

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Ващишин Любомир Володимирович

УДК 620.179.14

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ДЕФЕКТІВ ПРИ МАГНІТОДИНАМІЧНІЙ
ДІАГНОСТИЦІ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ
ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ ТА НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи
(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник –
Нічога Віталій Олексійович,
д.т.н., професор

Ідентичність усіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д35.052.10*

/Л.В.Демидов/

Львів – 2018

АНОТАЦІЯ

Ващишин Л.В. Виявлення сигналів дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок шляхом використання вейвлет-перетворень та нейронних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – «Радіотехнічні та телевізійні системи» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, Львів, 2018.

У дисертаційній роботі розв'язується актуальне науково-прикладне завдання з виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку та підвищення швидкості опрацювання діагностичної інформації шляхом автоматизації процесу виявлення та розрізнення сигналів від дефектів при магнітодинамічній дефектоскопії залізничних рейок.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету дослідження та науково-технічні завдання, необхідні для її досягнення, показано зв'язок дослідження з науковими програмами та темами, наведено наукову новизну отриманих результатів, їх практичну цінність та особистий внесок здобувача, надано інформацію про апробацію результатів роботи.

У першому розділі – «Сучасні методи мобільної діагностики залізничних рейок» – проведено аналіз сучасного стану розвитку методів мобільної діагностики залізничних рейок. Розглянуто ультразвуковий, магнітодинамічний, імпульсний вихрострумний, автоматизований візуальний та гібридний методи неруйнівного контролю (НК) стану рейок. Проведено загальне порівняння вищезгаданих методів НК з позиції основних переваг, обмежень та недоліків їх застосування в дефектоскопії залізничних рейок. Здійснено аналіз праць вітчизняних та закордонних вчених присвячених розвитку магнітодинамічної дефектоскопії

залізничних рейок в напрямках удосконалення системи намагнічування, давачів, пристроїв реєстрації та виявлення сигналів від дефектів.

Описано принцип роботи магнітного вагона-дефектоскопа на прикладі вагона-дефектоскопа № 442 Львівської залізниці, проведено аналіз системи реєстрації та обробки діагностичної інформації, а також наведено перелік та опис дефектів, що виявляються даним типом дефектоскопа.

Другий розділ роботи – «Визначення основних характеристик дефектоскопічних сигналів та вибір методів для їх аналізу» – присвячено дослідженню дефектоскопічних сигналів від регулярних та нерегулярних елементів залізничного шляху та розгляду методів для їх аналізу.

Проведена підготовка даних, отриманих вагоном-дефектоскопом, для подальшого аналізу в програмному середовищі MATLAB. Наведено аналіз впливу на форму сигналу від поперечної тріщини в головці рейки таких факторів як: швидкість руху вагона-дефектоскопа, розмір, глибина залягання, ширина розкриву тріщини та наявність виходу на поверхню. Це дало змогу виокремити основні властивості сигналів від вказаного дефекту, які в подальшому були використані при автоматизації процесу виявлення сигналів від даного типу дефекту.

В кінці розділу розглянуто основні методи цифрової обробки сигналів (ЦОС) з позиції їх застосування для аналізу дефектоскопічних сигналів. Були зроблені наступні висновки:

1. Перетворення Фур'є можна використати для характеристики спектру сигналів від окремих дефектів, однак не для визначення їх розташування.
2. Віконне перетворення Фур'є (ВПФ) дозволяє локалізувати сигнали від дефектів на часовій осі, але володіє такими основними недоліками: базисною функцією є синусоїда (косинусоїда), яка погано підходить для представлення імпульсних сигналів від

дефектів; відсутність адаптивності розмірів вікна спектрального розкладу до особливостей конкретних сигналів від дефектів.

3. Вейвлет-перетворення (ВП) позбавлене принципових недоліків характерних для ВПФ. Крім того, воно дає змогу створити базисну функцію, яка буде володіти тими властивостями, які найбільш важливі при виявленні сигналів від дефектів. Саме тому, для аналізу дефектоскопічних сигналів було обрано ВП.

В третьому розділі дисертації – «Застосування неперервного вейвлет-перетворення для аналізу дефектоскопічних сигналів» – здійснено аналіз реального дефектоскопічного сигналу за допомогою неперервного вейвлет-перетворення (НВП). Змодельовано сигнали від поперечної тріщини в головці рейки, як базис для створення материнської вейвлет-функції (вейвлету). Створено материнський вейвлет для НВП, адаптований до виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки та зроблено висновок, що алгоритм його створення може бути використаний при побудові материнських вейвлетів для інших типів дефектів. Проаналізовано залежність величини вейвлет-коефіцієнтів від масштабу для сигналів від поперечної тріщини та сформульовано перелік рекомендацій для виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок за допомогою НВП. Для поперечної тріщини в головці рейки було доведено можливість виявлення сигналів амплітудою в 2 рази меншою за поріг виявлення дефектів, яким керується оператор вагона-дефектоскопа.

В четвертому розділі роботи – «Використання дискретного вейвлет-перетворення для обробки та аналізу дефектоскопічних сигналів» – досліджено переваги та недоліки застосування дискретного вейвлет-перетворення (ДВП) при аналізі та обробці дефектоскопічних сигналів. Було здійснено розклад дефектоскопічного сигналу за допомогою вейвлету Добеші 6-го порядку на апроксимуючу складову та чотири складові деталізації, що дало змогу встановити пороги на вейвлет-коефіцієнти

деталізації та тим самим очистити сигнал від непотрібних високочастотних складових. Визначено, що очистка від шуму та компресія – найсильніші сторони ДВП, однак при обробці дефектоскопічних даних вони вносять спотворення форми сигналу від дефектів, а тому їх використання повинно бути надзвичайно обережним, особливо перед подальшим аналізом цих даних. Щодо використання ДВП для виявлення сигналів від дефектів, – то воно можливе лише на фоні адитивних слабо-корельованих перешкод.

В п'ятому розділі – «Побудова нейронної мережі для розпізнавання сигналів від дефектів залізничних рейок» – описано процес побудови штучної нейронної мережі (ШНМ) для виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки. В процесі побудови було здійснено вибір типу мережі та необхідних даних для навчання, визначено достатню кількість прихованих шарів та нейронів, розглянуто можливі функції активації та методи для навчання мережі. Збудована мережа дала змогу виявляти сигнали від поперечної тріщини, амплітуда яких лише в 1,5 рази більша за сигнали від підкладок залізничної колії, що, на практиці, означає здатність виділяти сигнали від слабо розвинутих дефектів та можливість моніторингу розвитку дефектів між заїздами вагона-дефектоскопа.

Описаний процес побудови ШНМ для виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки може бути застосований для інших типів дефектів. Причому, це можна реалізувати як розширенням існуючої нейронної мережі (яке буде вимагати змін в структурі мережі та повного перенавчання), так і створенням окремої мережі для конкретного типу дефекту. Для підвищення точності роботи ШНМ запропоновано залучити додаткові дані для аналізу з інших методів НК, використання сигналів отриманих багатокomпонентними давачами, а також інформації про попередні заїзди вагона-дефектоскопа.

Розроблено програмне забезпечення для аналізу дефектоскопічних сигналів, яке на основі НВП та ШНМ виділяє ті фрагменти дефектограми,

які з великою імовірністю походять від дефектів (імовірність правильного виявлення сигналів від поперечної тріщини при співвідношенні сигнал/шум 1,5 рівна 92%). При цьому, швидкість опрацювання діагностичної інформації становить 14623 м/с. Це дозволило підвищити ефективність та достовірність контролю технічного стану рейок та спростити роботу оператора вагона-дефектоскопа, якому необхідно переглядати лише виділені програмою фрагменти.

Ключові слова: дефектоскоп, магнітодинамічний метод, неруйнівний контроль, вейвлет-перетворення, штучна нейронна мережа, автоматичне виявлення дефектів.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Нічога В. Створення "Материнської" вейвлет-функції та аналіз за її допомогою дефектоскопічного сигналу від поперечної тріщини рейок / В. Нічога, Л. Ващишин, І. Сторож // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 3. — С. 61–69.

2. Ващишин Л. Використання дискретного вейвлет-перетворення для обробки та аналізу сигналів швидкісної магнітної дефектоскопії залізничної колії / Л. Ващишин, В. Нічога, І. Сторож // Вісник НУ "Львівська політехніка" – Радіoeлектроніка та телекомунікації. — 2012. — №738 — С. 21–28.

3. Нічога В. О. Аналіз сигналів деяких небезпечних дефектів при магнітній дефектоскопії залізничних рейок з допомогою віконного перетворення Фур'є і вейвлет - перетворення. / В. О. Нічога, І. В. Сторож, Л. В. Ващишин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 4. — С. 46–51.

4. Сторож І. В. Застосування модельованих і адаптованих сигналів як базису для вейвлет-подібного аналізу сигналів магнітної дефектоскопії

залізничних рейок / І. В. Сторож, В. О. Нічога, Л. В. Ващишин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 4 (додаток) — С. 12–14.

5. Ващишин Л. Штучні нейронні мережі, як засіб для розпізнавання дефектів залізничних рейок / Л. Ващишин, В. Нічога, І. Сторож // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 5. — С. 34–37.

6. Нічога В. О. Шляхи синтезу базисів для цифрового аналізу сигналів магнітної дефектоскопії залізничних рейок / В. О. Нічога, І. В. Сторож, Л. В. Ващишин // Системи контролю навколишнього середовища. — 2012. — № 18. — С. 44–54.

7. Ващишин Л. В. Критерії виявлення сигналу від поперечної тріщини рейки за допомогою неперервного вейвлет-перетворення / Л. В. Ващишин, В. О. Нічога // Відбір і обробка інформації. — 2013. — Вип.38 (114). — С. 69–74.

8. Nichoga V. Modern Method of Processing Signals from Dangerous Defects in the High-Speed Magnetic Rails Flaw / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Transport z. 98 : prace naukowe — Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013. — S. 483–490.

9. Nichoga V. Model of rail crack based on a discrete set of loops with current / Vitalij Nichoga, Igor Storozh, Liubomyr Vashchyshyn // Diagnostyka — Warszawa : PTDT, 2013. — Vol. 14, No 2. — S. 67–71. (Scopus).

10. Ващишин Л. В. Виявлення поперечної тріщини в головці рейки за допомогою вейвлет-перетворень та нейронних мереж / Л. В. Ващишин, В. О. Нічога // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2014. — №3. — С. 142–146.

11. Vashchyshyn L. Detection of a Transverse Crack in Railheads with the Help of Wavelet Transforms and Neural Networks / L. Vashchyshyn,

V. Nichoga // Materials Science — November 2014. — Vol. 50, Issue 3. — pp. 468–473. (перекладено з української, Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2014. — №3. — С. 142–146). (Scopus)

12. Nichoga V. Continuous wavelet transform of railway track defectoscopic signals in the matlab wavelet toolbox / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Elektronika i Optoelektronika — Warszawa, 2014. — Vol. LXIII, No 4. — S. 21–27. (Index Copernicus)

13. Нічога В. Аналіз сигналів дефектів залізничних рейок на основі неперервних вейвлет-перетворень / В. Нічога, Л. Ващишин, О. Салдан // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Радіoeлектроніка та телекомунікації. — 2014. — №796 — С. 8–13. (Index Copernicus)

14. Нічога В. О. Параметри індукційних сенсорів для діагностики об'єктів, середовищ і систем / В. О. Нічога, П. Б. Дуб, Л. В. Ващишин // Відбір і обробка інформації. — 2015. — Вип.42 (118). — С. 27–34.

15. Нічога В.О. Магнітодинамічний метод діагностики залізничної колії і напрямки його модернізації / В.О. Нічога, І.Н. Прудіус, І.В. Сторож, В.Г. Сторож, Л.В. Ващишин, П.Б. Дуб // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Радіoeлектроніка та телекомунікації. — 2016. — №849 — С. 99–116. (Index Copernicus)

16. Nichoga V. Ways of modernization of the Lviv railway magnetic non-destructive testing carriage using magnetic flux leakage rail inspection / V. Nichoga, I. Prudyus, I. Storozh, V. Storozh, L. Vashchyshyn // Transport z. 114 : prace naukowe — Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016. — S. 239–244.

17. Nichoga V. Process Of Building Artificial Neural Network For Automatic Detection Of Signals From Transverse Cracks In The Rail Head / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Problemy Kolejnictwa — Warszawa, 2017. — Tom 60, Issue 175. — S. 59–62.

18. Nichoga V. Application of the wavelet and neural technologies for processing of signals obtained during railway tracks diagnostics by the magnetic flux leakage method / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Elektronika i Optoelektronika* — Warszawa, 2017. — Vol. LXVI, No 4. — S. 11–77. (Index Copernicus)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

19. Нічога В. О. Спектральний аналіз дефектоскопічних сигналів швидкісної магнітної дефектоскопії за допомогою перетворення Фур'є / В. О. Нічога, І. В. Сторож, Л. В. Ващишин // *Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ-2010) : матеріали 15-ої Міжнар. наук.-техн. конф., 15–20 лют. 2010 р., Славське.* — Л., 2010, — С. 21–23.

20. Нічога В. О. Застосування віконного перетворення Фур'є і вейвлет перетворення при аналізі сигналів магнітної діагностики залізничних рейок / В. О. Нічога, Л. В. Ващишин., І. В. Сторож, В. М. Іванчук // *Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ-2011) : матеріали 16-ої міжнар. наук.-техн. конф., 21–26 лют. 2011 р., Славське.* — Л., 2011. — С. 134–139.

21. Ващишин Л. В. Неперервне вейвлет-перетворення дефектоскопічного сигналу від поперечної тріщини залізничної рейки / Л. В. Ващишин, В. М. Іванчук, І. В. Сторож // *22-а відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів КМН-2011, 26–28 жовт. 2011 р., Львів : зб. тез доп. Л., 2011.* — С. 229–232.

22. Нічога В. О. Можливості дискретного вейвлет-перетворення для обробки та аналізу дефектоскопічних сигналів / В. О. Нічога, Л. В. Ващишин, І. В. Сторож // *Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ-2012) : матеріали*

17-ої міжнар. наук.-техн. конф., 20–25 лют. 2012 р., Славське. Л., 2012. — С. 39–42.

23. Сторож І. В. Модель тріщини для дослідження компонент поля в магнітній дефектоскопії залізничних рейок / І. В. Сторож, В. О. Нічога, Л. В. Ващишин // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ-2012): матеріали 17-ої міжнар. наук.-техн. конф., 20–25 лют. 2012 р., Славське. Л., 2012. — С. 27–30.

24. Vashchyshyn L. Analysis of defectoscopic signals using the wavelet, adapted to detection signals from transverse cracks in the head of a rail / L. Vashchyshyn, V. Nichoga, I. Storozh // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIth Intern. Conf. (TCSET'2012), 21–24 February 2012, Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. — P. 96.

25. Nichoga V. Application of a magnetic field model above the defect for detection of transverse cracks in the magnetic flaw control of the railway / Nichoga V., Storozh I., Vashchyshyn L. // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIth Intern. Conf. (TCSET'2012), 21–24 February 2012, Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. — P. 122.

26. Nichoga W. Diagnostics of railway tracks using continuous wavelet transform / W. Nichoga, L. Vashchyshyn, V. Antonyuk // Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów (Diag'2013) : VIII Krajowa Konferencja, 3–7 czerwca 2013 r., Ustroń, Polska : streszczenia referatów. — Warszawa, 2013. — S. 80.

27. Nichoga W. Model of rail crack based on a discrete set of loops with current / W. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów (Diag'2013) : VIII Krajowa Konferencja, 3–7 czerwca 2013 r., Ustroń, Polska : streszczenia referatów. — Warszawa, 2013. — S. 79.

28. Nichoga V. Nowoczesna metoda przetwarzania sygnałów niebezpiecznych wad w szynach kolejowych przy szybkościowej defektoskopii magnetycznej / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // *Transport XXI wieku : Międzynarodowa konferencja naukowa*, 16-19 września 2013 r., Run, Polska : proc. — Warszawa, 2013.— S.187.

29. Storozh I. Physical modeling of field distribution for magnetic crack detector / I. Storozh, V. Nichoga, L. Vashchyshyn // *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIIth Intern. Conf. (TCSET'2014)*, 21 February – 1 March 2014, Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — P. 157–159.

30. Ващишин Л. В. Використання вейвлет-нейронних мереж для виявлення дефектів залізничних рейок / Л. В. Ващишин, В.О. Нічога // *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (ACIT'2014) : матеріали 4-ої всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів*, 16-17 травня 2014 р., Тернопіль: ТНЕУ, 2014. — С. 94–95.

31. Nichoga V. Using the matlab wavelet toolbox for analysis of railway track defectoscopic signals / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // *Metrologia wspomagana komputerowo (MWK'2014) : X szkola-konferencja*, 27–30 maja 2014 r., Waplewo, Polska — 2014.— S.108-109.

32. Nichoga V. Wavelet-neural network for detection signals from transverse cracks in the rail head / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // *Computational Problems of Electrical Engineering: XVIth Intern. Conf. (CPEE'2015)*, 2–5 September 2015, Lviv, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2015. — P. 132-134.

33. Nichoga V. Kierunki w modernizacji lwowskiego wagonu-defektoskopu magnetycznego przy zastosowaniu magneto-dynamicznej metody diagnostyki szyn torow kolejowych / V. Nichoga, I. Prudyus, V. Storozh, L. Vashchyshyn // *Transport XXI wieku : Międzynarodowa konferencja*

naukowa, 30 sierpnia -2 września 2016 r., Arłamów, Polska : proc. — Warszawa, 2016.— S.339-340.

34. Nichoga V. Artificial neural network for detecting defects in railway track / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Advanced Rail Technologies (ART'2016) : V Międzynarodowa Konferencja Naukowa, 9-10 listopada 2016 r., Warszawa, Polska : materiały konferencyjne. — Warszawa, 2016.— S.97.

35. Nichoga V. Application of the wavelet and neural technologies for processing of signals obtained during railway tracks diagnostics by the magnetic flux leakage method / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Metrologia wspomagana komputerowo (MWK'2017) : XI szkola-konferencja, 23–26 maja 2017 r., Waplewo, Polska — 2017. — S.71.

36. Matiieshyn Y. Modern methods of mobile diagnostics of railway tracks defects / Y. Matiieshyn, V. Nichoha, V. Shkliarskyi, V. Storozh, L. Vashchyshyn, M. Borovets, P. Zhuk // Advanced Rail Technologies (ART'2017) : VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa, 23-24 listopada 2017 r., Warszawa, Polska : materiały konferencyjne. — Warszawa, 2017.— S.71.

ABSTRACT

Vashchyshyn L.V. Detection of defect signals in the magnetic flux leakage diagnostics of railway tracks using wavelet transforms and neural networks. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for candidate degree in technical sciences on the specialty 05.12.17 – «Radio Engineering and Television Systems» (172 – Telecommunications and Radio Engineering). – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

In the dissertation, the actual scientific and practical problem of detection defects on the initial stages of their development is solved. The task of increasing the velocity of processing of the rail inspection information by

automating the process of detecting and distinguishing signals from defects in the magnetic flux leakage diagnostics is also solved.

The introduction substantiates the relevance of the thesis topic, formulates the purpose of the research, scientific and technical tasks necessary for its achievement, shows the connection of the research with scientific programs and themes, points on the scientific novelty of the obtained results, their practical value, individual contribution of the applicant and information on approbation of the results of work.

In the first section - "Modern methods of mobile diagnostics of railways" - an analysis of the actual state of the methods of railway tracks mobile diagnostics is presented. The ultrasonic, magnetic flux leakage (MFL), pulsed eddy-current, automated visual testing and hybrid methods of non-destructive testing (NDT) of rails are considered. A general comparison of the aforementioned methods of NDT from the position of the main advantages, limitations, and disadvantages of their application in the flaw detection of railway tracks was carried out. The analysis of works of domestic and foreign scientists devoted to the development of MFL in the direction of improvements of the magnetization system, sensors, devices of registration and detection of signals from dangerous defects was also carried out.

The operation principle of a magnetic wagon-defectoscope (MWD) on the example of the defectoscope № 442 of Lviv railway is described. The system for registration and processing of diagnostics information is analysed. The list and description of defects which the given type of defectoscope can detect is presented.

The second section of the work - "Determining of the main characteristics of defectoscopic signals and the choice of methods for their analysis" - is devoted to the study of defectoscopic signals from regular and irregular elements of the railway and consideration of methods for their analysis.

Preparation of the data received by MWD for further analysis in the MATLAB software environment was performed. The analysis of influence on the shape of the signal from a transverse crack in the rail head by the speed of the MWD, size, depth, width of the crack and the presence of an exit to the surface is given. It allowed separating the main properties of the signals from transverse crack, which were used to automate the process of detecting signals from this kind of defects.

At the end of the section, the basic methods of digital signal processing (DSP) from the point of their application for analysis of railway flaw detection signals are considered. The following conclusions were made:

1. Fourier transform can be used to characterize the spectrum of signals from individual defects, but not for determining their location.
2. Windowed Fourier transform or short-time Fourier transform (STFT) allows to locate the signals from the defects on the time axis, but has the next main disadvantages: the basic function is a sinusoid (cosine), which is badly suited for representing impulse signals from defects; lack of adaptability of the window size to the characteristics of specific signals from defects.
3. The wavelet transform (WT) is devoid of principal STFT drawbacks. In addition, it allows creating a basic function that can have the most important properties of related defective signals. That is why for the analysis of defectoscopic signals WT was selected.

In the third section of the dissertation - "Application of the continuous wavelet transform for the analysis of defectoscopic signals" - the analysis of real flaw detection signals via continuous wavelet transform (CWT) was carried out. Signals from the transverse crack as a basis for the mother wavelet function (or simply, wavelet) for CWT were modelled. A mother wavelet for CWT adapted for detection signals from transverse crack in the rail head was created. Conclusion about possibility of using the algorithm of it's creation for

constructing of mother wavelets based on other types of defects was made. The dependency of the value of wavelet coefficients on the scale for signals from the transverse crack is analysed and recommendations for detecting signals from defects in railway tracks via CWT are formulated. For a transverse crack in the rail head, the possibility of detecting signals with the amplitude of 2 times less than the defects detection threshold has been proved.

In the fourth section - "Using of discrete wavelet transform for the processing and analysis of defectoscopic signals" - the advantages and disadvantages of discrete wavelet transform (DWT) for analysis and processing of defectoscopic signals are investigated. A decomposition of the defectoscopic signal using the Daubechies wavelet of the 6th order was made. The result of decomposition is one approximation and four detailed components. It allows setting the thresholds on detailing wavelet coefficients and thereby clearing the signal from useless high-frequency components.

Determined that noise clearing and compression are the strongest parts of the DWT, however, during processing of defectoscopic data, they distort the shape of the signal from defects, and therefore their usage should be extremely cautious, especially before further analyzing of the data. Regarding the usage of DWT for defects detection, it is possible only on the background of additive weakly correlated interferences.

In the fifth section - "Building of the neural network for the recognition of signals from defects in railway tracks" - described the process of building an artificial neural network (ANN) for detection of signals from the transverse crack in the rail head. During the ANN construction, the following actions were made: chose network type and the necessary data for learning, identified a sufficient number of hidden layers and neurons, considered possible activation functions and methods for network learning. The constructed network allowed detecting signals from the transverse cracks whose amplitude is only 1.5 times greater than signals from the railway substrates. In practice, it means the ability

to separate signals from defects on initial stages of their development and to monitor the defects development between the races of wagon-defectoscope.

The described process of constructing ANN for detecting signals from a transverse crack can be applied to other types of defects. It can be implemented as an extension of the existing neural network (it will require changes in the structure of the network and a complete re-training), or a creation of separate network for a specific type of defect. In order to improve the accuracy of ANN, it is suggested to include additional data for analysis from other methods of NDT, using of signals from multicomponent sensors, as well as information on the previous races of the MWD.

The application on the basis of CWT and ANN for the analysis of defectoscopic signals was developed. It allocates those fragments of defectogram, which with the high probability are derived from defects (the probability of correct detection of signals from a transverse crack with the signal-to-noise ratio of 1.5 is equal 92%). At the same time, the processing speed of the diagnostic information is 14623 m/s. It has improved the efficiency and reliability of the results of control and simplified the operator's work, since only selected by ANN fragments are submitted for review.

Key words: defectoscope, magnetic flux leakage, non-destructive testing, wavelet transform, artificial neural network, automatic flaw detection.

The list of author's publications:

Proceedings where basic scientific results of thesis were published:

1. Nichoga V. Creation of mother wavelet function and using it for analysis of a defectoscopic signal from a transverse crack of rail / V. Nichoga, L. Vashchyshyn, I. Storozh // Information and Management Systems of Railway Transport. — 2012. — № 3. — pp. 61–69.

2. Vashchyshyn L. Using of discrete wavelet transform for processing and analysis of signals of high-speed magnetic defectoscopy of a railway tracks /

L. Vashchyshyn, V. Nichoga, I. Storozh // Visn. Nat. Univ. "Lviv Polytechnic". Series: Radio Electronics and Telecommunications: coll. of scient. works. — 2012. — №738 — pp. 21–28.

3. Nichoga V. Analysis of signals from some dangerous defects in magnetic defectoscopy of railways with the help of short-time Fourier transform and wavelet transform / V. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // Information and Management Systems of Railway Transport. — 2012. — № 4. — pp. 46–51.

4. Storozh I. Application of simulated and adapted signals as a basis for wavelet-like analysis of signals from magnetic defectoscopy of railway tracks / I. Storozh, V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Information and Management Systems of Railway Transport. — 2012. — № 4 (attachment) — pp. 12–14.

5. Vashchyshyn L. Artificial neural networks, as a mean for recognizing defects of railway tracks / L. Vashchyshyn, V. Nichoga, I. Storozh // Information and Management Systems of Railway Transport. — 2012. — № 5. — pp. 34–37.

6. Nichoga V. Ways of synthesis of bases for digital analysis of signals from magnetic defectoscopy of railways / V. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // Monitoring systems of environment : coll. of scient. works of Int. Scient. and Tech. workshop / NASU, MHI — Sevastopol, 2012. — № 18. — pp. 44–54.

7. Vashchyshyn L. Criteria for detecting a signal from a transverse crack in rail using continuous wavelet transform / L. Vashchyshyn, V. Nichoga // Information extraction and processing. — 2013. — Issue 38 (114). — pp. 69–74.

8. Nichoga V. Modern Method of Processing Signals from Dangerous Defects in the High-Speed Magnetic Rails Flaw / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Transport z. 98 : prace naukowe — Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013. — S. 483–490.

9. Nichoga V. Model of rail crack based on a discrete set of loops with current / V. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // Diagnostyka — Warszawa : PTDT, 2013. — Vol. 14, No 2. — S. 67–70. (Scopus)

10. Vashchyshyn L. Detection of a transverse crack in the rail head via wavelet transforms and neural networks / L. Vashchyshyn, V. Nichoga // Physicochemical Mechanics of Materials. — 2014. — №3. — pp. 142–146.

11. Vashchyshyn L. Detection of a Transverse Crack in Railheads with the Help of Wavelet Transforms and Neural Networks / L. Vashchyshyn, V. Nichoga // Materials Science — November 2014. — Vol. 50, Issue 3. — pp. 468–473. (Scopus)

12. Nichoga V. Continuous wavelet transform of railway track defectoscopic signals in the matlab wavelet toolbox / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Elektronika i Optoelektronika — Warszawa, 2014. — Vol. LXIII, No 4. — S. 21–27. (Index Copernicus)

13. Nichoga V. Analysis of signals from defects of railway based on continuous wavelet transform / V. Nichoga, L. Vashchyshyn, O. Saldan // Visn. Nat. Univ. "Lviv Polytechnic". Series: Radio Electronics and Telecommunications: coll. of scient. works — 2014. — №796 — pp. 8–13. (Index Copernicus)

14. Nichoga V. Parameters of induction sensors for the diagnostics of objects, environments and systems / V. Nichoga, P. Dub, L. Vashchyshyn // Information extraction and processing. — 2015. — Issue 42 (118). — pp. 27–34.

15. Nichoga V. Magnetic flux leakage method for railway diagnostics and directions of its modernization / V. Nichoga, I. Prudyus, I. Storozh, V. Storozh, L. Vashchyshyn, P. Dub // Visn. Nat. Univ. "Lviv Polytechnic". Series: Radio Electronics and Telecommunications: coll. of scient. works. — 2016. — №849 — pp. 99–116. (Index Copernicus)

16. Nichoga V. Ways of modernization of the lviv railway magnetic non-destructive testing carriage using magnetic flux leakage rail inspection / V. Nichoga, I. Prudyus, I. Storozh, V. Storozh, L. Vashchyshyn // Transport z. 114 : prace naukowe — Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016. — S. 239–244.

17. Nichoga V. Process Of Building Artificial Neural Network For Automatic Detection Of Signals From Transverse Cracks In The Rail Head / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Problemy Kolejnictwa — Warszawa, 2017. — Tom 60, Issue 175. — S. 59–62.

18. Nichoga V. Application of the wavelet and neural technologies for processing of signals obtained during railway tracks diagnostics by the magnetic flux leakage method / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Elektronika i Optoelektronika — Warszawa, 2017. — Vol. LXVI, No 4. — S. 195–201. (Index Copernicus)

Proceedings that certify an approvment of thesis materials:

19. Nichoga V. Spectral analysis of defectoscopic signals of high-speed magnetic flaw detection using Fourier transform / V. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // Electromagnetic and acoustic methods of non-destructive testing of materials and products LEOTEST'2010 : materials of 15th Int. Scient. and Tech. Conf., 15–20 February 2010, Slavsk — Lviv, 2010, — pp. 21–23.

20. Nichoga V. Application of short-time Fourier transform and wavelet transform during analysis of signals from magnetic diagnostics of railway tracks / V. Nichoga, L. Vashchyshyn, I. Storozh, V. Ivanchuck // Electromagnetic and acoustic methods of non-destructive testing of materials and products LEOTEST'2011: materials of 16th Int. Scient. and Tech. Conf., 21–26 February 2011, Slavsk — Lviv, 2011. — pp. 134–139.

21. Vashchyshyn L. Continuous wavelet transform of a defectoscopic signal from a transverse crack of rail / L. Vashchyshyn, V. Ivanchuck, I. Storozh // 22th Scient. and Tech. Conf. of Young Scientists and Special

YSC'2011, 26–28 October 2011, Lviv : coll. of scient. works. — Lviv, 2011. — pp. 229–232.

22. Nichoga V. Possibilities of discrete wavelet transformation for processing and analysis of defectoscopic signals / V. Nichoga, L. Vashchyshyn, I. Storozh // Electromagnetic and acoustic methods of non-destructive testing of materials and products LEOTEST'2012 : materials of 17th Int. Scient. and Tech. Conf., 20–25 February 2012, Slavsk — Lviv, 2012. — pp. 39–42.

23. Storozh I. Model of crack for studying field components in magnetic defectoscopy of rails / I. Storozh, V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Electromagnetic and acoustic methods of non-destructive testing of materials and products LEOTEST'2012 : materials of 17th Int. Scient. and Tech. Conf., 20–25 February 2012, Slavsk — Lviv, 2012. — pp. 27–30.

24. Vashchyshyn L. Analysis of defectoscopic signals using the wavelet, adapted to detection signals from transverse cracks in the head of a rail / L. Vashchyshyn, V. Nichoga, I. Storozh // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIth Intern. Conf. (TCSET'2012), 21–24 February 2012, Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. — P. 96.

25. Nichoga V. Application of a magnetic field model above the defect for detection of transverse cracks in the magnetic flaw control of the railway / V. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIth Intern. Conf. (TCSET'2012), 21–24 February 2012, Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. — P. 122.

26. Nichoga W. Diagnostics of railway tracks using continuous wavelet transform / W. Nichoga, L. Vashchyshyn, V. Antonyuk // Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów (Diag'2013) : VIII Krajowa Konferencja, 3–7 czerwca 2013 r., Ustroń, Polska : streszczenia referatów. — Warszawa, 2013. — S. 80.

27. Nichoga W. Model of rail crack based on a discrete set of loops with current / W. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów (Diag'2013) : VIII Krajowa Konferencja, 3–7 czerwca 2013 r., Ustroń, Polska : streszczenia referatów. — Warszawa, 2013.— S. 79.

28. Nichoga V. Nowoczesna metoda przetwarzania sygnałów niebezpiecznych wad w szynach kolejowych przy szybkościowej defektoskopii magnetycznej / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Transport XXI wieku : Międzynarodowa konferencja naukowa, 16-19 września 2013 r., Run, Polska : proc. — Warszawa, 2013.— S.187.

29. Storozh I. Physical modeling of field distribution for magnetic crack detector / I. Storozh, V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIIth Intern. Conf. (TCSET'2014), 21 February – 1 March 2014, Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — pp. 157–159.

30. Vashchyshyn L. Using of wavelet-neural networks for detecting defects in railway tracks / L. Vashchyshyn, V. Nichoga // Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2014) : materials of 4th Ukrainian School and Workshop of Young Scientists and Students, 16-17 May 2014, Ternopil: TNEU, 2014. — pp. 94–95.

31. Nichoga V. Using the matlab wavelet toolbox for analysis of railway track defectoscopic signals / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Metrologia wspomagana komputerowo (MWK'2014) : X szkola-konferencja, 27–30 maja 2014 r., Waplewo, Polska — 2014.— S.108-109.

32. Nichoga V. Wavelet-neural network for detection signals from transverse cracks in the rail head / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Computational Problems of Electrical Engineering : XVIth Intern. Conf. (CPEE'2015), 2–5 September 2015, Lviv, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2015. — P. 132-134.

33. Nichoga V. Kierunki w modernizacji lwowskiego wagonu-defrktoskopu magnetycznego przy zastosowaniu magneto-dynamicznej metody diagnostyki szyn torow kolejowych / V. Nichoga, I. Prudyus, V. Storozh, L. Vashchyshyn // Transport XXI wieku : Międzynarodowa konferencja naukowa, 30 sierpnia -2 września 2016 r., Arłamów, Polska : proc. — Warszawa, 2016.— S.339-340.

34. Nichoga V. Artificial neural network for detecting defects in railway track / V. Nichoha, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Advanced Rail Technologies (ART'2016) : V Międzynarodowa Konferencja Naukowa, 9-10 listopada 2016 r., Warszawa, Polska : materiały konferencyjne. — Warszawa, 2016.— S.97.

35. Nichoga V. Application of the wavelet and neural technologies for processing of signals obtained during railway tracks diagnostics by the magnetic flux leakage method / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Metrologia wspomagana komputerowo (MWK'2017) : XI szkola-konferencja, 23–26 maja 2017 r., Waplewo, Polska — 2017. — S.71.

36. Matiieshyn Y. Modern methods of mobile diagnostics of railway tracks defects / Y. Matiieshyn, V. Nichoha, V. Shkliarskyi, V. Storozh, L. Vashchyshyn, M. Borovets, P. Zhuk // Advanced Rail Technologies (ART'2017) : VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa, 23-24 listopada 2017 r., Warszawa, Polska : materiały konferencyjne. — Warszawa, 2017.— S.71.

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	27
ВСТУП	28
РОЗДІЛ 1	
СУЧАСНІ МЕТОДИ МОБІЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК.....	35
1.1. Відомості про найпоширеніші методи мобільної діагностики залізничних рейок	35
1.1.1. Ультразвуковий метод	37
1.1.2. Магнітодинамічний метод (МДМ)	41
1.1.3. Імпульсний вихрострумний метод.....	43
1.1.4. Візуально-вимірювальні методи.....	45
1.1.5. Гібридні системи мобільної діагностики.....	47
1.1.6. Порівняння методів швидкісної діагностики рейок	50
1.2. Особливості розвитку магнітодинамічної діагностики залізничних рейок	52
1.3. Особливості реалізації МДМ на львівському вагоні-дефектоскопі	62
1.3.1. Принцип роботи вагона-дефектоскопа	62
1.3.2. Дефекти, які виявляє вагон-дефектоскоп.	65
1.3.3. Процес реєстрації та обробки діагностичної інформації.	67
1.4. Висновки до розділу 1	69
РОЗДІЛ 2	
ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФЕКТОСКОПІЧНИХ СИГНАЛІВ ТА ВИБІР МЕТОДІВ ДЛЯ ЇХ АНАЛІЗУ	72
2.1. Структура файлу дефектограми	72
2.2. Базові елементи залізничної колії	73
2.3. Огляд сигналів, які записуються магнітним вагоном-дефектоскопом.....	74

2.3.1. Сигнали від регулярних елементів колії	75
2.3.2. Сигнали від поперечної тріщини рейки.....	77
2.3.3. Сигнали від поздовжньої тріщини рейки.	84
2.4. Методи для аналізу дефектоскопічних сигналів	85
2.4.1. Перетворення Фур'є.....	86
2.4.2. Віконне перетворення Фур'є.....	89
2.4.3. Вейвлет-перетворення	90
2.5. Висновки до розділу 2	93

РОЗДІЛ 3

ЗАСТОСУВАННЯ НЕПЕРЕРВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДЕФЕКТОСКОПІЧНИХ СИГНАЛІВ	95
3.1. Неперервне вейвлет-перетворення.....	95
3.2. Створення материнської вейвлет-функції НВП, адаптованої до виявлення сигналу від поперечної тріщини в головці рейки.	96
3.2.1. Модель сигналу від поперечної тріщини.....	96
3.2.2. Вибір зразку сигналу, який відповідає основним властивостям форми сигналів від поперечної тріщини	100
3.2.3. Створення вейвлету на основі зразку сигналу від поперечної тріщини.....	101
3.2.4. Тестування створеного вейвлету на точність виявлення сигналів від поперечної тріщини	103
3.2.5. Порівняння точності виявлення локальних особливостей тестового сигналу за допомогою адаптованої та наявних стандартних вейвлет-функції в MATLAB.	104
3.2.6. Алгоритм створення материнського вейвлету, адаптованого до виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок..	106
3.3. Аналіз дефектограми за допомогою НВП з використанням вейвлету, адаптованого до виявлення сигналів від поперечної тріщини.	106

3.3.1. Виявлення сигналу від розвиненого дефекту.....	106
3.3.2. Виявлення сигналу від дефекту на початковій стадії зародження.....	112
3.3.3. Загальні рекомендації для виявлення сигналів від дефектів за допомогою НВП.....	115
3.4. Висновки до розділу 3	115

РОЗДІЛ 4

ВИКОРИСТАННЯ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ ДЕФЕКТОСКОПІЧНИХ СИГНАЛІВ

4.1. Особливості дискретного вейвлет-перетворення	117
4.2. Пірамідальний алгоритм Малла для дефектоскопічного сигналу	118
4.3. Аналіз дефектоскопічного сигналу методом ДВП.....	121
4.4. Обробка дефектоскопічного сигналу за допомогою ДВП.....	124
4.5. Висновки до розділу 4	126

РОЗДІЛ 5

ПОБУДОВА НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ ВІД ДЕФЕКТІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

5.1. Поняття штучної нейронної мережі та нейрону	128
5.2. Вибір та підготовка даних для навчання мережі	132
5.3. Вибір типу нейронної мережі.....	133
5.4. Підбір параметрів мережі.....	134
5.4.1. Визначення кількості прихованих шарів.	134
5.4.2. Визначення оптимального числа нейронів прихованого шару. ...	135
5.4.3. Вибір функції активації.	137
5.5. Архітектура ШНМ для автоматичного виявлення сигналів від поперечної тріщини рейки	140
5.6. Навчання мережі	141

5.7. Імовірнісні характеристики мережі.....	144
5.8. Алгоритм виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок на основі НВП та ШНМ.....	145
5.9. Виявлення сигналів від поперечної тріщини рейки на основі НВП та ШНМ.	147
5.10. Висновки до розділу 5	151
ВИСНОВКИ.....	153
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	155
ДОДАТОК А. Код програми “Defectogram Analyzer”	170
ДОДАТОК Б. Акти впровадження результатів дисертації.....	175
ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	179

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АПК	- апаратно-програмний комплекс
ВП	- вейвлет-перетворення
ВПФ	- віконне перетворення Фур'є
ДВП	- дискретне вейвлет-перетворення
ЗД	- заводський давач
КВТ	- контактно-втомлювальна тріщина
МВД	- магнітний вагон-дефектоскоп
МДМ	- магнітодинамічний метод
НВП	- неперервне вейвлет-перетворення
НК	- неруйнівний контроль
ПФ	- перетворення Фур'є
РБП	- роликовий блок пошуку
СВД	- суміщений вагон-дефектоскоп
УВД	- ультразвуковий вагон-дефектоскоп
УЗД	- ультразвукова діагностика
ФВЧ	- фільтр високих частот
ФНЧ	- фільтр низьких частот
ЦОС	- цифрова обробка сигналів
ІНМ	- штучна нейронна мережа
ACFM	- Alternating Current Field Measurement – вимірювання електромагнітного поля змінного струму
CSV	- Coma Separated Values – представлення даних у вигляді таблиці, стовпці якої розділені символом “;”
GPS	- Global Positioning System – глобальна система позиціонування
UTU	- Ultrasonic rail Testing Unit – ультразвуковий дефектоскоп

ВСТУП

Контроль технічного стану залізничної колії призначений для гарантування безпечної експлуатації залізничного транспорту. Для цього застосовують різноманітні методи неруйнівного контролю (НК) в яких, шляхом сканування залізничних рейок, отримують певні електричні сигнали. Для швидкісної діагностики залізничних рейок зараз, в основному, застосовуються два методи НК: магнітодинамічний та ультразвуковий, які все частіше використовують разом, що дає змогу значно підвищити достовірність результатів контролю.

Актуальність теми. Серед сигналів записаних при НК можуть бути сигнали від дефектів, виявлення яких, на фоні завад та інших сигналів від регулярних елементів колії, є одночасно складним і важливим завданням. Це, в першу чергу, стосується магнітодинамічного методу (МДМ) діагностики, який дає змогу виявляти найбільш небезпечні дефекти залізничних рейок у вигляді поперечних та поздовжніх тріщин в головці рейки. Крім того, перевагами МДМ (у порівнянні з ультразвуковим методом) є значна швидкість сканування рейок, низька чутливість до погодних умов та можливість роботи на ділянках колії з кривизною, що особливо актуально в гірській місцевості.

Подальший розвиток магнітодинамічної дефектоскопії рейок залежить від успішного вирішення певного протиріччя: забезпечення високої інформативності, а відтак, достовірності результатів контролю (наприклад, шляхом залучення даних з інших методів НК або використання багатокомпонентних давачів) і необхідності виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку – з одного боку, та скорочення часу на діагностичне обстеження в умовах різноманітних завад – з іншого. Це вимагає залучення сучасних засобів цифрової обробки сигналів та розроблення прикладних програм для автоматичного виявлення і

попередньої класифікації сигналів від небезпечних дефектів рейок, оскільки оператору вагона-дефектоскопа складно належним чином опрацювати обсяги інформації, які постійно зростають.

Актуальність цього наукового завдання, його практичне значення і зумовили вибір теми, мети, завдань і структури дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Результати теоретичних і практичних досліджень, які наведені в дисертаційній роботі, одержані автором у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України та Національному університеті "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України.

В Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України автор брав участь, як виконавець, у виконанні НДР Національної академії наук України, які виконувалися у відділі відбору і обробки стохастичних сигналів: "Дослідження методів відбору і опрацювання діагностичних сигналів при багатокомпонентній магнітній дефектоскопії залізничних рейок" (2010 р., номер державної реєстрації 0110U000435), "Розробка методів аналізу і обробки багатомірних сигналів зі стохастичною повторюваністю та створення вимірювальних систем для вібродіагностики" (2011-2013 рр., номер державної реєстрації 0110U000433), "Розробка методів і засобів багатомірного спектрального аналізу періодичних нестационарних стохастичних коливань для задач технічної діагностики" (2013-2015 рр., номер державної реєстрації 0113U000304).

В Національному університеті "Львівська політехніка" автор брав участь, як виконавець, у виконанні НДР Міністерства освіти і науки України, які виконувалися на кафедрі "Радіоелектронні пристрої і системи": "Розроблення і дослідження малогабаритних компонентних давачів та методик опрацювання інформаційних сигналів для діагностики

залізничної колії" (2015-2016 рр., номер державної реєстрації 0115U000434), "Розроблення і дослідження методів достовірного виявлення, опрацювання та класифікації дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок" (2017-2018 рр., номер державної реєстрації 0117U004453).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок на початкових стадіях їх зародження та збільшення швидкості опрацювання дефектоскопічних сигналів шляхом автоматизації процесу виявлення дефектів (в першу чергу дефектів від поперечної тріщини в головці рейки) за допомогою вейвлет-перетворень та штучних нейронних мереж.

Для досягнення поставленої мети було розв'язано наступні завдання:

1. Проведено аналіз сучасного стану методів мобільної діагностики залізничних рейок.
2. Визначено загальні характеристики дефектоскопічних сигналів та обрано методи для їх обробки та аналізу. Виділено основні особливості форми сигналу від найнебезпечнішого дефекту залізничної колії – поперечної тріщини в головці рейки.
3. Створено материнську вейвлет-функцію для неперервного вейвлет-перетворення (НВП), адаптовану до виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки. Досліджено та застосовано НВП для аналізу дефектоскопічних сигналів.
4. Досліджено сферу застосування дискретного вейвлет-перетворення (ДВП) для обробки та аналізу дефектоскопічних сигналів.
5. Збудовано штучну нейронну мережу (ШНМ) для виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки на ранніх стадіях її розвитку.
6. Розроблено алгоритмічно-програмне забезпечення для аналізу дефектоскопічних сигналів на основі НВП та ШНМ.

Об'єктом дослідження є процес контролю технічного стану залізничних рейок шляхом реєстрації та аналізу сигналів магнітодинамічної діагностики.

Предметом дослідження є виявлення, аналіз і опрацювання сигналів від дефектів залізничних рейок шляхом використання вейвлет-перетворень та нейронних мереж.

Методи дослідження. При розв'язанні поставлених завдань використано теорію сигналів та методи їх цифрової обробки: кореляційні, спектральні, неперервне та дискретне вейвлет-перетворення сигналів; методи моделювання та навчання штучних нейронних мереж. Експериментальні дослідження проведено за допомогою комп'ютерного моделювання, з використанням прикладних пакетів MATLAB.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано материнську вейвлет-функцію для НВП на основі дефектоскопічного сигналу від поперечної тріщини в головці рейки, яка відрізняється від відомих більш точною локалізацією дефектних сигналів за часом та масштабом. Це дало змогу в 2 рази збільшити чутливість магнітодинімічного методу діагностики залізничних рейок.

2. Вперше запропоновано метод опрацювання дефектоскопічних сигналів на основі НВП та ШНМ, який відрізняється від відомих можливістю виявлення сигналів з різною кількістю відліків, що дало змогу автоматизувати процес виявлення дефектів різної протяжності (наприклад, поздовжнє горизонтальне розшарування головки рейки та розвинута поперечна тріщина).

3. Удосконалено метод виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок, який, на відміну від існуючих, забезпечує виявлення дефектів на початкових етапах їх розвитку, починаючи зі співвідношення сигнал/шум 1,5

(імовірність правильного виявлення – 92%), що уможливило вчасне виявлення та моніторинг розвитку небезпечних дефектів.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Запропоновано алгоритм створення материнської вейвлет-функції на основі сигналу від поперечної тріщини рейки, який можна застосувати при побудові материнських вейвлетів, які орієнтовані на інші типи дефектів (наприклад, поздовжнє горизонтальне розшарування головки рейки).

2. Збудовано ШНМ для аналізу дефектоскопічних сигналів, яка дала змогу виявляти сигнали від дефектів на початкових стадіях їх розвитку, починаючи від співвідношення сигнал/шум 1,5, що в 2 рази краще, ніж поріг при візуальному аналізі сигналів. На основі збудованої ШНМ запропоновано напрямки її подальшого вдосконалення:

1) підвищення точності роботи ШНМ шляхом залучення додаткових даних, одержаних іншими методами неруйнівного контролю, сигналів отриманих багатокомпонентними давачами, а також інформації про попередні заїзди вагона-дефектоскопа;

2) розширення функціональності існуючої ШНМ для виявлення інших типів дефектів або створення окремої мережі для виявлення конкретного типу дефекту.

3. Експериментально досліджено можливі шляхи застосування ДВП при аналізі та обробці сигналів магнітодинамічної дефектоскопії залізничних рейок:

1) очистка сигналу від високочастотних складових, спричинених рейковими підкладками, що зменшує імовірність хибного виявлення дефектів;

2) компресія дефектоскопічного сигналу з метою збереження даних попередніх заїздів вагона-дефектоскопа.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та практичні результати отримано автором самостійно.

У роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: аналіз методів отримання дефектоскопічних сигналів мобільними засобами діагностики залізничних рейок [3, 39]; визначення основних напрямків модернізації львівського вагона-дефектоскопа, який реалізує магнітодинамічний метод НК [13, 31, 32]; вибір моделі сигналу від поперечної тріщини в головці рейки [41, 57, 61, 64]; створення материнської вейвлет-функції, адаптованої до виявлення сигналів від поперечної тріщини та порівняння її з існуючими вейвлетами [66, 68, 69, 76]; аналіз дефектограм з сигналами від дефектів за допомогою НВП [67, 70, 72, 74, 75, 77, 78]; дослідження можливості використання ДВП, перетворення Фур'є та віконного перетворення Фур'є для аналізу та обробки дефектоскопічних сигналів [52-54, 81, 84]; підбір параметрів, побудова та застосування ШНМ для виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок [73, 79, 87, 88, 97, 100-102, 106-108].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 16-ти міжнародних і загальнодержавних науково-технічних конференціях та наукових семінарах: XV-й, XVI-й та XVII-й міжнародних науково-технічних конференціях «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» (Славське, Львівської обл., 2010, 2011, 2012); XXII-й відкритій науково-технічній конференції молодих науковців і спеціалістів КМН (Львів, 2011); XI-th and XII-th International Conferences on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (Lviv-Slavske, 2012, 2014); XXV-й міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні комп'ютерні, управляючі і телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України» (м. Алушта, Крим, Україна, 2012); VIII krajowej konferencji «Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów» DIAG (Ustroń, Polska, 2013); międzynarodowych konferencjach naukowych «Transport XXI

wieku» (Run, Arłamów, Polska, 2013, 2016); X i XI szkołach-konferencjach «Metrologia wspomagana komputerowo» MWK (Waplewo, Polska, 2014, 2017); IV-й всеукраїнській школі-семінарі молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» ACIT (Тернопіль, 2014); XVI-th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering CPEE (Lviv, Ukraine, 2015); V i VI międzynarodowych konferencjach naukowych «Advanced Rail Technologies» ART (Warszawa, Polska, 2016, 2017).

Публікації. Основні положення та результати дисертації опубліковано у 36 наукових працях, зокрема у 18 статтях, з яких 11 публікацій у наукових фахових виданнях України, 6 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних та 7 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, а також 18 праць у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 185 сторінок, із них 120 сторінок основного тексту, список використаних джерел із 108 найменувань, 73 рисунки, 2 таблиці, 3 додатки на 16 сторінках. Додатки містять код розробленого програмного забезпечення, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, список наукових праць автора.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ МЕТОДИ МОБІЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

1.1. Відомості про найпоширеніші методи мобільної діагностики залізничних рейок.

Сьогодні, залізничні мережі у всьому світі стають все більш завантаженими високошвидкісними поїздами з великою кількістю пасажирських та важких товарних вагонів. Це, в свою чергу, завдає значного тиску на існуючу інфраструктуру та призводить до збільшення потреб в контролі та технічному обслуговуванні залізничних активів. Витрати на огляд та технічне обслуговування протягом останніх кількох років неухильно ростуть, однак це не супроводжується значним поліпшенням показників безпеки в галузі. Як наслідок, ключовими викликами, з якими стикається залізнична галузь є:

- а) підвищення безпеки залізничної системи;
- б) побудова нових залізничних шляхів для задоволення постійно зростаючого попиту;
- в) забезпечення вищої стійкості залізничних мереж, як в екологічному, так і в фінансовому відношенні, шляхом подальшого підвищення ефективності та використання технологічних інновацій.

Таким чином, максимальна надійність залізничних рейок може бути досягнута тільки після якісної перевірки та технічного обслуговування. Рання дефектоскопія рейок виконує першочергову роль в процесі виявлення та розпізнавання небезпечних дефектів з метою недопущення аварійних ситуацій. Незважаючи на це, засоби неруйнівного контролю (НК) стану рейок довгий час не отримували достатнього фінансування.

Нажаль, таке фінансування ставало можливим тільки після ряду серйозних аварій з людськими жертвами та великими матеріальними збитками.

На даний час, залізничні рейки систематично перевіряються на наявність внутрішніх та поверхневих дефектів з використанням різних методів НК. Загальний огляд цих методів здійснено в [1-3]. Серед описаних методів, за використовуваними фізичними полями, виділяють акустичні (ультразвукові), магнітні, електромагнітні, теплові та електричні. Проте, лише перші три отримали широке застосування в залізничній галузі.

Вагоме місце в дефектоскопії залізничних рейок займають ультразвукові методи НК [4], які не зважаючи на труднощі забезпечення акустичного контакту з поверхнею рейки, необхідність великої кількості контактної рідини та обмеження швидкості дослідження, можуть діагностувати головку, шийку і підшву рейки. Безсумнівною перевагою ультразвукових методів є також можливість оцінки розмірів і положення дефекту, що в кінцевому результаті забезпечило інтенсивний розвиток досліджень в цьому напрямку [1, 5].

Магнітні методи НК, серед яких виділяють: магнітостатичний, квазімагнітостатичний та магнітодинамічний, віддавна активно використовуються у статичній та швидкісній діагностиці залізничних рейок [1, 6, 7]. Магнітні методи дефектоскопії добре діагностують верхню частину рейки, а фактично лише головку рейки.

Електромагнітні методи НК успішно використовуються не лише в залізничній галузі, але і в металопрокатній промисловості, бурінні, зберіганні ядерних відходів тощо [8]. Зокрема, за допомогою методу вимірювання електромагнітного поля змінного струму ACFM (англ. Alternating Current Field Measurement) здійснюється перевірка вагонів, колісних пар та рейок.

Також варто зазначити, що спостерігається активне використання гібридних систем діагностики з одночасним використанням магнітних, ультразвукових, та візуально-вимірювальних методів неруйнівного контролю.

Тепер слід детальніше зупинитись на найпоширеніших методах швидкісного контролю залізничних рейок.

1.1.1. Ультразвуковий метод.

Ультразвукова діагностика (УЗД) широко використовується в залізничній галузі для перевірки наявності будь-яких внутрішніх дефектів та контролю стану рейок в експлуатації. У більшості практичних випадків, перевірка рейок проводиться за допомогою спеціальних ультразвукових сенсорів, встановлених на шасі дефектоскопа. Ковзаючі пластини-сенсори або заповнені рідиною роликові сенсори є загальним підходом, який використовується для з'єднання п'єзоелектричних (ультразвукових) перетворювачів з рейкою. Стандартні ультразвукові сенсори мають погану здатність виявлення, коли дефекти є поверхневими або приповерхневими. Для часткового виправлення цього недоліку використовують набір сенсорів, які розміщені під різними кутами (рис. 1.1).

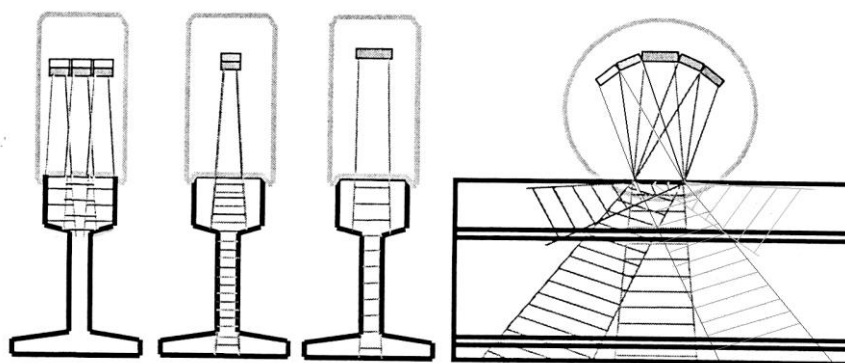


Рис. 1.1. Використання набору ультразвукових сенсорів для підвищення здатності виявлення дефектів рейок [1].

Підчас діагностики рейок з використанням звичайних ультразвукових давачів, ультразвукова енергія (у вигляді ультразвукового коливання) передається тілу рейки. Відбита енергія виявляється за допомогою набору перетворювачів. Амплітуда відбитих імпульсів містить цінну інформацію про цілісність чи пошкодження рейки. Оскільки положення дефектів є непередбачуваним, поширення ультразвукового коливання в рейці відбувається під різними кутами, для того, щоб максимізувати ймовірність виявлення небезпечних дефектів, присутніх в рейці. Зазвичай, використовують кути падіння 0° , 37° або 45° і 70° .

Цей метод НК знайшов широке застосування, зокрема діагностичні поїзди Eurailscout (Нідерланди, Німеччина та ін.) та Scanmaster (Ізраїль) використовують ковзаючі пластини для розміщення ультразвукових зондів, як показано на рис. 1.2 а. Ці поїзди працюють зі швидкістю 72 км/год, але потенційно можлива швидкість інспекції сягає 100 км/год [9].



а)



б)

Рис. 1.2. Техніка ультразвукової дефектоскопії: блок пошуку з п'ятьма ковзаючими пластинами (а) [9], портативний ультразвуковий дефектоскоп Sperry Stick (б) [10].

В багатьох країнах світу також використовуються поїзди-дефектоскопи американської фірми “Sperry Rail Service” (моделі UTU1, UTU2 та UTU5 – англ. Ultrasonic rail Testing Unit (UTU)). Наявність дефектів, виявлених за допомогою поїздів типу UTU, підтверджується пізніше за допомогою портативних ультразвукових блоків, відомих як Sperry Stick. На рис. 1.2 б показаний такий портативний пристрій, який керується оператором.

Одна з проблем, з якою стикаються поїзди типу UTU1 – велика кількість “хибних” спрацювань, що збільшує затрати часу персоналу на детальне дослідження кожного такого спрацювання. Частково ця проблема вирішується за рахунок збільшення порогу спрацювання і порівняння результатів діагностичного поїзда із результатами портативних систем для уточнення критеріїв виявлення.

Зонд UTU2 має більший масив сенсорів, що забезпечує краще та більш повне опромінення рейки ультразвуком. Масив давачів, який складається з 9 окремих сенсорів, міститься всередині заповненої рідиною шини, відомої як роликовий блок пошуку (РБП). UTU2 має два таких блоки, щоб забезпечити тестування, якщо один РБП не зможе правильно функціонувати чи відмовить. Портативний ультразвуковий дефектоскоп Sperry Stick є ручною версією РБП і використовується як засіб для перевірки даних обох типів ультразвукових поїздів (UTU1 та UTU2). Результати діагностики з блоків UTU2 та Sperry Stick співпадають на 90-95%.

UTU2 може працювати на швидкості до 65 км/год, однак, для забезпечення високої точності, давачі повинні опромінити дефект ультразвуком 4 рази і тому, на практиці, вони працюють при швидкості 45 км/год. Використання діагностичних поїздів UTU5 дозволяє на 40% швидше, ефективніше та надійніше виявляти дефекти рейок. Це

забезпечується високою відповідністю форми шини РБП до форми поверхні рейки, навіть при великому зношенні та деформації останньої.

Устаткування на поїздах типу UTU не визначає розміри всіх наявних дефектів та їх точне розташування. За допомогою цього обладнання можна надійно виявляти тільки дефекти у вигляді глибоких тріщин в діапазоні кутів $15-25^\circ$ від вертикалі. Тріщини які залягають менше ніж 5 мм в глибину та тріщини розташовані під іншими кутами виявити складно.

Ультразвукові вагони-дефектоскопи (УВД), які експлуатуються в Україні та країнах СНД, переважно використовують імпульсний метод випромінювання пружних хвиль. Імпульсні УВД мають недоліки через значні рівні завад та складність забезпечення надійного акустичного контакту, що сильніше проявляється при збільшенні швидкості сканування. В результаті, необхідним є використання портативних дефектоскопів для проведення вторинного контролю ділянок колії, де покази швидкісних засобів НК не є чіткими. В цілому, все це призводить до зменшення оперативності видачі інформації і, як наслідок, зменшення ефективності контролю.

Основну увагу дослідники і виробники апаратури УЗД залізничних рейок приділяють забезпеченню акустичного контакту з рейкою. Основними причинами неповного контролю рейкового шляху є: а) локальні пошкодження поверхні кочення (пробуксовки, вищербки і т.д.); б) розриви рейок на болтових з'єднаннях і стрілочних переводах; в) втрата акустичного контакту, що викликана підскакуванням ультразвукових перетворювачів на цих об'єктах; г) втрата акустичного контакту на кривих радіусом 300 м внаслідок розширення головки рейки в процесі експлуатації, що значно ускладнює центрування ультразвукових сенсорів відносно поздовжньої осі рейки, особливо при високих швидкостях сканування [11, 12].

Ультразвукові дефектоскопи, маючи достатню чутливість і роздільну здатність, виявляють багато дефектів на ранніх стадіях розвитку ($6\div 8\%$ площі перерізу головки рейки), але часто пропускають дефекти типу поперечної тріщини з критичними розмірами ($30\div 40\%$) [11].

Отже, незважаючи на те, що УВД дозволяють виявляти дефекти в головці, шийці та підшві рейки, вони мають ряд суттєвих недоліків:

- ускладнена (а інколи неможлива) робота в холодну погоду (при температурах нижчих від -10°C), при якій утворюється проміжний шар внаслідок обледеніння колії;
- розлите мастило, яке також формує проміжний шар, може вплинути на результати діагностики до 100 м залізничного шляху [1];
- нестабільний акустичний контакт;
- недосконале центрування ультразвукових перетворювачів шляхом механічного притискання до робочої поверхні головки рейки;
- відсутність формалізованих ознак дефектів при розшифруванні дефектоскопічних сигналів;
- поява при значних швидкостях дефектоскопа специфічних ефектів, які додатково знижують надійність та достовірність контролю рейок;
- складність визначення вертикальних та поперечних дефектів;
- у випадку поїздів типу UTU, – руйнування шини РБП пошкодженою рейкою, що відбувається, в середньому, один раз на тиждень.

1.1.2. Магнітодинамічний метод (МДМ).

МДМ широко використовується для неруйнівного контролю структурних компонентів в нафтохімічній, залізничній, енергетичній та металообробній промисловості. В МДМ постійні магніти або електромагніти постійного струму використовуються для створення сильного магнітного поля, щоб намагнітити контрольований феромагнітний об'єкт до насичення. Магнітні силові лінії проникають в цей об'єкт за допомогою металевих щіток або через повітря. Якщо в

контрольованому об'єкті є якась аномалія або неметалеві включення, магнітні силові лінії будуть витікати за його межі, недалеко до розташування цієї аномалії. Сенсор виявить витік магнітного поля, який сприймається як інформація про неоднорідність структури досліджуваного об'єкту (наприклад, тріщина або корозія).

При дефектоскопії залізничних рейок за допомогою МДМ, пошукові котушки фіксуються на постійній відстані від рейки і використовуються для виявлення будь-яких змін в магнітному полі, яке генерується навколо рейки. У місцях рейки, де присутні приповерхневі або поверхнево-поперечні дефекти, феромагнітна сталь не пропускає магнітний потік і частина потоку розсіюється. Зондуюча котушка (давач) виявляє цю зміну магнітного поля та вказує на наявність дефекту.

Магнітні вагони-дефектоскопи (МВД), які реалізують МДМ (рис. 1.3), можуть експлуатуватися при суворих погодних умовах та при відсутності безпосереднього контакту сенсора з рейкою, що є вагомою перевагою у порівнянні з УВД [12].

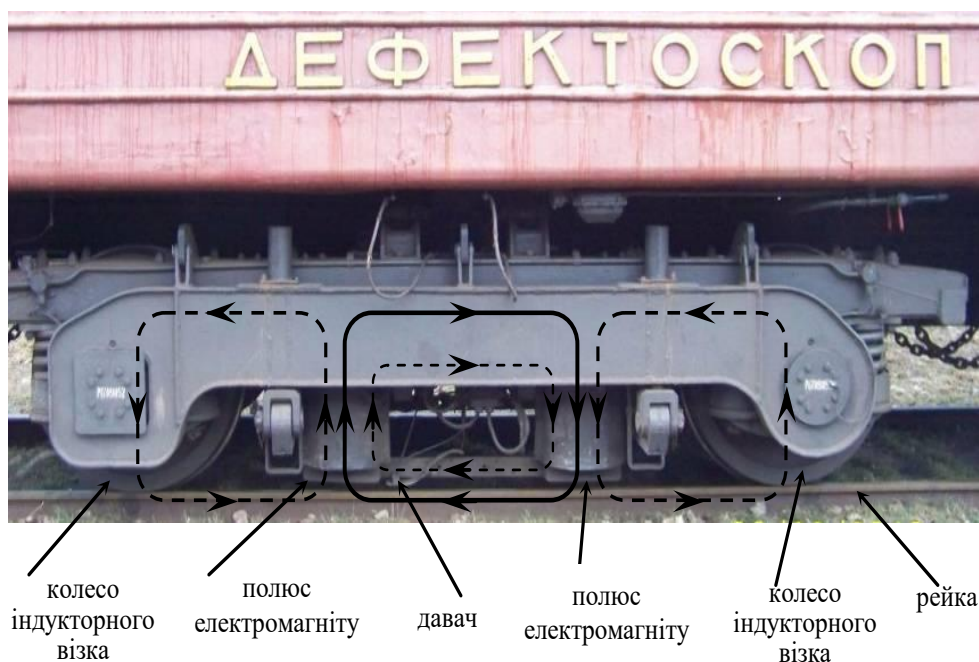


Рис. 1.3. Індукційний візок магнітного вагона-дефектоскопа [13].

При робочих швидкостях до 80 км/год МВД виявляють внутрішні поперечні тріщини, які охоплюють 20÷35% площі головки рейки і залягають на глибині до 5 мм від поверхні рейки, а також поздовжні горизонтальні та вертикальні тріщини, які виходять на поверхню і розташовані на глибині до 4÷5 мм. При цьому, виявляються не лише вищезгадані тріщини, а і дефекти пов'язані з виробництвом, обслуговуванням та експлуатацією: неметалеві включення, шви, луцення країв головки рейки та корозія. Втомні тріщини можуть виникати на основі цих дефектів, а також конструктивних особливостей рейки, таких як болтові отвори. Якщо ці дефекти залишаються непоміченими, вони можуть спричинити розкол головки рейки під рухомим поїздом. Багато з цих дефектів не виявляються за допомогою МДМ, так як можуть залягати глибше ніж 5 мм від поверхні кочення, в шийці або підшві рейки. УЗД, в свою чергу, дозволяючи виявляти вищезгадані дефекти, схильна пропускати дефекти критичних розмірів, які успішно виявляються при МДМ. Тому, все частіше, ці методи використовують разом, що дає суттєвий ефект, який перевищує сумарну ефективність окремо взятих МВД та УВД [11]. Максимальна швидкість контролю, яка досягається при комбінуванні ультразвукової системи та МДМ, як правило, не перевищує 35 км/год.

1.1.3. Імпульсний вихрострумний метод.

Раніше застосування вихрострумного методу обмежувалось лише перевіркою окремих зварних швів. Відносно недавно, для виявлення контактно-втомлювальних тріщин (КВТ), були розроблені системи, які дозволяли перевіряти рейку зі швидкістю кілька метрів за хвилину. На рис. 1.4 а показана ручна вихрострумна система, що використовується для виявлення КВТ і колісних вибоїн. Сенсор, за допомогою оператора,

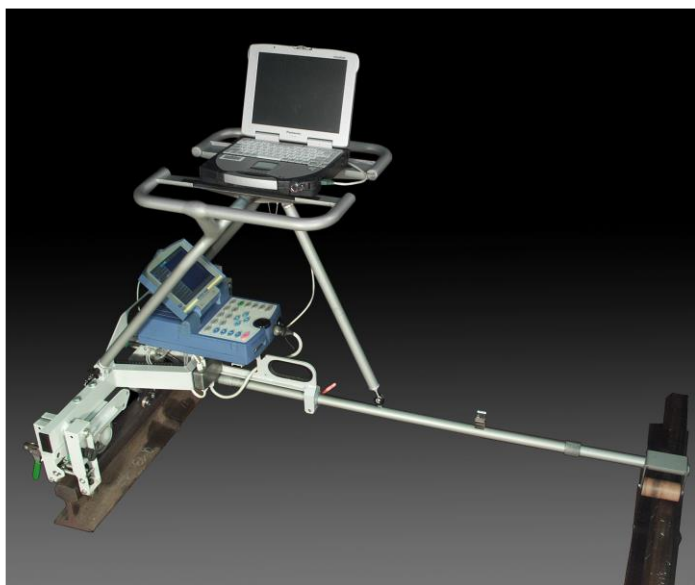
переміщується вздовж головки рейки і фіксує зміни в сигналі, викликані наявністю вищезгаданих дефектів.

Як згадувалося раніше, ультразвукові сенсори мають погану здатність виявлення поверхневих або приповерхневих дефектів. Вихрострумний сенсор має набагато кращу здатність до виявлення цих типів дефектів.

Значні розробки в перевірці рейок за допомогою вихрових струмів було зареєстровано німецьким Федеральним інститутом досліджень і випробувань матеріалів (German Federal Institute for Materials Research). Наскільки відомо, спеціально розроблене обладнання для виявлення КВТ надає інформацію про позицію дефекту та його глибину залягання. На даний момент, ця система використовується в деяких дефектоскопічних машинах і ручних тест-системах в Нідерландах, Німеччині та інших європейських країнах [14].



а)



б)

Рис. 1.4. Вихрострумні ручний портативний дефектоскоп (а) та дефектоскоп-візок (б) [14].

Для співставлення дефектоскопічної інформації шляхових координат використовується глобальна система позиціонування GPS (англ. Global Positioning System). Координати зберігаються як частина фіксованого взаємозв'язку з дефектоскопічними даними.

Діагностика рейки даним методом НК є особливо складною, так як зонд повинен бути розташований під кутом до направляючої поверхні. Дуже важливим є спрямувати вихрострумові давачі так, щоб сигнали не були піддані впливу різного роду завад та чутливість не змінювалась в залежності від відстані до поверхні тестування.

Перші успішні високошвидкісні випробування (72 км/год) були проведені на ділянці колії між Магдебургом і Айльслебеном в Німеччині (1999 рік) де було знайдено кілька областей з КВТ.

Покази, зроблені випробувальним поїздом Eurailscout були чітко підтверджені підчас ручного огляду за допомогою вихрострумowego контрольного візка, показаного на рис. 1.4 б. Розроблена вихрострумова система також була успішно включена в шліфувальні поїзди з метою оцінки якості шліфування залізничних рейок.

1.1.4. Візуально-вимірювальні методи.

До недавнього часу, візуальний огляд проводився тільки досвідченим персоналом, який проходив уздовж залізничної колії і фізично шукав дефекти. Ця потенційно небезпечна практика, яка вносить суб'єктивізм в процес діагностики, все ж, в значній мірі, використовується і дотепер. За останні декілька років, на залізницях були реалізовані різні системи відео моніторингу на основі візуальних камер [1].

Поняття автоматизованих візуальних систем засноване на використанні камери, яка здатна фіксувати відеозображення рейкового шляху на високих швидкостях. Записані зображення потім автоматично аналізуються за допомогою спеціального програмного забезпечення. Робота програмного забезпечення полягає в ідентифікації об'єктів або

дефектів, виявлених за допомогою методів крос-кореляції та вейвлет-перетворень, в той час як дані класифікуються штучною нейронною мережею після виконання навчання з вчителем. Розпізнавання об'єктів з використанням технології навчання з вчителем (на основі попередніх зафіксованих зображень) пов'язане з обчислювальними проблемами. Для досягнення розпізнавання в реальному часі, час обчислень для класифікації моделей повинен бути невеликим. При спробі виявити більш дрібні об'єкти, такі як поверхневі дефекти, роздільна здатність записаного відеозображення має бути високою. Однак, при збільшенні роздільної здатності зображення підвищується і кількість отриманих для аналізу даних, а отже і час, необхідний для виконання аналізу. В результаті, швидкість перевірки повинна бути синхронізована з аналізом даних.

Автоматизовані системи візуального контролю рейок можуть бути використані для контролю та вимірювання профілю головки рейки, відсотку її зносу, розриву колії, зміщення шпал, відсутності частини баласту, стану опорної плити, відсутності болтів кріплення та пошкодження поверхні тощо. Швидкість роботи цих систем може змінюватись від 60 км/год до 320 км/год залежно від типу перевірки і необхідної роздільної здатності. Наприклад, перевірка для виявлення деформацій залізничних рейок може бути виконана набагато швидше, ніж для виявлення тріщин. Проте, автоматизовані системи візуального контролю не забезпечують жодної інформації щодо наявності внутрішніх дефектів рейок а, отже, не можуть бути використані для повної заміни ультразвукової чи магнітодинамічної діагностики.

Для прикладу, компанія Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF) проводить діагностику колії високошвидкісними камерами за допомогою свого дефектоскопа «IRIS 320», який може досягати швидкості до 320 км/год. Ці перевірки проводяться кожні 15 днів, щоб виявити дефекти поверхні рейок на найбільш високошвидкісних ділянках

рейкового шляху. На рис. 1.5 показана схема діагностики з використанням візуальних камер.

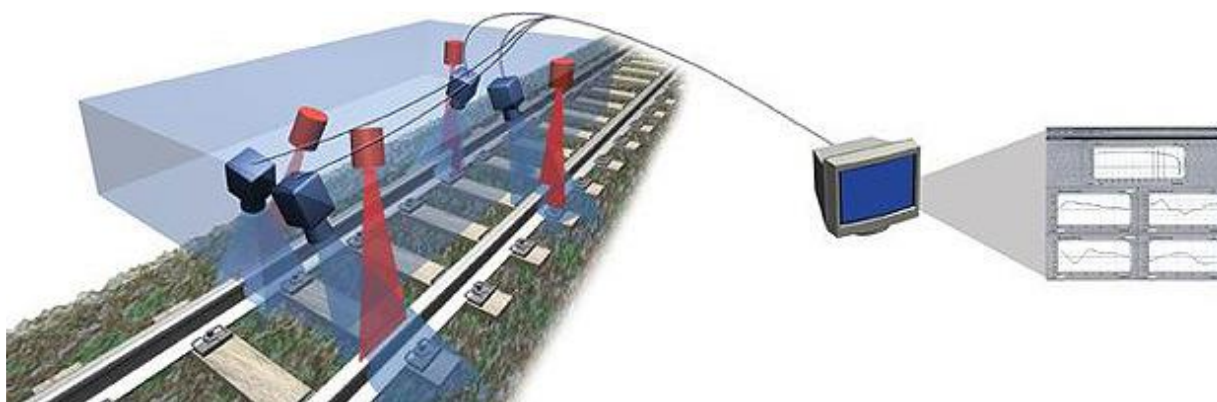


Рис. 1.5. Діагностика стану рейок за допомогою візуальних камер [1].

Подібні системи розроблені також у Німеччині (Bildverarbeitungssysteme) та Італії (MERMEC). Їх особливістю є забезпечення автоматизованого візуального огляду залізничних рейок з точним та раннім виявленням поверхневих дефектів та висока швидкість обробки результатів діагностики. Ці візуально-вимірювальні системи можуть бути використані як для перевірки всієї поверхні рейки, так і для визначення стану кріплень, шпал та баласту.

1.1.5. Гібридні системи мобільної діагностики.

Сьогодні, все більше спостерігається тенденція з використання гібридних систем діагностики, які засновані на одночасному використанні двох і більше методів НК. Наприклад, в Німеччині, Нідерландах та в інших країнах Європи для високошвидкісної діагностики залізничних рейок було введено в експлуатацію дефектоскопи, які використовують імпульсні вихрострумові давачі поряд із ультразвуковими [14, 15]. Вихрострумові сенсори мають значно кращу (у порівнянні з ультразвуковими) здатність виявлення поверхневих та приповерхневих дефектів, таких як КВТ,

відколи та колісні пробуксовки. Проте, робота вихрострумових давачів сильно залежать від відстані до контрольованої поверхні, а тому, вони повинні розташовуватись якомога ближче і на постійній відстані від поверхні головки рейки. В іншому випадку, деякі небезпечні поверхневі дефекти можуть бути пропущені. З цієї причини ведуться масштабні дослідження із залучення якомога надійніших та достовірніших методів НК, які здатні працювати на високих швидкостях в комбінації з існуючими ультразвуковим та магнітодинамічним методами НК. Тут варто відзначити високошвидкісні камери, електромагнітні акустичні перетворювачі, ультразвукові фазові антенні решітки, ультразвукові лазери та багаточастотні вихрострумові давачі [1, 8, 16].

На теренах СНД також ведуться активні розробки гібридних систем мобільної діагностики залізничної колії. Зокрема, в Білорусії, ЗАТ “Гомельський ВСЗ” виготовляє суміщений вагон-дефектоскоп (СВД) на базі пасажирського вагона. В операторському приміщенні цього вагона-дефектоскопа розміщуються: комп’ютерна апаратура, спеціалізований дефектоскопічний комплекс, апаратура керування ультразвуковим і магнітним інформаційними каналами та інше спеціалізоване обладнання. Живлення цього обладнання та намагнічувальної системи забезпечується дизель-електричним агрегатом потужністю 13 кВт [17]. Робоча швидкість вагона-дефектоскопа при контролі залізничної колії магнітним методом складає 60 км/год, а ультразвуковим – 40 км/год.

Російська фірма “ТВЕМА” (м. Москва) з 2009 року виготовляє вагони-дефектоскопи ВД-УМТ-1, які обладнані сучасними засобами ультразвукового та магнітного контролю (багатоканальний дефектоскоп «ЕХО-КОМПЛЕКС-2»). Діагностика стану залізничних рейок проводиться трьома методами НК – ультразвуковим, магнітним та візуально-вимірювальним [18].

Магнітний метод дозволяє виявляти дефекти рейок навіть при температурах від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді як робота ультразвукових дефектоскопічних систем є утрудненою при температурі нижче $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ через замерзання контактної рідини, що зроблена з водно-спиртової суміші.

Вагон-дефектоскоп оснащено спеціальним візком з шарнірним вузлом для постійного контакту колісних пар та рейок, що забезпечує плавне переміщення на кривих ділянках та стрілочних переходах. Позиціонування ультразвукової лижі відносно поздовжньої осі головки рейки забезпечується не через механічний контакт з рейкою, а – безконтактним магнітним методом, що дає можливість:

- виключити механічний контакт центруючої системи з рейкою;
- мінімізувати залежність точності центрування від стану робочої поверхні головки рейки;
- запобігти порушенню акустичного контакту, що обумовлено викидом снігу перед досліджуваною системою;
- забезпечити проходження будь-яких стрілочних переводів;
- збільшити швидкість діагностики.

Камери лінійного відео з високою роздільною здатністю та системою освітлення реалізують систему візуального визначення та вимірювання дефектів поверхні рейок та елементів кріплення «СВОД-2», яка автоматизує та спрощує монотонний процес неперервного оптичного контролю та дозволяє виключити «людський фактор», що зменшує ймовірність помилок.

З 2015 року фірма “ТВЕМА” розпочала випуск ще більш сучасних вагонів-дефектоскопів типу ВД-УМТ-2 [19], які мають наступні переваги над ВД-УМТ-1:

- використання вдосконалених засобів та систем комплексної неруйнівної діагностики (ультразвукової, магнітної, візуально-вимірювальної);

- можливість реалізації загальної швидкості контролю до 60 км/год;

- розширений кліматичний діапазон експлуатації тощо.

Крім вищезгаданих систем контролю, у цьому вагоні-дефектоскопі застосовано високошвидкісну систему вимірювання параметрів залізничної колії «СОКОЛ-2». Для отримання та обробки даних про стан елементів колії у вагоні використовується реєстратор та спеціалізоване програмне забезпечення «ИНТЕГРАЛ», яке дозволяє:

- реєстрацію даних про стан елементів залізничної колії, поточні координати шляху та швидкість руху вагона-дефектоскопа;

- архівацію та зберігання документів контролю всіх діагностичних систем.

Система автоматизованої обробки результатів контролю «АСТРА» дозволяє здійснювати автоматизоване розшифрування дефектів рейок. Нажаль, жодної інформації про імовірнісні показники виявлення конкретних типів дефектів виробник не надає.

Вищенаведене свідчить про загальну тенденцію до використання комбінованих методів НК з метою підвищення достовірності результатів діагностики.

1.1.6. Порівняння методів швидкісної діагностики рейок.

Порівняння вищеописаних методів НК для швидкісної діагностики залізничних рейок, наведене в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Метод НК	Доступні системи	Особливості
Ультразвуковий	Ручні та високошвидкісні системи (до 70 км/год)	Надійна ручна перевірка, але можливий пропуск дефектів підшви рейки. На високій швидкості можливий пропуск поверхневих дефектів. Обмеженість роботи в суворих погодних умовах та при низьких температурах. Необхідна контактна рідина між сенсором та головкою рейки. Проблема забезпечення акустичного контакту давача з поверхнею головки рейки на стрілочних переводах, з'єднаннях рейок та кривих ділянках колії.
Магнітодинамічний (МДМ)	Високошвидкісні системи (до 80 км/год)	Надійне виявлення лише поверхневих та приповерхневих внутрішніх дефектів головки рейки (до 5 мм від поверхні кочення). Можливість роботи в суворих погодних умовах, при низьких температурах та на поворотах колії.
Імпульсний вихрострумний	Ручні та високошвидкісні системи (до 70 км/год)	Надійне виявлення зламів рейки. Несприятливий вплив відбитків шліфування та поверхневих вертикальних варіацій. Необхідність стабільної відстані від давача до рейки та складність розміщення давача під відповідним кутом до направляючої поверхні.
Автоматизований візуальний огляд	Ручні та високошвидкісні системи (до 320 км/год)	Надійний у виявленні вибоїн, відсутніх конструктивних частин рейки і дефектного баласту на високих швидкостях. Неможливо надійно виявляти поверхневі розриви зі швидкістю > 4 км/год. Неможливо виявляти внутрішні дефекти.

1.2. Особливості розвитку магнітодинамічної діагностики залізничних рейок.

Магнітні методи у дефектоскопії рейок мають давню історію. Перші дослідні зразки дефектоскопів, що були засновані на магнітних принципах, з'явилися ще в 20-х – 30-х роках минулого сторіччя. Саме в цей час (в 1928 році), в Японії, М. Сузукі запропонував перший магнітний дефектоскоп, який представляв собою самохідну дрезину, обладнану системою намагнічування у вигляді П-подібного електромагніту постійного струму (на кожній нитці колії), індукційними давачами, розміщеними між полюсами електромагніту та пристроєм для реєстрації результатів контролю на паперову стрічку. Цей дефектоскоп дозволяв виявляти внутрішні дефекти головки рейки, а також тріщини з виходом на поверхню рейки при швидкості руху дефектоскопа до 4 км/год.

Також в 1928 році, на замовлення ARA (англ. American Railway Association), Елмер Сперрі розробив дефектоскоп для виявлення поперечних тріщин в головці рейки (рис. 1.6).

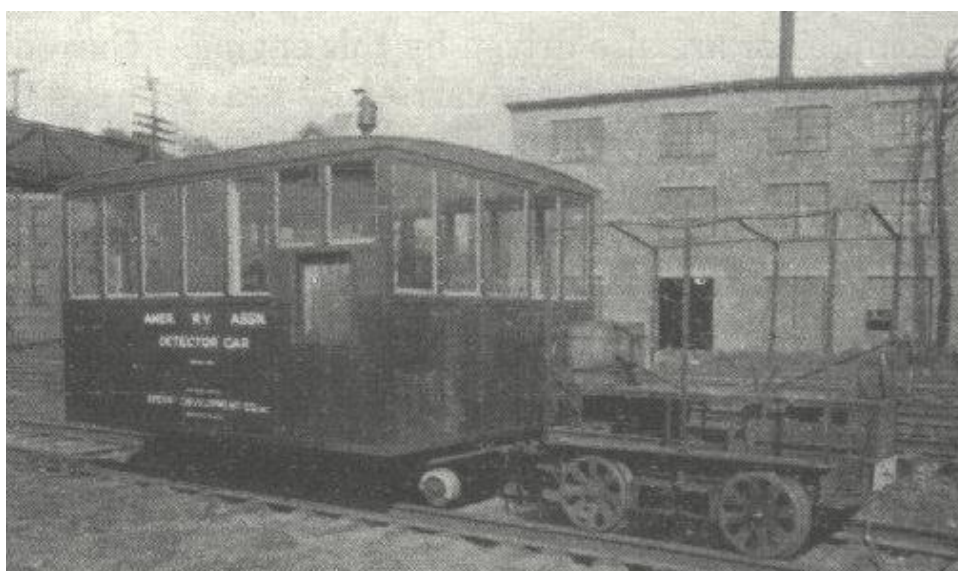


Рис. 1.6. Один з перших вагонів-дефектоскопів у світі, розроблений американцем Елмером Сперрі в 1928 році [20].

Дефектоскопічне обладнання розміщувалось на візку перед кабіною, а оператор та пристрій запису – в кабіні. Функціональна схема даного дефектоскопа представлена на рис. 1.7.

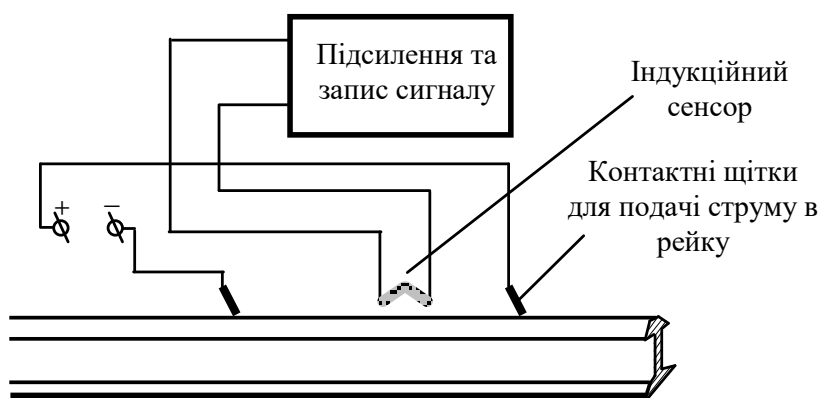


Рис. 1.7. Функціональна схема вагона-дефектоскопа розробленого Елмером Сперрі [20].

Намагнічування рейок відбувалось пропусканням через рейку постійного струму значної величини (до 3.5 кА при напрузі 0.8 В). Давачі були представлені двома котушками індуктивності (по одній на кожну нитку колії). Робоча швидкість дефектоскопа не перевищувала 20 км/год.

Після успішного впровадження дефектоскопа в експлуатацію, в 1928 році науковець заснував фірму “Sperry Rail Service” [10], сучасні ультразвукові дефектоскопи якої вже згадувались у цьому розділі.

В наступних дефектоскопах АРА в якості системи намагнічування використовувались потужні П-подібні електромагніти постійного струму, а давачі розміщувались позаду другого (за напрямом руху) полюсу електромагніту, тобто за межами його магнітного поля (режим роботи за методом залишкової намагніченості рейок).

На залізницях США та Франції отримав значного поширення вагон-дефектоскоп фірми “Teleweld”, який працював в режимі прикладеного магнітного поля, яке створювалось (для кожної нитки колії) трьома потужними стержневими електромагнітами. Давач дефектоскопа складався

з трьох пар локальних котушок індуктивності. Особливістю цього дефектоскопа було використання додаткового електромагніту, який створював слабе змінне магнітне поле розмагнічування поверхневого шару рейки для зменшення кількості імпульсів, які відповідали безпечним поверхневим дефектам рейок. Даним вагоном дефектоскопом виявлялись дефекти рейок (поза межами стикових накладок) при швидкості руху до 20 км/год.

У Росії перший магнітний вагон-дефектоскоп був розроблений та випущений в 1933 році винахідником Ф.М. Карповим.

У конструкції Ф.М. Карпова використовувалося контрольно-вимірювальне обладнання, яке включало:

- пристрій намагнічування з котушками, жорстко закріпленими на осях колісних пар;
- магнітомеханічні пошукові давачі;
- пристрій індикації наявності дефекту у вигляді ламп;
- систему реєстрації сигналів від давачів у вигляді самописного апарату;
- пристрій для відмітки дефектного місця на рейці.

Струм в котушки намагнічування подавався за допомогою спеціального контактно-щіткового пристрою. Для живлення котушок та інших пристроїв використовувався дизель-генератор постійного струму потужністю 15,5 кВт. При цьому, створювана магнітна індукція в рейці досягалася 1,5 - 2 Тл, що забезпечувало намагнічування рейок між полюсами до стану насичення.

В якості чутливих елементів використовувалися магнітомеханічні замикачі у вигляді трьох стрілочних індикаторів. Під впливом полів розсіювання дефектів стрілки поверталися і замикали контакти, до яких були підключені реле виконавчих кіл (ламп світлової сигналізації, самописного апарату, розприскувача фарби). Була можливість регулювати

чутливість стрілок, що дозволяло налаштовувати їх таким чином, щоб перша реагувала тільки на дефекти з площею ураження до 25% перерізу головки рейки, друга – від 25 до 50% і третя – на дефекти з площею більше 50% – свого роду прообраз автоматичного класифікатора дефектів.

Все обладнання розміщувалося на двох дрезинах. Перша служила в якості тягової і на ній було встановлено обладнання електроживлення. На другій розміщувалося контрольно-вимірювальне обладнання. Головна відмінність комплексу Ф.М. Карпова від аналогічних зарубіжних систем полягала в тому, що давачі працювали в активному полі, а не за методом залишкового намагнічування. Швидкість такого комплексу в робочому режимі становила до 20 км/год. Ця обставина зумовила його широке поширення, і до 1937 року в Росії вже експлуатувалося 4 магнітних вагони конструкції Ф.М. Карпова. За їх допомогою щорічно перевірялося близько 2000 км шляху і були виявлені сотні дефектних рейок.

Подальші удосконалення конструкції Ф.М. Карпова були здійснені в кінці 40-х – на початку 50-х років минулого століття, спочатку Р.І. Янусом, а потім В.В. Власовим. Вони, фактично, визначили подальші напрямки розвитку магнітної рейкової дефектоскопії на декілька десятиліть вперед. Саме в магнітних вагонах конструкції В.В. Власова почали застосовуватися П-подібні пристрої намагнічування і давачі індукційного типу (рис. 1.8), що дозволили вийти на якісно новий рівень по відношенню до тогочасних систем, а головне – досягти більш високих швидкостей контролю.

В процесі створення МВД на основі МДМ довелося пройти через розв'язання наступних серйозних проблем:

- збільшення ефективності пристрою намагнічування при одночасному зниженні потужності споживання;
- визначення оптимальних розмірів сенсора та його розташування в міжполюсному просторі;

- мінімізація перешкод і завад на виході сенсора при високих швидкостях руху;
- забезпечення виявлення необхідної номенклатури дефектів;
- розроблення методик розшифрування сигналів.

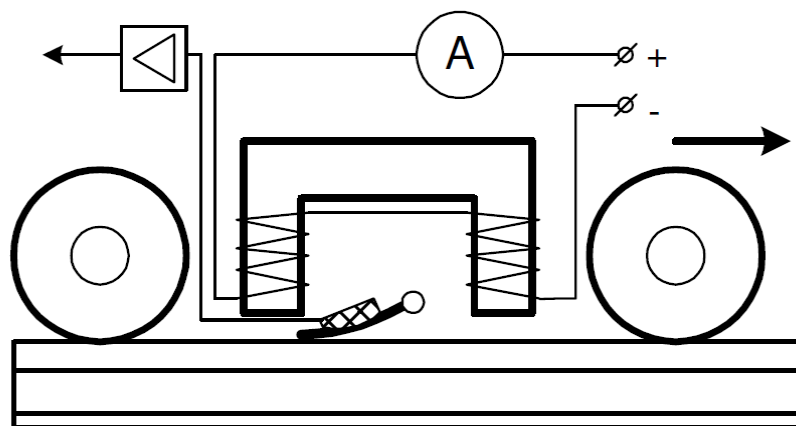


Рис. 1.8. Функціональна схема дефектоскопічного візка з П-подібним електромагнітом та індукційним давачем, розміщеним між полюсами магніту на спеціальній вимірювальній лижі [13].

В цілому, отримані в період з 1945 до 1959 року під керівництвом В.В. Власова дані дозволили створити досить ефективну конструкцію швидкісного рейкового дефектоскопа.

У 1952 році на Томській залізниці було введено в експлуатацію перший магнітний вагон-дефектоскоп конструкції В.В. Власова, а вже до 1961 року такими пристроями був оснащений цілий парк з 30 МВД. Конструкція таких дефектоскопів забезпечувала (при сумарній магніторушійній силі 40 кАв і робочому проміжку між полюсами магніту і головкою рейки $8 \div 12$ мм) магнітний потік в рейці близько $7 \div 10$ мВб (дані наведені для статичного намагнічування). При цьому, загальна потужність споживання дефектоскопа складала близько 2,5 кВт, а швидкість контролю збільшилася до 70 км/год. Такі вагони-дефектоскопи виявляли поперечні тріщини в головці рейки (дефекти по коду 20 і 21

згідно класифікатора дефектів рейок [21]) з площею, яка перевищувала 25% площі головки рейки та глибиною залягання дефекту до 4 мм [6]. Крім того, впевнено виявлялись поперечні та поздовжні тріщини за кодами 24, 25, 27, 30В, 30Г, а також зломи рейок за кодами 70, 74 та 79 згідно цього ж класифікатора. Дефектоскопічна інформація записувалась за допомогою шлейфових осцилографів типу МПО-2 на кіноплівку або електрографічною апаратурою на паперову стрічку.

Варто також відзначити деякі теоретичні дослідження. В [22] наведені результати вивчення процесу виявлення рейкових дефектів і характеру створюваних ними сигналів в пошукових пристроях, надані типові форми сигналів, які одержувались у процесі контролю від різних об'єктів, і зроблена спроба їх класифікації в залежності від виду (безпечний, небезпечний), форми (тріщина з виходом на поверхню або без виходу), глибини залягання і площі ураження головки за характерними ознаками. Серед цих ознак відзначаються – кількість імпульсів в сигналі від дефекту, співвідношення амплітуд позитивних і негативних максимумів, часовий інтервал між сусідніми максимумами і т.п.

В [22] також подано результати дослідження форми сигналів від поперечної тріщини в залежності від площі дефекту та швидкості контролю. Наводяться міркування про можливий вплив на цей процес вихрових струмів. Відзначається, що при зміні швидкості руху змінюється лише амплітуда імпульсів, в той час як форма залишається практично без змін у всьому інтервалі робочих швидкостей вагона-дефектоскопа (від 15 до 75 км/год).

Були вивчені спектри сигналів від деяких дефектів [23, 24], в результаті чого було встановлено, що спектри сигналів від дефектів дещо відрізняються від сигналів безпечних поверхневих пошкоджень. Зроблено висновок про те, що на основі спектрального аналізу можливо здійснювати ідентифікацію сигналів. З використанням цих даних був згодом

запропонований навіть автоматичний класифікатор [25]. Однак, подальшого розвитку роботи з використання спектрального представлення при аналізі дефектоскопічних сигналів не отримали в силу обмежених можливостей цього методу у відношенні до імпульсних сигналів.

Питання розшифрування осцилограм ретельно розглядаються в [26], де наводяться дані про характерні ознаки сигналів від різних типів дефектів і регулярних об'єктів типу підкладок та болтових стиків.

Теоретичним дослідженням магнітних давачів присвячені роботи В.В. Ключова [27, 28], Ю.М. Шкарлета [29], А.Л. Дорофеева [30] та ін.

В Україні, дослідження в напрямку удосконалення МДМ дефектоскопії рейок здійснюються в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України та в Інституті телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки (ІТРЕ) Національного університету “Львівська політехніка” [13, 31-33] з використанням для натурних експериментів львівського МВД № 442.

В [34] представлено підхід до виявлення порушень суцільності рейок за сигналами МВД на основі вивчення їх імовірнісної структури методами періодично корельованих випадкових процесів.

В ІТРЕ, науковою групою при кафедрі радіоелектронних пристроїв та систем, був розроблений експериментальний стенд, в якому первинне магнітне поле в відрізках дефектних рейок збуджується потужними постійними магнітами [35]. В результаті проведених досліджень створений робочий макет принципово нової багатоканальної компонентної інформаційно-діагностичної системи, яка реалізує МДМ з використанням сенсорів Холла [36, 37].

Впродовж багатьох років МВД дозволяли успішно розв'язувати завдання безпеки руху залізничного транспорту, виявляючи небезпечні дефекти рейок до досягнення ними критичних розмірів при дуже суворих погодних умовах (хуртовина, сильні морози) у той час, коли інші методи

контролю ставали малоефективними [38]. На залізницях СРСР в 70-80-ті роки одночасно експлуатувались близько сотні МВД. Такі вагони-дефектоскопи (з певними модернізаціями) і зараз досить широко експлуатуються на теренах країн СНД і в Україні зокрема. Модифікацій зазнали перш за все пристрої обробки та відображення інформації. Так, у сучасних МВД сигнали після попередньої обробки (підсилення, фільтрації, стиснення) надходять у спеціальний блок, де здійснюється їх аналого-цифрове перетворення, після чого вони вже в цифровому вигляді подаються для подальшої обробки, збереження в базі даних (з прив'язкою до поточної координати шляху) і відображення на моніторі в зручній для оператора формі. У всіх існуючих МВД реалізована одноканальна система реєстрації дефектоскопічних сигналів, які надходять від однокомпонентного індукційного датчика інтегрального типу [39]. В [40] описано, що значно більший обсяг інформації можна отримати при переході на 3-компонентні датчики з подальшим застосуванням первинних перетворювачів матричного типу і практичною реалізацією компонентної і багатоканальної приймальної дефектоскопічної системи [33, 41].

Досвід використання МВД виявив і їхні доволі суттєві недоліки [7]. Одним із конструктивних недоліків П-подібної системи намагнічування є наявність повітряного проміжку між полюсами магніту та рейки. Безпечна експлуатація комплексу вимагає робити цей проміжок достатньо великим (замість необхідних 8 мм він інколи досягає 23 мм!), що призводить до значного послаблення магнітного потоку в рейці. В результаті, на дефектограмі досить чітко фіксуються конструктивні елементи колії (створюючи видимість нормального функціонування комплексу), але відсутні сигнали від внутрішніх дефектів рейки.

Другим недоліком системи намагнічування МВД є те, що відстань між полюсами складає лише 80 см. Це дає високий рівень промагнічення рейки в статичному стані, однак при русі на великих експлуатаційних

швидкостях (70-80 км/год) магнітне поле не встигає проникати на достатню глибину. Причиною цього явища є зростання вихрових струмів при збільшенні швидкості, які протидіють проникненню магнітного поля в глибину металу.

Третій недолік П-подібної системи намагнічування – значні розміри електромагнітів, які повністю займають простір між полюсами магніту, що не дає змоги розмістити давачі інших систем НК.

Для усунення вказаних недоліків на початку 90-х років були поставлені два завдання:

1. Поступова заміна застарілих МВД на СВД, в яких реалізується як магнітний, так і ультразвуковий методи НК.
2. Забезпечити глибоке промагнічення рейки на швидкостях контролю до 80 км/год, а в перспективі – до 120 км/год.

В середині 90-х років спеціалістами ОАО “Радиоавионика” (Росія) та ВНИИЖТ (Загальносоюзного науково-дослідного інституту залізничного транспорту Росії) в рамках робіт із створення СВД з дефектоскопічним комплексом АВИКОН-03 була розроблена та успішно впроваджена нова магнітна підсистема (рис. 1.9).

У порівнянні із старими МВД система намагнічування була піддана кардинальним змінам. Проміжок між полюсами магніту було збільшено більш ніж в 3 рази (до 3 м), що дозволило вирішити проблему недостатньої глибини промагнічення рейки на великих швидкостях. Проте, таке значне збільшення проміжку між полюсами не привело до зниження величини магнітного потоку в рейці. Це було досягнуто використанням більш ефективного методу підведення магнітного поля в рейку, – за допомогою коліс дефектоскопічного візка, що безпосередньо контактують з головкою рейки.

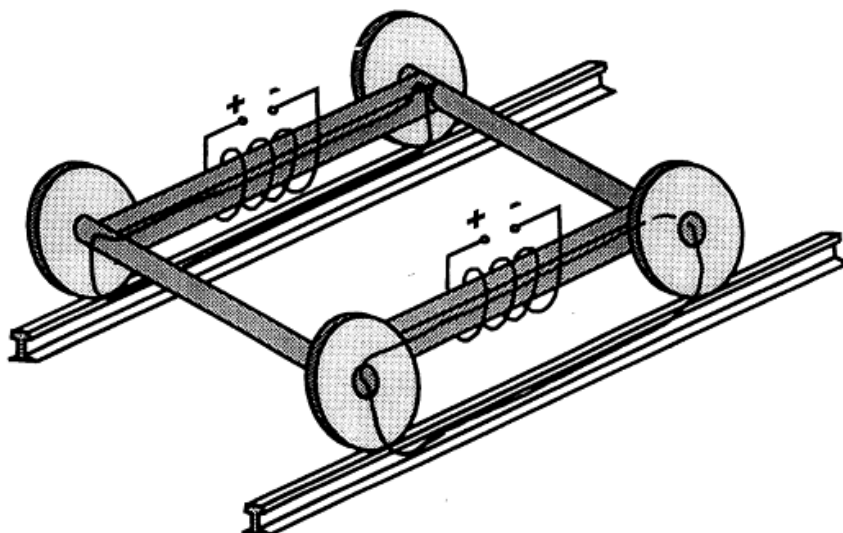


Рис. 1.9. Розміщення електромагнітів на поздовжніх балках дефектоскопічного (індукційного) візка [42].

В модернізованому комплексі АВИКОН-03 (та АВИКОН-03М, який виготовляється з 2006 року) система намагнічування реалізована так як показано на рис. 1.10.

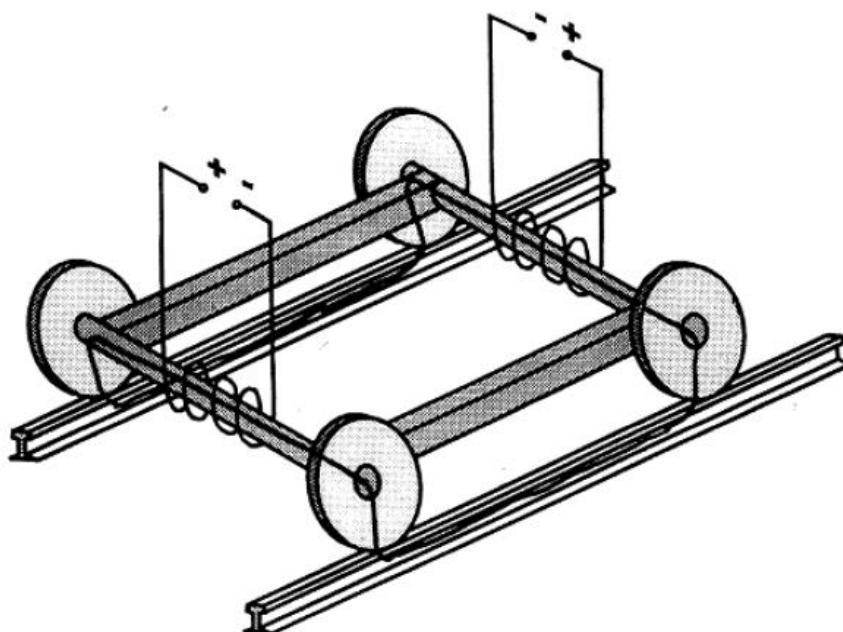


Рис. 1.10. Система намагнічування з електромагнітами на осях колісних пар дефектоскопічного візка [42].

Таке багатофункціональне використання конструктивних елементів індукційного візка дозволило не тільки зменшити його вагу (за рахунок відмови від додаткових осердь магнітів) але і вирішило проблему довжини магнітопроводів, яка була актуальною для системи намагнічування з великою відстанню між полюсами.

Надзвичайно важливим етапом удосконалення якості діагностики рейок є обробка результатів дослідження. В сучасних умовах, коли оператору вагона-дефектоскопа представляється для аналізу велика кількість інформації отримана магнітним, ультразвуковим каналами та системою відеореєстрації, дуже важко (а практично неможливо) вслідкувати за всім цим одночасно. Тому, достатньо давно, поставало питання автоматизації діагностики залізничних рейок шляхом залучення до цього процесу сучасних засобів цифрової обробки сигналів (ЦОС). Вивченню цього питання були посвячені роботи [43-45].

Слід також згадати і про пристрої відображення дефектоскопічної інформації, які в процесі свого розвитку пройшли довгий шлях удосконалення від паперових стрічок та кіноплівок до сучасних моніторів.

1.3. Особливості реалізації МДМ на львівському вагоні-дефектоскопі.

1.3.1. Принцип роботи вагона-дефектоскопа.

Вище вже згадувалось про принцип роботи МВД, тож тепер варто детальніше зупинитись на конкретному прикладі, а саме вагоні-дефектоскопі № 442 Львівської залізниці, записи сигналів якого використані в подальших дослідженнях. Принцип його роботи базується на застосуванні МДМ. Нагадаємо, суть методу полягає в тому, що в русі, при намагнічуванні рейки постійним магнітним полем за допомогою П-подібного електромагніту (рис. 1.8) в ній виникають вихрові струми, і виявлення дефектів проходить при одночасній дії двох фізичних факторів

[12]: зміні намагніченості (магнітного потоку) в зоні дефекту і зміні густини вихрових струмів, які обтікають дефект. В результаті на поверхні рейки, у зоні дефекту, виникає локальна зміна магнітного поля, яка називається магнітодинамічним полем дефекту. Величина магнітодинамічного поля дефекту залежить від швидкості руху вагона-дефектоскопа. При малих швидкостях, коли інтенсивність вихрових струмів мала, визначальну роль у формуванні динамічного поля дефекту відіграє фактор намагніченості рейок. Форма поля дефекту при цьому близька до магнітостатичної.

При збільшенні швидкості руху інтенсивність наведених в рейках вихрових струмів зростає, що впливає на величину і форму сигналу від дефекту. При швидкостях 15-20 км/год дефекти у вигляді поперечних тріщин у головці рейки починають суттєво впливати на розподіл вихрових струмів, у результаті чого магнітодинамічне поле цих дефектів змінюється (в порівнянні з магнітостатичним) і набуває характерних особливостей.

Елементи рейкових кріплень, зварні стики та деякі типи поверхневих пошкоджень головки рейки не мають помітного впливу на характер розподілу вихрових струмів. Завдяки цьому вдається розрізняти сигнали від дефектів на фоні сигналів від регулярних елементів колії.

На вагоні-дефектоскопі № 442 використовуються рамочні інтегральні давачі, які реєструють поздовжню складову магнітного поля. Ці давачі розміщуються на спеціальній пошуковій лижі над правою і лівою рейками залізничної колії (рис. 1.11).

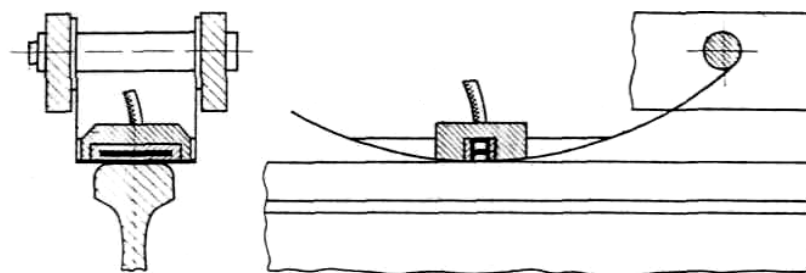


Рис.1.11. Розташування пошукової лижі з давачем на рейці [6].

Ширина сенсора орієнтовно дорівнює ширині головки рейки.

Процес розшифрування дефектограм записаних МВД, у більшості практичних випадків, носить характер експертних оцінок при перегляді записаних сигналів [46].

Вагон-дефектоскоп № 442, який експлуатує Львівська залізниця, відрізняється від типового МВД тільки тим, що в ньому замість електрографічного дефектографа ДГЕ-М встановлений апаратно-програмний комплекс (АПК) «Дефектоскоп», інтерфейс якого наведений на рис. 1. 12.

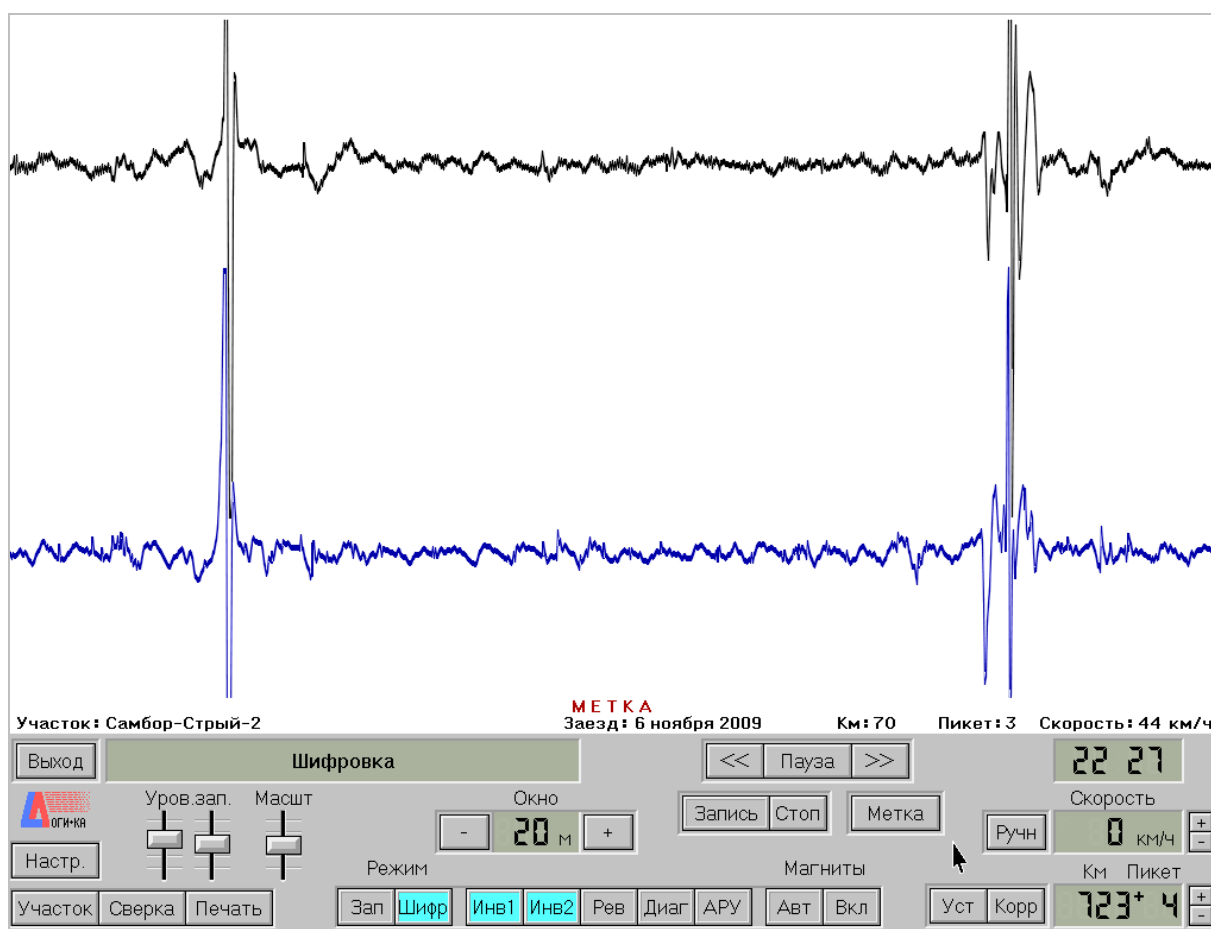


Рис. 1.12. Інтерфейс АПК «Дефектоскоп» з яким працює оператор вагона-дефектоскопа.

АПК «Дефектоскоп» значно полегшує працю операторів і дозволяє виконувати наступні функції: запис заїзду та його шифрування; ведення

архіву попередніх заїздів; звіряння фрагментів заїздів; друк вибраних фрагментів заїздів; діагностику АПК; сервісні вигоди, що дозволяють оператору: керувати роботою АПК за допомогою клавіатури або «мишки»; отримувати повідомлення про стан і роботу програми; отримувати максимально зручний вигляд сигналу з давачів при записі та шифруванні; одночасно проводити запис і шифрування сигналів даного і будь-якого іншого заїздів; відзначати важливі фрагменти запису і вводити до них текстові коментарі; швидко знаходити і вибирати потрібний заїзд, кілометр і пікети, починати запис нового заїзду, усувати старі записи заїздів; встановлювати автоматичне регулювання рівня сигналу та інше.

1.3.2. Дефекти, які виявляє вагон-дефектоскоп.

Даний вагон-дефектоскоп дозволяє виявити наступні типи дефектів, згідно класифікатора дефектів рейок [47]:

- дефект типу 20.2 (рис. 1.13 а) – поперечні тріщини в головці рейки у вигляді світлих або темних плям і злами через них, які викликані внутрішніми вадами (флокенами, газовими бульбашками);
- дефект типу 21.2 (рис. 1.13 б) – поперечні тріщини в головці рейки у вигляді світлих або темних плям і злами через них, які викликані недостатньою контактнo-втомлювальною міцністю металу;
- дефект типу 24.2 (рис. 1.13 в) – поперечні тріщини в головці рейки і злами через них внаслідок буксування, юзу, проходу коліс з повзунами та вибоїнами;
- дефект типу 25.2 (рис. 1.13 г) – поперечні тріщини в головці рейки і злами через них внаслідок ударів по рейці (інструментом, рейкою об рейку) та інших механічних пошкоджень;
- дефект типу 27.2 (рис. 1.13 д) – гартувальні тріщини в загартованому шарі металу головки рейки та злами через них;

- дефект типу 30Г.2 (рис. 1.13 е) – горизонтальне розшарування головки рейки через наявність неметалевих включень.

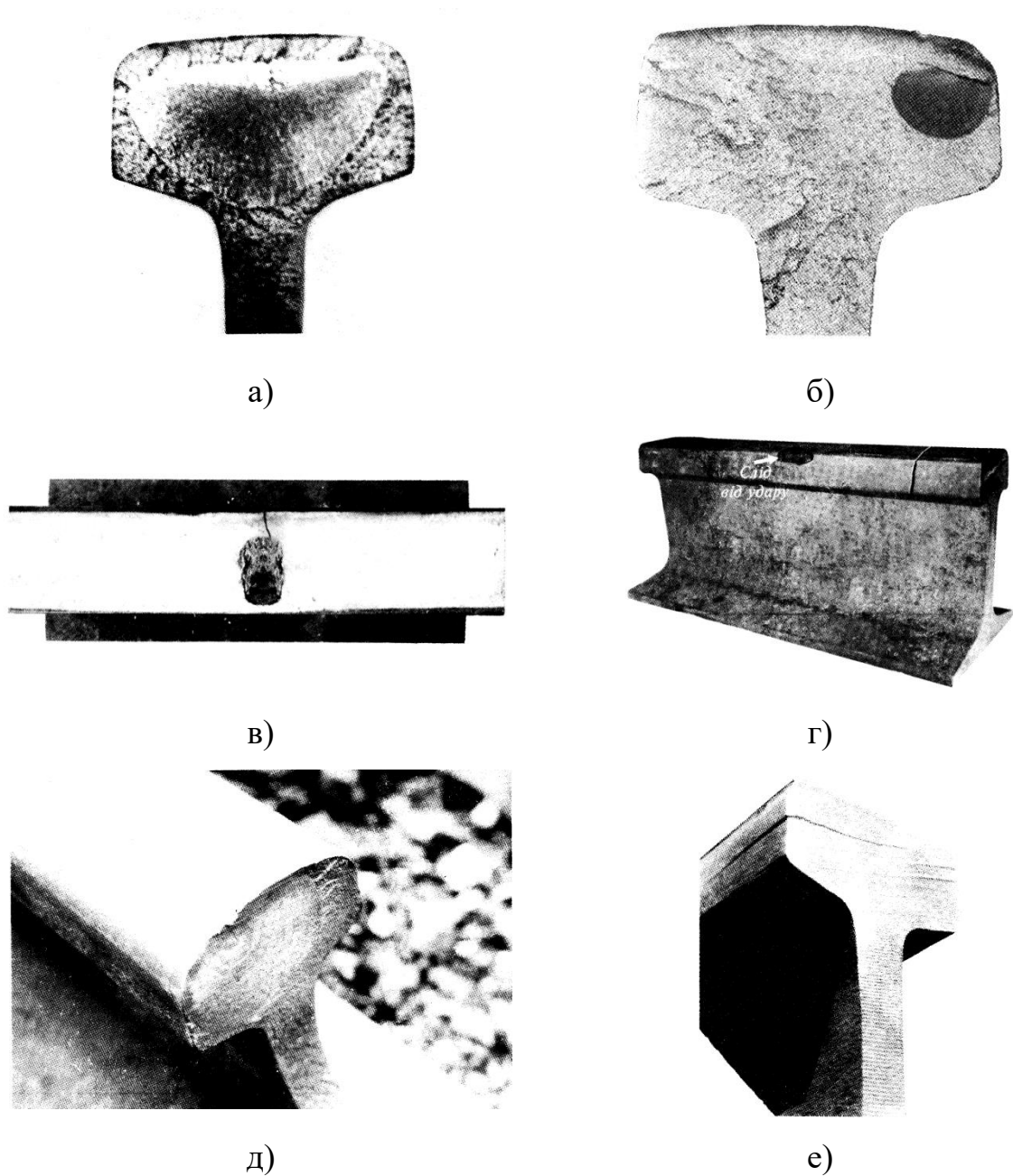


Рис. 1.13. Дефекти типу 20.2 (а), 21.2 (б), 24.2 (в), 25.2 (г), 27.2 (д) та 30Г.2 (е) [47].

Всі ці дефекти, окрім останнього, незалежно від причини їх появи, представляють собою поперечну тріщину в рейці. Форми сигналів від цих дефектів (образи) дуже схожі й оператор МВД при візуальному аналізі не

може точно встановити, до якого конкретно типу відноситься отриманий образ. З цієї причини, в літературі, як правило, наводять аналіз дефекту типу 21, оскільки він є найхарактернішим.

1.3.3. Процес реєстрації та обробки діагностичної інформації.

МВД використовується для періодичного контролю стану залізничних рейок в діапазоні швидкостей 20-80 км/год.

Для реєстрації дефектограм у вагоні-дефектоскопі застосовано два з'єднані мережею персональні комп'ютери, які містять у собі спеціальну плату збору і передачі сигналів, на яку поступають сигнали від герконового колісного давача обертів і лівої та правої вимірювальних лиж (рис. 1.14). З неї ж здійснюється керування електромагнітами лівого та правого намагнічувачів.

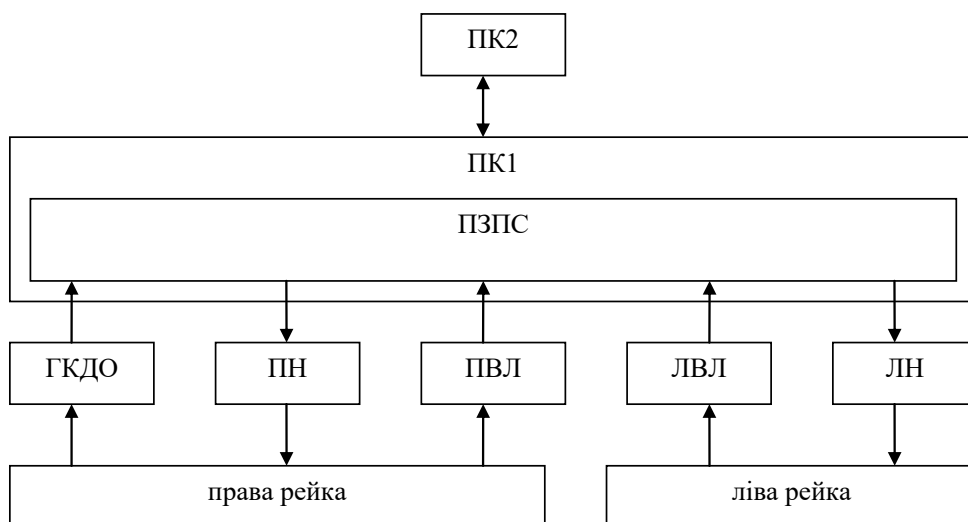


Рис. 1.14. Структурна схема вагона-дефектоскопа: ПК1, ПК2 – персональні комп'ютери; ПЗПС - плата збору і передачі сигналів; ГКДО - герконовий колісний давач обертів; ПН, ЛН – правий та лівий намагнічувачі; ПВЛ, ЛВЛ – права та ліва вимірювальні лижі [48].

Результатом діагностування засобами вагона-дефектоскопа є визначення типу дефекту та оцінка стадії руйнування рейки. При цьому

дефект розрізняється оператором як образ, шляхом порівняння з відомими сигнатурами дефектів. Окрім того, вказується його розташування (на лівій чи правій рейці) та відповідна шляхова координата.

При розгляді імпульсів на дефектограмі звертають увагу на:

- початковий напрям лінії імпульсу від нульової лінії (за додатній приймається імпульс, що починається вгору від нульової лінії);
- амплітуду імпульсів (відносно рівня сигналу від шпальних підкладок), за яку приймається найбільше відхилення додатної чи від'ємної частин імпульсу від нульової лінії;
- симетрію імпульсу, тобто, на співвідношення між його від'ємною та додатною частинами;
- ширину імпульсу, тобто, відстань між початком та кінцем імпульсу вздовж нульової лінії.

Вважають, що не тяжко розділяти сигнали від дефектів і поверхневих пошкоджень з відносною амплітудою $4 \div 5 \cdot a_n$ і більше (a_n – амплітуда сигналів від підкладок). Розділяти сигнали з меншою амплітудою ($1,5 \div 3 \cdot a_n$) значно складніше. Сигнали з відносною амплітудою менше $1,5 \cdot a_n$ за існуючими правилами розшифрування осцилограм можна взагалі не брати до уваги, хоча це не означає, що такі сигнали неможливо виділити.

До "безпечних" імпульсів відносять імпульси від наступних поверхневих пошкоджень головки рейки:

- зварка;
- буксування;
- тріщини в накаті;
- плівки, дрібні вибоїни, удари молотком і т.п.

Велика частина імпульсів від безпечних пошкоджень головки рейки має настільки характерний вигляд, що може бути відсіяна при

розшифруванні запису. Менша їх частина (10-15%) має вигляд, що нагадує форму сигналу від поперечної тріщини рейки. Наприклад, тріщини в накаті і великі раковини на поверхні кочення рейки.

Для уникнення пропуску дефекту такі імпульси треба відносити до числа тих, які підлягають натурному огляду. Додаткову інформацію отримують з записів попереднього заїзду. Коли сумнівний імпульс повторюється в тому ж місці, то його відносять до дефекту.

Точне визначення місця дефекту полягає в поданні шпал, між якими він розташований по довжині рейки. Відлік шпал ведеться за ходом кілометрів згідно сигналів від підкладок з врахуванням стикових шпал, розташованих в межах накладок.

Поява швидких комп'ютерів на робочому місці операторів вагонів-дефектоскопів дозволила ставити перед розробниками завдання автоматизації процесу обробки сигналів безпосередньо в умовах реального часу. Автоматичне виявлення нерегулярних фрагментів сигналів з наступним поданням таких фрагментів дефектограми оператору до аналізу дало б змогу збільшити швидкість розшифровування дефектограм та покращити якість виявлення небезпечних дефектів.

За останні роки різні виробники діагностичної апаратури рекламують свої новинки для МВД, однак, про якість роботи такої апаратури немає конкретної інформації. Тому, питання автоматизації процесу контролю і діагностики технічного стану залізничних рейок із зменшенням впливу «людського фактору» на цей процес залишається відкритим.

1.4. Висновки до розділу 1.

1. Аналіз сучасних методів та засобів мобільної дефектоскопії залізничних рейок дозволяє зробити висновок, що незважаючи на значні досягнення в цій галузі, залишається можливість їх подальшого вдосконалення.

Зокрема, в області магнітодинамічного методу діагностики, не вичерпані можливості щодо збільшення швидкості діагностики, яка в значній мірі залежить від параметрів намагнічувальної системи та її здатності промагнітити рейку. Цьому сприяє збільшення бази між полюсами магнітів, з можливим контролем положення пошукових сенсорів над поверхнею рейки при поворотах.

2. Магнітодинамічний метод дефектоскопії, який зараз застосовується в МВД, незважаючи на те, що дозволяє діагностувати тільки верхню частину рейки, в даний час, є найбільш надійним у виявленні поперечної та горизонтальної тріщин головки рейки, які є одними з найнебезпечніших дефектів залізничних рейок.

3. Ультразвукові вагони-дефектоскопи виявляють дефекти практично по всьому перерізу рейки, за винятком самої верхньої частини головки рейки, кінців підосви рейки, а також критичних дефектів, які охоплюють більше 35% площі головки рейки. Реальні робочі швидкості УВД, при яких можна гарантувати достовірність контролю, не перевищують 40-50 км/год. Проблеми використання УЗД виникають при температурах нижчих від -10°C , при забрудненні колії нафтопродуктами та при малих радіусах кривизни колії.

4. Магнітні вагони-дефектоскопи виявлять дефекти, які займають більше від 20% площі головки рейки. При цьому, виявляються дефекти як з виходом так і без виходу на поверхню. Максимальні робочі швидкості МВД можуть сягати 70-80 км/год. Крім того, відсутня необхідність безпосереднього контакту давача з рейкою, а достовірність результатів не залежить від погодних умов.

5. Основними напрямками підвищення ефективності швидкісної дефектоскопії залізничних рейок є:

1) використання СВД, які реалізують одночасне сканування колії кількома методами НК (переважно ультразвуковим та магнітодинамічним методами);

2) розроблення нових сенсорів для МВД, що дозволить створити нові діагностично-інформаційні системи з компонентним і багатоканальним способами відбору і опрацювання дефектоскопічних сигналів;

3) автоматизація процесів відбору, реєстрації, обробки і дешифровки дефектоскопічних сигналів;

4) застосування сучасних методів ЦОС для аналізу та обробки дефектоскопічних сигналів (наприклад, вейвлет-перетворень та нейронних мереж).

7. Збільшення кількості дефектоскопічної інформації (як через залучення даних з інших методів НК так і при реєстрації 3-х компонент магнітного поля) суттєво ускладнює роботу операторів вагонів-дефектоскопів, що може стати причиною збільшення кількості пропущених дефектів. Це ставить завдання з розробки спеціальних програмних засобів для автоматизації аналізу дефектоскопічної інформації, яка має на меті підвищити достовірність та оперативність виявлення дефектів.

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФЕКТОСКОПІЧНИХ СИГНАЛІВ ТА ВИБІР МЕТОДІВ ДЛЯ ЇХ АНАЛІЗУ

2.1. Структура файлу дефектограми.

АПК «Дефектоскоп» зберігає дані, отримані під час заїзду МВД, у файлах з розширенням “.DEF”. Назва файлу починається з двох букв латинського алфавіту, після яких є цифри, що вказують на дату заїзду (наприклад, AF120915.DEF). Дані в файлі зберігаються у стиснутому вигляді, а для опрацювання дефектограми існує спеціальна програма “undef.exe”, яка перетворює вміст файлу в текст формату CSV (англ. comma separated values – значення розділені комами). CSV файл має вигляд представлений в таблиці 2.1, кожен рядок якої відповідає одному відліку даних, що в свою чергу, відповідає 1 см залізничного полотна.

Таблиця 2.1.

Структура файлу дефектограми

PNT1	MIN1	MAX1	PNT2	MIN2	MAX2	POS	SPEED	MARK
-1	0	0	-5	0	0	1747420	43	
-1	0	0	1	0	0			
-1	0	0	1	0	0			
-2	0	0	0	0	0			
-1	0	0	0	0	0			
-2	0	0	0	0	0			
-1	0	0	0	0	0			
-2	0	0	0	0	0			
-1	0	0	0	0	0			
0	0	0	1	0	0			

Стовпці PNT1 і PNT2 містять виміряні значення поздовжньої складової магнітного поля над лівою та правою рейками відповідно. Саме значення з цих стовпців формують дефектоскопічний сигнал, який аналізує

оператор вагона-дефектоскопа. Значення MIN і MAX містять відповідно мінімальне та максимальне значення магнітного поля для конкретної нитки колії та використовуються тільки у випадку різких змін сигналу для кращого відображення на екрані (це потрібно для компенсації спотворень форми при стисненні даних). Столпчик POS відповідає за, виражену у сантиметрах, координату вагона-дефектоскопа на залізниці, причому, необхідно мати на увазі, що, в залежності від напрямку руху вагона, вона може як збільшуватись так і зменшуватись. Столпчик SPEED відображає миттєву швидкість вагона-дефектоскопа в км/год, а MARK – текстову помітку, яку ставить оператор у випадку виявлення сигналів, які можуть походити від дефектів.

2.2. Базові елементи залізничної колії.

Залізничні рейки - сталеві балки, які укладаються на шпали для утворення зазвичай двониткового шляху, по якому рухається рухомий склад залізничного транспорту.

Залізничну рейку можна умовно розділити на три складові частини: головку, шийку та підшву (рис. 2.1).

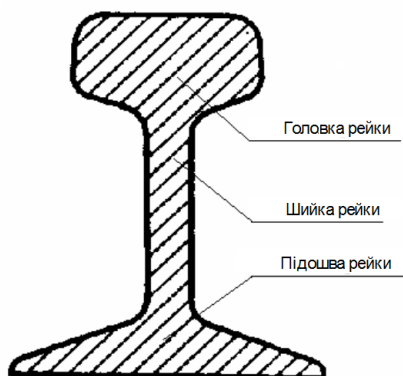


Рис. 2.1. Елементи поперечного перерізу рейки.

На рис. 2.2 показані регулярні елементи залізничної колії (елементи шляху, що періодично повторюються), такі як стик між торцями послідовно розташованих рейок, накладка – металічне кріплення рейок в області стику та підкладка – металічна прокладка між шпалою та підшвою рейки.

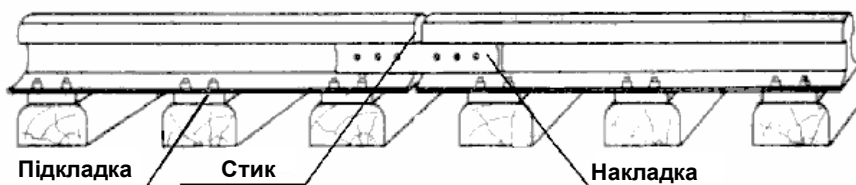


Рис. 2.2. Регулярні елементи залізничної колії [13].

Регулярними елементами залізничної колії є також зварні з'єднання, якщо колія має періодичні зварні з'єднання стандартних ділянок рейок.

До нерегулярних елементів залізничної колії належать звані з'єднання рейок (за винятком попередньо згаданих), сторонні елементи колії (наприклад, дріт) та різного роду дефекти.

2.3. Огляд сигналів, які записуються магнітним вагоном-дефектоскопом.

Дефектограма, яка записується в пам'ять АПК «Дефектоскоп» з одночасним відображенням в реальному часі на екрані монітора комп'ютера, являє собою двоканальний запис сигналів від двох давачів, розташованих над поверхнею рейок. Сигнали від кожного з давачів можуть мати регулярну (сигнали від регулярних елементів колії) та нерегулярну складову (сигнали від елементів рейок, в першу чергу, пов'язаних з дефектами).

На рис. 2.3 схематично показані дефекти, які виявляються магнітним вагоном-дефектоскопом. Дефекти, розташовані всередині головки рейки, показані у вигляді не заштрихованих «плям», а дефекти, які мають вихід на поверхню рейки, – у вигляді заштрихованих.

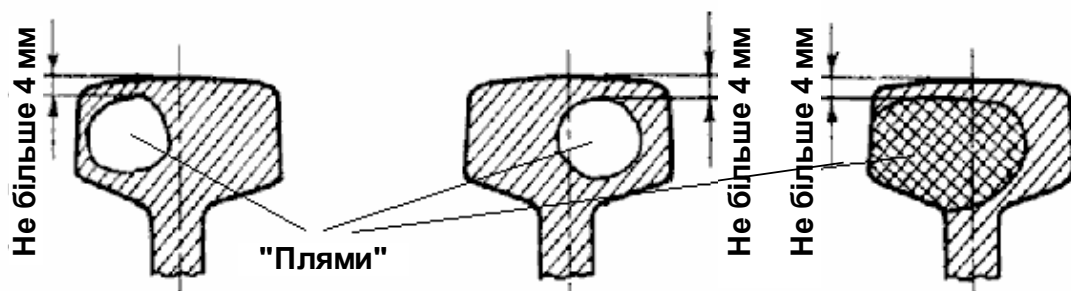


Рис. 2.3. Переріз головки рейки зі схематичним зображенням дефекту типу 20 і 21 [12].

МДМ не виявляються дефекти в межах накладок, в шийці і підшві рейки та в зварних стиках, за винятком сильно розвинутих поперечних тріщин втомного характеру.

2.3.1. Сигнали від регулярних елементів колії.

Давачі вагона-дефектоскопа реагують не тільки на дефекти, що утворюють нерегулярну складову дефектограми, а також і на зварні та механічні стики та рейкові підкладки. Останні утворюють регулярну складову дефектограми (рис. 2.4).

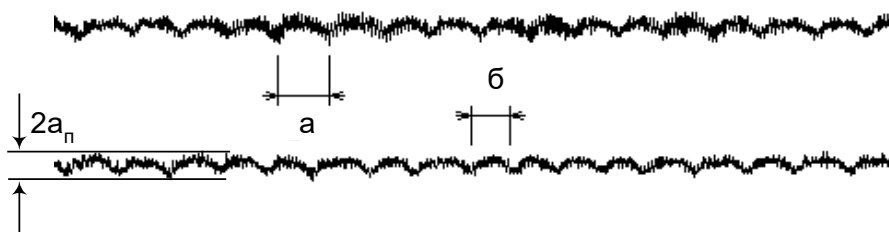


Рис. 2.4. Фрагмент дефектограми з позначенням сигналів від підкладок [13].

Відстані, позначені на рис. 2.4 буквами а і б, відповідають середньому значенню міжшпальних інтервалів на досліджуваній ділянці колії. Незначні пошкодження поверхні головки рейки, попадання під давач сторонніх предметів, несправність контактів та інше створюють на дефектограмі досить складний інтегральний сигнал, на якому періодично повторюються сигнали від підкладок і міжрейкових з'єднань.

На рис. 2.5 наведено фрагмент дефектограми від правої (зверху) та лівої (знизу) рейок залізничної колії. Рівень фону і середній рівень сигналу – це послідовність сигналів від підкладок, амплітуда яких позначається a_n . Вони представляють собою від'ємні або додатні викиди сигналу відносно середнього рівня.

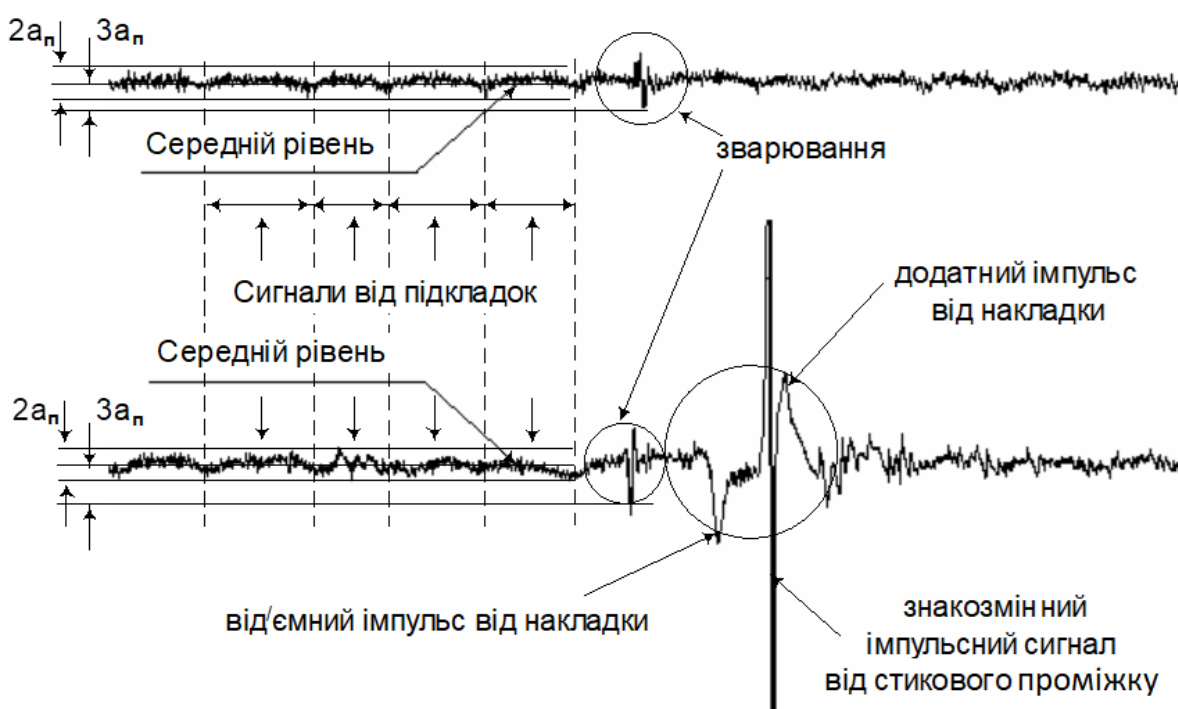


Рис. 2.5. Фрагмент дефектограми з регулярними елементами [11].

Оператори вагона-дефектоскопа проводять експертну оцінку дефектограми і, використовуючи власний досвід, можуть візуально відрізнити сигнали безпечних поверхневих пошкоджень від сигналів значних пошкоджень, які мають певну характерну форму. Суттєву роль в

оцінюванні сигналів дефектограми від різних об'єктів відіграє величина відхилення амплітуди сигналу від середнього рівня. Чим більша відносна амплітуда сигналу, тим яскравіше проявляються ознаки, які є характерними для певного типу дефекту. Так, на рис. 2.5 показаний знакозмінний сигнал відносно великої амплітуди від стикового зазору, який має навколо себе два імпульси різної полярності, які означають, відповідно, початок і кінець стикової накладки.

Початок і кінець накладки представлені на дефектограмі різнополярними (відносно середнього рівня) від'ємними і додатними імпульсами, зі значно більшою, ніж від підкладок, амплітудою і меншою тривалістю.

На рис. 2.5 також видно імпульсні сигнали від якісного зварного з'єднання правої та лівої рейок залізничної колії. Відносна амплітуда цих сигналів приблизно дорівнює $3 \cdot a_n$. Оператор вагона-дефектоскопа повинен звертати увагу на кожну аномалію дефектограми, величина викиду якої вниз перевищує $3 \cdot a_n$.

Характерні ознаки в сигналах, які відповідають певним типам дефектів, можна виділити в випадку, коли їх амплітуда є відносно великою у порівнянні з величиною $3 \cdot a_n$, яку ще називають порогом виявлення дефектів. При менших або рівних цьому порогові сигналах практично неможливо однозначно розділити сигнали дефектів і безпечних пошкоджень за ознакою форми сигналу, принаймні в ручному режимі роботи.

2.3.2. Сигнали від поперечної тріщини рейки.

Як уже згадувалось, поперечна тріщина в головці рейки, яка виявляється магнітним вагоном-дефектоскопом, може відповідати дефектам за кодом 20, 21, 24, 25, 26 та 27. Перша цифра (2) вказує на вид дефекту (поперечна тріщина) та його розташування (головка рейки). Друга

цифра позначає причину виникнення та розвитку дефекту (наприклад, порушення технології виробництва – 0, недостатня контактнотомлювальна міцність рейкового металу – 1 і т.д.). Третя цифра вказує на місце розміщення дефекту по довжині рейки (1 – у стик, 2 – поза стиком, 3 – в зоні контактного стикового зварювання рейок). Відсутність третьої цифри в коді означає, що дефект може бути розташований у будь-якому місці по довжині рейки [47]. Варто також відзначити, що приналежність дефекту до певного коду може бути визначена лише під час натурного огляду рейки. Оскільки поперечна тріщина за кодом 21 є найпоширенішим (приблизно 40% всіх випадків гостродефектних рейок) і найнебезпечнішим дефектом рейки, після виявлення якого рейка повинна бути замінена новою, то всі поперечні тріщини головки рейки будемо умовно вважати дефектом за кодом 21. Типова форма сигналу від цього дефекту зображена на рис. 2.6.

Як видно з рис. 2.6 сигнал від поперечної тріщини має характерну трьохімпульсну структуру з глобальним від'ємним імпульсом великої амплітуди.

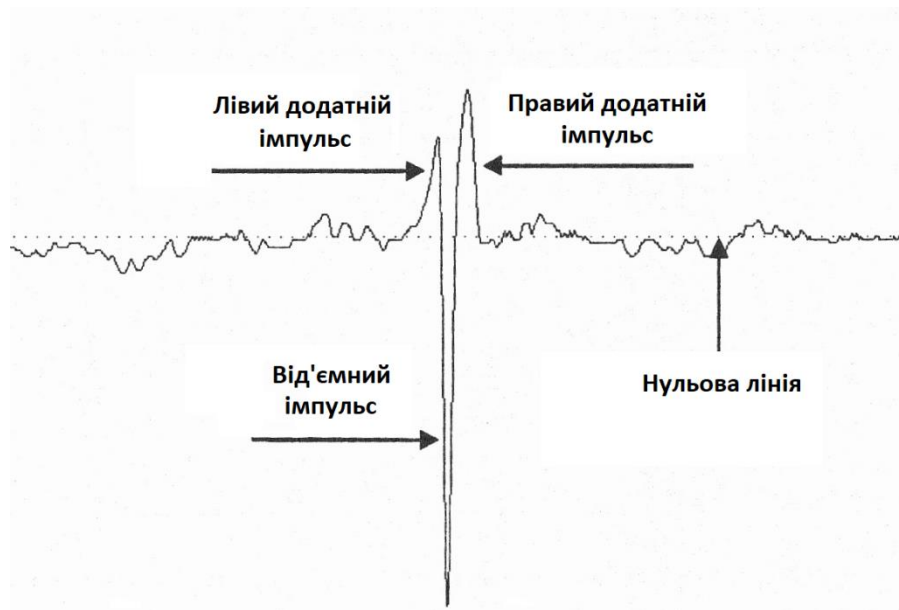


Рис. 2.6. Типова форма сигналу від дефекту по коду 21 [49].

Для порівняння, сигнали від дефектів за кодом 24.2 та 26.3 показані на рис. 2.7.

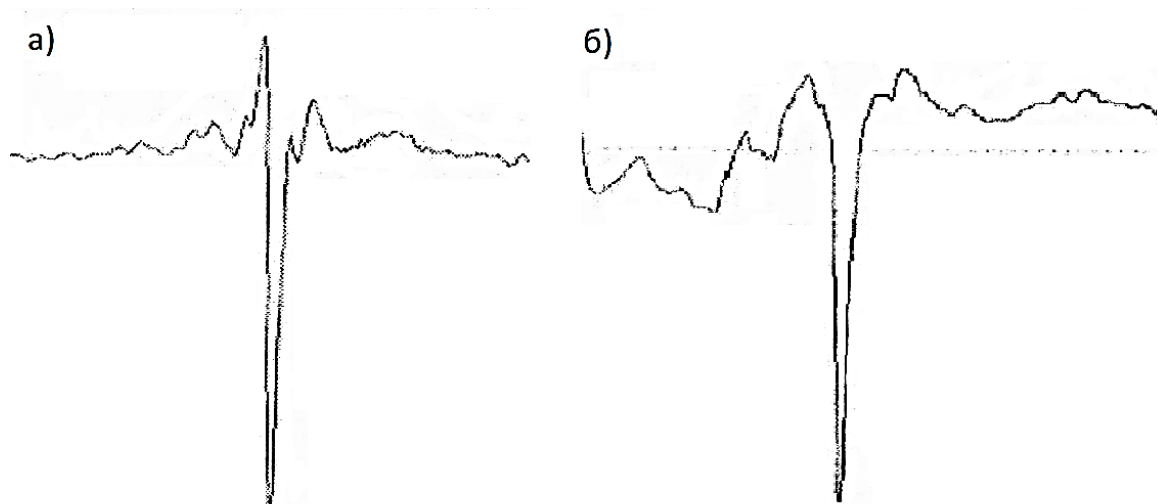


Рис. 2.7. Форма сигналу від дефектів за кодом 24.2 (а) та 26.3 (б) [49].

Як видно з рис. 2.6 та рис. 2.7 форма сигналів є практично однакова для всіх дефектів типу поперечної тріщини в головці рейки, незалежно від причини їх виникнення.

Найбільш типові форми сигналів від поперечної тріщини показані на рис. 2.8, де цифрами вказані: виражене у відсотках відношення площі дефекту до площі поперечного перерізу головки рейки та відносна амплітуда глобального від'ємного імпульсу сигналу (по відношенню до амплітуди сигналу від шпальних підкладок). Як видно з рис. 2.8, однією з найбільш характерних ознак форми таких сигналів є яскраво виражена асиметрія: амплітуда від'ємної частини сигналу зазвичай в 3-4 рази перевищує максимальну позитивну амплітуду. Другою дуже важливою ознакою є співвідношення амплітуд додатних частин сигналу: амплітуда правої частини завжди більша, або, в крайньому випадку, рівна амплітуді лівої частини. Виключення становлять сигнали від сильно розвинутих дефектів з виходом на поверхню (сигнали форми «д» та «е») [50].

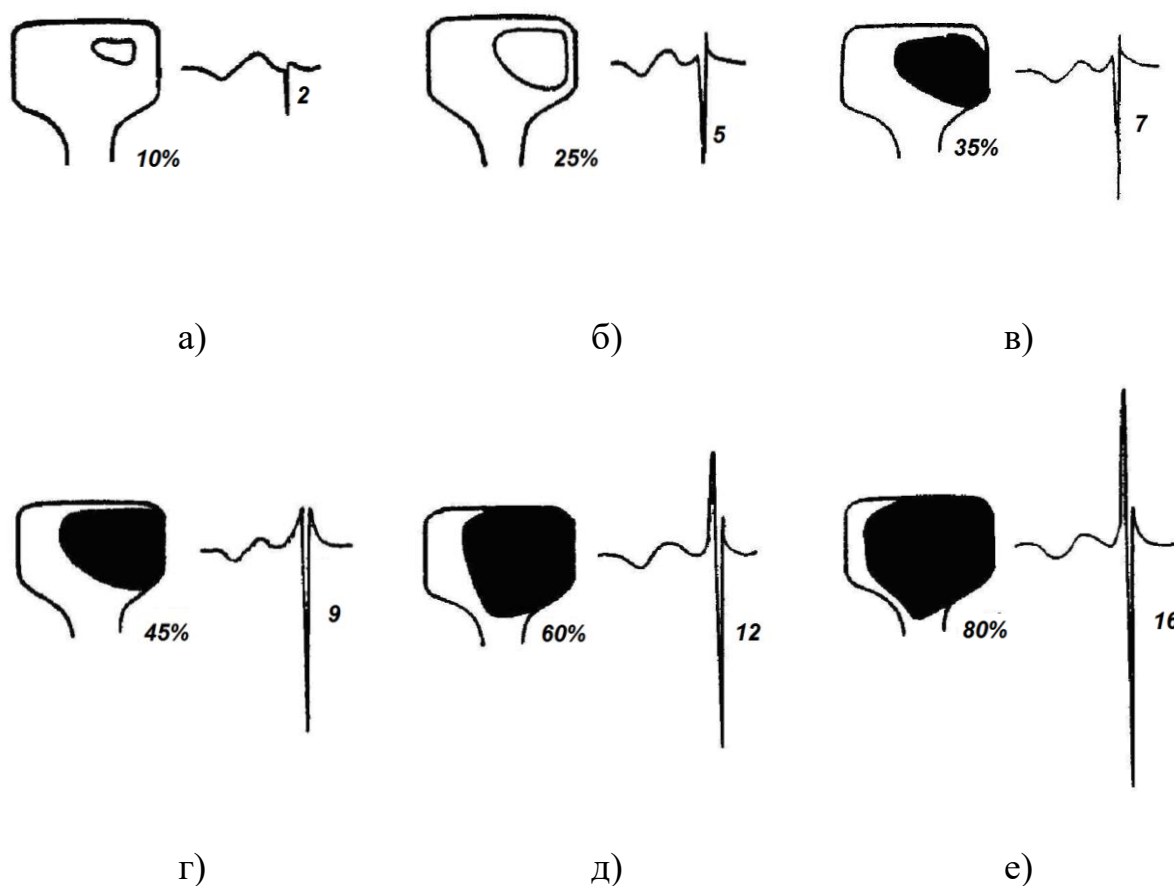


Рис. 2.8. Типові форми сигналів від поперечної тріщини в головці рейки, залежно від її площі [50]:

«а» і «б» – сигнали від внутрішніх дефектів;

«в» і «г» – сигнали від дефектів, які виходять на поверхню;

«д» і «е» – сигнали від тріщин, розкриття яких збільшується і може перерости в поперечний злом рейки.

Разом з тим, слід зазначити, що при аналізі дефектограм можна виявити сигнали від поперечної тріщини в головці рейки дещо іншої форми. Поява таких сигналів викликає певні труднощі при розшифруванні через нетиповість їх форми.

Тепер слід детальніше розглянути від чого залежить форма сигналу від поперечної тріщини. Основні фактори, які впливають на величину і форму дефектоскопічного сигналу: швидкість руху вагона-дефектоскопа –

V , намагніченість рейок – J , розташування давача в міжполюсному просторі електромагніту – x , характер дефектів і пошкоджень, їх розмір, орієнтація та глибина залягання відносно поверхні головки рейки.

На рис. 2.9 представлені форми сигналів від внутрішнього дефекту типу 21 в залежності від швидкості руху вагона-дефектоскопа. При цьому видно, що відносна амплітуда сигналу зростає зі збільшенням швидкості і цей ріст носить нелінійний характер. Сигнал від даного дефекту набуває характерної форми починаючи зі швидкості 18-20 км/год [6].

Для внутрішніх дефектів типу 21 закономірністю є ріст амплітуди сигналу при збільшенні швидкості до певного значення з подальшим зменшенням амплітуди до рівня фону. Для сигналів від безпечних поверхневих пошкоджень, дефектів з виходом на поверхню і підкладок характерний безперервний ріст амплітуди зі збільшенням швидкості.

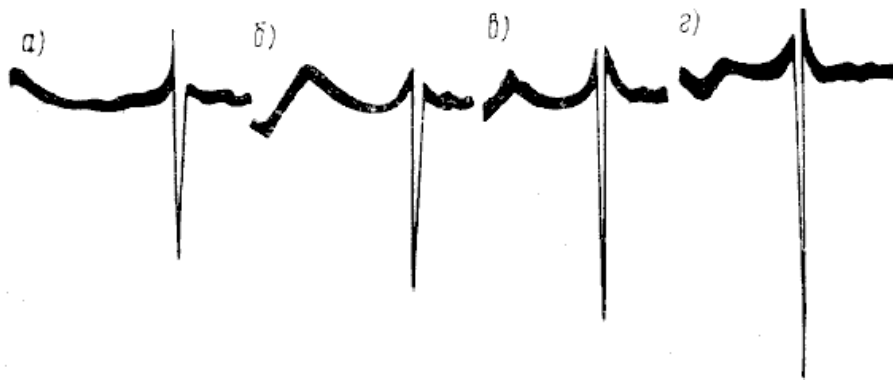


Рис. 2.9. Зміна форми сигналу (в давачі) від внутрішнього дефекту 21 в залежності від швидкості руху вагона-дефектоскопа: а) $V = 10$ км/год; б) $V = 15$ км/год; в) $V = 19$ км/год; г) $V = 24$ км/год [6].

Однак, при збільшенні швидкості вагона-дефектоскопа з типовою намагнічувальною системою (віддаль між полюсами П-подібного магніту складає 1,1 м) глибина проникнення магнітного поля в рейку знижується

настільки, що в цьому випадку можливий пропуск приповерхневих дефектів. Проведений теоретичний розрахунок показав, що гранична швидкість контролю вагоном дефектоскопом, при якій забезпечується впевнене виявлення дефектів на глибинах до 4 мм складає 110 км/год [12].

На практиці сканування залізничної колії проводиться при швидкостях не більше 70-80 км/год.

На величину і форму сигналу від небезпечних дефектів впливає також місце розташування давача між полюсами намагнічувального П-подібного електромагніту. У львівському вагоні-дефектоскопі № 442 давачі розміщені на віддалі -0,35 м від середини електромагніту, тобто біля північного N полюса, якщо враховувати, що переміщення вагона відбувається в напрямі від північного N до південного S полюса. Така геометрія розміщення давача пов'язана з тим, що під час руху дефектоскопа відбувається деформація намагнічувального поля електромагніту в напрямку його збільшення біля заднього (тильного) полюсу за напрямком руху.

На рис. 2.10 показані результати розрахунків сигналів від поперечної тріщини по коду 21 для різних координат розташування давача між полюсами електромагніту. З рис. 2.10 видно, що при зміщенні давача від заднього полюсу до переднього, тобто в напрямку руху вагона-дефектоскопа, з швидкістю V , відбувається суттєва зміна форми сигналу: зменшення амплітуди домінуючого імпульсу від'ємної полярності при наближенні до центру намагнічувального пристрою з подальшою зміною знаку на додатну полярність в області додатних координат. Окрім цього видно, що амплітуда сигналу при наближенні до заднього полюсу дещо більша, ніж при наближенні до переднього.

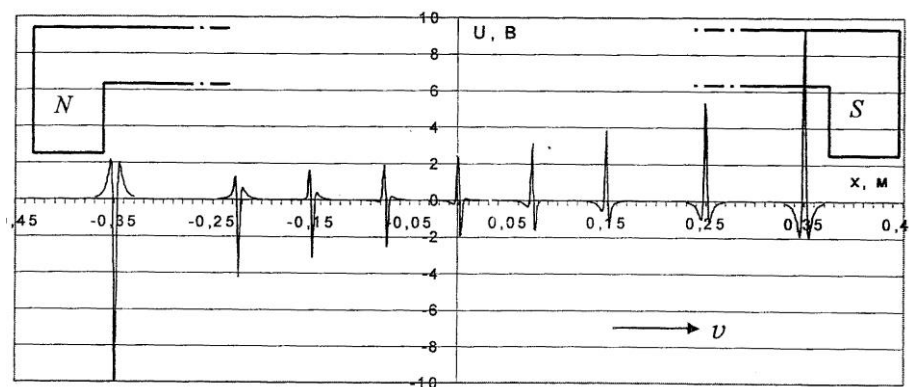


Рис. 2.10. Розрахункові форми сигналів від поперечної тріщини по коду 21 при зміні розташування давача в межах від -0,35 м до +0,35 м відносно середини П-подібної намагнічувальної системи [12].

Також на сигнал від поперечної тріщини рейки сильно впливає величина розкриву тріщини $b_{\text{деф}}$. На рис. 2.11 представлені результати числових експериментів з визначення залежності параметрів і форми сигналу від $b_{\text{деф}}$.

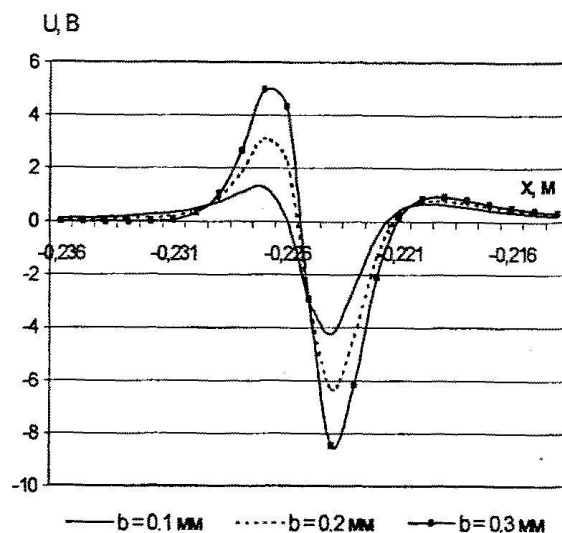


Рис. 2.11. Залежність форми сигналу дефекту по коду 21 від ширини розкриву $b_{\text{деф}}$ [12].

З графіку, поданого на рис. 2.11, видно, що при $b_{\text{деф}} = 0,1$ мм сигнал має класичну трьохімпульсну структуру з глобальним імпульсом; при $b_{\text{деф}} = 0,2$ мм структура дещо змінена, оскільки перший додатний імпульс у

1,5 рази більший; при $b_{\text{деф}} = 0,3$ мм структура сигналу близька до сигналу від рейкового стику. У цьому випадку амплітуда першого додатного імпульсу співмірна з амплітудою від'ємного глобального імпульсу. На основі цих результатів зроблений висновок [12], що за амплітудою першого додатного імпульсу сигналу від дефекту по коду 21 можна бачити динаміку росту тріщини, тобто збільшення потенційної небезпеки для експлуатації рейки. Якщо продовжити цей висновок, то можна сказати, що подальший ріст тріщини приводить до того, що форма цього сигналу фактично буде однаковою з образом сигналу від стику рейок на дефектограмі (якщо абстрагуватися від сигналів стикової накладки).

2.3.3. Сигнали від поздовжньої тріщини рейки.

Крім дефектів від поперечної тріщини МВД дозволяє виявляти дефекти за кодом 30.Г – поздовжнє горизонтальне розшарування головки рейки. Цей дефект спричинений наявністю неметалевих включень, витягнутих вздовж поверхні кочення на глибині більше 8 мм та є другим за поширеністю дефектом (близько 25% від виявлених гостродефектних рейок), який вимагає негайної заміни рейки. На рис. 2.12 представлена форма сигналу від цього дефекту в вигляді різнополярних від'ємного і додатного імпульсів, амплітуда і тривалість яких залежить від ступеня розвитку і довжини поздовжньої горизонтальної тріщини.

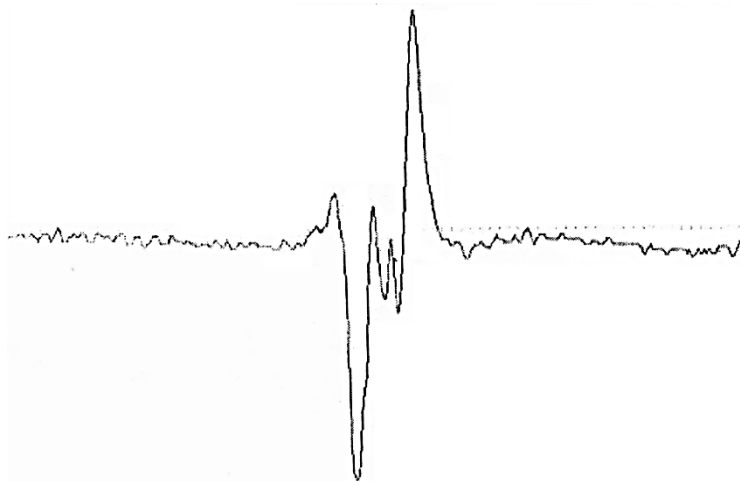


Рис. 2.12. Фрагмент дефектограми з дефектом типу 30.Г [49].

При великій довжині тріщини в середньому фрагменті сигналу від дефекту (між різнополярними імпульсами) сигнал приймає значення приблизно рівне значенню фону від рейкових підкладок. При цьому довжина власне цього фрагменту сигналу пропорційна довжині тріщини.

Закінчуючи розгляд образів сигналів від різних видів дефектів, слід зазначити, що крім сигналів від дефектів, підкладок, стикових з'єднань рейок на дефектограмі фіксують сигнали від різного роду незначних пошкоджень. Характерним для цих сигналів є порівняно невелика їх протяжність (в 10-15 разів менше, ніж протяжність сигналів від підкладок), та амплітуда, яка безпосередньо залежить від ступеня розвитку дефекту.

Оператор вагона-дефектоскопа візуально проглядаючи дефектограму, класифікує образи сигналів на основі власного досвіду та знань характерних ознак їх форми та приймає рішення про необхідність подальшого дослідження відповідної ділянки колії.

2.4. Методи для аналізу дефектоскопічних сигналів.

Для створення надійного алгоритму автоматичного виявлення сигналів від небезпечних дефектів рейок необхідно обрати оптимальну методику для обробки та аналізу дефектоскопічних сигналів. Загальноприйнятим підходом до аналізу сигналів $s(t)$ є їхнє представлення у вигляді підібраної суми простих складових – базисних функцій $\psi_k(t)$, помножених на коефіцієнти C_k :

$$s(t) = \sum_k C_k \cdot \psi_k(t). \quad (2.1)$$

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

На сьогодні, найбільш потужними методами для аналізу таких сигналів є перетворення Фур'є (ПФ) та вейвлет-перетворення (ВП).

Базисними функціями ПФ є синусоїди (або косинусоїди). Вони гранично локалізовані в частотній області, але дуже погано локалізовані (точніше, зовсім не локалізовані) в часовій.

Протилежний приклад синусоїди – імпульсна базисна функція:

$$\psi_k(t) = \delta_k(t) = \begin{cases} 1, k = t, \\ 0, k \neq t. \end{cases} \quad (2.2)$$

Вона чітко локалізована в часовій області і тому ідеально підходить для представлення розривів сигналу. Проте ця базисна функція не несе інформації про частоту сигналу, а тому, погано пристосована для представлення сигналів на заданому відрізку часу, і тим більше періодичних сигналів.

Вейвлети займають проміжне місце між розглянутими крайніми випадками (синусоїдою та імпульсною функцією). Базисними функціями вейвлетів можуть бути різноманітні функції, в тому числі схожі на модульовані імпульсами синусоїди, функції зі стрибками рівня і т.д. Це забезпечує легке представлення сигналів з локальними стрибками (і розривами) наборами вейвлетів того чи іншого типу. Майже всі вейвлети не мають аналітичного представлення у вигляді однієї формули і можуть задаватись ітераційним виразом. Тепер варто розглянути ПФ та ВП більш детально.

2.4.1. Перетворення Фур'є.

ПФ можна представити за допомогою наступної формули:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (2.3)$$

З позиції точного представлення перетворенням Фур'є довільних сигналів і функцій можна відмітити ряд його недоліків [51]:

- ПФ навіть для однієї заданої частоти вимагає значення сигналу не тільки в минулому, але і в майбутньому, що є теоретичною абстракцією;

- в умовах неможливості уникнути обмеження числа гармонік або спектру коливань, точне відтворення сигналу після прямого і оберненого ПФ теоретично (і, тим більше, практично) неможливе через появу ефекту Гібса (використання скінченного спектру для представлення неперіодичного імпульсу породжує додаткові коливання в сигналі).

- базисною функцією при розкладі в ряд Фур'є є гармонічне коливання (синусоїда або косинусоїда), яке математично визначене на всьому часовому інтервалі та має незмінні в часі параметри;

- числове інтегрування в часовій області від $-\infty$ до $+\infty$ при прямому ПФ і в частотній області від 0 до $+\infty$ при оберненому ПФ зустрічає великі обчислювальні перешкоди;

- окремі особливості сигналу (наприклад, розриви або піки), що особливо важливо знати при дослідженні дефектоскопічного сигналу, викликають незначні зміни частотного образу сигналу на всьому інтервалі частот від $-\infty$ до $+\infty$, які «розмазуються» по всій частотній осі, що робить їх виявлення за спектром практично неможливим;

- така плавна базисна функція як синусоїда (або косинусоїда), в принципі, взагалі не може представляти перепади сигналів з нескінченною крутизною, хоча такі сигнали використовуються дуже часто;

- єдиним можливим варіантом для виявлення швидких змін сигналів, таких як піки або перепади, є різке збільшення числа гармонік, які здійснюють вплив на форму сигналу і за межами його локальних особливостей;

- по складу вищих складових спектру практично неможливо оцінити місцезнаходження особливостей на часовій залежності сигналу і їхній характер;

- для нестационарних сигналів труднощі прямого і оберненого ПФ значно збільшуються.

Невеликі розриви (сходинки) на синусоїдальному або іншому плавно змінному сигналі важко виявити за допомогою його Фур'є-спектру, оскільки вони створюють множину вищих гармонік дуже малої амплітуди. Спектр таких сигналів містить ледь помітні високочастотні складові, за допомогою яких розпізнати локальну особливість сигналу, а тим більше її місце розташування та характер, практично неможливо. З цього слідує, що ПФ не годиться для виявлення швидких змін сигналів, що у випадку аналізу дефектоскопічного сигналу є найбільш пріоритетним завданням. Проте, за допомогою даного виду перетворень можна охарактеризувати кожен окремий сигнал від дефекту або регулярного елементу залізничної колії. Це дасть змогу виділити спільні ознаки для певних груп дефектоскопічних сигналів. Для прикладу наведемо сигнал від дефекту поперечної тріщини в головці рейки (рис. 2.13) і його частотний спектр [52] (рис. 2.14) отриманий за допомогою ПФ в середовищі комп'ютерної математики MATLAB.

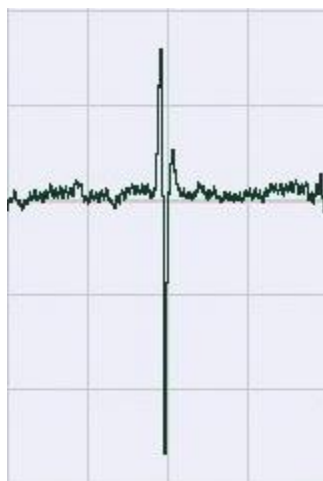


Рис. 2.13. Форма сигналу від дефекту по коду 21 (поперечна тріщина в головці рейки).

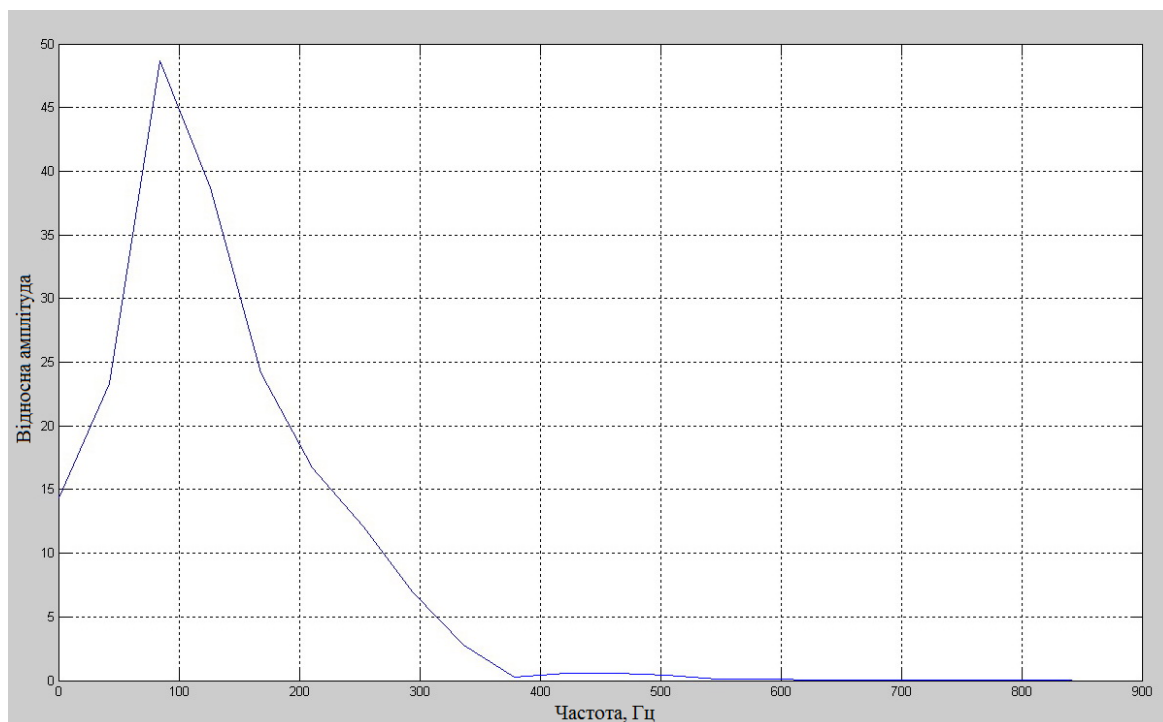


Рис. 2.14. Спектр сигналу від поперечної тріщини в головці рейки, яку було виявлено підчас заїзду Львів - Сянки – Чоп, 06.11.2009 р. (км:36 пікет:6 швидкість 47 км/год).

Результати аналізу спектру повністю узгоджуються з дослідженнями які робились по даній темі Власовим В.В., Ушаковою Г.Г. та Успенским Е.И. [23, 24].

2.4.2. Віконне перетворення Фур'є.

Для можливості, з певною точністю, виявляти локальні особливості дефектоскопічних сигналів (такі як сигнали від дефектів) та їх місце розташування, необхідно використати короткочасне або віконне перетворення Фур'є (ВПФ) [53]:

$$F(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (2.4)$$

В ньому, на відміну від ПФ (2.3), функція $s(t)$ під знаком інтегралу додатково помножується на віконну функцію $w(t - \tau)$. Параметр τ вікна задає його зсув на часовій осі. Зазвичай задається ряд фіксованих значень τ в межах повного вікна. Наприклад, для найпростішого прямокутного

вікна функція $w(t - \tau)$ в межах вікна дає 1, а за межами вікна перегляду – 0. При цьому, для кожного вікна ми отримуємо свій набір комплексних амплітуд сигналу в частотній області.

Все вищесказане пояснює рис. 2.15.



Рис. 2.15. Ілюстрація методу ВПФ.

Вікно показане на часовій залежності сигналу (зліва), переміщується стрибками і за деяке число таких переміщень дозволяє «переглянути» весь сигнал. В кожному вікні відбувається свій спектральний розклад, так що замість зазвичай присутньої однієї спектрограми (візуального представлення спектру частот сигналу в залежності від часу) тепер буде отримано набір спектрограм схематично показаний в правій частині рис. 2.15 у вигляді прямокутників. Таким чином, отримується множина спектрів, кожен фрагмент з якої, відноситься до визначеної ділянки в часі. Це дозволяє будувати спектрограми для аналізу нестационарних сигналів.

Віконне перетворення Фур'є, будучи більш складним ніж звичайне перетворення Фур'є, не позбавлене від його принципових недоліків пов'язаних з тим, що базисною функцією спектрального розкладу залишається синусоїда. Крім того, вікна в цьому перетворенні мають фіксовані розміри і їх важко адаптувати під конкретне представлення локальних властивостей сигналу [54].

2.4.3. Вейвлет-перетворення.

Близько чверть століття тому математики відкрили нові базисні функції у вигляді коротких «хвиль» - вейвлетів, які здатні зміщуватись по осі часу (параметр b) і змінювати свою ширину (параметр a):

$$\psi(t) \equiv \psi(a, b, t) = a^{-1/2} \cdot \psi_0\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (2.5)$$

Однією з основоположних ідей ВП сигналів було розбиття наближення до сигналу на дві складові – грубу (апроксимуючу) і чітку (складову деталізації) – з подальшим їх дрібленням для зміни рівня декомпозиції сигналу. Саме тому, в основі ВП лежить використання двох неперервних та інтегрованих по всій осі часу функцій:

- вейвлет-функції $\psi(t)$ з нульовим значенням інтегралу:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0, \quad (2.6)$$

яка визначає деталі сигналу та утворює коефіцієнти деталізації;

- масштабувальної або скейлінг-функції $\varphi(t)$ з одиничним значенням інтегралу:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt = 1, \quad (2.7)$$

яка визначає грубе наближення (апроксимацію) сигналу і утворює коефіцієнти апроксимації.

Вейвлет-функція $\psi(t)$ створюється на основі базової функції $\psi_0(t)$, яка як і $\psi(t)$, визначає тип вейвлету.

Функція $\varphi(t)$ характерна далеко не для всіх вейвлетів, а тільки для тих, які відносяться до ортогональних. Найсуттєвішими перевагами ортогональних вейвлетів є:

- можливість відновлення (реконструкції) не тільки локальних особливостей сигналу $s(t)$, але і сигналу в цілому;

- можливість здійснення швидких вейвлет-перетворень.

Всі вейвлети характеризуються своїми обмеженими часовим і частотним образами – рис. 2.16.

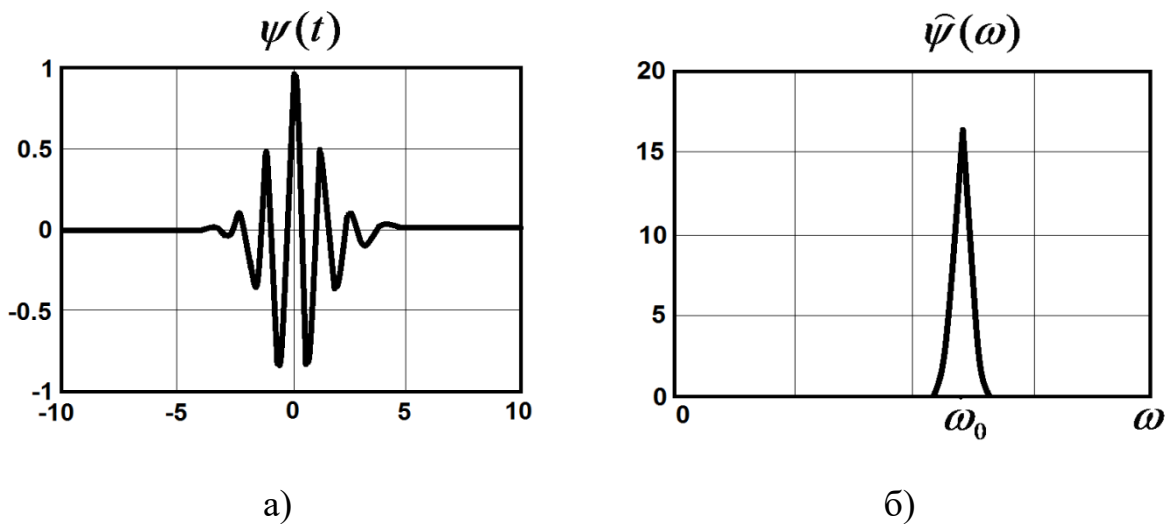


Рис. 2.16. Часовий (а) і частотний (б) образи вейвлету [51].

Часовий образ визначається функцією $\psi(t)$ (рис. 2.16 а), а частотний – її Фур’є-образом $\hat{\psi}(t)$, який задає огинаючу спектру вейвлету (рис. 2.16 б). Якщо вейвлет в просторі звужується, його «середня частота» збільшується, спектр зміщується в область більш високих частот і розширюється. Цей процес можна вважати лінійним – якщо вейвлет звужується в два рази, то його середня частота і ширина спектру зростають також в два рази, тобто великим значенням параметру a відповідають нижні частоти, а малим – вищі частоти за шкалою герц.

Ілюстрація методу ВП зображена на рис. 2.17.



Рис. 2.17. Ілюстрація ВП сигналу.

Отже, за допомогою ВП сигнал представляється сукупністю хвилевих пакетів-вейвлетів, утворених на основі деякої базисної (материнської)

функції $\psi_0(t)$. Ця сукупність різна в різних частинах часового інтервалу визначення сигналу і представляє останній з тим чи іншим ступенем деталізації. Такий підхід називають вейвлет-аналізом сигналів.

З вищенаведеного можна виділити чотири принципово важливі властивості, якими володіють всі вейвлети:

- мають вигляд коротких, локалізованих в часі хвильових пакетів з нульовим значенням інтегралу вейвлет-функції;
- можуть зміщуватись по осі часу;
- здатні до масштабування (стиснення – розтягнення);
- мають обмежений частотний спектр.

Такі властивості вейвлетів дозволяють їм пристосовуватись під локальну особливість сигналу, чого не можна було отримати при ВПФ. Крім того, в якості базової функції можна не лише обрати існуючу, але і створити власну, яка буде найкраще підходити під вимоги конкретного завдання. Саме через ці переваги було вирішено використовувати ВП для аналізу дефектоскопічних сигналів.

2.5. Висновки до розділу 2.

1. Описано регулярні елементи залізничної колії та сигнали які вони формують у МВД. Знання особливостей таких сигналів дозволяє вирізнити на їх фоні сигнали від небезпечних дефектів, що є головним завданням при дефектоскопії залізничних рейок.

2. Проаналізовано вплив на форму сигналу від поперечної тріщини в головці рейки таких факторів як: швидкість руху вагона-дефектоскопа, розмір, глибина залягання, ширина розкриву тріщини та наявність виходу на поверхню. Це дало змогу виокремити основні властивості сигналів від вказаного дефекту, які в подальшому були враховані при побудові материнської вейвлет-функції для ВП.

3. Розглянуто основні методи ЦОС з позиції їх застосування для аналізу дефектоскопічних сигналів отриманих МДМ. Були зроблені наступні висновки:

- ПФ можна використати для характеристики спектру сигналів від окремих дефектів, однак не для визначення їх розташування.
- ВПФ дозволяє локалізувати сигнали від дефектів на часовій осі, але має наступні недоліки: базисною функцією є синусоїда (косинусоїда), яка погано підходить для представлення імпульсних сигналів від дефектів; відсутність адаптивності розмірів вікна спектрального розкладу до особливостей конкретних сигналів від дефектів.
- ВП позбавлене принципових недоліків характерних для ВПФ. Крім того, воно дає змогу створити базисну функцію з властивостями, які найбільш важливі при виявленні сигналів від дефектів. Саме тому, вибір методу для аналізу дефектоскопічних сигналів зупинився на ВП.

РОЗДІЛ 3

ЗАСТОСУВАННЯ НЕПЕРЕРВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДЕФЕКТОСКОПІЧНИХ СИГНАЛІВ

3.1. Неперервне вейвлет-перетворення.

Неперервним вейвлет-перетворенням (НВП) сигналу називається обчислення вейвлет-коефіцієнтів в області визначення R :

$$C(a,b) = \int_R s(t) \cdot a^{-1/2} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (3.1)$$

Інтегральне перетворення (3.1), яке використовується для різних вейвлетів, називається неперервним, якщо параметри масштабу a та зміщення b в процесі обробки сигналу приймають будь-які дійсні значення. Воно є збитковим за затратами часу на обчислення, проте дозволяє досягнути найбільшої деталізації при аналізі сигналів, яка обмежена лише принципом невизначеності [55]. На сучасних персональних комп'ютерах час такого аналізу складає долі (одиниці) секунди, тобто того ж порядку (а часто набагато менше), що і в сучасних аналізаторів спектру з апаратною реалізацією Фур'є-аналізу [56].

Згідно (3.1) слідує, що чим подібніша материнська вейвлет-функція НВП до фрагменту сигналу $s(t)$, – тим більшими будуть значення вейвлет-коефіцієнтів в місці розташування даного фрагменту. Тобто, для виявлення локальної особливості (наприклад, такої як сигнал від дефекту) необхідно, щоб материнська вейвлет-функція за своїм образом була якомога подібнішою до даної особливості. Саме тому, перш ніж здійснювати НВП дефектоскопічного сигналу необхідно визначитись з об'єктом пошуку та створити на його основі материнську функцію (якщо жоден з існуючих вейвлетів не підійде для цього завдання). Оскільки поперечна тріщина в

головці рейки (дефект по коду 21) є найпоширенішим та найнебезпечнішим дефектом залізничної колії то саме сигнали від цього типу дефекту представляють найбільше зацікавлення при дефектоскопії залізничних рейок. Тому, в подальших дослідженнях, саме такі сигнали будуть об'єктом нашого пошуку.

Слід також зазначити, що для НВП не є обов'язковим використання ортогональних вейвлетів, що значно полегшує підбір материнської функції.

3.2. Створення материнської вейвлет-функції НВП, адаптованої до виявлення сигналу від поперечної тріщини в головці рейки.

3.2.1. Модель сигналу від поперечної тріщини.

Для визначення форми сигналу, яка наведеться в пошуковому давачі необхідно знати магнітне поле збурення від дефекту [57]. Існує багато математичних моделей, які дозволяють описати це поле. В найпростішому випадку поле від дефекту може бути описане як поле двопровідної лінії відстань між провідниками якої відповідає висоті дефекту [58]. Однак, ця модель не може врахувати, наприклад, зміщення дефекту відносно осі рейки.

В інших роботах для опису поля тріщини використовуються або пара магнітних зарядів, або магнітний момент [59]. В роботі [60], наприклад, використовується комбінація з двох зарядів. Ця модель є двомірна, тобто вважається, що дефект є поперечний і розподілений по всій ширині головки рейки.

Для нашого дослідження найкраще підійде модель намагніченої рейки на основі дискретного набору рамок зі струму [61]. У цьому випадку, намагнічену речовину можна розглядати як певний об'єм, що заповнений елементарними контурами зі струмом. Під дією зовнішнього поля ці

контури орієнтуються так, що напрям їх полів співпадає. На рис. 3.1 а, для прикладу, показано циліндричне феромагнітне тіло під дією зовнішнього магнітного поля створеного струмом I .

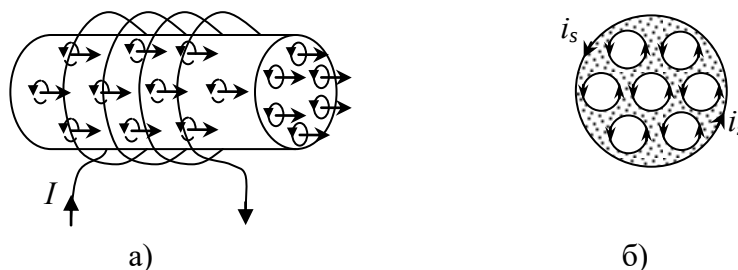


Рис. 3.1. Феромагнітне тіло під дією зовнішнього магнітного поля (а), та його поперечний переріз (б) [62].

Поворот усіх елементарних контурів зі струмами до повного співпадіння їх поля з напрямком зовнішнього поля (створеного струмом I) досягається при великих значеннях намагнічувального поля — поля насичення. При менших значеннях зовнішнього поля має місце лише неповний поворот елементарних контурів. В цьому випадку результуюче поле буде визначатися сумою складових, які за напрямком співпадають з зовнішнім полем. Якщо розглянути поперечний переріз намагніченого тіла то картина поперечних контурних струмів може бути представлена так як показано на рис. 3.1 б. З неї видно, що напрямок струмів сусідніх елементарних контурів протилежні і, у випадку однорідного поля і однорідної речовини, їх дія взаємно компенсується. Некомпенсованими залишаються тільки струми i_s на поверхні тіла. Ці струми неперервно розподілені вздовж поверхні тіла. Їх величина залежить від величини намагнічувального поля і параметрів речовини, але не залежить від розмірів цього тіла.

Виходячи зі сказаного вище, залізничну рейку, намагнічену в поздовжньому напрямку магнітною системою вагона-дефектоскопа, можна розглядати як одношаровий соленоїд складної форми, що має рівномірно розподілену обмотку, форма якої співпадає з формою цієї рейки.

На рис. 3.2 схематично показані поверхневі струми на поверхні рейки, які виникають в результаті намагнічування.

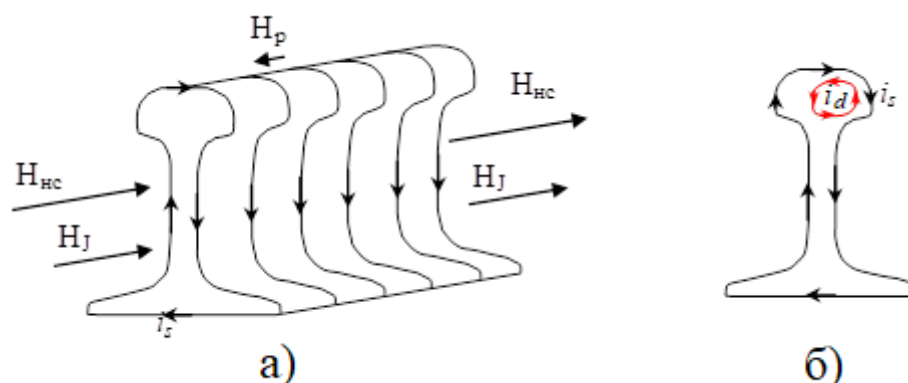


Рис. 3.2. Струми, що виникають на поверхні рейки при намагнічуванні поздовжнім магнітним полем (а) та формування струму дефекту (б) [61].

При наявності дефекту в рейці утворюється область, параметри якої відрізняються від параметрів справної рейки, а тому внутрішні струми будуть інші. У результаті, в цій області внутрішні струми не будуть повністю компенсуватися, або просто будуть відсутні, що зручно врахувати увівши новий контур зі струмом дефекту i_d , напрямок якого протилежний до напрямку струму на поверхні рейки i_s . Останнє призведе до збурення поля розсіяння і дозволить локалізувати дефект. Формування струму дефекту схематично показано на рис. 3.2 б [61].

Таке представлення дозволяє при відомій магніторухійній силі намагнічувальної системи та параметрах магнітопроводу вагона-дефектоскопа розрахувати магнітний потік в рейці. Далі, замінивши намагнічену рейку системою контурів зі струмами, можна розрахувати ці струми, визначивши заздалегідь їх власні і взаємні індуктивності за взаємним розташуванням. Результуюче поле – це суперпозиція полів від усіх рамок моделі [63].

На рис. 3.3-3.5 представлені змодельовані (на основі вищеописаної моделі) форми сигналу від сильно розвиненої поперечної тріщини в

головці рейки при різних глибинах залягання дефекту [61, 64], де спостерігається типова зміна форми сигналу [60, 65], яка в кінцевому результаті схожа на сигнал від стику.

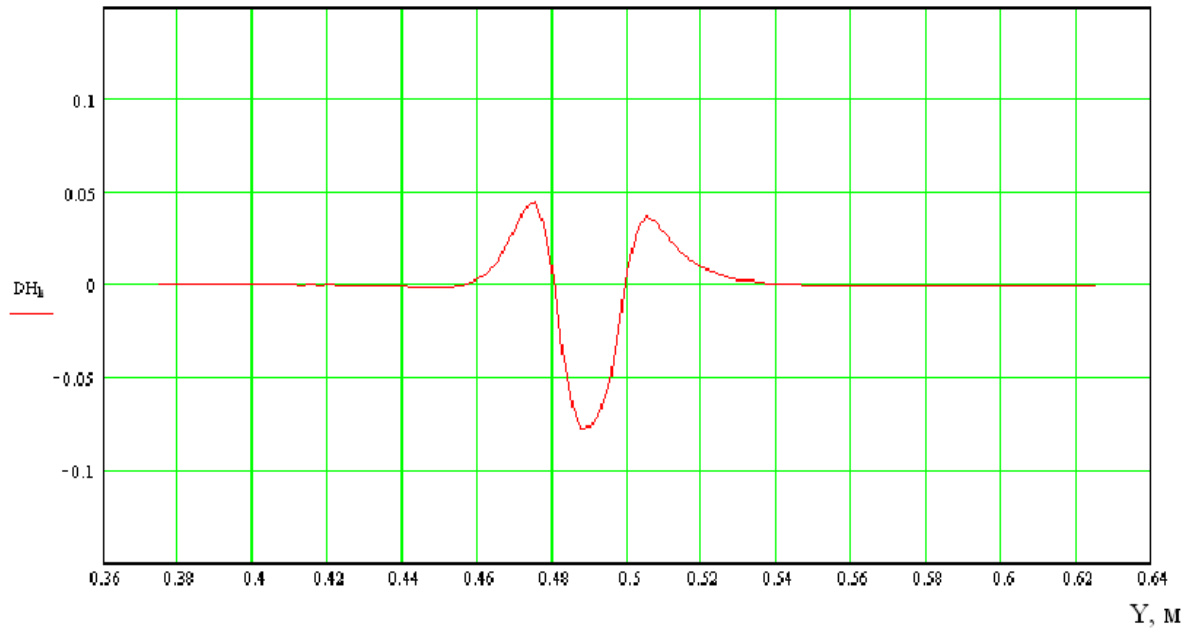


Рис. 3.3. Змодельована форма сигналу від поперечної тріщини при глибині залягання дефекту 5 мм [61].

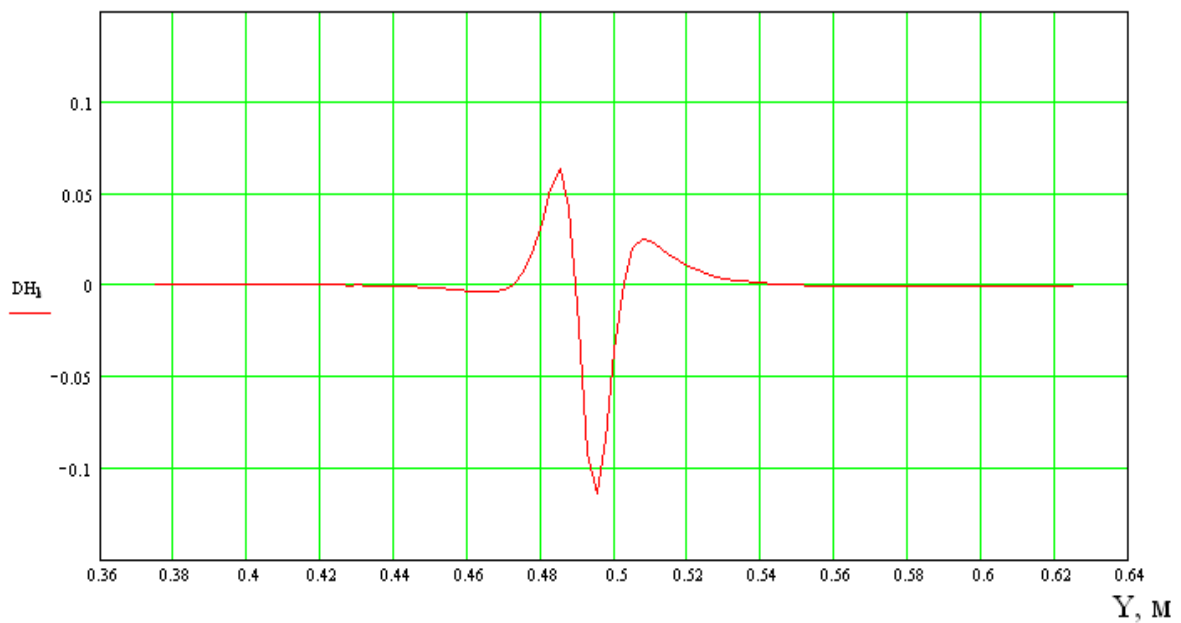


Рис. 3.4. Змодельована форма сигналу від поперечної тріщини при глибині залягання дефекту 2 мм [61].

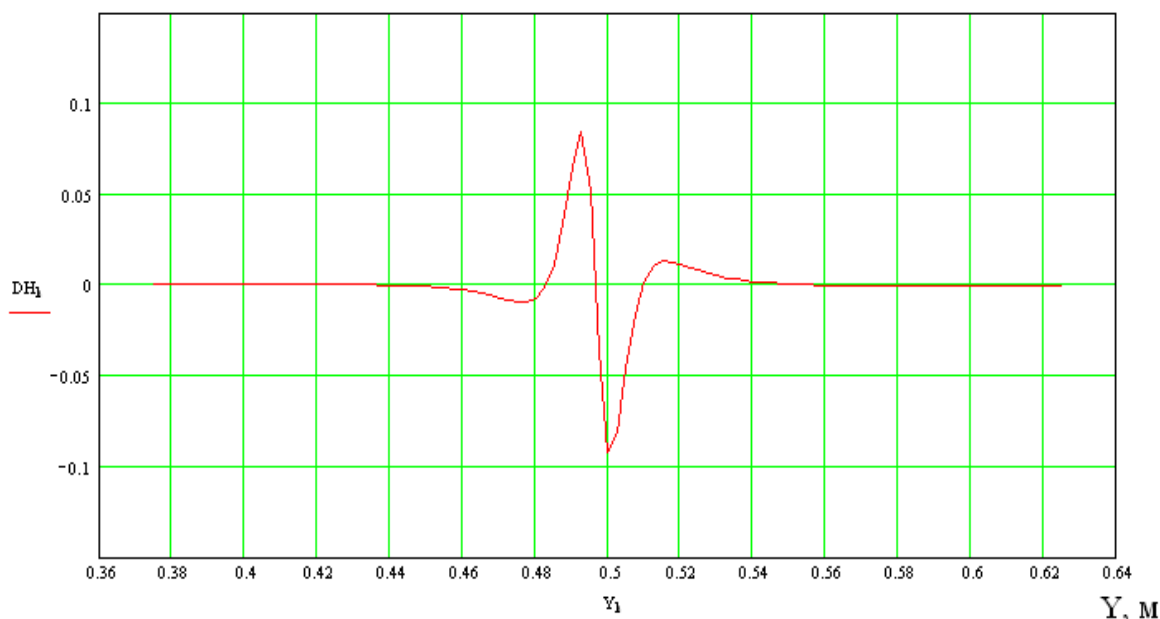


Рис.3.5. Змодельована форма сигналу від поперечної тріщини при виході тріщини на поверхню [61].

3.2.2. Вибір зразку сигналу, який відповідає основним властивостям форми сигналів від поперечної тріщини.

На рис. 3.6 а представлено реальний сигнал від поперечної тріщини в головці рейки (отриманий під час заїзду Львів – Сянки – Чоп, 06.11.2009 р.), який в подальшому буде використано в якості об'єкту для виявлення. Як видно, реальний сигнал відповідає основним ознаками форми сигналу від поперечної тріщини (п. 2.3.2), однак достатньо відрізняється від типового (представленого на рис. 2.6). Це пояснюється тим, що на практиці ідентичних сигналів не буває і можливі деякі відхилення форми викликані перш за все розташуванням, розміром дефекту та налаштуванням системи намагнічування.

Виходячи з основних властивостей сигналу від поперечної тріщини (п. 2.3.2) та використовуючи вищеописану модель, було створено зразок сигналу від поперечної тріщини в головці рейки (рис. 3.6 б) [66], який буде використано в якості базису при побудові материнського вейвлету.

Варто також зазначити, що в якості зразку можна було б взяти і реальний сигнал [67] зображений на рис. 3.6 а, але це негативно б відобразилось на узагальнюючих властивостях вейвлету.

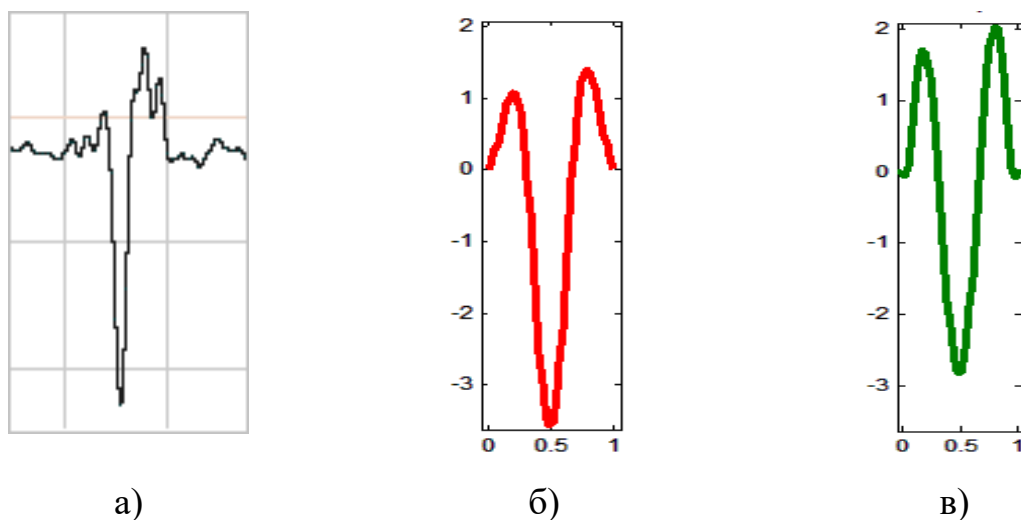


Рис. 3.6. Реальний сигнал від поперечної тріщини рейки (а), зразок сигналу від даного дефекту (б) та його апроксимоване значення (в) [68]

3.2.3. Створення вейвлету на основі зразку сигналу від поперечної тріщини.

Як вже згадувалось, НВП передбачає наявність функції $\psi(t)$, що визначає деталі сигналу і породжує вейвлет-коефіцієнти деталізації, і яка повинна відповідати умові нульового середнього значення (2.6). Для виконання цієї умови було здійснено апроксимацію зразку сигналу від дефекту (рис. 3.6 б) поліномом 6-го порядку на інтервалі $[0,1]$ (рис. 3.6 в) методом найменших квадратів [69, 70]:

$$\sum_{k=1}^K [\psi(t) - y_k]^2 = \min, \quad (3.2)$$

так, щоб

$$\int_0^1 \psi(t) dt = 0, \quad (3.3)$$

де y_k – заданий взірець (зразок); $\psi(t)$ – шукана материнська вейвлет-функція.

В точках 0 та 1 виконуються граничні умови $\psi(0) = 0$ та $\psi(1) = 0$.

Також необхідно здійснити нормування вейвлет-функції $\psi(t)$:

$$\|\psi(t)\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1. \quad (3.4)$$

Нормування (в MATLAB воно виконується автоматично при збереженні апроксимованого значення взірця) потрібне для того, щоб за допомогою коефіцієнтів $C(a,b)$ можна було відновити аналізований сигнал $s(t)$ за наступною формулою:

$$s(t) = \frac{1}{K_\psi} \int_{R^+} \int_R C(a,b) \cdot a^{-1/2} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dad b}{a^2}, \quad (3.5)$$

де K_ψ – константа, яка визначається функцією $\psi(t)$.

НВП на основі тільки функції деталізації $\psi(t)$ здатне відновити (реконструювати) лише тонкі деталі часової залежності сигналу $s(t)$. Для відновлення повної форми сигналу необхідна апроксимуюча функція $\varphi(t)$, яка характерна лише ортогональним вейвлетам.

Після вищезгаданих апроксимації та нормування зразок сигналу від поперечної тріщини відповідає вимогам пред'явленим до базисної функції НВП і може використовуватись для побудови скейлограм (скейлограма показує значення коефіцієнтів вейвлет-перетворення в площині «масштаб – час» (або «масштаб – відліки»)). Однак, не завжди, новостворена вейвлет-функція, в достатній мірі, відображає особливості форми зразку. Це пояснюється тим, що форма сигналу дещо спотворилась після апроксимації. Тому, необхідно виконати перевірку створеного вейвлету на

можливість виконання поставленого перед ним завдання та здійснити порівняння його можливостей з іншими вейвлетами [71].

3.2.4. Тестування створеного вейвлету на точність виявлення сигналів від поперечної тріщини.

Для тестування нових та стандартних вейвлет-функцій MATLAB створює тестовий сигнал (рис. 3.7), який описується наступною формулою:

$$S(t) = f\left(\frac{t-20}{8}\right) + \sqrt{2} \cdot f\left(\frac{t-40}{4}\right). \quad (3.6)$$

З формули слідує, що даний тестовий сигнал побудований розтягненням, зсувом і додаванням хвиль $f(t)$ зразку сигналу від поперечної тріщини.

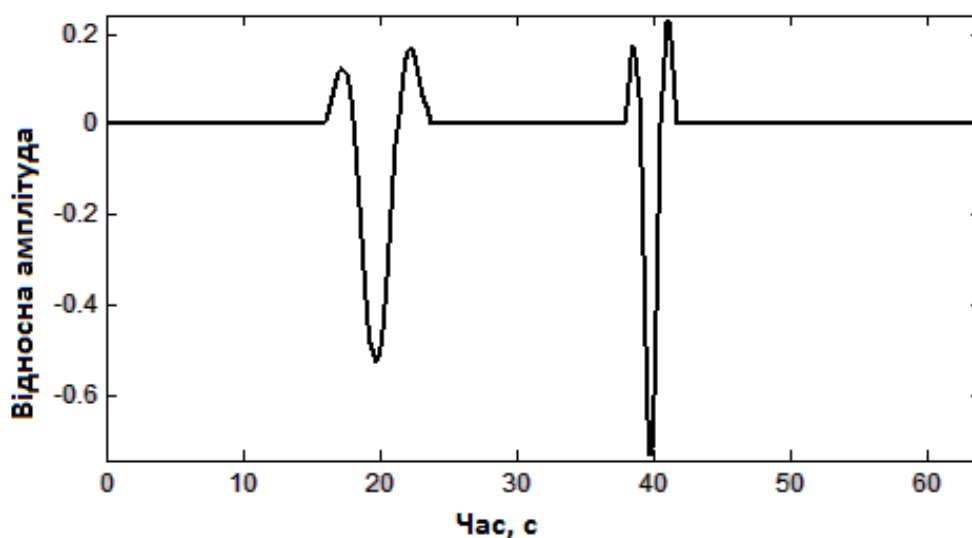


Рис. 3.7. Сигнал $S(t)$ для тестування створеного вейвлету (рис. 3.6 в).

НВП тестового сигналу за допомогою адаптованої вейвлет-функції, зображеної на рис. 3.8 а (вона називається адаптованою тому, що створена для виявлення сигналів конкретної форми), дає інформацію про місце розташування сигналів, схожих на сигнал від поперечної тріщини рейки, в

часі (позиції 20 і 40 на часовій осі) і масштабі (позиції 8 і 4 на масштабній осі скейлограми). Звичайно, в ідеалі, локалізація даних сигналів на скейлограмі повинна бути у вигляді двох точок. Однак, оскільки НВП – це кореляція масштабованої та зміщеної вейвлет-функції з аналізованим сигналом, то в залежності від масштабу та розміщення материнської вейвлет-функції стосовно сигналу, що піддається аналізу, НВП буде обчислювати різні коефіцієнти кореляції (вейвлет-коефіцієнти). На скейлограмі (рис. 3.8 б) в позиції 20 (на часовій осі) найбільше значення коефіцієнтів кореляції припадає на діапазон масштабів від 7 до 9, а в позиції 40 – приблизно на 4 масштаб. Це свідчить про добру роздільну здатність як за часом, так і відносно масштабу.

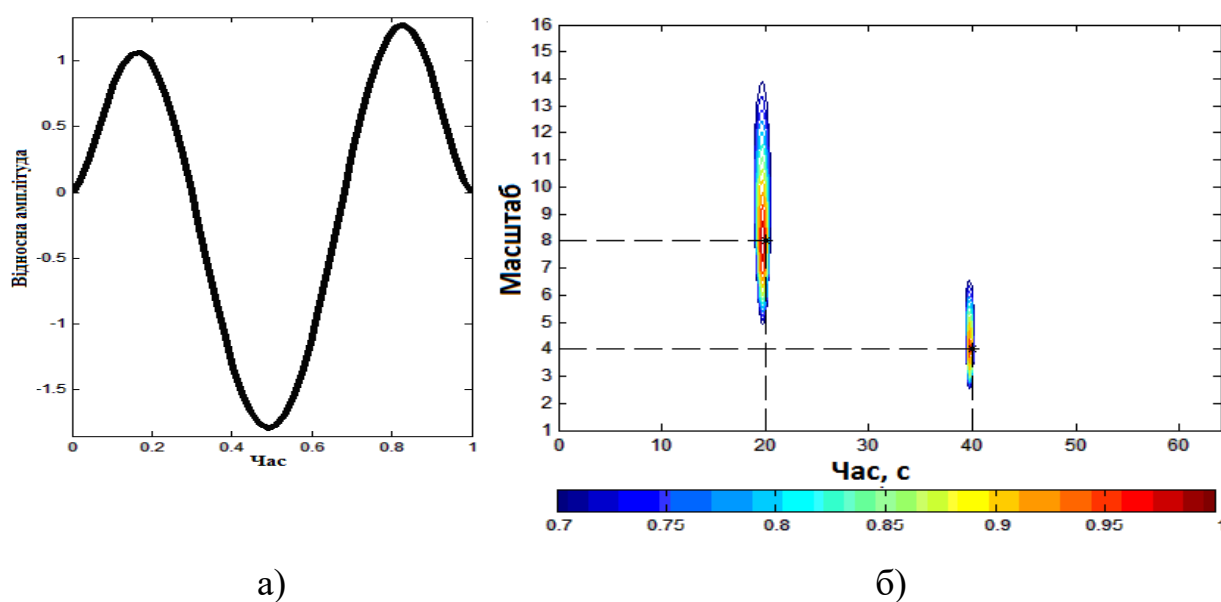


Рис. 3.8. Вейвлет-функція $\psi(t)$, яка адаптована до виявлення сигналу від поперечної тріщини в головці рейки (а) та скейлограма (б) тестового сигналу $S(t)$ (рис. 3.7) отримана за її допомогою [69].

3.2.5. Порівняння точності виявлення локальних особливостей тестового сигналу за допомогою адаптованої та наявних стандартних вейвлет-функції в MATLAB.

Оскільки стандартних вейвлет-функцій є достатньо багато, то можна обмежитись кількома окремими прикладами.

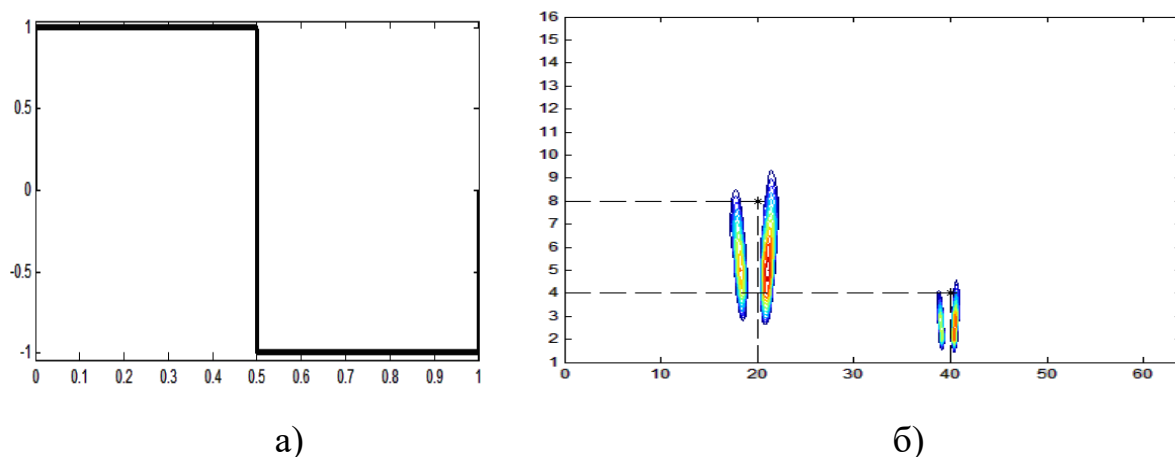


Рис. 3.9. $\psi(t)$ – функція вейвлету Хаара (а) та скейлограма (б) тестового сигналу $S(t)$ отримана за її допомогою [69].

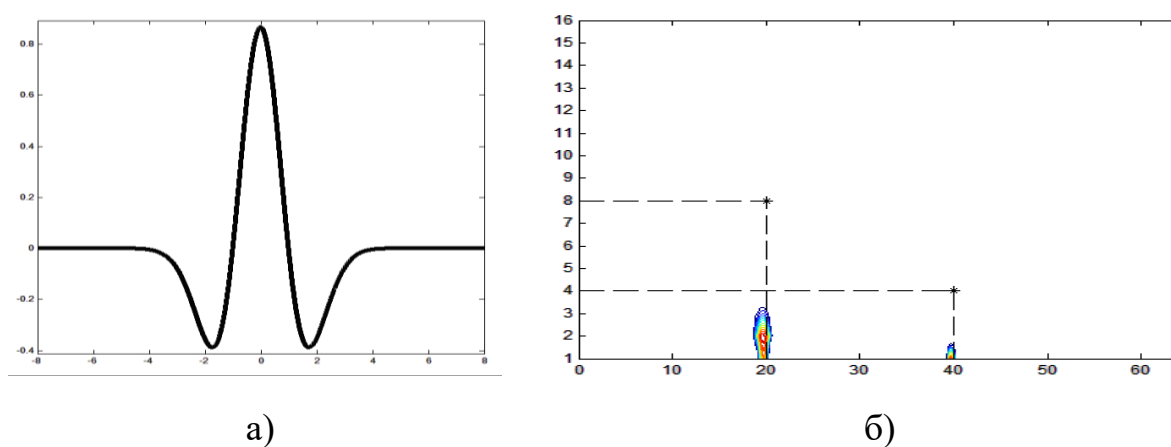


Рис. 3.10. $\psi(t)$ – функція вейвлету мексиканський капелюх (а) та скейлограма (б) тестового сигналу $S(t)$ отримана за її допомогою [69].

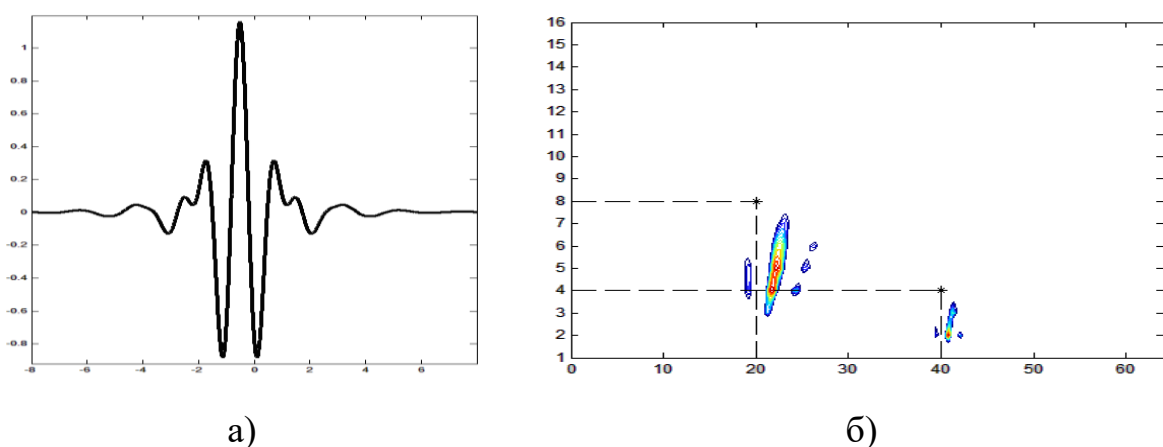


Рис. 3.11. $\psi(t)$ – функція вейвлету Мейєра (а) та скейлограма (б) тестового сигналу $S(t)$ отримана за її допомогою [69].

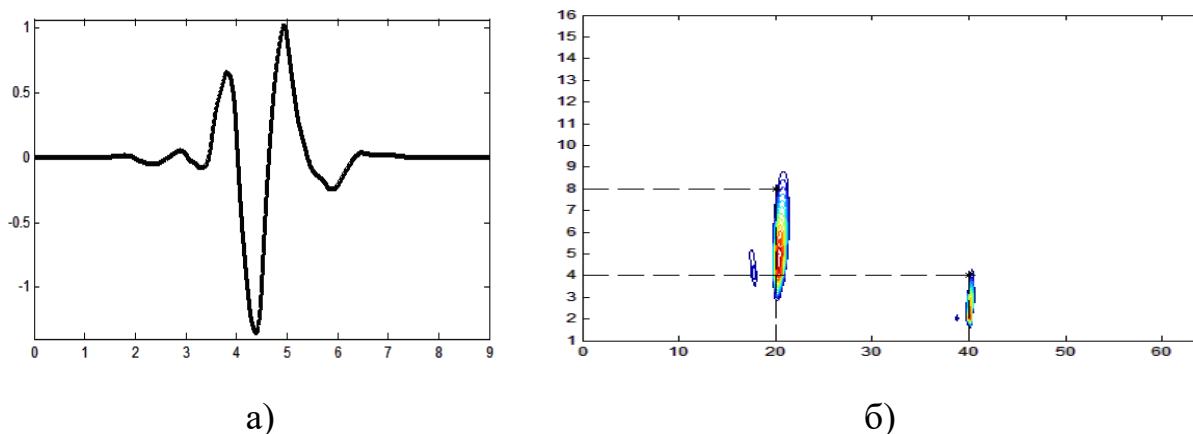


Рис. 3.12. $\psi(t)$ – функція вейвлету симлет 5-го порядку (а) та скейлограма (б) тестового сигналу $S(t)$ отримана за її допомогою [69].

Як видно з рис. 3.9-3.12 жоден зі стандартних вейвлетів не дає кращого результату (не забезпечує більш точної локалізації особливостей сигналу $S(t)$ як за часом, так і за масштабом) ніж адаптована вейвлет-функція. Це пояснюється тим, що чим подібніша $\psi(t)$ – функція вейвлету до образу сигналу, який очікується знайти – тим точнішим (за часом) та достовірнішим (за масштабом) буде його виявлення.

3.2.6. Алгоритм створення материнського вейвлету, адаптованого до виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок.

Взявши за основу процес створення материнської вейвлет-функції, адаптованої до виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки, на рис. 3.13 представлено алгоритм створення вейвлетів для інших типів дефектів.

3.3. Аналіз дефектограми за допомогою НВП з використанням вейвлету, адаптованого до виявлення сигналів від поперечної тріщини.

3.3.1. Виявлення сигналу від розвиненого дефекту.

На рис. 3.14 зображено фрагмент дефектоскопічного сигналу (дефектограма) 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).



Рис. 3.13. Алгоритм створення вейвлет-функції для НВП, адаптованої до виявлення сигналів від дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок

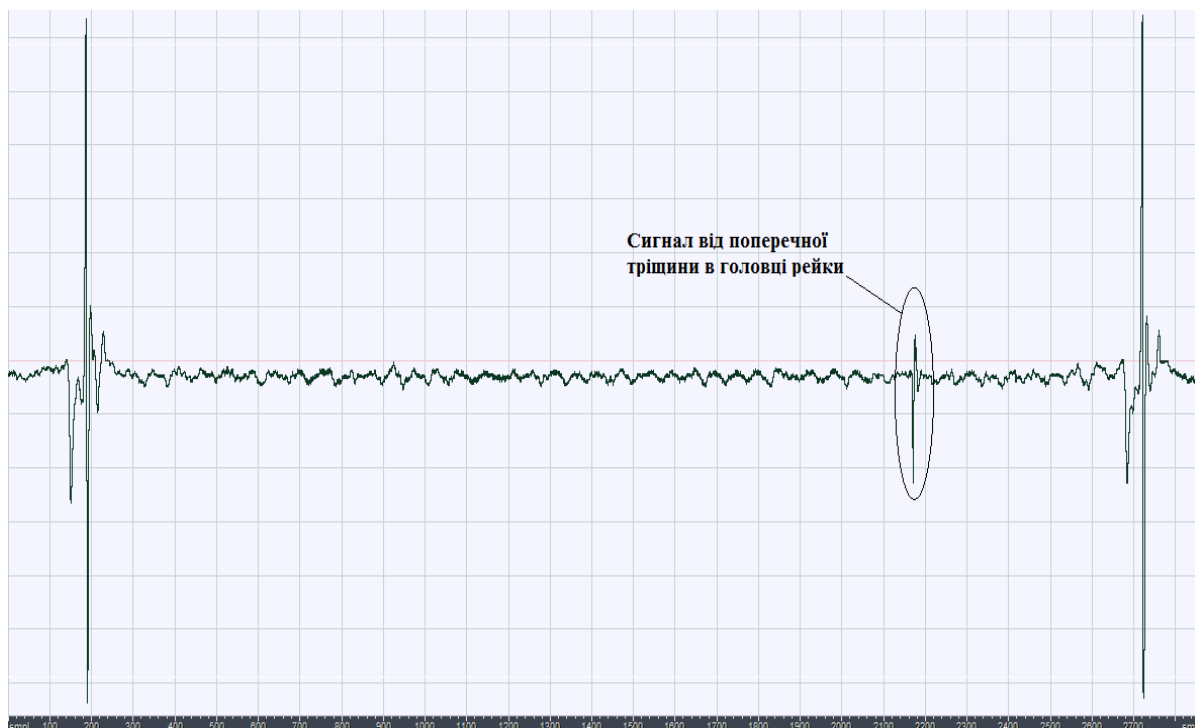


Рис. 3.14. Фрагмент дефектоскопічного сигналу з поперечною тріщиною рейки по коду 21.2, отриманий підчас заїзду Львів - Сянки – Чоп, 06.11.2009 р. (км:36 пікет:6 швидкість 47 км/год) [72]

Тепер варто проаналізувати вищезазначений фрагмент (рис. 3.14) за допомогою НВП та з використанням адаптованого вейвлету (рис. 3.8 а). Результатом проведення цього аналізу є побудова скейлограми (рис. 3.15) [73], яка показує значення коефіцієнтів вейвлет-перетворення в площині «масштаб – відліки».

На рис. 3.16 ця скейлограма подана в 2D представленні [74, 75], причому чим більша величина вейвлет-коефіцієнтів – тим темнішим кольором вони відображаються на скейлограмі. В місці, де розташований дефект, чітко виділяється вертикальна лінія чорного кольору, яка свідчить про наявність в цій точці осі відліків – сигналу, форма якого дуже схожа на адаптований вейвлет [76].

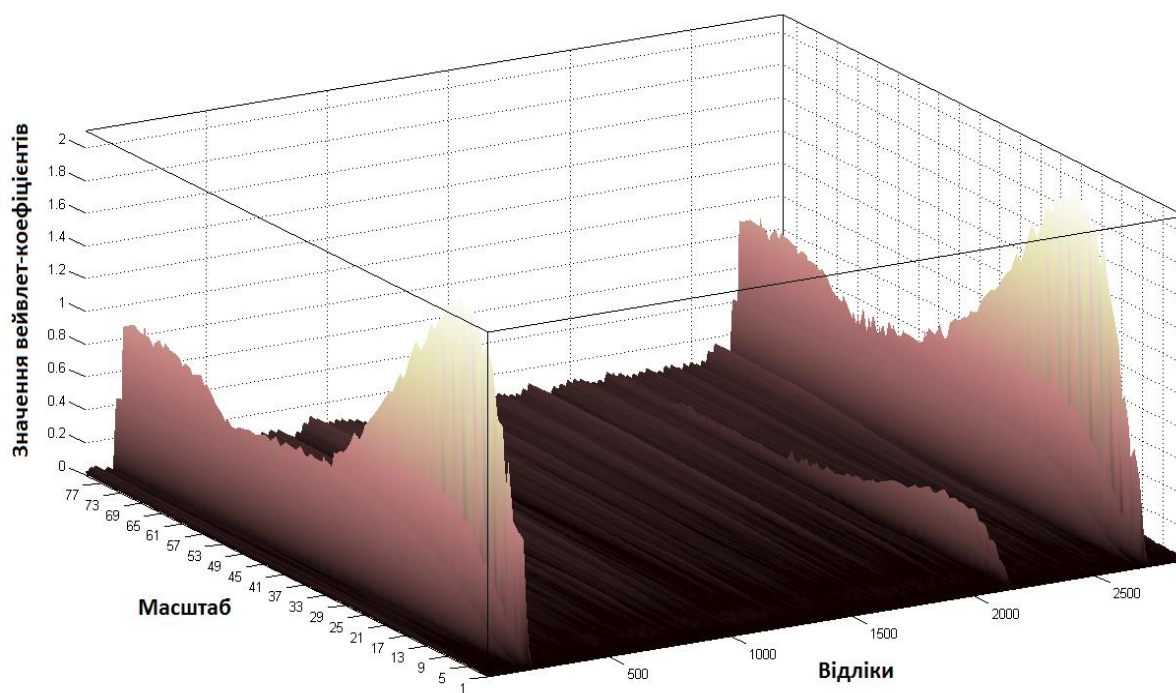


Рис. 3.15. Скейлограма дефектоскопічного сигналу (зображеного на рис. 3.14), отримана в процесі виконання НВП [73] із використанням вейвлету, адаптованого до виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки.

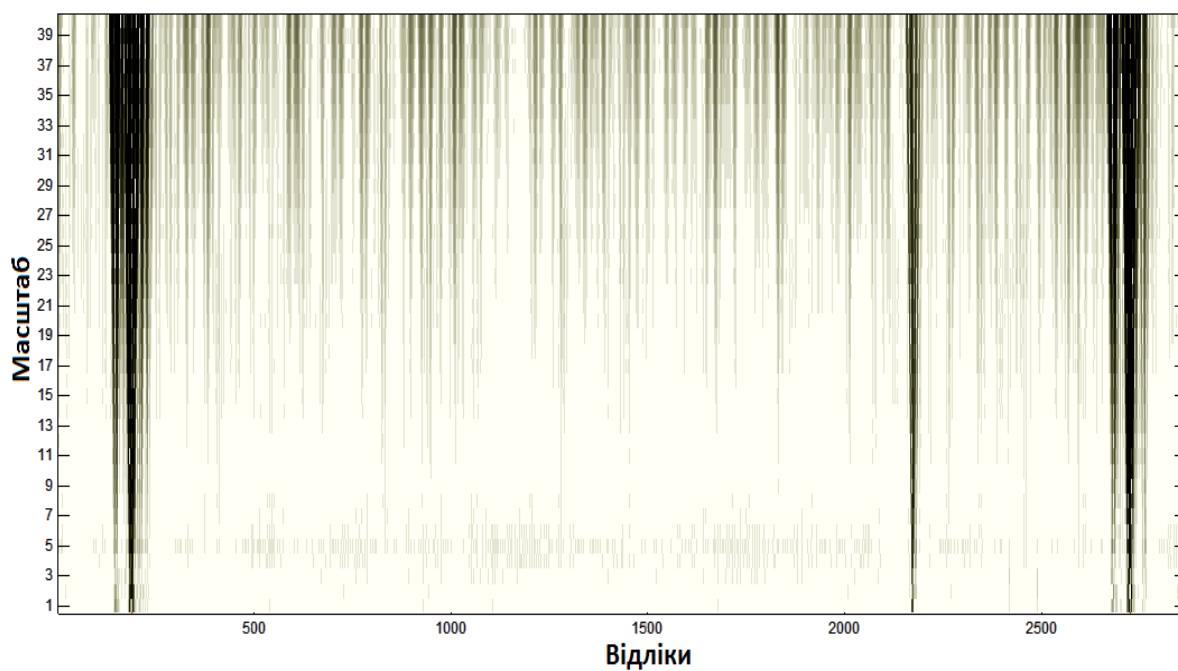


Рис. 3.16. Скейлограма дефектоскопічного сигналу (рис. 3.14) подана в 2D представленні [74].

На скейлограмі також помітні вертикальні відрізки блідо-сірого кольору (відповідають сигналам від шпальних підкладок, які існують вздовж усієї довжини дефектоскопічного сигналу і можуть бути розцінені як фоновий шум) та згущення темних областей по краях скейлограми (сигнали від рейкових стиків, які формують великі значення вейвлет-коефіцієнтів за рахунок великої амплітуди). Вищеописані фрагменти скейлограми (за винятком сигналу від поперечної тріщини в головці рейки) є регулярними елементами залізничної колії, а тому їх виявлення (оператором) не носить жодного практичного інтересу.

Тепер збільшимо скейлограму в області сигналу від поперечної тріщини (рис. 3.17).

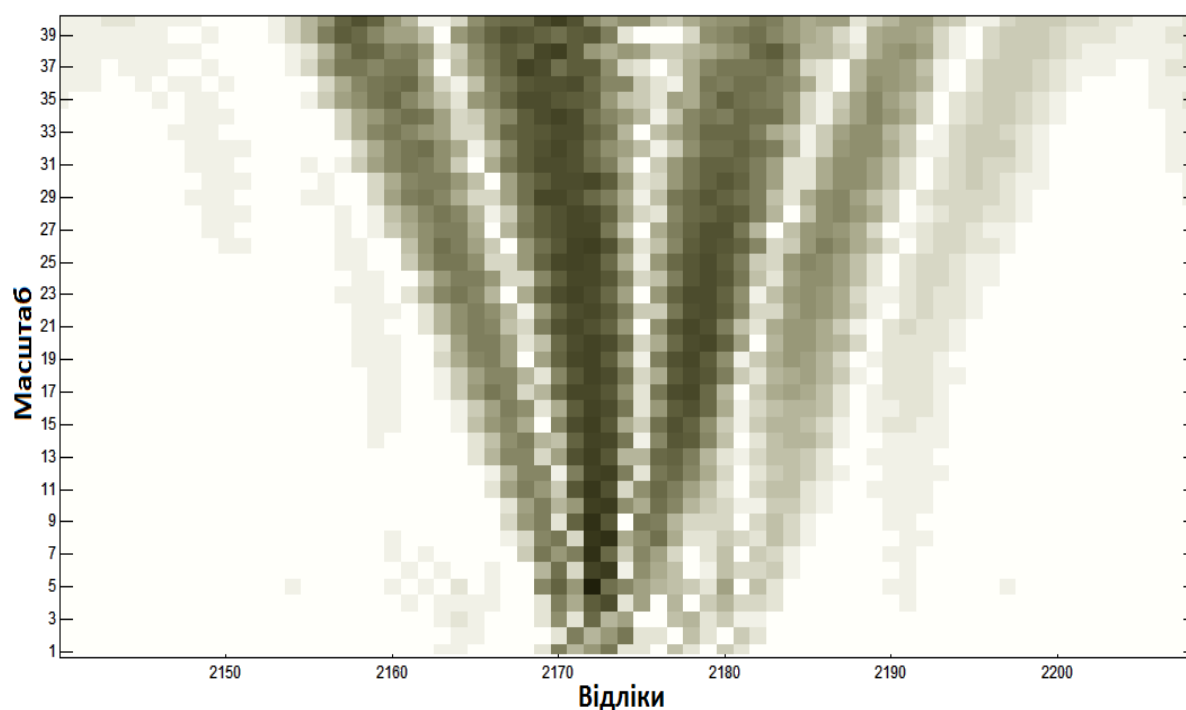


Рис. 3.17. Скейлограма дефектоскопічного сигналу, представлена на рис. 3.16, в місці, де розміщений сигнал від поперечної тріщини.

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. 3.17 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) можна обрати як критерій наявності дефекту, необхідно розглянути залежність значень вейвлет-коефіцієнтів від масштабу в місці розташування розглянутого дефекту. Для цього, побудуємо графік залежності величини вейвлет-коефіцієнтів від масштабу на 2172 відліку (рис. 3.18).

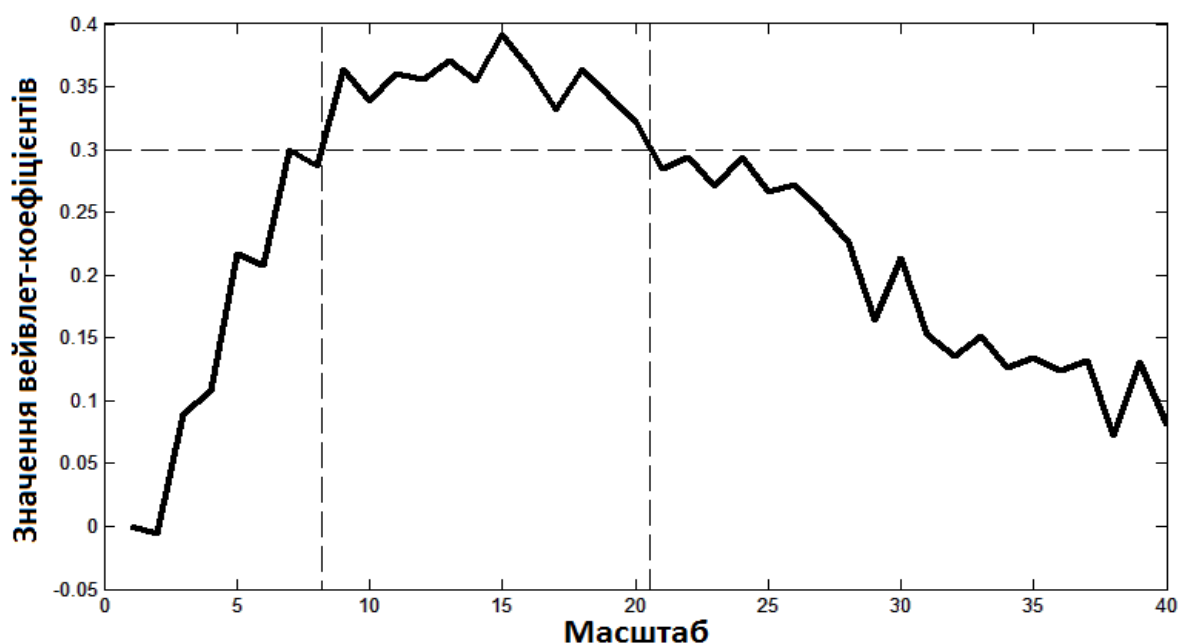


Рис. 3.18. Залежність величини вейвлет-коефіцієнтів від масштабу, в місці розташування сигналу від поперечної тріщини [77] (2172 відлік сигналу, зображеного на рис. 3.14).

З графіку видно, що вейвлет-коефіцієнти мають своє максимальне значення в діапазоні масштабів від 8 до 21.

Щоб порівняти величину цих коефіцієнтів з коефіцієнтами, отриманими від шпальних підкладок, побудуємо графік значень вейвлет-коефіцієнтів в околі сигналу від поперечної тріщини (рис. 3.19), приблизно в середині встановленого діапазону (15 масштаб). В місці, де міститься дефект, коефіцієнти НВП досягають величини в 16 разів більшої за амплітуду коефіцієнтів, отриманих від шпальних підкладок (Wn), а це дає

змогу визначати наявність (або відсутність) дефекту, встановивши відповідний поріг на величину вейвлет-коефіцієнтів.

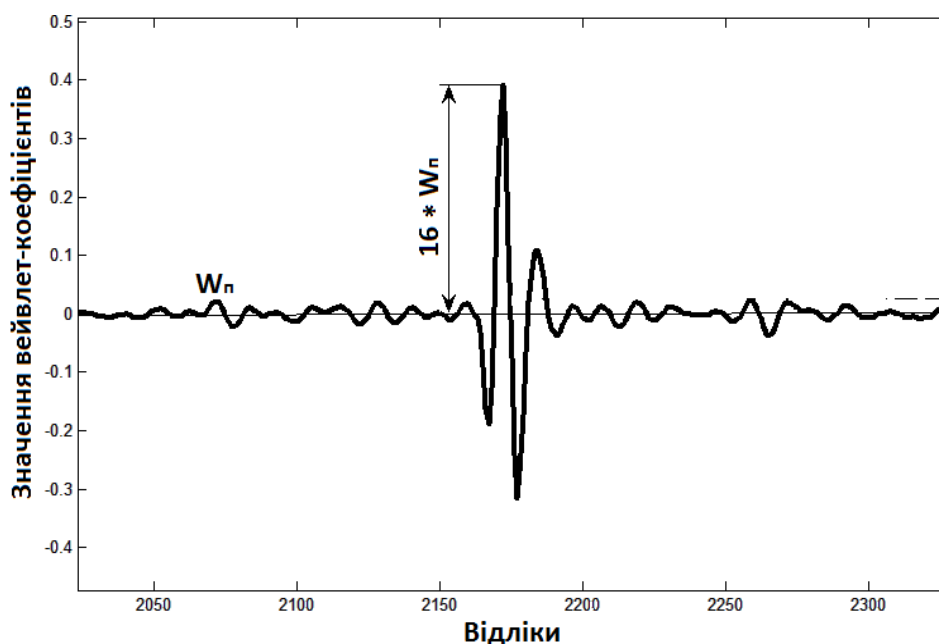


Рис. 3.19. Значення вейвлет-коефіцієнтів (на 15 масштабі) в околі сигналу від поперечної тріщини.

3.3.2. Виявлення сигналу від дефекту на початковій стадії зародження.

Оскільки сигнал від поперечної тріщини в головці рейки на рис. 3.14 достатньо великої амплітуди, то його виявлення не зумовить жодних проблем і для оператора вагона-дефектоскопа. Тому, цілком логічно, виникає запитання можливості застосування НВП там, де оператор не може прийняти рішення про наявність чи відсутність дефекту. Відповідь на це запитання може дати аналіз сигналів (від цього дефекту), які мають значно меншу амплітуду. Саме з цією метою сигнал від поперечної тріщини в головці рейки (з рис. 3.14) було зменшено до рівня, при якому амплітуда глобального від'ємного імпульсу дефекту приблизно в три рази перевищує амплітуду сигналів від шпальних підкладок (тобто, як уже згадувалось, до рівня виявлення дефекту). Цей сигнал (рис. 3.20), з легкістю може бути пропущений оператором вагона-дефектоскопа, хоча і несе в собі інформацію про найнебезпечніший дефект залізничної колії.

Виявлення таких сигналів дасть змогу здійснювати моніторинг розвитку дефектів, який виведе дефектоскопію залізничної колії на якісно новий рівень розвитку.

Здійснивши НВП сигналу зображеного на рис. 3.20 за допомогою адаптованого вейвлету, видно, що зменшений сигнал від дефекту теж достатньо чітко виділяється на скейлограмі (рис. 3.21).

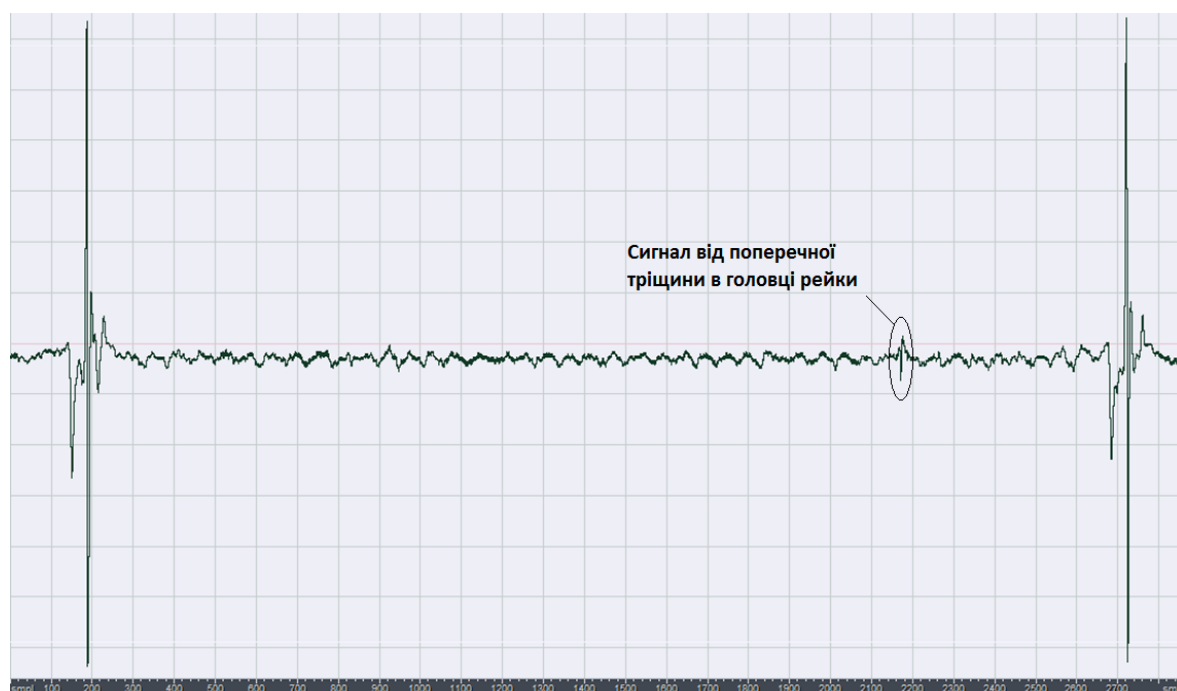


Рис. 3.20. Дефектограма з сигналом від поперечної тріщини в головці рейки, амплітуда якого менша за рівень виявлення даного дефекту.

В цьому випадку, значення вейвлет-коефіцієнтів в околі сигналу від поперечної тріщини в головці рейки на 15 масштабі, представлені на рис. 3.22 і видно, що амплітуда вейвлет-коефіцієнтів від дефекту зменшилась приблизно в три рази (порівняно з рис. 3.19), що викликано зменшенням сигналу від поперечної тріщини. Тепер ця амплітуда приблизно в 5 разів більша за амплітуду коефіцієнтів, отриманих від шпальних підкладок. Цей результат дає змогу стверджувати, що завдяки НВП можна виявляти сигнали від слабо розвинутих дефектів, за умови вдало підібраного порогу на величину вейвлет-коефіцієнтів.

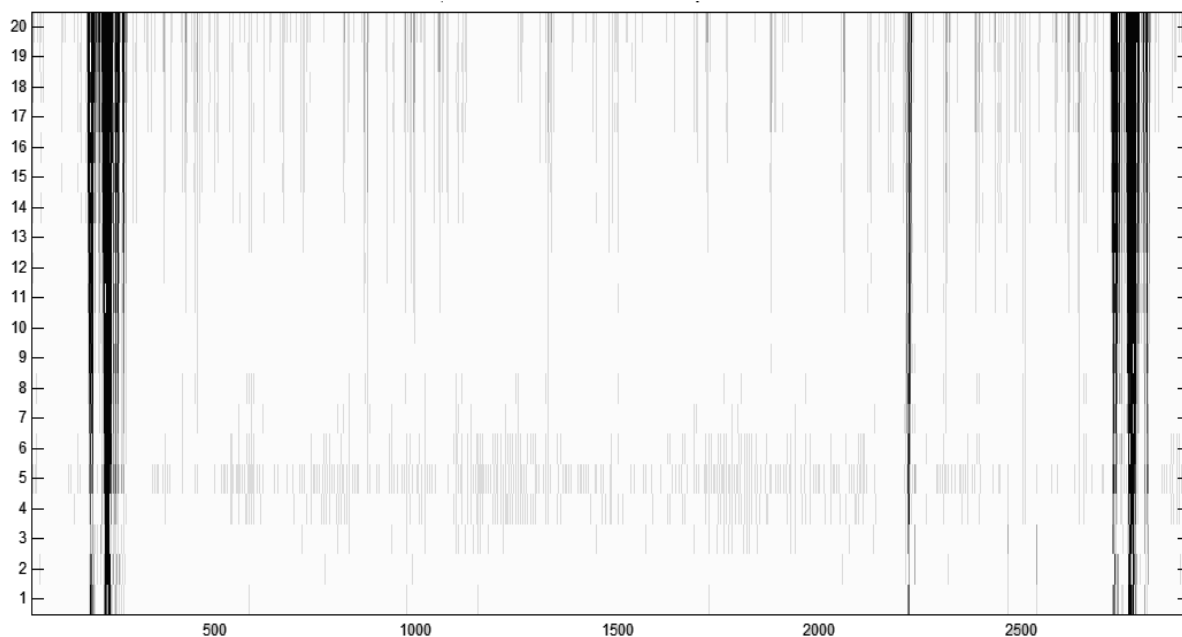


Рис. 3.21. Скейлограма дефектоскопічного сигналу зображеного на рис. 3.20, отримана при виконанні НВП з використанням адаптованого (до виявлення сигналів від поперечної тріщини) вейвлету в якості материнського.

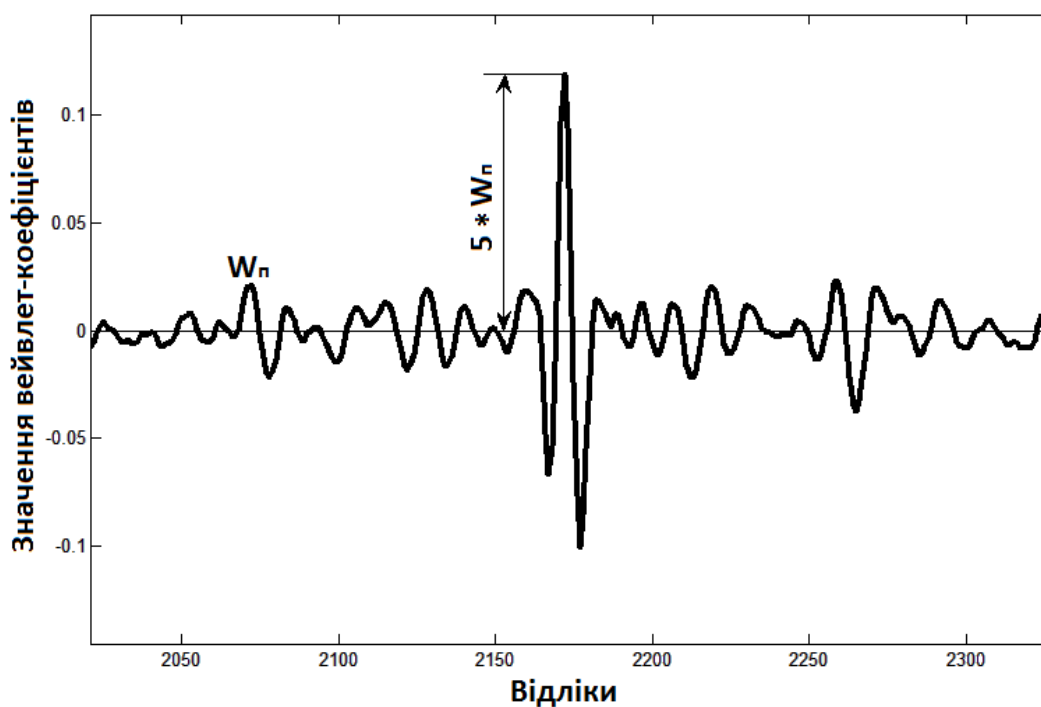


Рис. 3.22. Значення вейвлет-коефіцієнтів (на 15 масштабі) в околі сигналу від поперечної тріщини зображеного на рис. 3.20.

3.3.3. Загальні рекомендації для виявлення сигналів від дефектів за допомогою НВП.

Зі всього вищесказаного, можна виділити основні рекомендації для якісного виявлення сигналів від дефектів за допомогою НВП [78, 79]:

- Материнська функція НВП повинна бути максимально подібною до образу сигналу, який очікується виявити.
- Потрібно вибрати такі масштаби НВП (для поперечної тріщини пропонується в межах від 8 до 21 масштабу), за якими, з найбільшою вірогідністю, можна стверджувати про наявність дефекту.
- Пріоритет слід віддавати меншим масштабам (високі частоти), оскільки це впливає на точність виявлення дефекту (чим менший масштаб – тим більша роздільна здатність за часом і навпаки).
- Необхідно оптимально підібрати пороги на величину вейвлет-коефіцієнтів для кожного з вибраних масштабів. Відповідно до цих порогів буде прийматись рішення про наявність чи відсутність сигналу від дефекту. З даним завданням добре справляється апарат штучних нейронних мереж.

3.4. Висновки до розділу 3.

1. Створено материнську вейвлет-функцію, яка адаптована до виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки, тобто володіє основними властивостями форми сигналу від вищезгаданого дефекту. Підчас аналізу дефектограми, сигнали від поперечної тріщини будуть формувати найбільші вейвлет-коефіцієнти, а їх значення можуть свідчити про наявність або відсутність дефекту.

2. Запропоновано алгоритм створення материнської вейвлет-функції на основі сигналу від поперечної тріщини рейки, який можна застосовувати при побудові материнських вейвлетів, які орієнтовані на

інші типи дефектів (наприклад, поздовжнє горизонтальне розшарування головки рейки).

3. Сформульовано перелік рекомендацій для виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок за допомогою НВП, що забезпечило можливість виділення сигналів від дефектів на ранніх стадіях їх розвитку, коли амплітуда менша за поріг виявлення дефектів ($3 \cdot a_n$), яким керується оператор вагона-дефектоскопа.

4. Автоматизація процесу виявлення сигналів від дефектів за допомогою НВП можлива шляхом залучення до даного процесу штучних нейронних мереж.

РОЗДІЛ 4

ВИКОРИСТАННЯ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ ДЕФЕКТОСКОПІЧНИХ СИГНАЛІВ

4.1. Особливості дискретного вейвлет-перетворення.

Як уже згадувалось, представлення сигналу $s(t)$ через його НВП є збитковим за затратами часу на обчислення, оскільки отримується велика кількість вейвлет-коефіцієнтів, яка в багато разів перевищує число відліків вхідного сигналу. Тому, в багатьох завданнях ЦОС, використовується дискретне вейвлет-перетворення (ДВП), для якого параметри масштабу a та зміщення b є дискретними і мають вигляд [80]:

$$a = a_0^j \text{ і } b = k \cdot a_0^j,$$

де a_0 - довільне число, яке в більшості практичних випадків рівне 2;

j і k - цілі числа.

ДВП передбачає наявність двох ортогональних функцій вейвлет-перетворення (вейвлет-функції $\psi(t)$ та функції масштабування $\varphi(t)$), за допомогою яких сигнал розділяється на дві складові – грубу (апроксимуючу) та чітку (деталізуючу). Апроксимуюча складова далі піддається подібному розкладу, який змінює рівень декомпозиції сигналу. Для дискретних значень a та b функції $\psi(t)$ та $\varphi(t)$ можуть бути записані у вигляді [81]:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \cdot \psi(a_0^{-j} \cdot t - k), \quad (4.1)$$

$$\varphi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \cdot \varphi(a_0^{-j} \cdot t - k). \quad (4.2)$$

Відповідно до цього, ДВП обчислюється за формулами:

$$C(j,k) = d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt, \quad (4.3)$$

$$a_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \varphi_{j,k}(t) dt, \text{ де} \quad (4.4)$$

$d_{j,k}$ та $a_{j,k}$ – коефіцієнти деталізації та апроксимації відповідно.

Аналізований за допомогою ДВП сигнал $s(t)$ може бути відновлений на n -му рівні розкладу за своїм дискретним вейвлет-спектром, згідно наступної формули:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{j_n,k} \cdot \varphi_{j_n,k}(t) + \sum_{j=j_n}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t). \quad (4.5)$$

НВП обчислювалось шляхом зміни масштабу вікна для аналізу, зсуву його в часі, множення на сигнал та інтегрування вздовж усієї часової осі. У випадку ДВП, для аналізу сигналу на різних масштабах використовуються фільтри з різними частотами зрізу. Сигнал пропускається через деревоподібно з'єднані фільтри високих (ФВЧ) та низьких (ФНЧ) частот, яким відповідають функції $\psi(t)$ та $\varphi(t)$. Такий підхід називається швидким вейвлет-перетворенням або пірамідальним алгоритмом Малла і можливий лише для ортогональних вейвлет-функцій.

4.2. Пірамідальний алгоритм Малла для дефектоскопічного сигналу.

В даному алгоритмі роздільна здатність сигналу змінюється за допомогою фільтрації сигналу, а масштаб – за рахунок децимації та інтерполяції. Нагадаємо, що децимація полягає у зниженні частоти дискретизації, тобто видаленні деяких відліків з сигналу. Наприклад, децимація в два рази означає видалення з сигналу кожного другого відліку. Інтерполяція відповідає збільшенню частоти дискретизації сигналу шляхом додавання нових відліків між існуючі. Зазвичай, в якості нових відліків використовується нуль. Наприклад, інтерполяція в два рази означає вставку нулів між кожними двома відліками сигналу.

В якості прикладу, використано дефектоскопічний сигнал $x[n]$, зображений на рис. 3.14. Він містить 2864 відліки з частотою дискретизації приблизно рівною 1306 Гц, яка поражена шляхом множення швидкості сканування колії (47 км/год) на кількість відліків, що відповідають одному метру довжини залізничної рейки (100 відліків/м).

Процес аналізу розпочинається з пропускання сигналу через ФНЧ з імпульсною характеристикою $h[n]$. Фільтрація сигналу відповідає математичній операції згортки сигналу з імпульсною характеристикою фільтру і може бути записаною наступним чином:

$$x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot h[n-k]. \quad (4.6)$$

ФНЧ обрізає всі частоти, які більші половини максимальної частоти сигналу. Згідно теореми Котельникова [82] найбільша частота, яка може бути присутня в сигналі, рівна половині частоти дискретизації, тобто, у нашому випадку, дефектоскопічний сигнал містить найбільшу частоту рівну 653 Гц. Тому, ФНЧ видалить всі частоти з сигналу, які більші за 326 Гц. Аналогічно, сигнал розкладається і за допомогою ФВЧ з імпульсною характеристикою $g[n]$, який видалить частоти менші за 326 Гц.

Так як половина частотного діапазону сигналу буде відфільтрована, то, за теоремою Котельникова, відліки сигналу можна прорідити, тобто виконати децимацію в два рази:

$$y_{low}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot h[2 \cdot n - k], \quad (4.7)$$

$$y_{high}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot g[2 \cdot n - k]. \quad (4.8)$$

В результаті, на виході ФВЧ будуть отримані коефіцієнти деталізації $(D_1, D_2, D_3, \dots)$, а на виході ФНЧ – коефіцієнти апроксимації

($A_1, A_2, A_3, \dots$). Даний процес називається декомпозицією сигналу відповідного рівня.

Після декомпозиції першого рівня роздільна здатність за часом вдвічі зменшилась (через децимацію), однак роздільна здатність за частотою збільшилась (також в два рази) через те, що кожен з отриманих сигналів представляє половину частотної смуги початкового сигналу. Вихід ФНЧ подається далі на таку ж схему обробки, а вихід ФВЧ вважається вейвлет-коефіцієнтами. Даний алгоритм поданий на рис. 4.1, де f позначає смугу сигналу на кожному рівні декомпозиції.

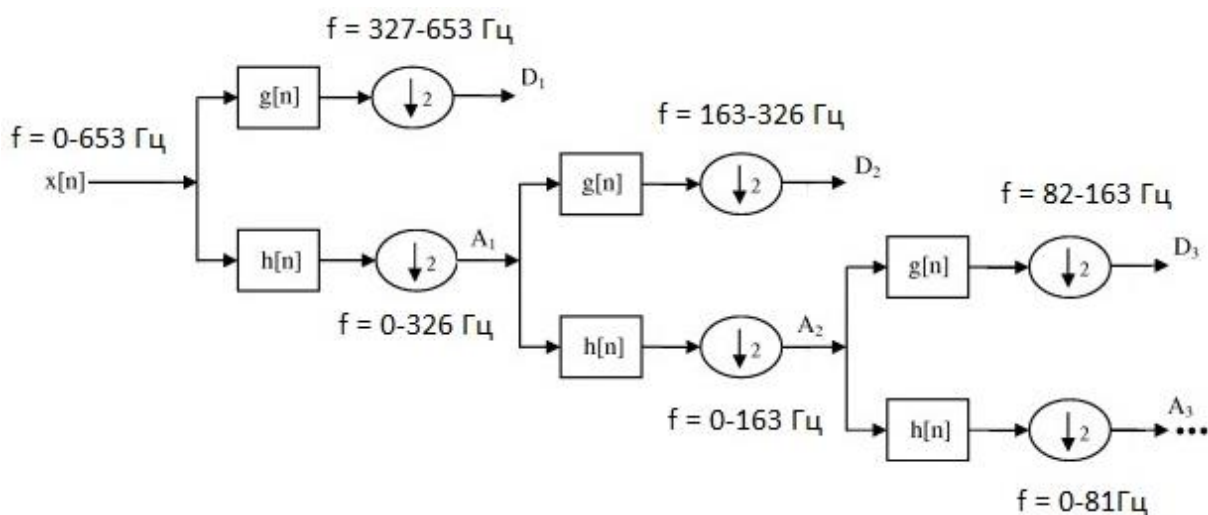


Рис. 4.1. Пірамідальний алгоритм Малла для дефектоскопічного сигналу зображеного на рис. 3.14.

На практиці, число рівнів декомпозиції вибирається виходячи з природи аналізованого сигналу або відповідно деякого критерію.

Синтез проаналізованого за допомогою ДВП сигналу відбувається в зворотньому напрямку, а саме додаванням вейвлет-коефіцієнтів (коефіцієнтів деталізації) всіх рівнів декомпозиції та коефіцієнтів апроксимації останнього рівня.

Найбільш значущі частоти сигналу будуть відповідати великим амплітудам вейвлет-коефіцієнтів відповідного частотного діапазону. І навпаки, малі значення коефіцієнтів означають низьку енергетику

конкретних частотних смуг в сигналі, і можуть бути відкинені без суттєвого спотворення сигналу. За допомогою останнього досягається компресія даних та фільтрація.

Реконструкція сигналу виконується в оберненому порядку до аналізу. На практиці, це відбувається за рахунок інтерполяції (в два рази) сигналів кожного рівня декомпозиції, пропускання їх через фільтри синтезу (ФНЧ та ФВЧ) та подачі їх на суматор.

4.3. Аналіз дефектоскопічного сигналу методом ДВП.

Дослідження проводилось над сигналом, зображеним на рис. 3.14. В якості базового вейвлету для ДВП використовувався вейвлет Добеші 6-го порядку (рис. 4.2), який є простою та поширеною базисною функцією [83]. Крім того, форма його вейвлет-функції (рис. 4.2 б) дещо нагадує форму сигналу від поперечної тріщини в головці рейки, що забезпечить, достатньо хорошу її корельованість з сигналом від дефекту [84].

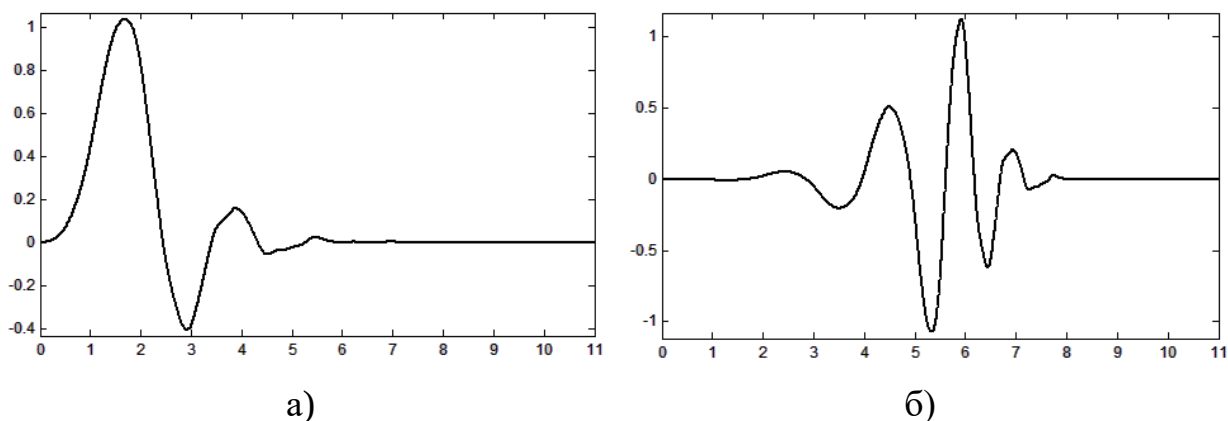


Рис. 4.2. Масштабувальна функція $\varphi(t)$ та $\psi(t)$ -функція (б) вейвлету Добеші 6-го порядку.

Було обрано рівень декомпозиції рівний чотирьом, оскільки в сигналі від дефекту провідну роль відіграє високочастотна складова і немає необхідності в дослідженні низьких частот.

Результат аналізу сигналу за допомогою ДВП представляє собою апроксимуючу складову 4-го рівня розкладу – $A_4(t)$ та чотири складові

деталізації – $D_4(t), D_3(t), D_2(t), D_1(t)$ (рис. 4.3), сума яких і утворює аналізований сигнал:

$$S(t) = A_4(t) + D_4(t) + D_3(t) + D_2(t) + D_1(t). \quad (4.9)$$

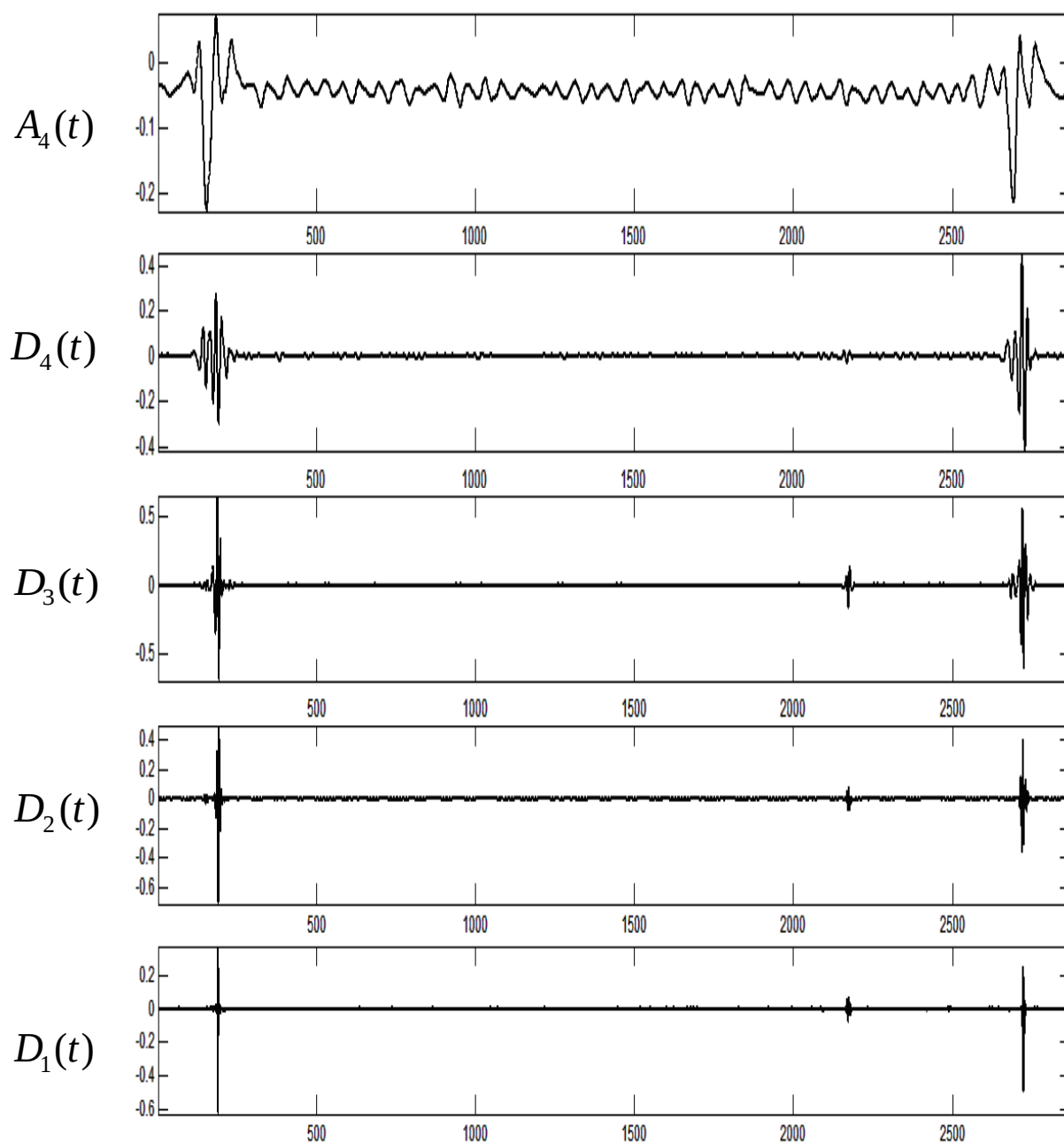


Рис. 4.3. Декомпозиція (4-го рівня) дефектоскопічного сигналу, зображеного на рис. 3.14, отримана за допомогою ДВП, при використанні вейвлету Добеші 6-го порядку.

Скейлограма (рис. 4.4), побудована на основі коефіцієнтів деталізації, вказує на наявність локальної особливості (сигналу від поперечної тріщини), якій відповідає вертикальна лінія, що виходить з точки, де знаходиться особливість (приблизно на 2200-му відліку). Оскільки сигнал від поперечної тріщини в головці рейки (рис. 3.14) достатньо великої амплітуди, то він сильно виділяється і на скейлограмі. Однак, якщо амплітуду даного сигналу зменшити до рівня, за яким оператор вагона-дефектоскопа приймає рішення про наявність дефекту, то скейлограма може й не відобразити дану особливість (чутливість ДВП до локальної особливості залежить від її амплітуди та, перш за все, схожості форми $\psi(t)$ - функції та цієї особливості).

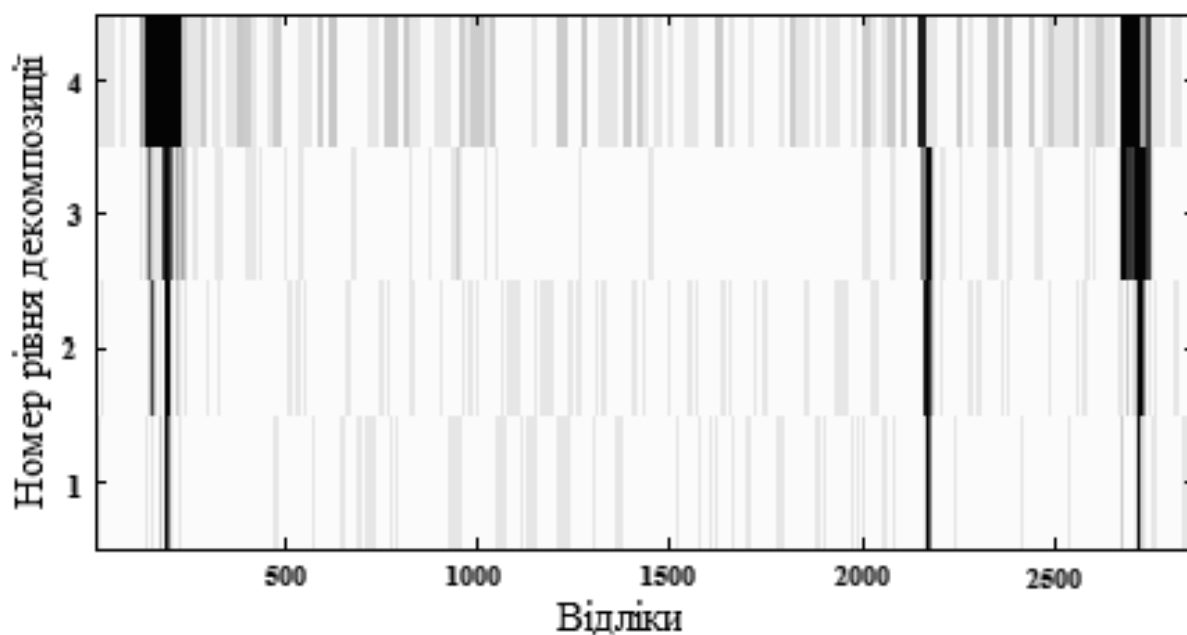


Рис. 4.4. Скейлограма отримана за допомогою ДВП, при використанні вейвлету Добеші 6-го порядку і 4-го рівня декомпозиції.

З вищесказаного слідує, що як і у випадку НВП, для точнішого виявлення дефекту, необхідно створювати адаптовану до сигналу від дефекту вейвлет-функцію, що є завданням набагато складнішим ніж для НВП, оскільки для ДВП $\psi(t)$ -функція повинна бути ортогональною до функції масштабування $\varphi(t)$, яку теж потрібно буде створювати.

4.4. Обробка дефектоскопічного сигналу за допомогою ДВП.

ДВП можна також використовувати для компресії сигналу та очистки його від шуму (точніше, це основні напрямки його практичного застосування).

Для очистки сигналу від шуму необхідно виставити пороги на коефіцієнти ДВП, з яких утворюються складові деталізації представлені на рис. 4.3. Також необхідно підібрати модель шуму, щоб максимально виділити сигнал від дефекту та усунути високочастотні шумові складові небажаних для виявлення сигналів (наприклад, від шпальних підкладок). На рис. 4.5 відображено встановлений поріг на коефіцієнти деталізації 1-го рівня декомпозиції. Коефіцієнти, що перевищують заданий поріг, будуть залишені, а всі інші – усунуті. Аналогічним чином встановлюються пороги на інших рівнях декомпозиції.

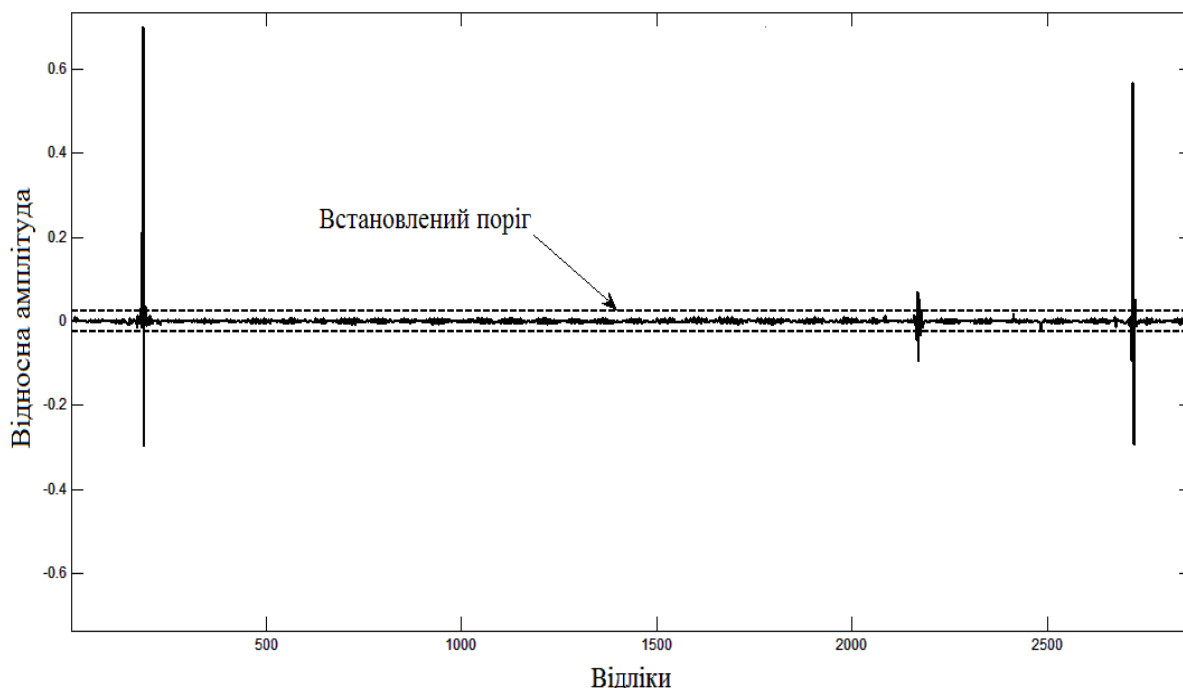


Рис. 4.5. Встановлення порогу на коефіцієнти деталізації 1-го рівня декомпозиції.

Встановивши пороги на всіх рівнях декомпозиції та провівши очистку сигналу від шумів, отримана скейлограма, яка зображена на рис. 4.6.

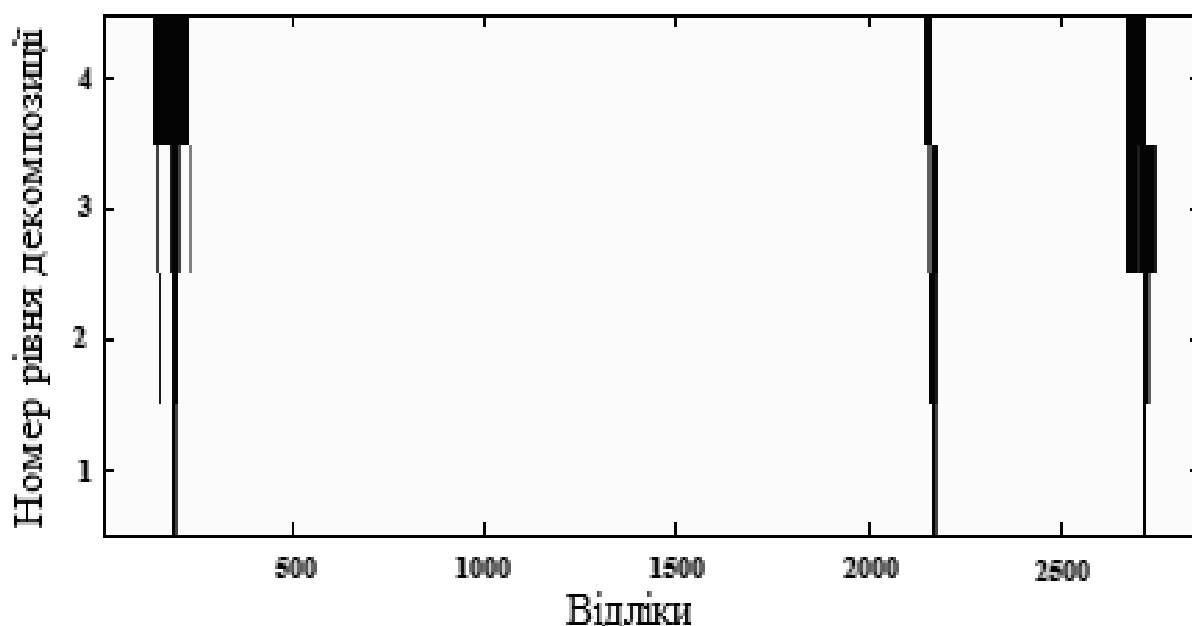


Рис. 4.6. Скейлограма отримана за допомогою ДВП, при використанні вейвлету Добеші 6-го порядку і 4-го рівня декомпозиції сигналу (рис. 3.14) після очистки від шуму.

Як видно з рис. 4.6, скейлограма представлена без коефіцієнтів ДВП, які відповідали сигналам від шпальних підкладок. Отже, за допомогою ДВП, сигнал (рис. 3.14) був очищений від високочастотних складових, що порівняно добре корелювалися з материнською вейвлет-функцією ($\psi(t)$ -функцією вейвлету Добеші 6-го порядку).

Реконструйований початковий сигнал після очистки від шуму зображений на рис. 4.7.

З рис. 4.7 видно, що форма сигналу від поперечної тріщини в головці рейки спотворилась, тобто зазнала змін, у порівнянні з формою представленою на рис. 3.14. Це негативно вплине на розпізнавання сигналів від дефектів, яке є найголовнішим завданням в дефектоскопії залізничних рейок.

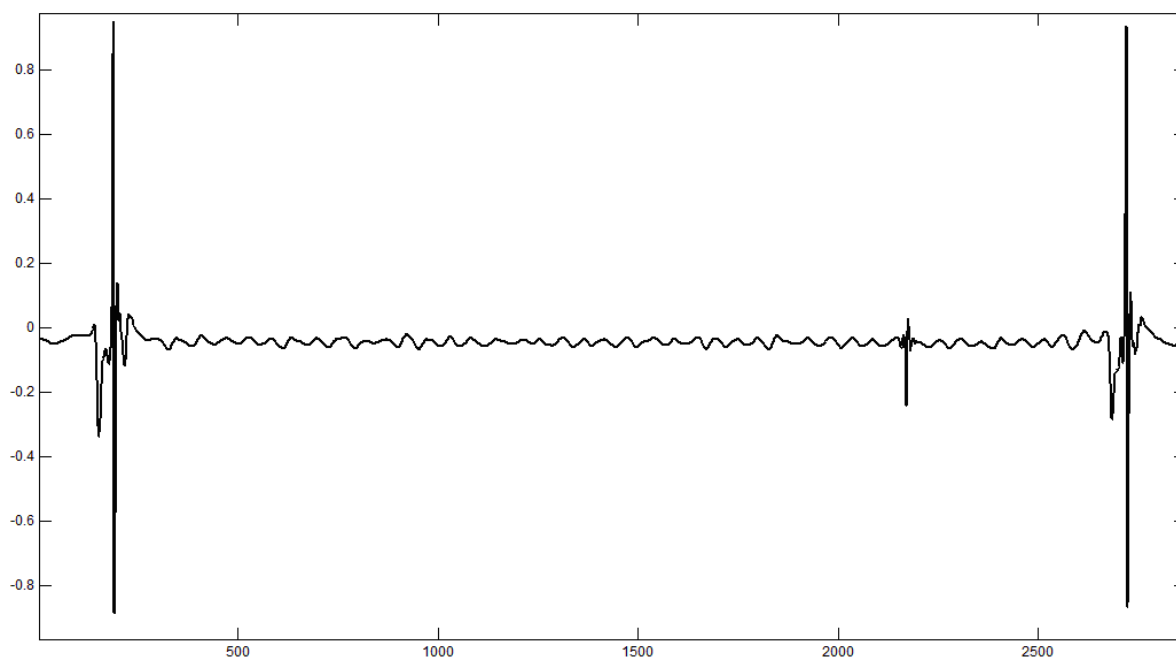


Рис. 4.7. Сигнал (рис. 3.14) очищений від шуму за допомогою ДВП при використанні вейвлету Добеші 6-го порядку.

Варто також відзначити, що компресія, яка теж успішно реалізується за допомогою ДВП, і може використовуватись для збереження даних попередніх заїздів, діє подібно очистці від шуму, а тому, теж вносить спотворення форми сигналів, які у випадку дефектоскопічних сигналів є неприпустимими.

4.5. Висновки до розділу 4.

1. Здійснено опис пірамідального алгоритму Малла на прикладі реального дефектоскопічного сигналу. Це дало змогу визначити необхідний рівень декомпозиції сигналу за допомогою ДВП для виділення сигналів від дефектів (складові деталізації) на фоні сигналів від підкладок (апроксимуюча складова).

2. Проведено аналіз дефектоскопічного сигналу за допомогою ДВП. Було визначено, що очистка від шуму та компресія – найсильніші сторони ДВП, які при обробці дефектоскопічних даних вносять спотворення форми сигналу від небезпечних дефектів, а тому їх використання повинно бути надзвичайно обережним.

3. ДВП передбачає застосування ортогональних вейвлетів, процес створення яких є значно складніший за побудову материнської вейвлет-функції для НВП. Це означає, що для аналізу дефектоскопічних сигналів доведеться використовувати існуючі вейвлети (а не створювати адаптовані, як у випадку НВП), які не в повній мірі відображають особливості сигналів від дефектів. Як результат, ДВП можна застосовувати для виявлення локальних особливостей сигналів, але лише на фоні адитивних слабо-корельованих перешкод, тобто чутливість ДВП до виявлення цих особливостей буде недостатньою при аналізі дефектоскопічних сигналів, де прерогативою має бути уникнення пропуску дефектів, а не швидкість опрацювання діагностичної інформації.

РОЗДІЛ 5

ПОБУДОВА НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ ВІД ДЕФЕКТІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

5.1. Поняття штучної нейронної мережі та нейрону.

Людина обробляє інформацію за допомогою нейронних мереж, які сформовані з величезної кількості нейронів (нервових клітин), що обмінюються короткими електричними імпульсами. Комп'ютерні алгоритми, які імітують ці біологічні структури, називаються штучними нейронними мережами (ШНМ). ШНМ демонструють велику кількість властивостей, характерних для людського мозку. Наприклад, вони навчаються на основі досвіду, узагальнюють попередні прецеденти на нові випадки та виділяють суттєві властивості з інформації, яка містить надлишкові дані. Ця здатність бачити образ крізь шум та завади (узагальнення) життєво важлива для розпізнавання образів в реальному світі та дефектоскопії залізничних рейок зокрема. Варто відзначити, що ШНМ здійснює узагальнення автоматично, завдяки своїй структурі, а не за допомогою «людського інтелекту» в формі спеціально написаних комп'ютерних програм.

Деякі ШНМ мають здатність виділяти сутність з вхідних сигналів. Така властивість називається абстрагуванням. Наприклад, мережа може бути навчена послідовністю спотворених версій букви «А», після чого як відгук на подібний вхідний сигнал, вона згенерує букву ідеальної форми. В деякому сенсі вона навчиться породжувати те, чого ніколи не бачила.

Дослідження та розвиток ШНМ пов'язані з двома основними завданнями:

- отримати краще розуміння процесу функціонування людського мозку;

- навчити машину (комп'ютер) приймати рішення тоді, коли вона має справу з абстрактною та погано визначеною проблемою. Прикладом такої проблеми може бути розпізнавання мови або людських облич, з чим людина справляється значно краще.

Найбільш поширена структура ШНМ [85] представлена на рис. 5.1. Таку мережу ще називають трьохшаровим перцептроном [86]. Вона сформована з вхідного, прихованого та вихідного шарів. Кожен шар містить один або більше вузлів, представлених на рис. 5.1 у вигляді маленьких кругів. Лінії між вузлами показують потік інформації від одного вузла до іншого. Вузли вхідного шару – пасивні, тобто не змінюють дані, що через них проходять. Натомість, вузли прихованого та вихідного шарів – активні, які модифікують дані у відповідності з рис. 5.2.

Величини $X_1 \dots X_{15}$ вхідного шару містять дані, які будуть оцінюватись (у випадку дефектоскопічного сигналу, це можуть бути фрагменти, що потенційно відповідають дефектам залізничних рейок, або вихідні параметри попередньої обробки дефектоскопічних даних, такі як вейвлет-коефіцієнти [87]).

Кожна величина з вхідного шару дублюється і надсилається до кожного елементу прихованого шару. Виходи з прихованого шару (представлені на рис. 5.1 величинами $X_{21} \dots X_{24}$) дублюються та потрапляють на вхід наступного шару. Активні вузли вихідного шару комбінують та модифікують дані, для отримання двох вихідних величин цієї ШНМ – X_{31} та X_{32} . Така структура ШНМ називається повністю взаємопов'язаною.

ШНМ можуть мати будь-яку кількість шарів та вузлів у них, проте найбільше застосування знайшла трьохшарова структура, з максимальною кількістю вхідних вузлів – до кількох сотень [85].

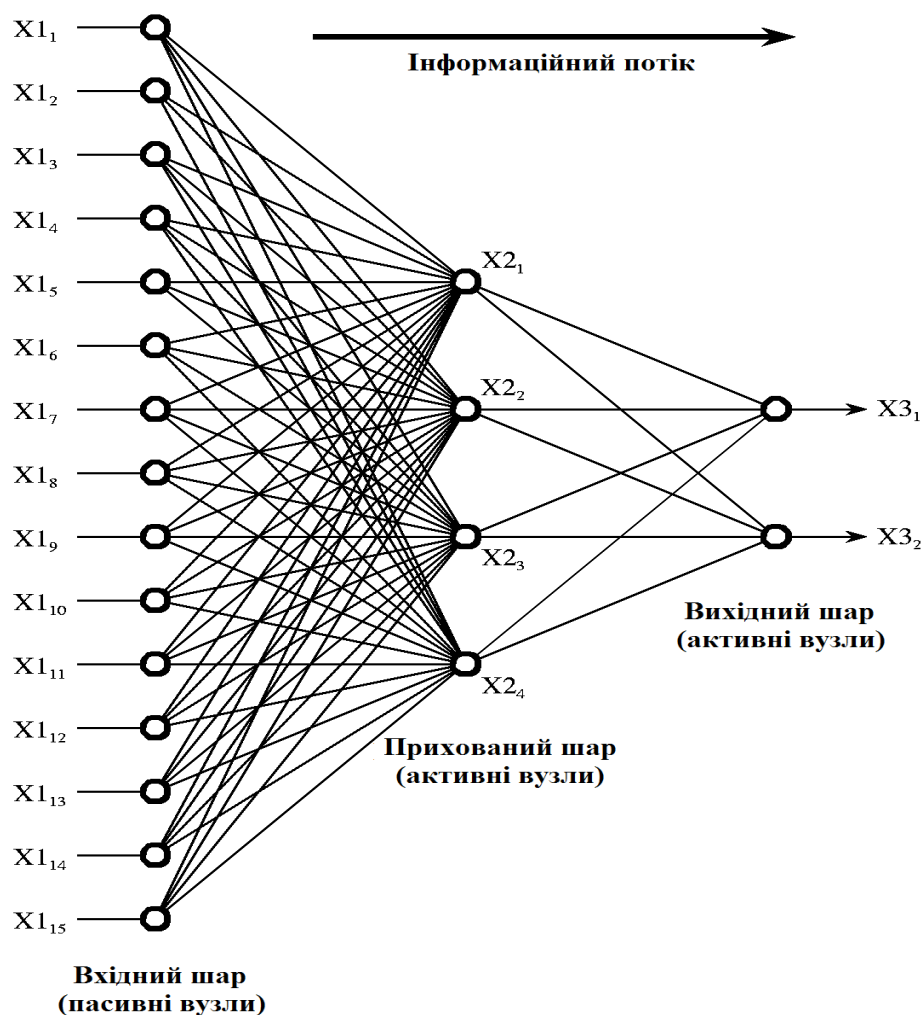


Рис. 5.1. Архітектура ШНМ з повною взаємопов'язаністю шарів [85].

Оснoву кожної ШНМ складають відносно прості, у більшості випадків, однотипні елементи, які імітують роботу нейронів. Як показано на рис. 5.2 значення, що потрапляють в активний вузол прихованого шару (штучний нейрон), множаться на вагові коефіцієнти (набір наперед визначених чисел, які збережені в програмі). «Зважені» вхідні величини після цього додаються, а отримане сумарне значення пропускається через функцію активації, яка і формує вихід штучного нейрону. Детальніше про функції активації буде описано далі.

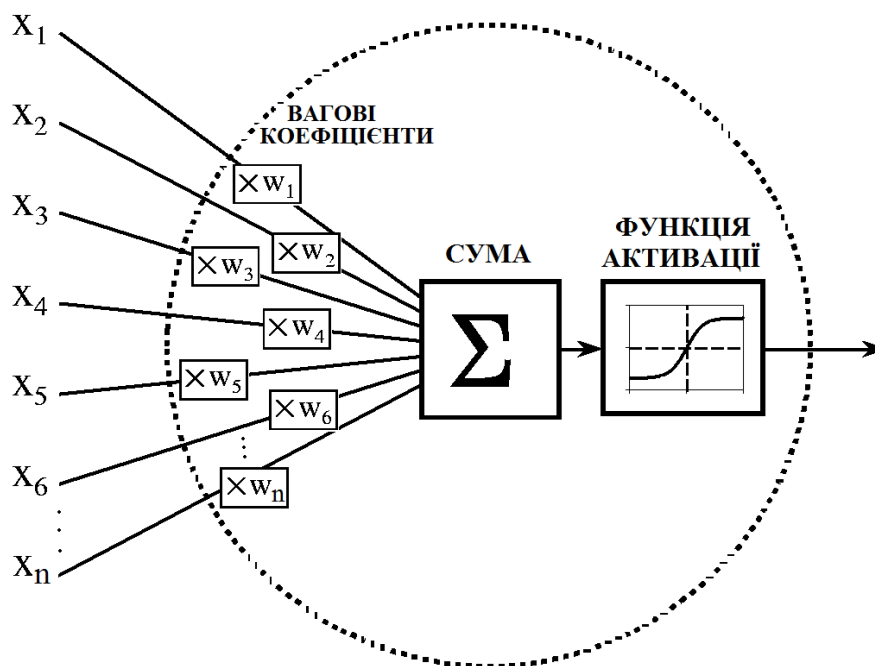


Рис.5.2. Активний вузол ШНМ (штучний нейрон) [85].

Вищеописане функціонування штучного нейрону можна представити за допомогою наступних формул:

$$NET = \sum_n w_n \cdot x_n, \quad (5.1)$$

$$OUT = F(NET), \quad (5.2)$$

де x_n - вхідні сигнали,

w_n - вагові коефіцієнти,

NET – зважена сума вхідних сигналів,

F – нелінійна функція, яка називається функцією активації,

OUT – вихід штучного нейрону.

У випадку виявлення конкретної «цілі» (наприклад, для дефектоскопії залізничних рейок – це може бути дефект певного типу), вихідний шар потребує лише один вузол. Вихід цього вузла забезпечує позитивну або негативну індикацію присутності або відсутності шуканого об'єкту у вхідних даних.

5.2. Вибір та підготовка даних для навчання мережі.

Набір даних для навчання ШНМ повинен задовольняти наступні критерії:

- дані повинні відображати конкретний об'єкт предметної області;
- несуперечливість даних, що забезпечить добру якість навчання мережі.

Навчання мережі за допомогою непідготованого набору даних, як правило, не дає якісного результату. Саме тому, існує ряд методів покращити «сприйняття» мережі:

- Нормування, яке відбувається тоді, коли навчальна вибірка містить дані різної розмірності. Наприклад, на перший вхід мережі подаються величини від нуля до одиниці, а на другий – від ста до тисячі. При відсутності нормування другий набір даних завжди буде впливати на вихід мережі значно більше ніж перший. При нормуванні розмірності всіх вхідних та вихідних даних узагальнюються.

- Квантування, яке виконується над неперервними величинами, для яких виділяється скінченний набір дискретних значень.

- Фільтрація, що виконується над даними, які містять незначні спотворення шумами.

Після обробки ці дані можна подати на входи мережі. Окремий елемент навчальної вибірки містить одне значення для кожного входу мережі та в залежності від типу навчання (з вчителем або без) одне значення для кожного виходу мережі.

В якості навчальної вибірки мережі було обрано коефіцієнти НВП (на масштабах від 8 до 15) для сигналів від поперечної тріщини рейки (еталонні значення) та сигналів від шпальних підкладок (хибні значення). Всі сигнали перед їх аналізом за допомогою НВП були нормовані відносно

нульового рівня. Нормування викликане відмінностями в налаштуванні систем намагнічування на різних вагонах-дефектоскопах.

5.3. Вибір типу нейронної мережі.

Тип мережі слід вибирати виходячи із складності завдання та наявних даних для навчання [88]. Навчання з учителем вимагає наявності для кожного елементу навчальної вибірки експертної оцінки, тобто значення правильної реакції мережі на нього. Разом вони називаються навчальною парою. Зазвичай мережа навчається на деякому числі таких навчальних пар. Найпоширенішими ШНМ з таким принципом навчання є багатошаровий перцептрон та мережа Ворда [89]. Топологія цих двох мереж дуже схожа, за винятком того, що в мережі Ворда приховані шари нейронів розбиті на блоки і можлива наявність обхідних з'єднань (нейрони вхідного шару безпосередньо з'єднуються з нейронами вихідного або наступного прихованого шару, пропускаючи попередній).

Інколи отримання експертних оцінок для великого масиву даних є неможливим. В цих випадках правильним вибором буде мережа, яка навчається без вчителя (наприклад, самоорганізуюча карта Кохонена [90] або нейронна мережа Хопфілда [91]).

Доцільно використовувати такі архітектури ШНМ, властивості яких найбільш досліджені. Однозначних рекомендацій щодо вибору архітектури нейронної мережі не існує, проте для розпізнавання сигналів від дефектів залізничних рейок варто використовувати ШНМ, які призначені для завдань класифікації. Виходячи з цього та наявних навчальних вибірок (з експертними оцінками), в якості архітектурного рішення ШНМ, було обрано багатошаровий перцептрон.

5.4. Підбір параметрів мережі.

Після вибору топології мережі потрібно підібрати її параметри, для чого згідно з [92] варто слідувати наступним правилам:

1. Кількість нейронних елементів у прихованому шарі повинна бути меншою від кількості елементів навчальної вибірки.

2. Потужність нейронної мережі можна збільшувати як за рахунок числа нейронів у шарі так і за допомогою кількості шарів. Якщо відносно мережі стосується обмеження пункту 1 і вона не вирішує поставленого завдання, то необхідно збільшити кількість прихованих шарів.

Чим більше прихованих нейронів, тим більша точність ШНМ. Однак при надто великій розмірності прихованого шару (або шарів) може спостерігатись явище перенавчання мережі, при якому мережа добре справляється із поставленим на неї завданням тільки для навчальної вибірки. Це свідчить про погіршення узагальнюючих властивостей ШНМ.

Для багатошарового перцептрона необхідно підібрати наступні параметри: число прихованих шарів, число нейронів у прихованих (або прихованому) шарах, а також тип активаційних функцій.

5.4.1. Визначення кількості прихованих шарів.

В [93] Тімоті Мастерс стверджує, що для вирішення майже всього різноманіття практичних проблем достатня наявність лише одного прихованого шару. Лише в тому випадку, коли використання великого числа нейронів в цьому шарі не дає змоги вирішити поставленого завдання, варто додати другий прихований шар, який, можливо, ще й дозволить зменшити сумарну кількість нейронів у прихованих шарах. Автор також наголошує, що теоретичної необхідності використання нейронної мережі з трьома або більше прихованими шарами немає, оскільки це не дасть жодної додаткової користі в продуктивності, а лише значно збільшить час навчання та ймовірність потрапляння мережі в локальний мінімум похибки.

Слідуючи вищесказаному було вирішено використовувати лише один прихований шар для побудови ШНМ призначеної виявляти сигнали від поперечної тріщини рейки.

5.4.2. Визначення оптимального числа нейронів прихованого шару.

Дане завдання є дуже важливим, оскільки кількість прихованих нейронів, з однієї сторони повинна бути достатньою для вирішення поставленого завдання, а з іншої – не повинна бути надто великою, щоб забезпечити необхідну узагальнюючу здатність.

Перший крок, який необхідно зробити для цього – визначитись чи мережа буде звужувальною (кількість елементів прихованого шару менша від кількості вхідних елементів) чи розширювальною (навпаки) [94]. Для завдань виділення інформації з вхідних даних для узагальнення або зниження розмірності масиву даних необхідно використовувати звужувальну мережу.

Оскільки ми намагаємось визначити наявність чи відсутність сигналу від дефекту (поперечної тріщини) за допомогою коефіцієнтів НВП, то ШНМ повинна бути звужувальною.

На жаль, сьогодні, в теорії штучного інтелекту не розроблено досить точних методів визначення кількості нейронів прихованого шару. На практиці, це значення треба визначати емпірично, і воно має являти собою результат компромісу між точністю функціонування мережі та обчислювальними затратами на її реалізацію [95]. Точність функціонування мережі при збільшенні кількості нейронів зростає, але тільки до тих пір, поки не виникне явище перенавчання мережі, коли ШНМ здатна розпізнавати тільки образи сигналів з навчальної вибірки.

Згідно Саймона Хайкіна [96] емпіричний підбір оптимальної кількості нейронів прихованого шару можна здійснювати двома методами:

1. Нарощуванням мережі. В цьому випадку в якості початкової архітектури вибирається простий багатошаровий перцептрон, можливостей якого недостатньо для вирішення поставленого завдання. Після цього в мережу додається новий нейрон (або шар прихованих нейронів) до тих пір, доки не буде отримано задовільного результату.

2. Спрощенням структури мережі. Процес адаптації розпочинається з великого багатошарового перцептрона, потужностей якого забагато для вирішення поставленого завдання. Далі мережа поступово спрощується шляхом вибіркового або послідовного видалення нейронів.

Однак, існують і евристичні правила вибору кількості нейронів прихованого шару [94]. Одним з таких правил є правило геометричної піраміди (geometric pyramid rule) [93]. Воно стверджує, що для багатьох практичних реалізацій ШНМ, число нейронів нагадує форму піраміди, при якій це число зменшується від кількості входів до кількості виходів. Звичайно, дане правило не справджується для рекурентних мереж, які використовуються як автоасоціативна пам'ять (наприклад, мережа Хопфілда), тому що вони мають однакову кількість входів і виходів. Згідно правила геометричної піраміди, число нейронів прихованого шару в трьохшаровому перцептроні обчислюється за наступною формулою:

$$k = \sqrt{n \cdot m}, \quad (5.3)$$

де k – число нейронів в прихованому шарі,

n – число нейронів у вхідному шарі,

m – число нейронів у вихідному шарі.

Узагальнивши дане правило до нашого конкретного випадку, виходить, що при восьми входах і одному виході мережі для нормального її функціонування необхідно лише три нейрони у прихованому шарі. Така кількість прихованих нейронів не буде потребувати великих обчислювальних затрат, а тому, варто лише перевірити як ШНМ буде справлятися із поставленим на неї завданням. Якщо цієї кількості буде

недостатньо або забагато, тоді слід звернутись до методів оптимізації Саймона Хайкіна описаних раніше.

5.4.3. Вибір функції активації.

Перш ніж перейти до навчання та тестування сформованої ШНМ варто приділити увагу такому параметру як функція активації. Від вибору даної функції залежить не тільки швидкість, але й метод навчання мережі [97]. Останнє пов'язане з тим, що відомі алгоритми навчання накладають певні обмеження на функцію активації.

Більшість функцій активації мають стискаючі властивості, тобто вихідні значення нейрону завжди належать певному інтервалу, який залежить від типу функції активації [98].

В теорії побудови нейронних мереж застосовують велику кількість функцій активації, серед них слід виокремити чотири, які зустрічаються найчастіше [99]:

1. *Функція Хевісайда* (рис. 5.3). Перший штучний нейрон мав функцію активації у вигляді порогової функції (інша назва – функція Хевісайда), яка на думку авторів першої математичної моделі найкраще відповідала характеристикам біологічного нейрону: значення виходу нейрона рівне нулю до тих пір, доки на виході суматора не буде значення, яке перевищує пороговий рівень T . Як тільки це сталося – нейрон переходить в збуджений стан і на виході з'являється одиниця:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < T \\ 1 & x \geq T \end{cases} . \quad (5.4)$$

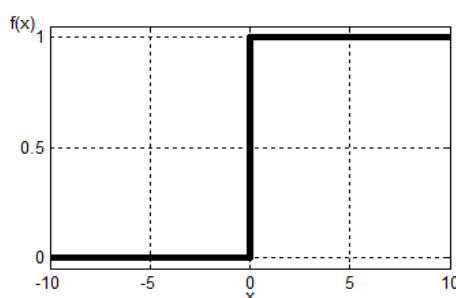


Рис. 5.3. Функція Хевісайда, при $T = 0$.

До переваг функції Хевісайда слід віднести простоту описання та швидкість розрахунку. З недоліків є непридатність для роботи з неперервними сигналами (вихід приймає значення або 0, або 1), а відсутність першої похідної не дозволяє використовувати деякі з методів навчання. Крім того, при використанні функції Хевісайда, наявність прихованих шарів у нейронній мережі є надлишковою, так як вони не впливають на роздільну здатність мережі та на швидкість її навчання.

2. *Лінійна функція активації з насиченням* (рис. 5.4). На відміну від функції Хевісайда лінійна функція з насиченням має проміжні значення в діапазоні від 0 до 1, що дає змогу більш широкого використання в системах класифікації образів. Також цю функцію інтерпретують як апроксимаційну характеристику нелінійного підсилювача. Недоліком залишається відсутність першої похідної.

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ x & 0 < x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases} \quad (5.5)$$

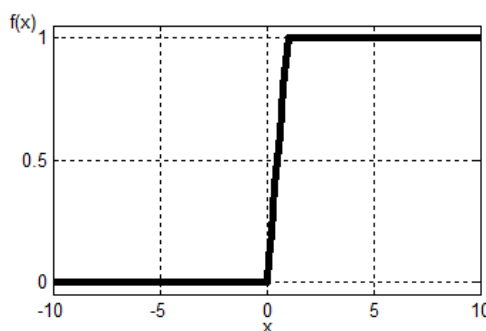


Рис. 5.4. Лінійна функція активації з насиченням.

3. *Сигмоїдальна (логістична) функція* (рис. 5.5). Введення нелінійності в роботу нейронної мережі дозволяє будувати ефективні багатошарові нейронні мережі, які здатні до апроксимації складних функцій. На відміну від порогової, логістична функція диференційована на всій числовій осі та має властивість до підсилення слабких сигналів із

одночасним запобіганням насичення великими вхідними сигналами. Ще до переваг цієї функції варто віднести просту похідну, яка дозволяє ефективно використовувати алгоритм зворотного поширення похибки під час навчання ШНМ.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha \cdot x}}, \quad (5.6)$$

де α - коефіцієнт крутизни функції.

За допомогою параметру α можна задавати різні кути нахилу функції, що використовується для регулювання підсилення слабких сигналів та зміни швидкості навчання мережі.

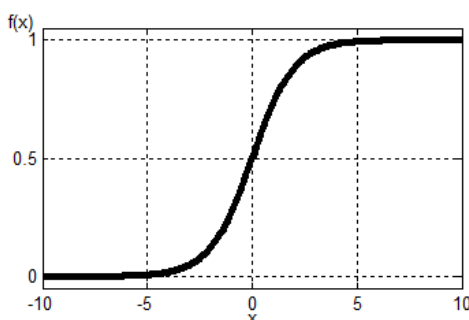


Рис. 5.5. Логістична функція (сигмоїд).

4. *Тангенс гіперболічний* (рис. 5.6). Крім логістичної функції до сигмоїдальних відноситься і тангенс гіперболічний, який має діапазон вихідних значень від -1 до 1. Це дозволяє нейронній мережі працювати не лише з додатними, але і з від'ємними величинами:

$$f(x) = th\left(\frac{x}{\alpha}\right) \quad (5.7)$$

Призначення параметру α аналогічне тому, що вказане для логістичної функції.

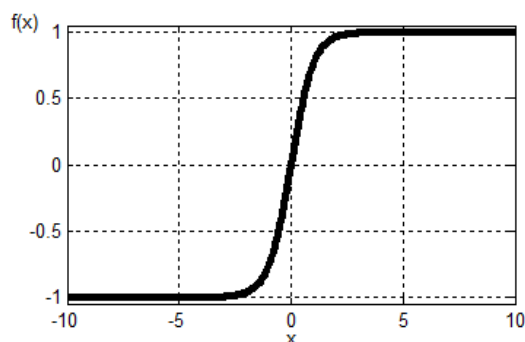


Рис. 5.6. Тангенс гіперболічний.

Серед перелічених функцій активації для побудови ШНМ автоматичного виявлення сигналів від поперечної тріщини рейки найкраще підходить логістична функція, оскільки вона надає найбільшу свободу у виборі методу навчання мережі та діапазон її значень найкраще відображає наявність або відсутність дефекту (1 або 0 відповідно).

5.5. Архітектура ШНМ для автоматичного виявлення сигналів від поперечної тріщини рейки.

В результаті вищенаведеного вибору типу та параметрів ШНМ була отримана трьохшарова нейронна мережа (рис. 5.7) [100, 101], яка складається з вхідного, вихідного та одного прихованого шару.

Вхідний шар містить вісім входів, на які подаються вейвлет-коефіцієнти НВП дефектоскопічного сигналу (масштаби від 8 до 15) [102]. Материнською вейвлет-функцією для НВП був обраний вейвлет (рис. 3.8 а), адаптований до виявлення сигналів від поперечної тріщини.

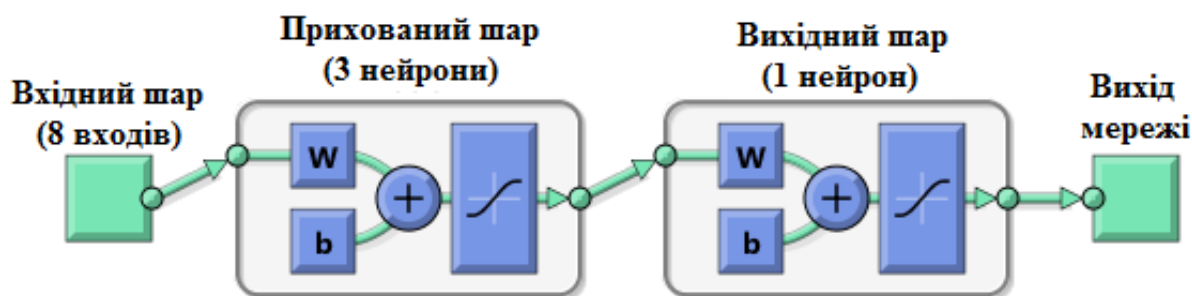


Рис. 5.7. Штучна нейронна мережа для автоматичного виявлення сигналів від поперечної тріщини рейки [102].

Вхідні сигнали дублюються і надходять на кожен з трьох вузлів прихованого шару, де перемножуються на вагові коефіцієнти W , додаються, і з врахуванням вузла зміщення b , цю суму подають на передавальну функцію (в нашому випадку логістичну). Вагові коефіцієнти W , які визначаються під час навчання мережі, впливають на крутизну цієї функції, аналогічно параметру α в рівнянні 5.6. Що стосується вузла зміщення b , то він дозволяє зміщувати передавальну функцію вздовж горизонтальної осі (вправо або вліво), тим самим задаючи відповідний поріг спрацювання нейрону.

Далі сигнали з трьох вузлів прихованого шару надходять у вихідний шар, і залежно від подібності до сигналу від поперечної тріщини рейки, мережа формує сигнал, який відповідає наявності чи відсутності дефекту (1 або 0 відповідно).

5.6. Навчання мережі.

Навіть в тому випадку, коли нейронна мережа сконструйована і її потужностей достатньо для вирішення поставленого завдання, вона не функціонуватиме, якщо немає методу для відповідного налаштування її вагових коефіцієнтів та порогів функцій активації (вузлів зміщення). Для того, щоб мережа мала практичну цінність, потрібен систематичний метод (алгоритм) для обчислення цих значень.

Як вже згадувалось, навчання мережі може бути з вчителем і без вчителя (самонавчання). В першому випадку відомі правильні відповіді для кожного вхідного образу, а вагові коефіцієнти налаштовуються так, щоб мінімізувати похибку навчання. Навчання без вчителя дозволяє розподілити навчальні образи на категорії, за рахунок розкриття внутрішньої структури та природи даних.

Не важко здогадатись, що не існує універсального алгоритму для навчання, який підходить для всіх архітектур ШНМ. Існує лише набір засобів, який представлений множиною алгоритмів, кожен з яких має свої переваги та недоліки в залежності від сфери застосування.

Серед всіх існуючих методів навчання можна виділити два класи: детермінований та стохастичний [103].

Детермінований метод ітеративно коректує параметри мережі, враховуючи її поточне налаштування, значення вхідних сигналів, фактичні та бажані (еталонні) вихідні сигнали. Даний метод найбільш характерний для навчання з вчителем, а його яскравою ілюстрацією є метод зворотного поширення похибки [104].

Стохастичні методи навчання змінюють параметри мережі псевдовипадковим чином. При цьому зберігаються тільки ці зміни, які приводять до покращення.

Оскільки навчальна послідовність сформована з коефіцієнтів НВП (на масштабах від 8 до 15) для сигналів від поперечної тріщини рейки (еталонні значення) та сигналів від шпальних підкладок (хибні значення) то найбільш оптимальним методом навчання ШНМ є детермінований з учителем, а конкретно – алгоритм пружного зворотного поширення похибки [105], який значно покращує швидкість навчання у порівнянні із звичайним методом зворотного поширення похибки.

Процес навчання мережі можна охарактеризувати графіком (рис. 5.8) залежності середньоквадратичної похибки від епохи навчання (подання мережі повного набору даних для навчання) для трьох вибірок (у відсотках в межах навчальної послідовності) [106, 107]:

- навчальної (70%), яка регулює вагові коефіцієнти протягом навчання;
- узагальнювальної (15%), що перевіряє узагальнювальні властивості мережі та зупиняє навчання;

- тестової (15%), яка призначена для абсолютно незалежного тестування мережі.

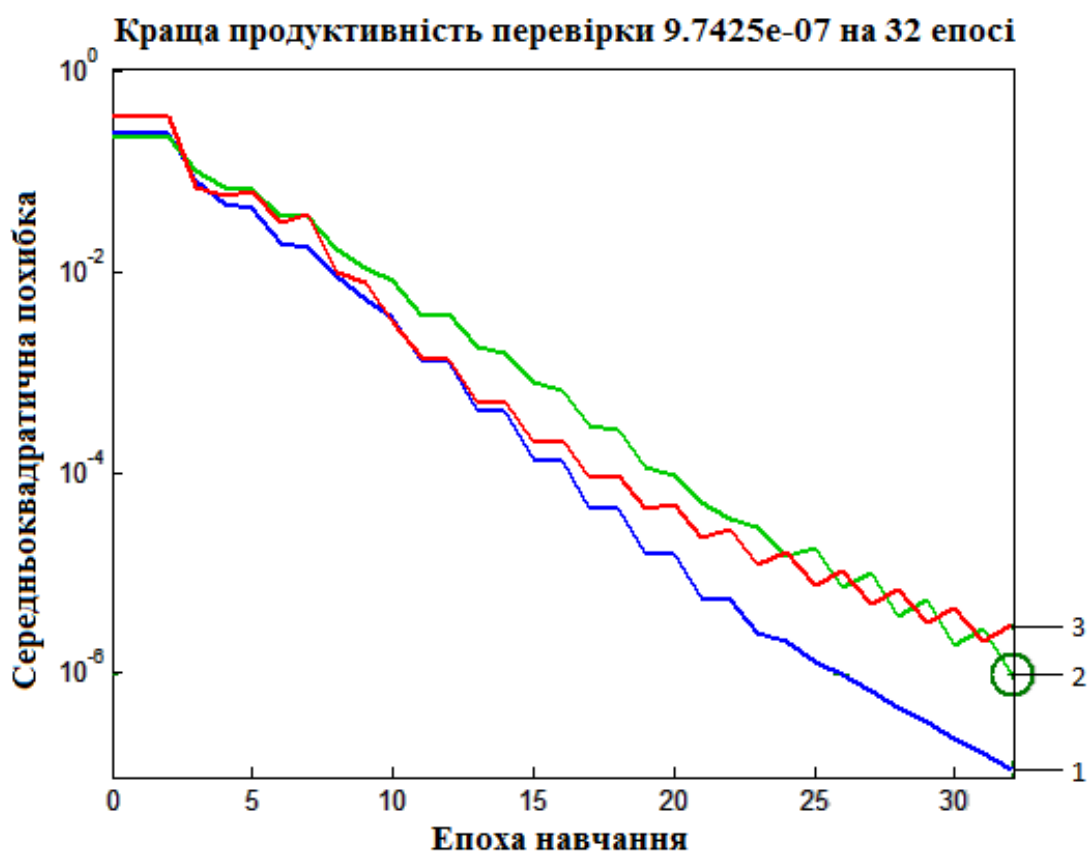


Рис. 5.8. Залежність середньоквадратичної похибки нейронної мережі від епохи навчання для навчальної (1), узагальнювальної (2) та тестової (3) вибірок [106, 107].

Як видно з рис. 5.8 мережа досягла достатньо малого значення середньоквадратичної похибки (приблизно 10^{-6}), що свідчить про успішність процесу навчання.

5.7. Імовірнісні характеристики мережі.

Тепер варто визначити імовірнісні характеристики мережі. Для цього було використано 100 реальних сигналів (50 сигналів від поперечної тріщини та 50 сигналів від шпальних підкладок), які масштабувались в залежності від необхідного співвідношення сигнал/шум. На рис. 5.9 представлено залежність ймовірностей правильного виявлення та хибної тривоги від співвідношення сигнал/шум для сигналів від поперечної тріщини в головці рейки.

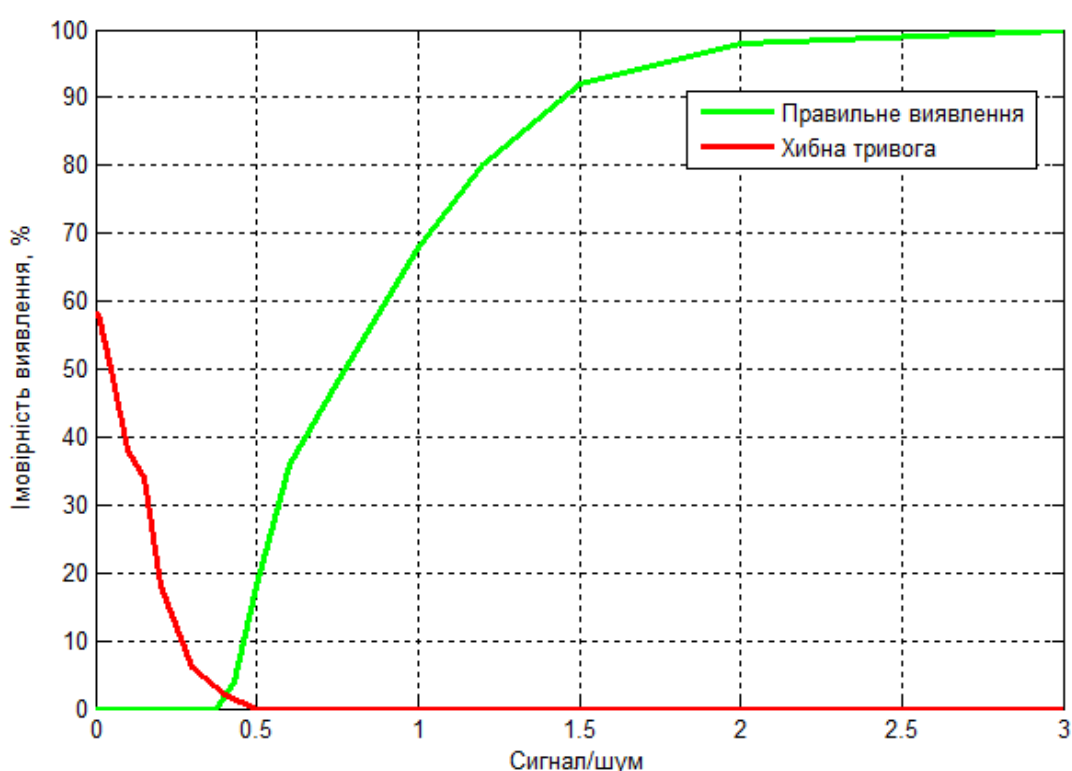


Рис. 5.9. Залежність ймовірностей правильного виявлення та хибної тривоги від співвідношення сигнал/шум (співвідношення амплітуди сигналу від поперечної тріщини рейки до амплітуди сигналів від шпальних підкладок).

Як видно з графіку, ймовірність правильного виявлення сигналів від поперечної тріщини при співвідношенні сигнал/шум рівному 3 (поріг при візуальному огляді) близька до 100%, тобто збудована ШНМ дозволяє

виділяти сигнали, які зобов'язаний реєструвати оператор вагона-дефектоскопа. Крім того, імовірність виявлення слабо розвинутих дефектів (співвідношення сигнал/шум – 1,5) рівна 93%. Такі показники свідчать про готовність ШНМ до практичного використання та перевірки її роботи з реальними дефектоскопічними сигналами.

5.8. Алгоритм виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок на основі НВП та ШНМ.

На рис. 5.10 представлено алгоритм виявлення сигналів від дефектів при магнітодинамічній дефектоскопії залізничних рейок на основі НВП та ШНМ. Оскільки дефектоскопічні файли з розширенням ".def" є бінарними, тому для можливості аналізу в середовищі MATLAB, їх необхідно конвертувати. Як описано в п. 2.1, це можна зробити за допомогою спеціальної програми "undef.exe" (яка включена до АПК «Дефектоскоп»), що перетворює вміст файлу в текст формату CSV. Після конвертації дані готові до аналізу, який передбачає НВП сигналів з обох віток залізничної колії. В якості материнської вейвлет-функції необхідно обирати (або створювати нові) вейвлети, які за формою схожі на сигнали від дефектів, що очікується виявляти. Далі, результати НВП, у вигляді вейвлет-коефіцієнтів, надходять на входи ШНМ і на основі відповідної реакції мережі відбувається позначення фрагменту сигналу як такий, що необхідно уважно переглянути оператору вагона-дефектоскопа, з метою уникнення пропуску небезпечних дефектів, які можуть спричинити аварійні ситуації.

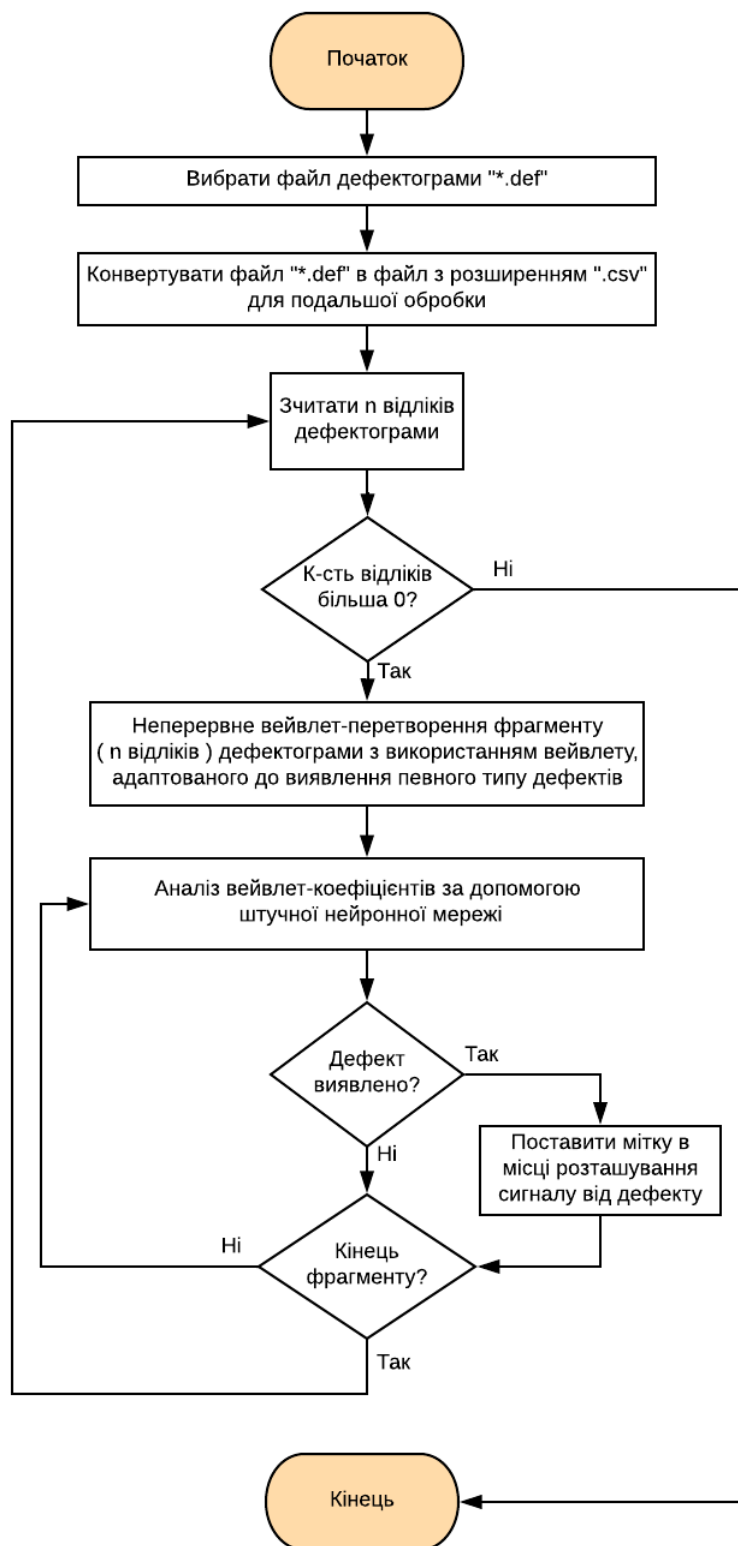


Рис. 5.10. Алгоритм виявлення сигналів від дефектів при магнітодинамічній дефектоскопії рейок на основі НВП та ШНМ.

5.9. Виявлення сигналів від поперечної тріщини рейки на основі НВП та ШНМ.

Для можливості візуально проаналізувати ефективність алгоритму представленого на рис. 5.10, засобами MATLAB GUIDE (англ. Graphical User Interface Development Environment – середовище розробки графічного інтерфейсу в MATLAB) було розроблено програму “Defectogram Analyzer” з графічним інтерфейсом користувача зображеним на рис. 5.11 [108] (код програми розміщений в Додатку А).

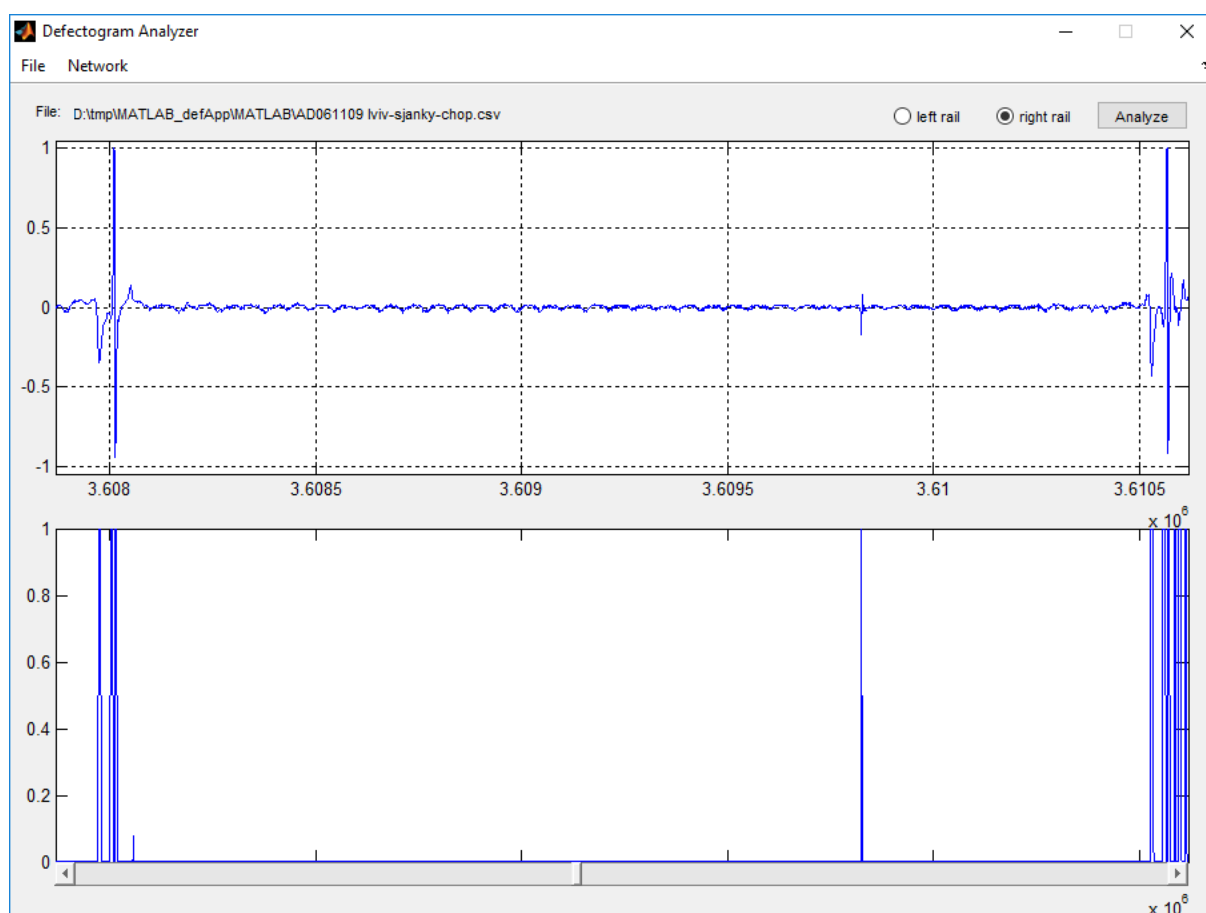


Рис. 5.11. Результат аналізу дефектоскопічного сигналу зображеного на рис. 3.14 за допомогою збудованої ШНМ [108].

Через меню “File” ця програма дозволяє завантажувати дефектоскопічні сигнали, які збережені в форматі “csv” і автоматично їх проаналізувати. Пункт меню “Network -> Retrain” дає змогу здійснити перенавчання мережі, метою якого є зменшення середньоквадратичної

похибки. Кнопка "Analyze" стає активною тільки після перенавчання ШНМ і дозволяє проаналізувати сигнал повторно. Верхній графік відображає фрагмент дефектоскопічного сигналу (в межах завантаженого сигналу), який відповідає рейці довжиною 25 метрів (2500 відліків), а нижній – реакцію на цей фрагмент нейронної мережі. Горизонтальна вісь обох графіків представлена у відліках.

В якості прикладу роботи мережі було завантажено дефектоскопічний сигнал, записаний на ділянці залізничного полотна Львів – Сянки – Чоп, 6 листопада 2009 р. та обрано для аналізу (за допомогою радіокнопки "right rail") праву вітку колії. На верхньому графіку рис. 5.11 зображена та частина дефектоскопічного сигналу, яка відповідає дефектограмі представлений на рис. 3.14. Сигнал від поперечної тріщини був виявлений оператором вагона-дефектоскопа, оскільки його амплітуда є достатньо великою. Як показано на нижньому графіку рис. 5.11 цей образ також виявила і нейронна мережа, про що свідчить вертикальна лінія навпроти нього. Це означає, що ШНМ дозволяє виявляти сигнали, які безпосередньо створюють загрозу безпеці руху [88].

Крім цього, яскраво вираженого сигналу від поперечної тріщини рейки, ШНМ виявила десятки інших сигналів, які за своєю формою нагадують даний дефект, однак залишились поза увагою оператора вагона-дефектоскопа. Один з таких випадків представлений на рис. 5.12.

Як видно на рис. 5.12, амплітуда виявленого сигналу майже не вирізняється на фоні сигналів від підкладок. Амплітуда цього сигналу приблизно рівна $1,5 \cdot a_n$, що в 2 рази менше рівня виявлення дефектів. Це, в свою чергу, свідчить про можливість виділення сигналів від слабо розвинутих дефектів, які не несуть загрози безпеці руху, але, у випадку їх розвитку, можуть спричинити до аварійних ситуацій. Спостереження за такими сигналами впродовж кількох заїздів вагона-дефектоскопа дає змогу проводити моніторинг розвитку дефектів, а у випадку відсутності такого

сигналу в наступних заїздах – розцінювати попереднє спрацювання мережі як хибне.

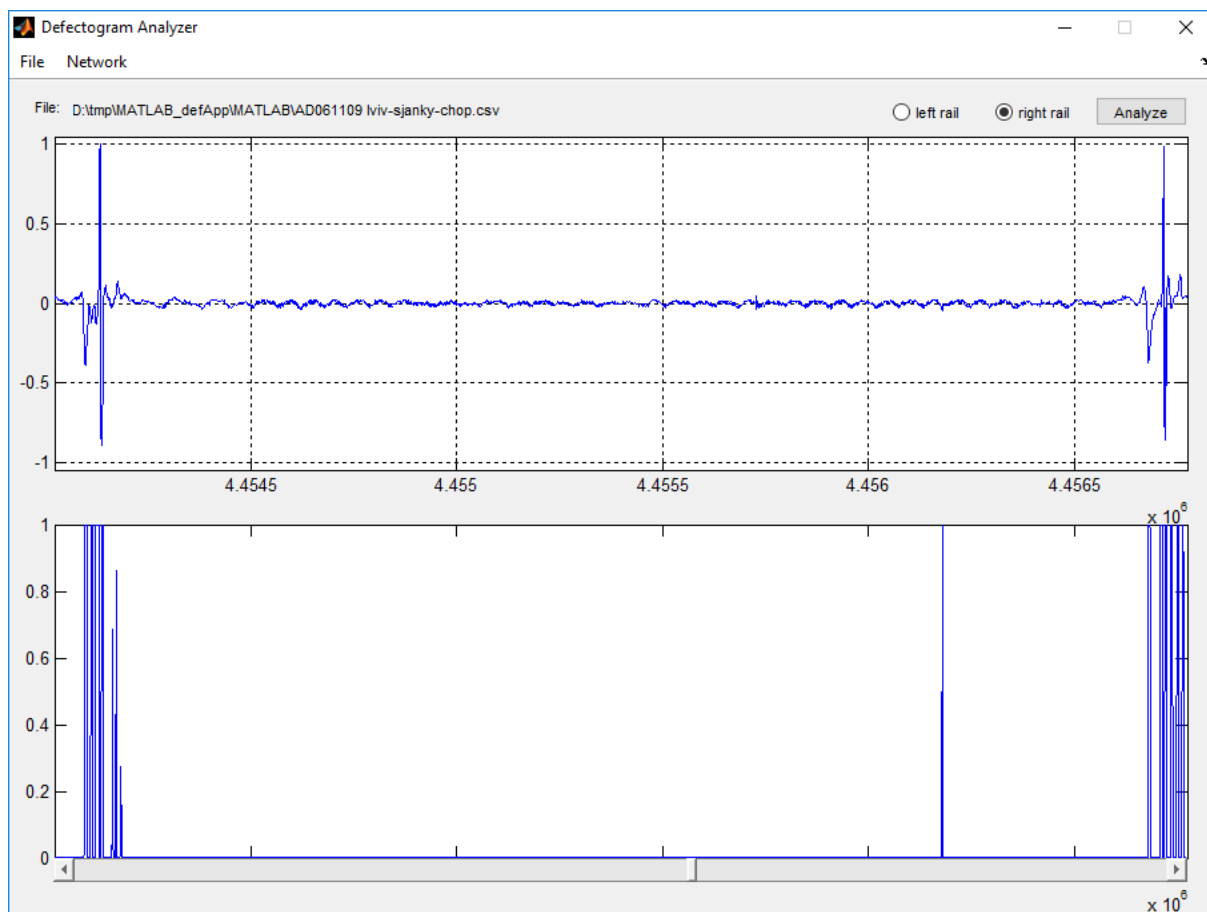


Рис. 5.12. Результат аналізу фрагменту дефектоскопічного сигналу за допомогою ШНМ [88]

(заїзд Львів – Сянки – Чоп, 06.11.2009 р., км: 44, пікет:5).

Цей сигнал, у збільшеному виді, представлений на рис. 5.13.

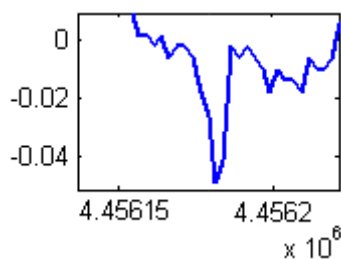


Рис. 5.13. Сигнал виявлений ШНМ [88].

Варто також зазначити, що завантажений в програму сигнал містив 7867392 відліки, тобто дефектоскопічна інформація про 78674 метри залізничного шляху (аналізувалась лише права вітка колії). Процес аналізу цього сигналу (на комп'ютері з процесором Intel Core i5-4440 з тактовою частотою 3.1 ГГц та оперативною пам'яттю 8 Гбайт) тривав 5,38 с, що відповідає швидкості опрацювання дефектограми – 14623 м/с!

Звичайно, серед сигналів, які виділила мережа, є і хибні виявлення. Їх появу можна зменшити шляхом залучення до аналізу додаткових даних, які сприятимуть прийняттю правильного рішення про наявність або відсутність дефекту. Такими даними можуть бути сигнали з інших систем НК рейок, сигнали отримані багатокomпонентними давачами, а також моніторингові дані з попередніх заїздів. Це призведе до збільшення кількості входів ШНМ та нейронів у прихованому шарі (а, можливо, і до появи другого прихованого шару).

При необхідності виявляти інші типи дефектів (не лише від поперечної тріщини в головці рейки) можна слідувати двом напрямкам:

1. Розширення існуючої структури ШНМ, при якому кількість нейронів вихідного шару мережі повинна рівнятись кількості типів дефектів. Це призведе до збільшення кількості вхідних елементів та нейронів прихованого шару. Збільшення числа входів викликане тим, що НВП для конкретного типу дефекту (з метою покращення його виявлення) потрібно здійснювати за допомогою відповідної материнської функції, а також мають бути визначені найбільш значущі масштаби, за якими буде навчатись мережа. Повністю очевидним є той факт, що ці параметри будуть відмінні для кожного типу дефекту. Одним з найголовніших недоліків цього підходу є те, що ШНМ потрібно буде перенавчати (повністю!) кожного разу після додавання нового типу дефекту або поновлення навчальної вибірки для будь-якого з існуючих (тих, які мережа вміє виявляти) дефектів.

2. Побудова для кожного нового типу дефекту нової ШНМ за принципом аналогічним побудові ШНМ для виявлення поперечної тріщини в головці рейки. Такий підхід є більш безпечним, оскільки гарантує, що зміни, які мають місце для конкретного типу дефекту не вплинуть на роботу інших.

Отже, ШНМ та НВП є одними з найпотужніших засобів ЦОС, які в комплексі добре підходять для виявлення дефектів залізничних рейок, причому швидкість опрацювання дефектоскопічних сигналів є дуже високою – 14623 м/с. Створена ШНМ (та розроблена на її основі програма) не може замінити оператора вагона-дефектоскопа в прийнятті рішення про придатність рейки до подальшої експлуатації, однак може значно полегшити та підвищити ефективність його роботи, шляхом виділення (для розгляду оператором) тільки тих фрагментів дефектограми, які з найбільшою імовірністю походять від дефектів.

5.10. Висновки до розділу 5.

1. Збудовано ШНМ для аналізу дефектоскопічних сигналів, яка дала змогу виявляти сигнали від дефектів на початкових стадіях їх розвитку, починаючи від співвідношення сигнал/шум 1,5, що в 2 рази краще, ніж поріг при візуальному аналізі сигналів.

2. Описаний процес побудови ШНМ для виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки може бути застосований для інших типів дефектів. Причому, це можна реалізувати як розширенням існуючої нейронної мережі (яке буде вимагати змін в структурі та повного перенавчання), так і створенням окремої мережі для конкретного типу дефекту.

3. Запропоновано спосіб підвищення точності роботи ШНМ шляхом залучення додаткових даних для аналізу з інших методів НК, використання

сигналів отриманих багатокомпонентними давачами, а також інформації про попередні заїзди вагона-дефектоскопа.

4. Розроблено алгоритмічно-програмне забезпечення для аналізу дефектоскопічних сигналів, яке на основі НВП та ШНМ виділяє ті фрагменти дефектограми, які з великою імовірністю (імовірність правильного виявлення сигналів від поперечної тріщини рейки при співвідношенні сигнал/шум 1,5 рівна 92%), походять від дефектів. При цьому, швидкість опрацювання діагностичної інформації рівна 14623 м/с. Це дало змогу підвищити ефективність та достовірність контролю технічного стану рейок та спростити роботу оператора вагона-дефектоскопа, якому необхідно переглядати лише виділені програмою фрагменти.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано наукове завдання виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок на початкових стадіях їх зародження та збільшення швидкості опрацювання дефектоскопічних сигналів шляхом автоматизації процесу виявлення дефектів (в першу чергу дефектів від поперечної тріщини в головці рейки) за допомогою вейвлет-перетворень та штучних нейронних мереж.

Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи:

1. Проведено аналіз сучасних методів та засобів мобільної дефектоскопії залізничних рейок та визначено шляхи їх подальшого вдосконалення, а саме:

- 1) використання суміщених вагонів-дефектоскопів, які поєднують декілька методів НК стану рейок, основними з яких є ультразвуковий та магнітодинамічний;
- 2) розроблення нових сенсорів для МВД, що дозволить створити нові діагностично-інформаційні системи з компонентним і багатоканальним способами відбору і опрацювання дефектоскопічних сигналів;
- 3) автоматизація процесів відбору, реєстрації, обробки і дешифровки дефектоскопічних сигналів;
- 4) застосування сучасних методів ЦОС (таких як вейвлет-перетворення та нейронні мережі) для аналізу та обробки дефектоскопічних сигналів.

2. Розглянуто основні типи дефектів, які виявляються МВД та сигнали, які вони формують. Досліджено вплив на форму сигналу від поперечної тріщини таких факторів як: швидкість руху вагона-дефектоскопа, розмір, глибина залягання, ширина розкриву тріщини та наявність її виходу на поверхню. Це дало змогу виокремити основні

властивості форми сигналу від поперечної тріщини, які в подальшому були враховані при створенні материнського вейвлету для НВП.

3. Створено материнську вейвлет-функцію для НВП, яка адаптована до виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки та проаналізовано за її допомогою реальний дефектоскопічний сигнал. Це забезпечило можливість виділення сигналів від дефектів на ранніх стадіях їх розвитку, коли амплітуда менша за поріг виявлення дефектів ($3 \cdot a_n$), яким керується оператор вагона-дефектоскопа.

4. Запропонований алгоритм створення материнської вейвлет-функції для поперечної тріщини в головці рейки можна застосовувати при побудові материнських вейвлетів, які орієнтовані на інші типи дефектів (наприклад, поздовжнє горизонтальне розшарування головки рейки).

5. Проведено аналіз дефектоскопічного сигналу за допомогою ДВП. Було визначено, що очистка від шуму та компресія – найсильніші сторони ДВП, які при обробці дефектоскопічних даних вносять спотворення форми сигналу від небезпечних дефектів, а тому їх використання повинно бути достатньо обережним.

6. Збудовано ШНМ для аналізу дефектоскопічних сигналів, яка дала змогу виявляти сигнали від дефектів на початкових стадіях їх розвитку, починаючи від співвідношення сигнал/шум 1,5, що в 2 рази краще, ніж поріг при візуальному аналізі сигналів.

7. Розроблено алгоритмічно-програмне забезпечення для аналізу дефектоскопічних сигналів, яке дозволяє виявляти сигнали від поперечної тріщини рейки зі швидкістю опрацювання дефектограми – 14623 м/с (імовірність правильного виявлення при співвідношенні сигнал/шум 1,5 рівна 92%). Це дало змогу підвищити ефективність та достовірність контролю технічного стану рейок і спростити роботу оператора вагона-дефектоскопа, якому необхідно переглядати лише виділені програмою фрагменти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rail Inspection Technologies. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.innotrack.net/IMG/pdf/d441.pdf>.
2. Карпаш А.М. Аналіз відомих методів контролю фізико-механічних характеристик металу // Нафтогазова енергетика: всеукр. наук.-техн. журн. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. — 2012. — № 1(17). — С. 70–82.
3. Matiieshyn Y. Modern methods of mobile diagnostics of railway tracks defects / Y. Matiieshyn, V. Nichoha, V. Shkliarskyi, V. Storozh, L. Vashchyshyn, M. Borovets, P. Zhuk // Advanced Rail Technologies (ART'2017) : VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa, 23–24 listopada 2017 r., Warszawa, Polska : materiały konferencyjne. — Warszawa, 2017.— S.71.
4. Lesiak P. Automatyzacja badan defektoskopowych szyn na szlaku kolejowym // Problemy Kolejnictwa. — 2001. — No. 134. — pp. 105–121.
5. Clark R. Ultrasonic characterisation of defects in rails / R. Clark, S. Singh, C. Haist // Insight. — 2002. — No. 44(6). — pp. 341–347.
6. Гурвич А. К. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте / А. К. Гурвич, Б. П. Довнар, В. Б. Козлов [и др.]; под ред. А. К. Гурвича. — М. : Транспорт, 1983. — 318 с.
7. Марков А.А. Магнитодинамический метод контроля рельсов / А.А. Марков, А.Г. Антипов // В мире НК. — 2012. — № 3(57). — С. 66–71.
8. The First 20 years of the A.C. field Measurement Technique. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/502_wcndtfinal00502.pdf
9. A novel high-speed rail inspection system. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.ndt.net/article/ecndt02/156/156.htm>.
10. Sperry walking stick. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.sperryrail.com/pedestrian.php>.

11. Нічога В. О. Особливості виявлення дефектів рейок магнітним і ультразвуковим вагонами-дефектоскопами в умовах Львівської залізниці / В. О. Нічога, М. В. Сім'яновський, І. С. Кучма, Г. Р. Трохим // Відбір і обробка інформації. — 2011. — №34 (110). — С. 42–48.

12. Нічога В. О. Дослідження сигналів магнітодинамічної дефектоскопії на Львівській залізниці / В. О. Нічога, П. Б. Дуб, В. М. Іванчук, Ю. М. Романишин // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів (серія) : зб. наук. пр. — Л. : Нац. акад. наук України, Фізико-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 2008. — Вип. 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій. — С. 8–19.

13. Нічога В.О. Магнітодинамічний метод діагностики залізничної колії і напрямки його модернізації / В.О. Нічога, І.Н. Прудіус, І.В. Сторож, В.Г. Сторож, Л.В. Ващишин, П.Б. Дуб // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. — 2016. — №849. — С. 99–116.

14. Eddy current detection of head-checks on the gauge corner of rails: Recent results. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ndt.net/article/v07n06/thomas/thomas.htm>.

15. Advantage of a combined ultrasonic and eddy current examination for railway inspection trains. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.4.5.3.pdf>.

16. Krull R. Non-destructive testing of rails today and in the future / R. Krull, H. Hintze, M. Thomas, T. Heckel // ZEVrail Glasers Annalen. — 2003. — 127. — pp. 286–296.

17. Совмещенный вагон-дефектоскоп. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://vsz.gomel.by/index.php/ru/vagons/specialnogo-naznacheniya/252-sovmeschennyi-vagon-defektoskop.html>.

18. Антипов Г. А. Современное состояние и перспективы развития магнитных методов контроля рельсового пути / Г. А. Антипов, А. А. Марков // Современные технологии извлечения и обработки информации : сб. науч. тр. — СПб. : ОАО "Радиоавионика", 2001. — С. 45–52.

19. Вагоны-дефектоскопы «ВД-УМТ-2». — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://tvema.ru/516>.

20. Rail Inspection. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.nde-ed.org/AboutNDT/SelectedApplications/RailInspection/RailInspection.htm>.

21. Нормативно-техническая документация. Классификация дефектов рельсов НТД/ЦП-1-93. Каталог дефектов рельсов НТД/ЦП-2-93. Признаки дефектных и остродефектных рельсов НТД/ЦП-3-93. — М. : Транспорт, 1993. — 63 с.

22. Власов В.В. Исследования по дефектоскопии железнодорожных рельсов в движущихся магнитных полях. Изучение выявляемости рельсовых дефектов и характера создаваемых ими сигналов в искательной системе / В.В. Власов, А.И. Воробьев // Физика металлов и металловедение. — 1959. — Т. 7, Вып. 3. — С. 341–349.

23. Власов В. В. Исследования по дефектоскопии железнодорожных рельсов в движущихся магнитных полях. 15. Спектры сигналов от некоторых дефектов / В. В. Власов, А. И. Воробьев, Е. И. Успенский // Физика металлов и металловедение. — 1959. — Т. 7, Вып. 6. — С. 837–841.

24. Успенский Е.И. Спектры импульсов Э.Д.С. от дефектов и помех в показаниях вагонов-дефектоскопов // Дефектоскопия рельсов. — 1967. — № 243. — С. 17–26.

25. Успенский Е.И. Автоматизация контроля рельсов магнитными вагонами-дефектоскопами. — М.: Транспорт, 1970. — 28 с.

26. Козлов В.Б. О расшифровке осциллограмм. Рельсовая дефектоскопия. — М.: Трансжелдориздат, 1959. — 150 с.

27. Ключев В.В. Некоторые вопросы расчета высокочастотных накладных датчиков вихревых токов // Дефектоскопия. — 1966. — № 4. — С. 36–45.

28. Ключев В.В. Контроль накладными и накладными экранными вихретоковыми преобразователями движущихся изделий / В.В. Ключев, М.Л. Файнгойз // Дефектоскопия. — 1974. — № 1. — С. 106–111.

29. Шкарлет Ю.М. Основы теории моделей накладных электромагнитных и электромагнито-акустических преобразователей // Дефектоскопия. — 1974. — № 2. — С. 39–45.

30. Дорофеев А.Л. Электроиндуктивная дефектоскопия. — М.: Машиностроение, 1967. — 232 с.

31. Nichoga V. Ways of modernization of the lviv railway magnetic non-destructive testing carriage using magnetic flux leakage rail inspection / V. Nichoga, I. Prudyus, I. Storozh, V. Storozh, L. Vashchyshyn // Transport z. 114 : prace naukowe — Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016. — S. 239–244.

32. Nichoga V. Kierunki w modernizacji lwowskiego wagonu-defrktoskopu magnetycznego przy zastosowaniu magneto-dynamicznej metody diagnostyki szyn torow kolejowych / V. Nichoga, I. Prudyus, V. Storozh, L. Vashchyshyn // Transport XXI wieku : Midzynarodowa konferencja naukowa, 30 sierpnia – 2 września 2016 r., Arłamów, Polska : proc. — Warszawa, 2016.— S.339–340.

33. Трохим Г.Р. Аналіз апаратної частини магнітодинамічного дефектоскопа залізничних рейок та шляхи її модернізації / Г.Р. Трохим, В.О. Нічога, П.Б. Дуб // Відбір і обробка інформації. — 2010. — № 33(109). — С. 43–46.

34. Трохим Г.Р. Статистичний аналіз вимірювальних сигналів при магнітодинамічній дефектоскопії залізничних рейок: автореф дис. ... канд. тех. наук / Г.Р. Трохим. — Львів, 2009. — 20 с.

35. Saldan O. Experimental research of signals of defects such as the transverse cracks on the rail imitator / O. Saldan, V. Nichoha, V. Storozh, I. Storozh, I. Stefanyshyn // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIIIth Intern. Conf. (TCSET'2016), 22–26 February 2016, Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2016. — pp. 222–225.

36. Нічога В. О. Компонентні давачі для магнітної діагностики технічного стану рейок залізничної колії / В. О. Нічога, П. Б. Дуб, І. В. Сторож // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2014. — № 3. — С. 34–43.

37. Сторож І. В. Восьмиканальний активний давач для магнітної діагностики залізничної колії / І. В. Сторож, В. О. Нічога // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. Серія: Радіoeлектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. — 2011. — №705. — С. 171–175.

38. Кононов О. А. Дефектоскопический комплекс магнитного вагона-дефектоскопа / О. А. Кононов, В. В. Осипов, А. А. Марков [и др.] // Путь и путевое хозяйство. — 2000. — № 5. — С. 23–25.

39. Нічога В. О. Параметри індукційних сенсорів для діагностики об'єктів, середовищ і систем / В. О. Нічога, П. Б. Дуб, Л. В. Ващишин // Відбір і обробка інформації. — 2015. — Вип.42 (118). — С. 27–34.

40. Нічога В.О. Перспективи використання багатокomпонентної дефектоскопії при магнітодинамічній діагностиці рейок залізничної колії / В.О. Нічога, Г.Р. Трохим, І.В. Сторож, С. Кучма // Україна у європейському просторі. Проблеми бізнесу, політики, права: матеріали VI Міжнар. наук.-техн. конф., 29–30 квітня 2010 року, Львів / Львівський університет бізнесу і права. — Львів, 2010. — С. 246–248.

41. Сторож І. В. Модель тріщини для дослідження компонент поля в магнітній дефектоскопії залізничних рейок / І. В. Сторож, В. О. Нічога, Л. В. Ващишин // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ–2012) : матеріали 17-ої міжнар. наук.-техн. конф., 20–25 лют. 2012 р., Славське. Л., 2012. — С. 27–30.

42. Марков А.А. Магнитодинамический метод контроля рельсов в вагонах-дефектоскопах / А.А. Марков, А.Г. Антипов // Путь и путевое хозяйство. — 2012. — № 12. — С. 9–15.

43. Башкатова Л.В. Компьютеризированные средства неразрушающего контроля и диагностики железнодорожного пути / Л.В. Башкатова, А.К. Гурвич, А.А. Марков, А.В. Лохач. — Санкт-Петербург: Радиоавионика, 1997. — 128 с.

44. Матюнин А.Ю. Этапы решения задачи при разработке автоматической системы распознавания образов // Системы и модели в информационном мире: Материалы Межд. науч. конф. — Ч. 3 Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2009. — С. 41 – 43.

45. Максименко И.Н. Автоматизация расшифровки дефектограмм методом сопоставления / И.Н. Максименко, Ф.А. Цветков // Новые информационные технологии. Разработка и аспекты применения: 2-я Всерос. науч. конф. м. уч. и асп. Таганрог: ТРТУ, 1999. — 32 с.

46. Нічога В. О. Сучасний стан методів та апаратури для швидкісної технічної діагностики залізничної колії електромагнітними методами / В. О. Нічога, П. Б. Дуб, В. М. Іванчук // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів : зб. наук. пр. — Л. : Нац. акад. наук України, Фізико-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, 2007. — Вип. 12 : Неруйнівний контроль та технічна діагностика матеріалів та конструкцій. — С. 3–15.

47. Даниленко Е. Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів та рейок залізниць України / Е. Даниленко, А. Орловський, А. Татуревич, М. Уманов, Д. Сливець. — Дніпропетровськ: Арт-Пресс, 2000. — 148 с.

48. Дослідження методів відбору і опрацювання діагностичних сигналів при багатокомпонентній магнітній дефектоскопії залізничних рейок: Звіт по НДР : НД-25-4.7 / ФМІ НАНУ ; В. О. Нічога, П. Б. Дуб, Г. Р. Трохим, В. М. Іванчук, І. В. Сторож, Л. В. Ващишин. — Л., 2010. — 93 с. — № ДР 0110U000435.

49. Брандис М.П. Руководство по дефектоскопии рельсов мобильными средствами / М.П. Брандис, С.И. Заика, В.А. Лончак, Д.М. Марандич. — Кишинев: Tipogr. Balacron, 2005. — 207 с.

50. Гурвич А.К. Дефектоскопия рельсов / А.К. Гурвич, Б.П. Довнар, В.Б. Козлов и др. — М.: Транспорт, 1978. — 440 с.

51. Дьяконов В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник / В. Дьяконов, И. Абраменкова. — Санкт-Петербург: Издательский дом «Питер», 2002. — 608 с.

52. Нічога В. О. Спектральний аналіз дефектоскопічних сигналів швидкісної магнітної дефектоскопії за допомогою перетворення Фур'є / В. О. Нічога, І. В. Сторож, Л. В. Ващишин // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ–2010) : матеріали 15-ої Міжнар. наук.-техн. конф., 15–20 лют. 2010 р., Славське. — Л., 2010, — С. 21–23.

53. Нічога В. О. Застосування віконного перетворення Фур'є і вейвлет перетворення при аналізі сигналів магнітної діагностики залізничних рейок / В. О. Нічога, Л. В. Ващишин., І. В. Сторож, В. М. Іванчук // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ–2011) : матеріали 16-ої міжнар. наук.-техн. конф., 21–26 лют. 2011 р., Славське. — Л., 2011. — С. 134–139.

54. Нічога В. О. Аналіз сигналів деяких небезпечних дефектів при магнітній дефектоскопії залізничних рейок з допомогою віконного перетворення Фур'є і вейвлет - перетворення. / В. О. Нічога, І. В. Сторож, Л. В. Ващишин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 4. — С. 46–51.

55. MATLAB - новые возможности в технологии осциллографии. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.kit-e.ru/articles/measure/2009_10_133.php.

56. Афонский А. А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов; Под ред. проф. В. П. Дьяконова. — М.: СОЛОН-Пресс, 2009. — 248 с.

57. Storozh I. Physical modeling of field distribution for magnetic crack detector / I. Storozh, V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIIth Intern. Conf. (TCSET'2014), 21 February – 1 March 2014, Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — Р. 157–159.

58. Бурцева В. А. О возможности обнаружения мелких поверхностных дефектов в стальных изделиях электроиндуктивным методом / В. А. Бурцева, В. В. Власов // Дефектоскопия. — 1974. — №1. — С. 120–122.

59. Герасимов В. Г. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков; В. В. Сухорукова. — М. : Высшая школа, 1992. — 312 с.

60. Королёв М. Ю. Магнитодинамический метод контроля рельсов. Методология расчета полей и сигналов : автореф дис. ... канд. тех. наук / М. Ю. Королёв. — СПб., 2003. — 26 с.

61. Nichoga V. Model of rail crack based on a discrete set of loops with current / V. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // Diagnostyka — Warszawa : PTDT, 2013. — Vol. 14, No 2. — S. 67–70.

62. Нестеренко А. Д. Введение в теоретическую электротехнику / А. Д. Нестеренко. — К. : Наукова думка, 1969. — 352 с.

63. Никольский В. В. Теория электромагнитного поля : учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по радиотехн. спец. / В. В. Никольский. — Изд. 3-е. — М. : Высшая школа, 1964. — 384 с.

64. Nichoga W. Model of rail crack based on a discrete set of loops with current / W. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów (Diag'2013) : VIII Krajowa Konferencja, 3–7 czerwca 2013 r., Ustroń, Polska : streszczenia referatów. — Warszawa, 2013.— S. 79.

65. Королев М. Ю. Расчетные модели для оценки сигналов от объектов пути при магнитодинамическом методе неразрушающего контроля рельсов / М. Ю. Королев // В мире неразрушающего контроля. — 2002. — №4 (18). — С. 72–73.

66. Нічога В. О. Шляхи синтезу базисів для цифрового аналізу сигналів магнітної дефектоскопії залізничних рейок / В. О. Нічога, І. В. Сторож, Л. В. Ващишин // Системи контролю оточуючої середовища : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. семинар / НАН України, Мор. гідрофіз. ін-т — Севастополь, 2012. — С. 44–54.

67. Nichoga V. Application of a magnetic field model above the defect for detection of transverse cracks in the magnetic flaw control of the railway / V. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIth Intern. Conf. (TCSET'2012), 21–24 February 2012, Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. — P. 122.

68. Сторож І. В. Застосування модельованих і адаптованих сигналів як базису для вейвлет-подібного аналізу сигналів магнітної дефектоскопії залізничних рейок / І. В. Сторож, В. О. Нічога, Л. В. Ващишин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 4 (додаток) — С. 12–14.

69. Нічога В. Створення "Материнської" вейвлет-функції та аналіз за її допомогою дефектоскопічного сигналу від поперечної тріщини рейок / В. Нічога, Л. Ващишин, І. Сторож // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 3. — С. 61–69.

70. Nichoga V. Continuous wavelet transform of railway track defectoscopic signals in the matlab wavelet toolbox / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Elektronika i Optoelektronika — Warszawa, 2014. — Vol. LXIII, No 4. — S. 21–27.

71. Иванько Е.О. Построение адаптированной вейвлет-функции для выявления поздних потенциалов предсердий // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». — 2010. — № 2(55). — С. 115–121.

72. Ващишин Л. В. Неперервне вейвлет-перетворення дефектоскопічного сигналу від поперечної тріщини залізничної рейки / Л. В. Ващишин, В. М. Іванчук, І. В. Сторож // 22-а відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів КМН-2011, 26–28 жовт. 2011 р., Львів : зб. тез доп. Л., 2011. — С. 229–232.

73. Nichoga V. Modern Method of Processing Signals from Dangerous Defects in the High-Speed Magnetic Rails Flaw / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Transport z. 98 : prace naukowe — Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013. — S. 483–490.

74. Nichoga W. Diagnostics of railway tracks using continuous wavelet transform / W. Nichoga, L. Vashchyshyn, V. Antonyuk // Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów (Diag'2013) : VIII Krajowa Konferencja, 3–7 czerwca 2013 r., Ustroń, Polska : streszczenia referatów. — Warszawa, 2013. — S. 80.

75. Nichoga V. Using the matlab wavelet toolbox for analysis of railway track defectoscopic signals / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Metrologia

wspomagana komputerowo (MWK'2014) : X szkola-konferencja, 27–30 maja 2014 r., Waplewo, Polska — 2014.— S.108–109.

76. Vashchyshyn L. Analysis of defectoscopic signals using the wavelet, adapted to detection signals from transverse cracks in the head of a rail / L. Vashchyshyn, V. Nichoga, I. Storozh // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIth Intern. Conf. (TCSET'2012), 21–24 February 2012, Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. — P. 96.

77. Нічога В. Аналіз сигналів дефектів залізничних рейок на основі неперервних вейвлет-перетворень / В. Нічога, Л. Ващишин, О. Салдан // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. Серія: Радіoeлектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. — 2014. — №796. — С. 8–13.

78. Ващишин Л. В. Критерії виявлення сигналу від поперечної тріщини рейки за допомогою неперервного вейвлет-перетворення / Л. В. Ващишин, В. О. Нічога // Відбір і обробка інформації. — 2013. — Вип.38 (114). — С. 69–74.

79. Nichoga V. Nowoczesna metoda przetwarzania sygnalow niebezpiecznych wad w szynach kolejowych przy szybkosciowej defektoskopii magnetycznej / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Transport XXI wieku : Midzynarodowa konferencja naukowa, 16–19 wrzesnia 2013 r., Run, Polska : proc. — Warszawa, 2013.— S.187.

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

81. Ващишин Л. Використання дискретного вейвлет-перетворення для обробки та аналізу сигналів швидкісної магнітної дефектоскопії залізничної колії / Л. Ващишин, В. Нічога, І. Сторож // Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”. Серія: Радіoeлектроніка та телекомунікації : зб. наук. праць. — 2012. — №738. — С. 21–28.

82. Теорема Котельникова. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Котельникова.

83. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. — Москва: СОЛОН-Р, 2002. — 448 с.

84. Нічога В.О. Можливості дискретного вейвлет-перетворення для обробки та аналізу дефектоскопічних сигналів / В.О. Нічога, Л. В. Ващишин, І. В. Сторож // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ–2012) : матеріали 17-ої міжнар. наук.-техн. конф., 20–25 лют. 2012 р., Славське. Л., 2012. — С. 39–42.

85. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.dspguide.com/pdfbook.htm>.

86. Перцептрон. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://uk.wikipedia.org/wiki/Перцептрон>.

87. Ващишин Л. Штучні нейронні мережі, як засіб для розпізнавання дефектів залізничних рейок / Л. Ващишин, В. Нічога, І. Сторож // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 5. — С. 34–37.

88. Nichoga V. Wavelet-neural network for detection signals from transverse cracks in the rail head / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Computational Problems of Electrical Engineering : XVIth Intern. Conf. (CPEE'2015), 2–5 September 2015, Lviv, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2015. — P. 132–134.

89. Нейронна мережа Ворда. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://uk.wikipedia.org/wiki/Нейронна_мережа_Ворда.

90. Нейронна мережа Кохонена. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://uk.wikipedia.org/wiki/Нейронна_мережа_Кохонена.
91. Нейронна мережа Хопфілда. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://uk.wikipedia.org/wiki/Нейронна_мережа_Хопфілда.
92. Головки В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. — Москва: ИПРЖР, 2001. — 256 с.
93. Masters T. Practical Neural Network Recipes in C++, Academic Press, London 1993, p. 504.
94. Swingler K. Applying Neural Networks: A Practical Guide, Morgan Kaufman Publishers, San Francisco 1996, p. 303.
95. Визначення потрібної кількості нейронів мережі для обчислення енергетично оптимального потоку ротора асинхронного двигуна. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi_2011/0222.pdf.
96. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. — М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2006. — 1104 с.
97. Nichoga V. Process Of Building Artificial Neural Network For Automatic Detection Of Signals From Transverse Cracks In The Rail Head / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Problemy Kolejnictwa — Warszawa, 2017. — Tom 60, Issue 175. — S. 59–62.
98. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. — Москва: Мир, 1999. — 184 с.
99. Адаменко В.О. Штучні нейронні мережі в задачах реалізації матеріальних об'єктів. Частина 1. Принципи побудови та класифікація / В.О. Адаменко, Г.О. Мірських // Вісн. Нац. ун-ту "Київський політехнічний інститут". Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2011. — № 47. — С. 176–189.

100. Nichoga V. Application of the wavelet and neural technologies for processing of signals obtained during railway tracks diagnostics by the magnetic flux leakage method / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // *Metrologia wspomagana komputerowo (MWK'2017)* : XI szkola-konferencja, 23–26 maja 2017 r., Waplewo, Polska — 2013. — S.71.

101. Nichoga V. Artificial neural network for detecting defects in railway track / V. Nichoha, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // *Advanced Rail Technologies (ART'2016)* : V Miedzynarodowa Konferencja Naukowa, 9–10 listopada 2016 r., Warszawa, Polska : materialy konferencyjne. — Warszawa, 2016.— S.97.

102. Ващишин Л. В. Використання вейвлет-нейронних мереж для виявлення дефектів залізничних рейок / Л. В. Ващишин, В.О. Нічога // *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ'2014)* : матеріали 4-ої всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, 16-17 травня 2014 р., Тернопіль: ТНЕУ, 2014. — С. 94–95.

103. Васенков Д.В. Методы обучения искусственных нейронных сетей // *Компьютерные инструменты в образовании*. — 2007. — № 1. — С. 20–29.

104. Метод обратного распространения ошибки. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_обратного_распространения_ошибки.

105. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/916c/eefae4b11dad3ee754ce590381c568c90de.pdf>.

106. Ващишин Л. В. Виявлення поперечної тріщини в головці рейки за допомогою вейвлет-перетворень та нейронних мереж / Л. В. Ващишин, В. О. Нічога // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. — 2014. — №3. — С. 142–146.

107. Vashchyshyn L. Detection of a Transverse Crack in Railheads with the Help of Wavelet Transforms and Neural Networks / L. Vashchyshyn, V. Nichoga // Materials Science — November 2014. — Vol. 50, Issue 3. — pp. 468–473.

108. Nichoga V. Application of the wavelet and neural technologies for processing of signals obtained during railway tracks diagnostics by the magnetic flux leakage method / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Elektronika i Optoelektronika — Warszawa, 2017. — Vol. LXVI, No 4. — S. 195–201.

ДОДАТОК А. Код програми “Defectogram Analyzer”

Файл DefectogramAnalyzer.m

```
% MATLAB код, залежний від інтерфейсу програми
function varargout = DefectogramAnalyzer(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @DefectogramAnalyzer_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @DefectogramAnalyzer_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

% Виконання підготовчих дій безпосередньо перед відображенням інтерфейсу
% hObject - вказівник на головне вікно програми
% handles - структура, яка вказує на обробники та глобальні дані
% varargin - аргументи програми, які передані через командну стрічку
function DefectogramAnalyzer_OpeningFcn(hObject, ~, handles, varargin)
% Найбільш значущі масштаби для поперечної тріщини
mostValuableScales = 8:15;
% Діапазон відліків для відображення сигналу
defaultXLim = [0 2750];

handles.output = hObject;
set(handles.leftRailRadioBtn, 'Value', 1);
handles.defaultXLim = defaultXLim;
handles.mostValuableScales = mostValuableScales;
net = createNeuralNetwork();
handles.net = trainNeuralNetwork(net, mostValuableScales, false);
guidata(hObject, handles);

% Вивід статусу в командну стрічку (реалізація за замовчуванням)
% handles - структура, яка вказує на обробники та глобальні дані
function varargout = DefectogramAnalyzer_OutputFcn(~, ~, handles)
% Отримати вивід в командну стрічку
varargout{1} = handles.output;

% Обробник натиснення кнопки Analyze (здійснити аналіз дефектограми)
% hObject - вказівник на кнопку Analyze
% handles - структура, яка вказує на обробники та глобальні дані
function analyzeSignalBtn_Callback(hObject, ~, handles)
filePath = get(handles.filePathTextBox, 'String');
if filePath ~= 0
    set(handles.defectogramAnalyzerMainWindow, 'pointer', 'watch')
    drawnow;
    signal = getAnalyzedSignal(filePath, handles);
    netOutput=handles.net(performCwt(signal, handles.mostValuableScales));
    axes(handles.netOutputChart);
    plot(netOutput(1,:));
    set(handles.netOutputChart, 'XLim', get(handles.signalChart, 'XLim'), ...
        'XTickLabel', []);
```

```

handles.netOutput = netOutput;
guidata(hObject,handles);

set(handles.defectogramAnalyzerMainWindow, 'pointer', 'arrow');
end

% Обробник пункту меню File -> Open (відкрити .csv файл дефектограми)
% hObject - вказівник на пункт меню File -> Open
% handles - структура, яка вказує на обробники та глобальні дані
function openFileMenu_Callback(hObject, ~, handles)
[fileName, path] = uigetfile('*.csv','Select CSV file');

% Перевірка чи файл був вибраний
if ~isequal(fileName,0)
    set(handles.defectogramAnalyzerMainWindow, 'pointer', 'watch')
    drawnow;

    % Відобразити шлях до вибраного файлу в інтерфейсі програми
    filePath = strcat(path,fileName);
    set(handles.filePathTextBox,'String', filePath);

    axes(handles.signalChart);
    signal = getAnalyzedSignal(filePath, handles);

    % Проаналізувати дефектограму
    netOutput=handles.net(performCwt(signal, handles.mostValuableScales));

    % Відобразити фрагмент сигналу в інтерфейсі програми
    handles.analyzedSignal = signal;
    handles.netOutput = netOutput;
    signalSize = size(signal, 1);
    % Кнопку для аналізу активною
    set(handles.analyzeSignalBtn, 'Enable', 'on');
    timeRange = 1:handles.defaultXLim(2);
    axes(handles.signalChart);
    plot(timeRange,signal(timeRange));
    ylim([-1.05,1.05]);
    grid on;
    magnify;
    % Відобразити результати аналізу в інтерфейсі програми
    axes(handles.netOutputChart);
    plot(timeRange,netOutput(timeRange));
    ylim([0,1]);
    set(handles.signalChart,'XLim', handles.defaultXLim);
    set(handles.netOutputChart,'XLim', handles.defaultXLim);

    % Відкоригувати позицію та ширину полоси прокрутки сигналу
    DeltaX = handles.defaultXLim(2) - handles.defaultXLim(1) + 1;
    StepX = DeltaX/(signalSize-DeltaX);
    handles.min = 1+DeltaX/2;
    max = signalSize - DeltaX/2 + 1;
    set(handles.signalScrollBar,'Min', handles.min, 'Max', max,...
        'Value', handles.min, 'SliderStep', [0.1*StepX StepX]);
    set(handles.signalScrollBar, 'Visible', 'on');
    handles.lastSliderValue = handles.defaultXLim(1) + DeltaX/2;
    guidata(hObject,handles);
    set(handles.defectogramAnalyzerMainWindow, 'pointer', 'arrow');
end

```

```

% Обробник пункту меню Network -> Retrain (перенавчання мережі)
% hObject - вказівник на пункт меню Network -> Retrain
% handles - структура, яка вказує на обробники та глобальні дані
function retrainNetworkMenu_Callback(hObject, ~, handles)
handles.net = trainNeuralNetwork(handles.net,...
    handles.mostValuableScales, true);
guidata(hObject,handles)

% Обробник зміни позиції полоси прокрутки
% hObject - вказівник на полоси прокрутки сигналу
% handles - структура, яка вказує на обробники та глобальні дані
function signalScrollBar_Callback(hObject, ~, handles)
sliderVal=get(hObject, 'Value');
newXLim = get(handles.signalChart, 'XLim') +...
    (sliderVal - handles.lastSliderValue);
handles.lastSliderValue = sliderVal;
guidata(hObject,handles);
timeRange = int64(newXLim(1):newXLim(2));
signalRange = handles.analyzedSignal(timeRange);
nnOutputRange = handles.netOutput(timeRange);
axes(handles.signalChart);
plot(timeRange,signalRange);
grid on;
ylim([-1.05,1.05]);
axes(handles.netOutputChart);
plot(timeRange,nnOutputRange)
ylim([0,1]);
set(handles.signalChart,'XLim', newXLim);
set(handles.netOutputChart,'XLim', newXLim);

% Ініціалізація полоси прокрутки сигналу
% hObject - вказівник на полоси прокрутки сигналу
function signalScrollBar_CreateFcn(hObject, ~, ~)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),...
    get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

% Обробник вибору радіокнопки аналізу сигналів лівої рейки
% handles - структура, яка вказує на обробники та глобальні дані
function leftRailRadioBtn_Callback(~, ~, handles)
set(handles.rightRailRadioBtn,'Value', 0);

% Обробник вибору радіокнопки аналізу сигналів правої рейки
% handles - структура, яка вказує на обробники та глобальні дані
function rightRailRadioBtn_Callback(~, ~, handles)
set(handles.leftRailRadioBtn,'Value', 0);

% Отримати сигнал для аналізу
% filePath - шлях до файлу дефектограми
% handles - структура, яка вказує на обробники та глобальні дані
function signal = getAnalyzedSignal(filePath, handles)
defectogram = loadDefectogram(filePath);
% Вибрати сигнал відповідної вітки колії
analyzeLeftRail = get(handles.leftRailRadioBtn,'Value');
if analyzeLeftRail == 1
    signal = defectogram.PNT1;
else
    signal = defectogram.PNT2;
end

```

Файл createNeuralNetwork.m

```
% Створити нейронну мережу призначену для виявлення сигналів від дефектів
function [ net ] = createNeuralNetwork()
% Сигмоїд
transferFcn = 'logsig';
% Створити багатoshаровий перцептрон та
% задати кількість прихованих нейронів
net = feedforwardnet(3);
% Задати кількість шарів (вхідний шар не береться до уваги,
% так як не містить активних нейронів)
net.numLayers = 2;
% Задати кількість входів мережі
net.inputs{1}.size = 8;
% Задати кількість нейронів вихідного шару
% (відображає наявність або відсутність дефекту)
net.layers{2}.size = 1;
% Встановити функцію активації для нейронів прихованого та вихідного шару
net.layers{1}.transferFcn = transferFcn;
net.layers{2}.transferFcn = transferFcn;
end
```

Файл trainNeuralNetwork.m

```
% Здійснити навчання штучної нейронної мережі
% net - нейронна мережа для якої необхідно виконати навчання
% scales - масштаби на яких необхідно обчислити вейвлет-коефіцієнти
% showTrainingResults - чи відображати результати навчання?
function [net] = trainNeuralNetwork(net, scales, showTrainingResults)
% Завантажити сигнали для навчання
load('learningInputs.mat', 'learningInputs');
% Завантажити правильну реакцію мережі на вхідні дані (навчання з вчителем)
load('learningTargets.mat', 'learningTargets');
% Обчислити вейвлет-коефіцієнти з вхідних сигналів
inputsCwt = performCwtOnTrainingSet(learningInputs, scales);
% Задати функцію для навчання мережі
% (алгоритм пружного зворотного поширення похибки)
net.trainFcn = 'trainrp';
% Чи відображати результати навчання?
net.trainParam.showWindow = showTrainingResults;
[net]= train(net,inputsCwt,learningTargets);
end
```

Файл crack.m

```
% Створення вейвлет-функції на основі шаблону сигналу від
% поперечної тріщини в головці рейки
function [out1,out2] = crack(LB,UB,N,~)
% Завантажити шаблон сигналу від поперечної тріщини в головці рейки
load crack21
% Здійснити апроксимацію сигналу для виконання умови нульового інтегралу
[out1,out2] = pat2cwav(Y,'polynomial',6,'continuous');
end
```

Файл performCwtOnTrainingSet.m

```
% Здійснити неперервне вейвлет-перетворення над навчальними вибірками
% trainingSet - навчальні вибірки даних
% scales - масштаби на яких необхідно обчислити вейвлет-коефіцієнти
function coefs = performCwtOnTrainingSet(trainingSet, scales)
% Розташування особливості в тренувальних даних
featureLocation = 7;
count = size(trainingSet, 2);
coefs = zeros(size(scales,2),count);
```

```
% Обчислити вейвлет-коефіцієнти для кожної навчальної вибірки
for i = 1:count
    itemCoefs = performCwt(trainingSet(:, i), scales);
    coefs(:, i) = itemCoefs(:, featureLocation);
end
end
```

Файл performCwt.m

```
% Здійснити неперервне вейвлет-перетворення сигналу
% data - дані для аналізу
% scales - масштаби на яких необхідно обчислити вейвлет-коефіцієнти
function coefs = performCwt(data, scales)
% В якості материнського вейвлету використано вейвлет 'cr21'
% адаптований до виявлення сигналів від поперечної тріщини
coefs = cwt(data, scales, 'cr21');
end
```

Файл loadDefectogram.m

```
% Завантажити дефектограму з файлу (розширення ".csv") для обробки
function defectogram = loadDefectogram(fileName)
delimiter = ';';
startRow = 2;
endRow = inf;

% Формат кожного рядка файлу дефектограми:
% колонка1 - PNT1: double (%f)
% колонка2 - MIN1: double (%f)
% колонка3 - MAX1: double (%f)
% колонка4 - PNT2: double (%f)
% колонка5 - MIN2: double (%f)
% колонка6 - MAX2: double (%f)
% колонка7 - POS: double (%f)
% колонка8 - SPEED: double (%f)
% колонка9 - MARK: text (%s)
fileFormat = '%f%f%f%f%f%f%f%f%s%[\n\r]';

% Відкрити файл дефектограми
fileID = fopen(fileName, 'r');

% Зчитати дані в масив відповідно до формату файлу
dataArray = textscan(fileID, fileFormat, endRow(1)-startRow(1)+1, ...
    'Delimiter', delimiter, 'EmptyValue', 0, ...
    'HeaderLines', startRow(1)-1, 'ReturnOnError', false, 'EndOfLine',
    '\r\n');
for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
    dataArrayBlock = textscan(fileID, fileFormat, ...
        endRow(block)-startRow(block)+1, 'Delimiter', delimiter, ...
        'EmptyValue', 0, 'HeaderLines', startRow(block)-1, ...
        'ReturnOnError', false, 'EndOfLine', '\r\n');
    for col=1:length(dataArray)
        dataArray{col} = [dataArray{col}; dataArrayBlock{col}];
    end
end
end

% Закрити файл дефектограми
fclose(fileID);
% представлення дефектограми у вигляді таблиці
defectogram = table(dataArray{1:end-1}, 'VariableNames', ...
    {'PNT1', 'MIN1', 'MAX1', 'PNT2', 'MIN2', 'MAX2', 'POS', 'SPEED', 'MARK'});
end
```

ДОДАТОК Б. Акти впровадження результатів дисертації

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Головний інженер СП «Львівський
центр діагностики»



О.Б.Нечай

21 березня 2018 р.

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Ващишина Любомира Володимировича
на тему "

"Виявлення сигналів дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних
рейок шляхом використання вейвлет-перетворень та нейронних мереж"

Комісія у складі професора кафедри радіоелектронних пристроїв та систем (РЕПС) інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки (ІТРЕ) національного університету "Львівська політехніка" (НУ "ЛП") д.т.н. проф. Нічоги В.О., доцента кафедри РЕПС к.т.н. Сторожа В.Г., наукового співробітника теми ДР-ДЗР кафедри РЕПС Ващишина Л.В. з **однієї сторони** і начальника відділу рейкової дефектоскопії Львівського центру діагностики залізничної інфраструктури (ЛЦДРД) Москалика Л.В., начальника магнітного вагона-дефектоскопа №442 Тищенка Ю.Г. і інженера магнітного вагона-дефектоскопа №442 Овчаренка В.В. з **другої сторони** склали цей акт про те, що в результаті проведених спільних робіт по відбору та аналізу сигналів від регулярних і нерегулярних об'єктів рейкового шляху на вагоні-дефектоскопі № 442 створено систему збору дефектоскопічної інформації типу СЗДІ для запису рейкових діагностичних сигналів на основі портативного комп'ютера "Netbook" для використання на магнітних вагонах-дефектоскопах.

Система використовувалась для відбору і аналізу дефектограм паралельно з наявним штатним обладнанням вагона-дефектоскопа виробництва фірми "ЛОГІКА".

В склад системи входять: інтегральний однокомпонентний давач типу ЗД, двокомпонентний давач типу ІДЗ-К, блок вводу сигналів типу СЗДІ та портативний комп'ютера класу "Netbook" зі спеціальним програмним забезпеченням. Система дозволяє проводити вимірювання вертикальної та горизонтальної компоненти магнітного поля сигналів дефектоскопії.

При розробці вказаної системи використані результати, отримані в дисертаційній роботі Л.В. Ващишина.

Професор кафедри РЕПС НУ "ЛП"
д.т.н., проф..

В.О.Нічога

Начальник відділу рейкової
дефектоскопії СП "Львівський центр
діагностики"

Л.В.Москалик

Доцент кафедри РЕПС к.т.н.,
.

В.Г. Сторож

Начальник магнітного вагона-
дефектоскопа №442

Ю.Г.Тищенко

Наук.співроб.теми ДБ- ДЗР кафедри
РЕПС

Л.В.Ващишин

Інженер магнітного вагона-
дефектоскопа №442

В.В.Овчаренко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Фізико-механічного інституту
ім. Г.В.Карпенка НАН України
академік НАН України

З. Т. Назарчук

“05” “03” 2018р.



про впровадження результатів дисертаційної роботи
Ващишина Любомира Володимировича
на тему “Виявлення сигналів дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок
шляхом використання вейвлет-перетворень та нейронних мереж”

Комісія у складі: завідувача лабораторією вібродіагностики, д.т.н., ст.н.с. Р. М. Юзефовича; провідного наукового співробітника, д.ф.-м.н., проф. І. М. Яворського; наукового співробітника, к.т.н. І. Й. Мацька склала цей акт про те, що Л. В. Ващишин приймав активну участь при виконанні науково-дослідних робіт:

– “Дослідження методів відбору і опрацювання діагностичних сигналів при багатокомпонентній магнітній дефектоскопії залізничних рейок”, № державної реєстрації 0110U000435, 2010 р.

– “Розробка методів аналізу і обробки багатомірних сигналів зі стохастичною повторюваністю та створення вимірювальних систем для вібродіагностики”, № державної реєстрації 0110U000433, 2011-2013 рр.

– “Розробка методів і засобів багатомірного спектрального аналізу періодичних нестационарних стохастичних коливань для задач технічної діагностики”, № державної реєстрації 0113U000304, 2013-2015 рр.

Ним були розроблені теоретичні основи для аналізу дефектоскопічних сигналів за допомогою вейвлет-перетворень та нейронних мереж. Л. В. Ващишин також прийняв участь в натурних випробуваннях двокомпонентного давача типу ІДЗ-К та модернізованого рейкового інтегрального давача МД.

Були впроваджені і використані наступні результати дисертаційної роботи Любомира Володимировича Ващишина:

– розробка рекомендацій з удосконалення магнітних вагонів-дефектоскопів на прикладі вагона-дефектоскопа №442, який експлуатується на Львівській залізниці;

– аналіз дефектоскопічних сигналів за допомогою вейвлет-перетворень;

– створення материнської вейвлет-функції для неперервного вейвлет-перетворення на основі моделі сигналу від поперечної тріщини в головці рейки.

– вибір типу та підбір параметрів штучної нейронної мережі для виявлення дефектів типу поперечної тріщини на ранніх стадіях її зародження.

– навчання штучної нейронної мережі за допомогою експериментальних сигналів з метою виявлення дефекту у вигляді поперечної тріщини в головці рейки.

Ці результати використовуються, мають практичне застосування і можуть використовуватися при проведенні подальших досліджень по зазначеній тематиці.

Члени комісії:

зав. лаб. вібродіагностики, д.т.н., ст.н.с.

/ Р. М. Юзефович /

пров. н.с., д.ф.-м.н., проф.

/ І. М. Яворський /

н.с., к.т.н.

/ І. Й. Мацько /

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

професор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

проф. Чухрай Н.І.

2018 р.

**АКТ**

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи

Ващишина Любомира Володимировича

«Виявлення сигналів дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок шляхом використання вейвлет-перетворень та нейронних мереж»

Комісія у складі голови - начальника НДЧ Національного університету «Львівська політехніка» к.т.н., доц. Жук Л.В. та членів: в.о. зав. каф. РЕПС д.т.н., доц. Оборжицького В.І., зав. відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень Лазько Г.В., заст. начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М. склали цей акт про те, що результати кандидатської дисертації Ващишина Л.В. «Виявлення сигналів дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок шляхом використання вейвлет-перетворень та нейронних мереж» використані при виконанні НДР:

- «Розроблення і дослідження малогабаритних компонентних давачів та методик опрацювання інформаційних сигналів для діагностики залізничної колії» (№ держ. реєстрації 011511000434). Зокрема, Ващишин Л.В. розробив математичну модель для числового розрахунку сигналу від дефекту, що дозволяє створити банк сигналів, які є необхідні для подальшої розробки алгоритмів автоматичного виявлення сигналу від реальних дефектів залізничних рейок.

- «Розроблення і дослідження методів достовірного виявлення, опрацювання та класифікації дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок» (№ держ. реєстрації 011711004453).). Зокрема, Ващишин Л.В. провів аналіз сучасного стану розвитку методів діагностики залізничних рейок і їх застосування в країнах світу і особливостей методів швидкісної дефектоскопії залізничних рейок.

Голова комісії:
Начальник НДЧ,
к.т.н., доцент

Л.В. Жук

Члени комісії:

В.о. зав. каф. РЕПС
д.т.н., доцент

В.І. Оборжицький

Зав. відділу НОСНД

Г.В. Лазько

Заст. начальника ПФВ

Т.М. Чулой

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

проректор

за науково педагогічної роботи

Національного університету

"Львівська політехніка"

Давидчак О.Р.

16.04.2018 р.



АКТ

про впровадження у навчальний процес
Національного університету "Львівська політехніка"
результатів кандидатської дисертаційної роботи
Ващишина Любомира Володимировича

"Виявлення сигналів дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок
шляхом використання вейвлет-перетворень та нейронних мереж"

Даний акт складено про те, що в Національного університету "Львівська політехніка" на кафедрі "Радіотехнічні пристрої та системи" в лекційних курсах для студентів спеціальності 172 "Телекомунікації та радіотехніка" найшли застосування наступні результати дисертаційної роботи Ващишина Л.В. "Виявлення сигналів дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок шляхом використання вейвлет-перетворень та нейронних мереж"

1) У курсі "Основи теорії передавання інформації" (для базового напрямку 050901 "Радіотехніка") запроваджено вивчення складних нестационарних сигналів, які передаються від сканувальних сенсорів при магнітодинамічній діагностиці об'єктів.

2) У курсі "Радіотехнічні пристрої і системи захисту інформації" (для магістрів спеціальності 172 "Телекомунікації та радіотехніка") впроваджено вивчення методів перетворення сигналів при шифруванні інформації з застосуванням вейвлет-перетворень.

Ефект від використання названих результатів полягає в ознайомленні майбутніх спеціалістів с принципами побудови сучасних інформаційно-діагностичних систем для виявлення і опрацювання складних цифрових сигналів сучасними методами.

Директор інституту телекомунікацій,
радіоелектроніки та електронної техніки
д.т.н., проф..

І.Н.Прудіус

Голова науково-методичної комісії ІТРЕ
д.т.н., доц..

Б.М. Стрихалюк

в.о. зав.кафеди РЕПС
д.т.н., доц..

В.І.Оборжицький

ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Нічога В. Створення "Материнської" вейвлет-функції та аналіз за її допомогою дефектоскопічного сигналу від поперечної тріщини рейок / В. Нічога, Л. Ващишин, І. Сторож // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 3. — С. 61–69.

2. Ващишин Л. Використання дискретного вейвлет-перетворення для обробки та аналізу сигналів швидкісної магнітної дефектоскопії залізничної колії / Л. Ващишин, В. Нічога, І. Сторож // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Радіoeлектроніка та телекомунікації. — 2012. — №738 — С. 21–28.

3. Нічога В. О. Аналіз сигналів деяких небезпечних дефектів при магнітній дефектоскопії залізничних рейок з допомогою віконного перетворення Фур’є і вейвлет - перетворення. / В. О. Нічога, І. В. Сторож, Л. В. Ващишин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 4. — С. 46–51.

4. Сторож І. В. Застосування модельованих і адаптованих сигналів як базису для вейвлет-подібного аналізу сигналів магнітної дефектоскопії залізничних рейок / І. В. Сторож, В. О. Нічога, Л. В. Ващишин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 4 (додаток) — С. 12–14.

5. Ващишин Л. Штучні нейронні мережі, як засіб для розпізнавання дефектів залізничних рейок / Л. Ващишин, В. Нічога, І. Сторож // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2012. — № 5. — С. 34–37.

6. Нічога В. О. Шляхи синтезу базисів для цифрового аналізу сигналів магнітної дефектоскопії залізничних рейок / В. О. Нічога,

І. В. Сторож, Л. В. Ващишин // Системи контролю навколишнього середовища. — 2012. — № 18. — С. 44–54.

7. Ващишин Л. В. Критерії виявлення сигналу від поперечної тріщини рейки за допомогою неперервного вейвлет-перетворення / Л. В. Ващишин, В. О. Нічога // Відбір і обробка інформації. — 2013. — Вип.38 (114). — С. 69–74.

8. Nichoga V. Modern Method of Processing Signals from Dangerous Defects in the High-Speed Magnetic Rails Flaw / V. Nichoga, I.Prudyus, L.Vashchyshyn // Transport z. 98 : prace naukowe — Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013. — S. 483–490.

9. Nichoga V. Model of rail crack based on a discrete set of loops with current / Vitalij Nichoga, Igor Storozh, Liubomyr Vashchyshyn // Diagnostyka — Warszawa : PTDT, 2013. — Vol. 14, No 2. — S. 67–71. (Scopus).

10. Ващишин Л. В. Виявлення поперечної тріщини в головці рейки за допомогою вейвлет-перетворень та нейронних мереж / Л. В. Ващишин, В. О. Нічога // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2014. — №3. — С. 142–146.

11. Vashchyshyn L. Detection of a Transverse Crack in Railheads with the Help of Wavelet Transforms and Neural Networks / L. Vashchyshyn, V. Nichoga // Materials Science — November 2014. — Vol. 50, Issue 3. — pp. 468–473. (перекладено з української, Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2014. — №3. — С. 142–146). (Scopus)

12. Nichoga V. Continuous wavelet transform of railway track defectoscopic signals in the matlab wavelet toolbox / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Elektronika i Optoelektronika — Warszawa, 2014. — Vol. LXIII, No 4. — S. 21–27. (Index Copernicus)

13. Нічога В. Аналіз сигналів дефектів залізничних рейок на основі неперервних вейвлет-перетворень / В. Нічога, Л. Ващишин, О. Салдан // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Радіoeлектроніка та телекомунікації. – 2014. — №796 — С. 8–13. (Index Copernicus)

14. Нічога В. О. Параметри індукційних сенсорів для діагностики об'єктів, середовищ і систем / В. О. Нічога, П. Б. Дуб, Л. В. Ващишин // Відбір і обробка інформації. — 2015. — Вип.42 (118). — С. 27–34.

15. Нічога В.О. Магнітодинамічний метод діагностики залізничної колії і напрямки його модернізації / В.О. Нічога, І.Н. Прудіус, І.В. Сторож, В.Г. Сторож, Л.В. Ващишин, П.Б. Дуб // Вісник НУ “Львівська політехніка” – Радіoeлектроніка та телекомунікації. — 2016. — №849 — С. 99–116. (Index Copernicus)

16. Nichoga V. Ways of modernization of the Lviv railway magnetic non-destructive testing carriage using magnetic flux leakage rail inspection / V. Nichoga, I. Prudyus, I. Storozh, V. Storozh, L. Vashchyshyn // Transport z. 114 : prace naukowe — Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016. — S. 239–244.

17. Nichoga V. Process Of Building Artificial Neural Network For Automatic Detection Of Signals From Transverse Cracks In The Rail Head / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Problemy Kolejnictwa — Warszawa, 2017. — Tom 60, Issue 175. — S. 59–62.

18. Nichoga V. Application of the wavelet and neural technologies for processing of signals obtained during railway tracks diagnostics by the magnetic flux leakage method / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Elektronika i Optoelektronika — Warszawa, 2017. — Vol. LXVI, No 4. — S. 11–77. (Index Copernicus)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

19. Нічога В. О. Спектральний аналіз дефектоскопічних сигналів швидкісної магнітної дефектоскопії за допомогою перетворення Фур'є /

В. О. Нічога, І. В. Сторож, Л. В. Ващишин // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ-2010) : матеріали 15-ої Міжнар. наук.-техн. конф., Славське. — Л., 2010, — С. 21–23. (Дати проведення: 15–20 лютого 2010 р., форма участі – заочна участь)

20. Нічога В. О. Застосування віконного перетворення Фур'є і вейвлет перетворення при аналізі сигналів магнітної діагностики залізничних рейок / В. О. Нічога, Л. В. Ващишин., І. В. Сторож, В. М. Іванчук // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ-2011) : матеріали 16-ої міжнар. наук.-техн. конф., Славське. — Л., 2011. — С. 134–139. (Дати проведення: 21–26 лютого 2011 р., форма участі – заочна участь)

21. Ващишин Л. В. Неперервне вейвлет-перетворення дефектоскопічного сигналу від поперечної тріщини залізничної рейки / Л. В. Ващишин, В. М. Іванчук, І. В. Сторож // 22-а відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів КМН-2011, Львів : зб. тез доп. Л., 2011. — С. 229–232. (Дати проведення: 26–28 жовтня 2011 р., форма участі – очна доповідь)

22. Нічога В.О. Можливості дискретного вейвлет-перетворення для обробки та аналізу дефектоскопічних сигналів / В.О. Нічога, Л. В. Ващишин, І. В. Сторож // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ-2012) : матеріали 17-ої міжнар. наук.-техн. конф., Славське. — Л., 2012. — С. 39–42. (Дати проведення: 20–25 лютого 2012 р., форма участі – очна доповідь)

23. Сторож І. В. Модель тріщини для дослідження компонент поля в магнітній дефектоскопії залізничних рейок / І. В. Сторож, В. О. Нічога, Л. В. Ващишин // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ-2012):матеріали 17-ої міжнар. наук.-техн. конф., Славське. — Л., 2012. — С. 27–30. (Дати проведення: 20–25 лютого 2012 р., форма участі – співдоповідач)

24. Vashchyshyn L. Analysis of defectoscopic signals using the wavelet, adapted to detection signals from transverse cracks in the head of a rail / L. Vashchyshyn, V. Nichoga, I. Storozh // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIth Intern. Conf. (TCSET'2012), Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. — P. 96. (Дати проведення: 21–24 лютого 2012 р., форма участі – очна доповідь)

25. Nichoga V. Application of a magnetic field model above the defect for detection of transverse cracks in the magnetic flaw control of the railway / Nichoga V., Storozh I., Vashchyshyn L. // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIth Intern. Conf. (TCSET'2012), Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. — P. 122. (Дати проведення: 21–24 лютого 2012 р., форма участі – співдоповідач)

26. Nichoga W. Diagnostics of railway tracks using continuous wavelet transform / W. Nichoga, L. Vashchyshyn, V. Antonyuk // Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów (Diag'2013): VIII Krajowa Konferencja, Ustroń, Polska : streszczenia referatów. — Warszawa, 2013. — S. 80. (Дати проведення: 3–7 червня 2013 р., форма участі – співдоповідач)

27. Nichoga W. Model of rail crack based on a discrete set of loops with current / W. Nichoga, I. Storozh, L. Vashchyshyn // Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów (Diag'2013) : VIII Krajowa Konferencja, Ustroń, Polska : streszczenia referatów. — Warszawa, 2013.— S. 79. (Дати проведення: 3–7 червня 2013 р., форма участі – співдоповідач)

28. Nichoga V. Nowoczesna metoda przetwarzania sygnałów niebezpiecznych wad w szynach kolejowych przy szybkościowej defektoskopii magnetycznej / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Transport XXI wieku : Międzynarodowa konferencja naukowa, Run, Polska : proc. —

Warszawa, 2013.— S.187. (Дати проведення: 16–19 вересня 2013 р., форма участі – співдоповідач)

29. Storozh I. Physical modeling of field distribution for magnetic crack detector / I. Storozh, V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : XIIth Intern. Conf. (TCSET'2014), Lviv–Slavske, Ukraine: proc. — P. 157–159. (Дати проведення: 21 лютого – 1 березня 2014 р., форма участі – співдоповідач)

30. Ващишин Л. В. Використання вейвлет-нейронних мереж для виявлення дефектів залізничних рейок / Л. В. Ващишин, В.О. Нічога // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ'2014) : матеріали 4-ої всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, Тернопіль: ТНЕУ, 2014. — С. 94–95. (Дати проведення: 16–17 травня 2014 р., форма участі – заочна участь)

31. Nichoga V. Using the matlab wavelet toolbox for analysis of railway track defectoscopic signals / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Metrologia wspomagana komputerowo (MWK'2014): X szkola-konferencja, Waplewo, Polska — 2014.— S.108-109. (Дати проведення: 27–30 травня 2014 р., форма участі – співдоповідач)

32. Nichoga V. Wavelet-neural network for detection signals from transverse cracks in the rail head / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Computational Problems of Electrical Engineering: XVIth Intern. Conf. (CPEE'2015), Lviv, Ukraine: proc. — Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2015. — P. 132-134. (Дати проведення: 2–5 вересня 2015 р., форма участі – очна доповідь)

33. Nichoga V. Kierunki w modernizacji lwowskiego wagonu-defrktoskopu magnetycznego przy zastosowaniu magneto-dynamicznej metody diagnostyki szyn torow kolejowych / V. Nichoga, I. Prudyus, V. Storozh, L. Vashchyshyn // Transport XXI wieku : Midzynarodowa konferencja

naukowa, Arłamów, Polska : proc. — Warszawa, 2016.— S.339-340. (Дати проведення: 30 серпня – 2 вересня 2016 р., форма участі – очна доповідь)

34. Nichoga V. Artificial neural network for detecting defects in railway track / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Advanced Rail Technologies (ART'2016) : V Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Warszawa, Polska : materiały konferencyjne. — Warszawa, 2016.— S.97. (Дати проведення: 9–10 листопада 2016 р., форма участі – співдоповідач)

35. Nichoga V. Application of the wavelet and neural technologies for processing of signals obtained during railway tracks diagnostics by the magnetic flux leakage method / V. Nichoga, L. Vashchyshyn // Metrologia wspomagana komputerowo (MWK'2017) : XI szkola-konferencja, Waplewo, Polska — 2017. — S.71. (Дати проведення: 23–26 травня 2017 р., форма участі – співдоповідач)

36. Matiieshyn Y. Modern methods of mobile diagnostics of railway tracks defects / Y. Matiieshyn, V. Nichoha, V. Shkliarskyi, V. Storozh, L. Vashchyshyn, M. Borovets, P. Zhuk // Advanced Rail Technologies (ART'2017) : VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Warszawa, Polska : materiały konferencyjne. — Warszawa, 2017.— S.71. (Дати проведення: 23–24 листопада 2017 р., форма участі – співдоповідач)