

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Ващишин Любомир Володимирович**



УДК 620.179.14

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

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконувалась в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України у відділі відбору та обробки стохастичних сигналів та завершена на кафедрі радіоелектронних пристроїв та систем Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Нічога Віталій Олексійович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
професор кафедри радіоелектронних пристроїв та систем.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Русин Богдан Павлович,**  
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка  
Національної академії наук України, завідувач  
відділу методів та систем дистанційного зондування;  
  
доктор технічних наук, доцент  
**Любчик Віталій Романович,**  
Хмельницький національний університет,  
професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки.

Захист відбудеться «12» жовтня 2018 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12, ауд. 218 XI навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано «07» вересня 2018 р.

*Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, д.т.н., доцент*

І.В. Демидов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** 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.

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 радіоелектронних пристроїв та систем: "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.

**Результати дисертаційної роботи впроваджені:** в науково-дослідні роботи, виконані в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України; в науково-дослідні роботи, виконані в Національному університеті «Львівська політехніка»; в навчальний процес у Національному університеті «Львівська політехніка» при підготовці фахівців напряму «Радіотехніка» на кафедрі "Радіоелектронні пристрої та системи";

в роботу магнітного вагона-дефектоскопа № 442 Львівського центру діагностики залізничної інфраструктури Львівської залізниці. Усі результати реалізації підтверджено відповідними актами про впровадження та використання.

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні і 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 [10, 36]; визначення основних напрямків модернізації львівського вагону-дефектоскопу, який реалізує магнітодинамічний метод неруйнівного контролю [11, 17, 33]; вибір моделі сигналу від поперечної тріщини в головці рейки [12, 23, 27, 29]; створення материнської вейвлет-функції, адаптованої до виявлення сигналів від поперечної тріщини та порівняння її з існуючими вейвлетами [1, 4, 6, 24]; аналіз дефектограм з сигналами від дефектів за допомогою НВП [7, 9, 13, 21, 25, 26, 31]; дослідження можливості використання ДВП, перетворення Фур'є та віконного перетворення Фур'є для аналізу та обробки дефектоскопічних сигналів [2, 3, 19, 20, 22]; підбір параметрів, побудова та застосування ШНМ для виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок [5, 8, 14-16, 18, 28, 30, 32, 34, 35].

**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 szkolach-konferencjach «Metrologia wspomagana komputerowo» MWK (Waplewo, Polska, 2014, 2017); IV-й всеукраїнській школі-семінарі молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» АСІТ (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.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

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 методів мобільної діагностики залізничних рейок. Розглянуто ультразвуковий, магнітодинамічний, імпульсний вихрострумний, автоматизований візуальний та гібридний методи НК стану рейок та реалізації цих методів в вагонах-дефектоскопах і портативних засобах контролю. 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 небезпечних дефектів.

Описано принцип роботи магнітного вагона-дефектоскопа (МВД) на прикладі вагона-дефектоскопа № 442 Львівської залізниці, проведено аналіз системи реєстрації та обробки діагностичної інформації, а також наведено перелік та опис дефектів, які даний дефектоскоп дозволяє виявляти.

У **другому розділі** – «Визначення основних характеристик дефектоскопічних сигналів та вибір методів для їх аналізу» – описано дефектоскопічні сигнали від регулярних та нерегулярних структурних елементів залізничного шляху та здійснено порівняння методів для їх аналізу та обробки.

Проведена підготовка даних, отриманих вагоном-дефектоскопом, для подальшого аналізу в програмному середовищі MATLAB.

На рис. 1 наведено фрагмент дефектограми від правої (зверху) та лівої (знизу) рейок залізничної колії. Рівень фону і середній рівень сигналу – це послідовність сигналів від підкладок, із амплітудою  $a_n$ . Вони представляють собою від'ємні або додатні викиди сигналу відносно середнього рівня. 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.

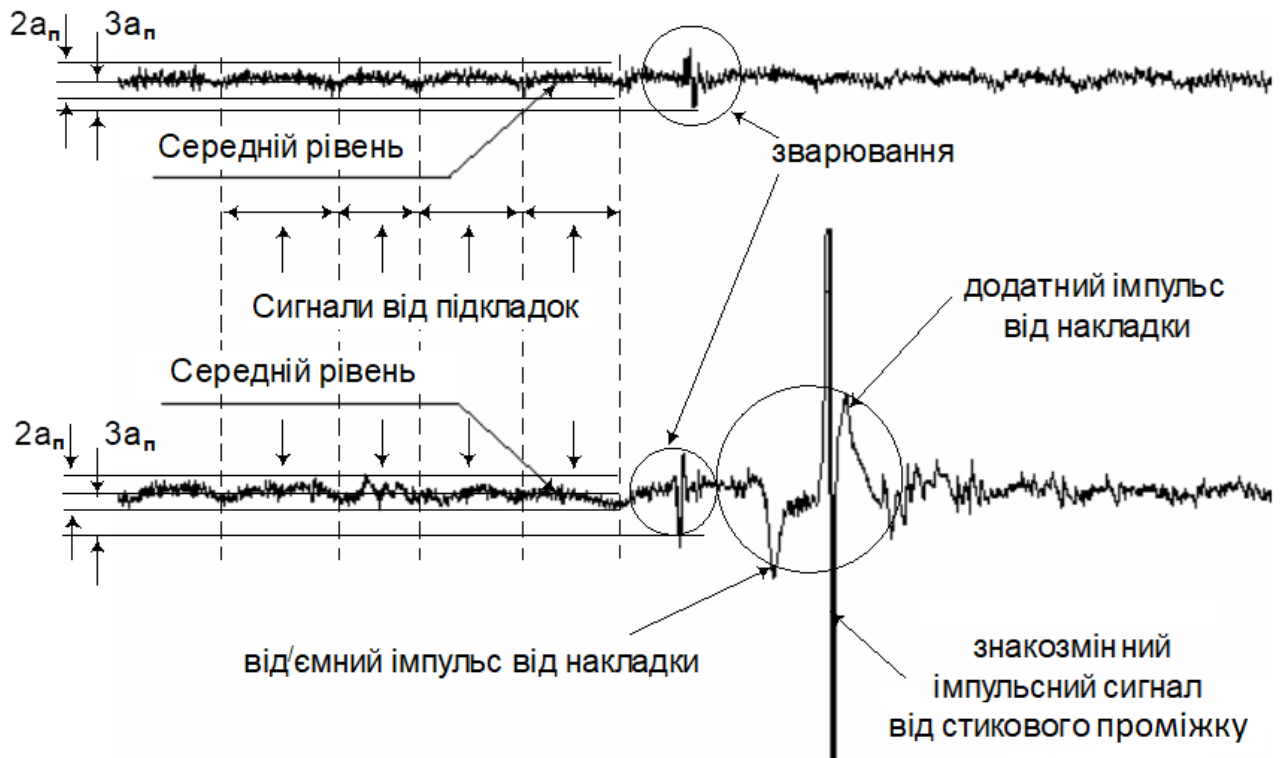


Рис. 1. Фрагмент дефектограми з позначеними на ньому сигналами від підкладок, накладки, стику та зварювання.

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. 1 показаний знакозмінний сигнал великої амплітуди від стикового проміжку, який має навколо себе два імпульси різної полярності, які означають, відповідно, початок і кінець стикової накладки.

На рис. 1 також видно імпульсні сигнали від якісного зварного з'єднання правої і лівої рейки 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 значення  $3 \cdot a_n$ , яке ще називають порогом виявлення дефектів.

Серед всіх дефектів, які виявляє магнітний вагон-дефектоскоп (дефекти за кодами 20, 21, 24, 25, 26.3, 27, 28.1 та 30Г.2) найнебезпечнішим та найпоширенішим (приблизно 40% всіх випадків гостродефектних рейок) є поперечна тріщина в головці рейки за кодом 21. Всі вищезгадані дефекти, окрім 30Г.2 (горизонтальне розшарування головки рейки), незалежно від причини їх появи представляють собою поперечну тріщину в рейці. Форми сигналів (образи) від цих дефектів дуже схожі, а конкретний тип дефекту може бути встановлений лише при натурному огляді. З цієї причини в літературі, як



правило, наводять аналіз дефекту типу 21, оскільки він є найхарактернішим. Типова форма сигналу від цього дефекту зображена на рис. 2. Як видно з рис. 2, сигнал від поперечної тріщини має характерну трьохімпульсну структуру з глобальним від'ємним імпульсом великої амплітуди (який зазвичай в 3-4 рази перевищує максимальну позитивну амплітуду). Другою, дуже важливою, особливістю таких сигналів є співвідношення амплітуд додатних імпульсів: амплітуда правого імпульсу завжди більша, або в крайньому випадку, рівна амплітуді лівого. Виключення становлять сигнали від сильно розвинутих дефектів з виходом на поверхню.



Рис. 2. Типова форма сигналу від дефекту по коду 21.

В роботі 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 враховані при побудові материнської вейвлет-функції для неперервного вейвлет-перетворення (НВП).

В кінці другого розділу розглянуто такі методи цифрової обробки сигналів (ЦОС) як перетворення Фур'є (ПФ), віконне перетворення Фур'є (ВПФ) та вейвлет-перетворення.

Зазначено, що ПФ сигналу  $s(t)$ , яке представляється за допомогою формули:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

можна використовувати лише для аналізу спектру сигналів від окремих дефектів.

Для можливості, з певною точністю, виявляти локальні особливості дефектоскопічних сигналів (такі як сигнали від дефектів) необхідно використовувати ВПФ:

$$F(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (2)$$

В ньому, на відміну від ПФ (1), сигнал  $s(t)$  додатково помножується на віконну функцію  $w(t-\tau)$ . Параметр  $\tau$  вікна задає його зсув на часовій осі. Вікно переміщується стрибками і за деяке число таких переміщень дозволяє проаналізувати весь сигнал. В кожному вікні відбувається свій спектральний розклад, в результаті чого отримується множина спектрів, кожен фрагмент з якої відноситься до визначеної ділянки в часі.

Однак, ВПФ не в достатній мірі підходить для імпульсних сигналів від дефектів, що спричинено базисною функцією спектрального розкладу, яка є синусоїдою (косинусоїдою). Крім того, вікна в цьому перетворенні мають фіксовані розміри і їх важко адаптувати під конкретне представлення локальних властивостей сигналу.

Вейвлет-перетворення (ВП) позбавлене принципових недоліків характерних для ВПФ. Воно базується на використанні вейвлетів, які здатні зміщуватись по осі часу (параметр  $b$ ) і змінювати свою ширину (параметр  $a$ ):

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

Крім того, ВП дає змогу створити базисну функцію  $\psi_0$ , з тими властивостями, які є найбільш важливими при виявленні сигналів від дефектів конкретного типу.

Саме тому, для аналізу дефектоскопічних сигналів було обрано ВП.

**В третьому розділі – «Застосування неперервного вейвлет-перетворення для аналізу дефектоскопічних сигналів»** – створено материнську вейвлет-функцію для НВП, яка адаптована до виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки, та проведено аналіз реального дефектоскопічного сигналу за допомогою НВП з використанням новоствореного вейвлету.

Неперервним вейвлет-перетворенням сигналу називається обчислення вейвлет-коефіцієнтів в області визначення  $R$ :

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

Інтегральне перетворення (4), 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 затратним в плані обчислення, проте дозволяє досягнути найбільшої деталізації при аналізі сигналів. При НВП, важливим моментом є вибір материнської вейвлет-функції, яка при можливості повинна бути максимально подібною до сигналів, які необхідно виявити (в дефектоскопії залізничних рейок – це, перш за все, сигнали від дефектів).

На рис. 3 а представлено реальний сигнал від поперечної тріщини в головці рейки, який використано в якості об'єкту для виявлення.

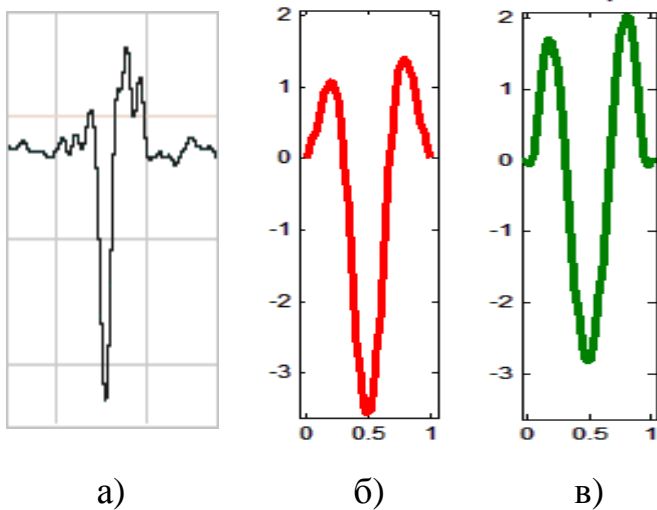


Рис. 3. Реальний сигнал від поперечної тріщини рейки (а), зразок сигналу від даного дефекту, отриманий шляхом моделювання (б) та відповідна вейвлет-функція для НВП (в).

На рис. 3 б представлений сигнал від поперечної тріщини в головці рейки, отриманий шляхом моделювання і який був використаний в якості зразку сигналу від дефекту при побудові материнської вейвлет-функції. Для того, щоб зразок сигналу відповідав вимогам, пред'явленим до базисної функції НВП він повинен бути апроксимований, з виконанням наступної умови:

$$\int_0^1 \psi(t) dt = 0, \quad (5)$$

де  $\psi(t)$  – шукана материнська вейвлет-функція.

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

$$\|\psi(t)\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1. \quad (6)$$

Після вищезгаданих апроксимації та нормування (рис. 3 в) зразок сигналу від поперечної тріщини відповідає вимогам, пред'явленим до базисної функції НВП. Повністю алгоритм створення вейвлету, адаптованого до виявлення сигналів від дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок представлено на рис. 4.

На рис. 5 зображено фрагмент дефектоскопічного сигналу (дефектограма) з наявним у ньому сигналом від поперечної тріщини в головці рейки, збільшена версія якого представлена на рис. 3 а. На краях цього фрагменту представлені сигнали від рейкових стиків, а вздовж усієї його довжини – сигнали від рейкових підкладок (схожі на фоновий шум).

Результатом аналізу вищезазначеного фрагменту за допомогою НВП та з використанням адаптованого вейвлету (рис. 3 в) є побудова скейлограми (рис. 6), яка показує значення коефіцієнтів вейвлет-перетворення в площині «масштаб – відліки».



Рис. 4. Блок-схема алгоритму створення вейвлет-функції для НВП, адаптованої до виявлення сигналів від дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок.

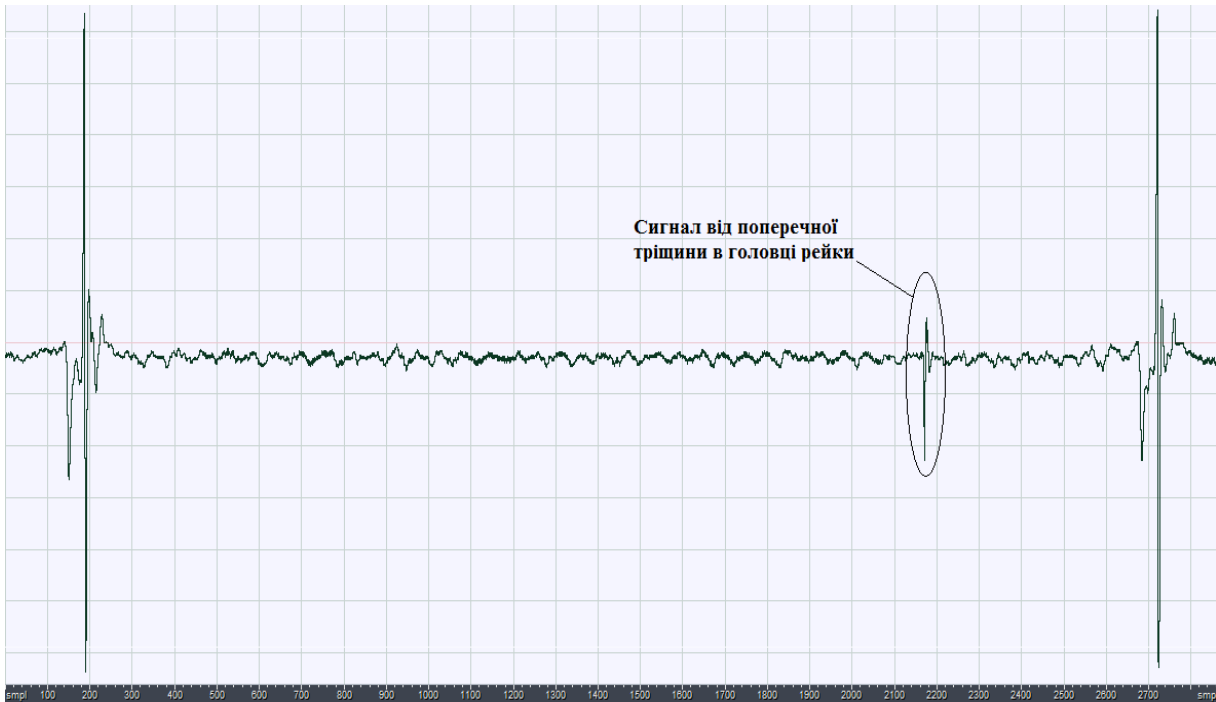


Рис. 5. Фрагмент дефектоскопічного сигналу з поперечною тріщиною рейки по коду 21, отриманий під час заїзду Львів - Сянки – Чоп, 06.11.2009 р.  
(км:36 пікет:6 швидкість 47 км/год)

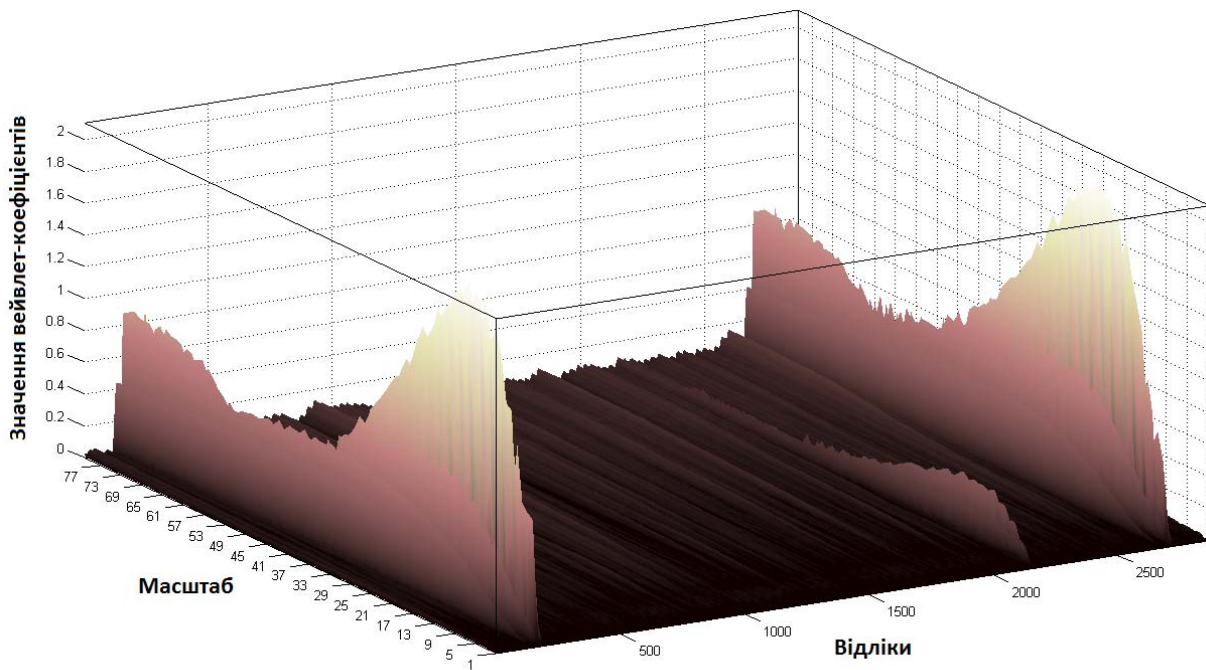


Рис. 6. Скейлограма дефектоскопічного сигналу (зображеного на рис. 5), отримана в процесі виконання НВП із використанням вейвлету, адаптованого до виявлення сигналів від поперечної тріщини (рис. 3 в).

Для того, щоб проаналізувати, який масштаб (чи масштаби) містять основну інформацію про наявність дефекту, побудовано залежність значень вейвлет-коефіцієнтів від масштабу в місці розташування дефекту (рис. 7).

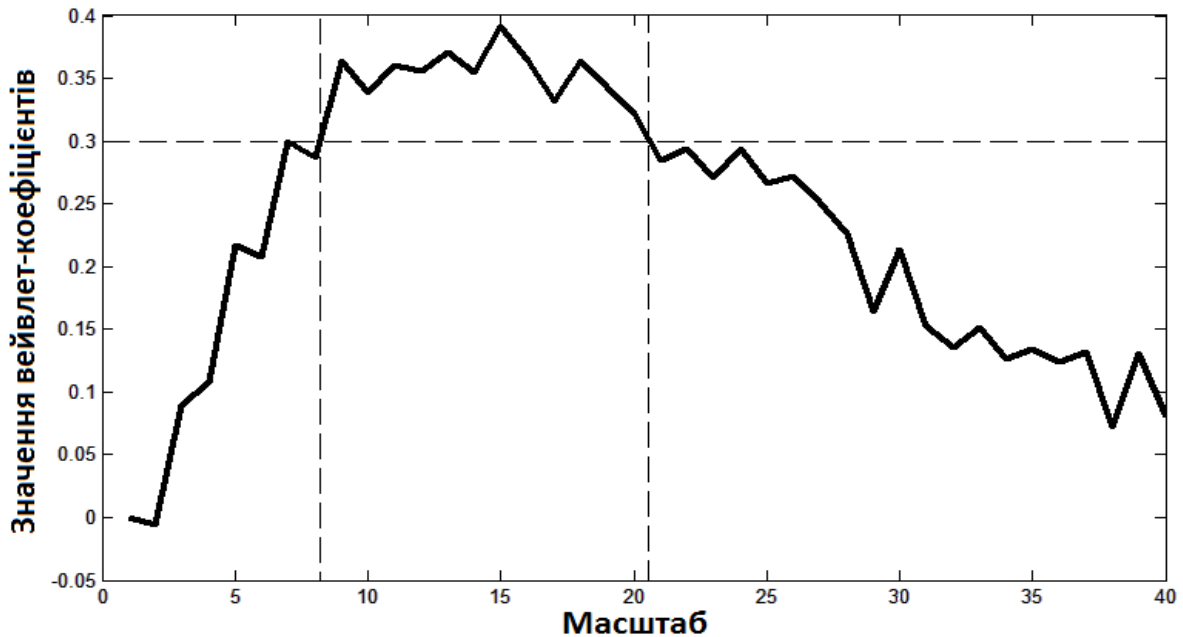


Рис. 7. Залежність величини вейвлет-коефіцієнтів від масштабу в місці розташування сигналу від поперечної тріщини (2172 відлік сигналу, зображеного на рис. 5).

З графіку на рис. 7 видно, що вейвлет-коефіцієнти мають своє максимальне значення в діапазоні масштабів від 8 до 21, а тому, встановивши відповідний поріг на величину вейвлет-коефіцієнтів (для конкретних масштабів в межах цього діапазону), можна вирізнити сигнали від дефектів на фоні сигналів від шпальних підкладок та безпечних поверхневих пошкоджень.

На основі аналізу дефектоскопічного сигналу, сформульовано основні рекомендації для виявлення сигналів від дефектів залізничних рейок за допомогою НВП:

- 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 ШНМ.

**В четвертому розділі – «Використання дискретного вейвлет-перетворення для обробки та аналізу дефектоскопічних сигналів»** – здійснено аналіз реального дефектоскопічного сигналу за допомогою ДВП, досліджено можливості застосування ДВП для аналізу, очистки від шуму та компресії дефектоскопічних сигналів.

В обчислювальному плані ДВП є набагато ефективнішим від НВП. Крім того, воно дозволяє повністю реконструювати сигнал після аналізу.

ДВП має дві основні особливості. Першою особливістю є те, що параметри масштабу  $a$  та зміщення  $b$  є дискретними і мають вигляд:

$$a = a_0^j \text{ і } b = k \cdot a_0^j, \quad (7)$$

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

$j$  і  $k$  - цілі числа.

Другою особливістю ДВП є 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) і 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:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \cdot \psi(a_0^{-j} \cdot t - k), \quad (8)$$

$$\varphi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \cdot \varphi(a_0^{-j} \cdot t - k). \quad (9)$$

Відповідно до цього, ДВП обчислюється за формулами:

$$C(j,k) = d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt, \quad (10)$$

$$a_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \varphi_{j,k}(t) dt, \text{ де} \quad (11)$$

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

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

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{j_n,k} \cdot \varphi_{j_n,k}(t) + \sum_{j=j_n}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t). \quad (12)$$

Для аналізу сигналу на різних масштабах використовуються фільтри з різними частотами зрізу. Сигнал пропускається через деревоподібне з'єднання фільтрів високих та низьких частот, яким відповідають функції  $\psi(t)$  та  $\varphi(t)$ .

Дослідження проводилось над сигналом, зображеним на рис. 5. В якості базового вейвлету для ДВП використовувався вейвлет Добеші 6-го порядку, вейвлет-функція якого нагадує форму сигналу від поперечної тріщини в головці

рейки. Це забезпечило достатньо хорошу корельованість вейвлету з сигналом від дефекту.

Результат аналізу сигналу за допомогою ДВП (рис. 8) представляє собою апроксимуючу складову 4-го рівня розкладу –  $A_4(t)$  та чотири складові деталізації –  $D_4(t), D_3(t), D_2(t), D_1(t)$ , сума яких і утворює сигнал, що піддавався аналізу:

$$S(t) = A_4(t) + D_4(t) + D_3(t) + D_2(t) + D_1(t) . \quad (13)$$

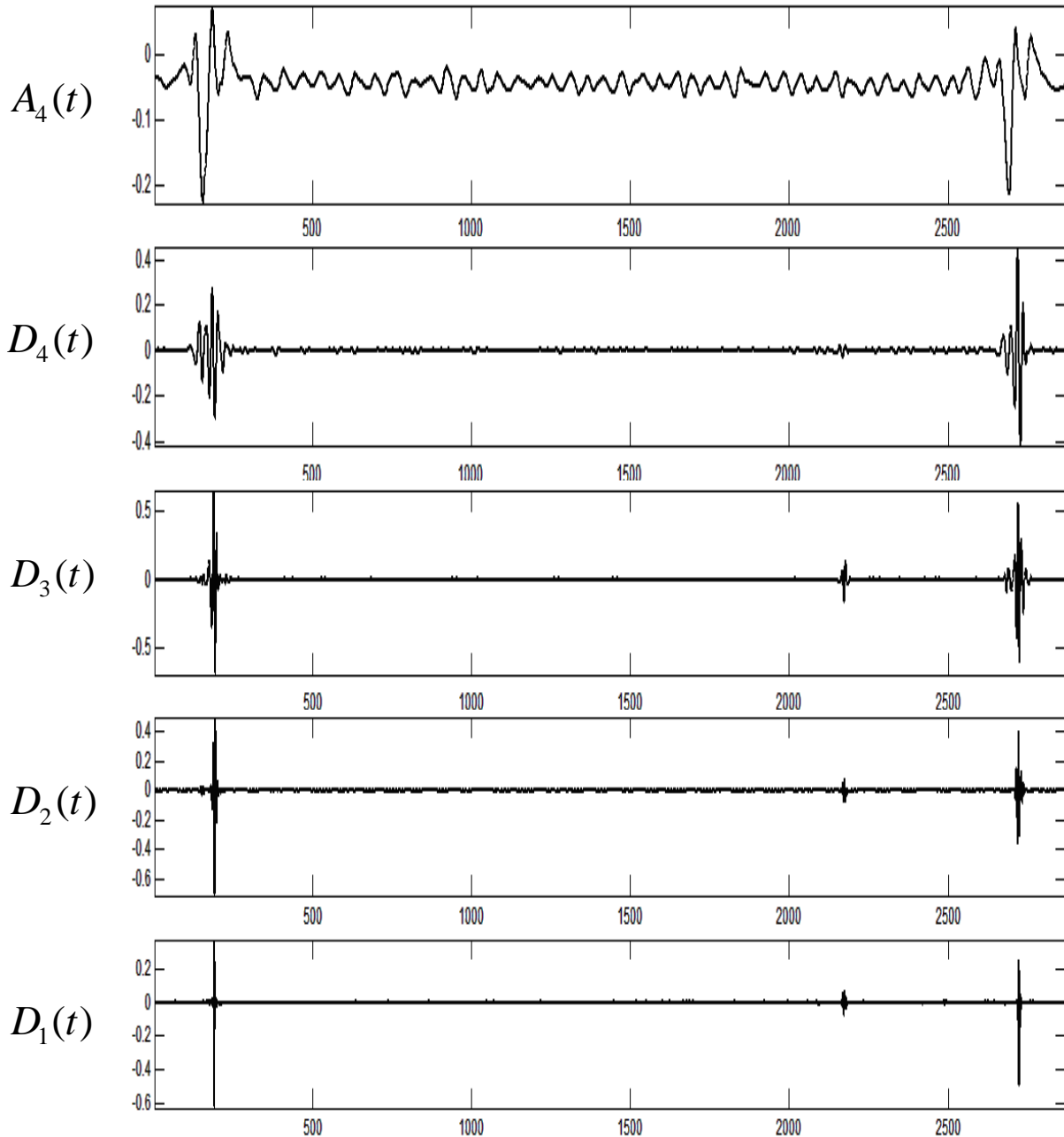


Рис. 8. Декомпозиція (4-го рівня) дефектоскопічного сигналу, зображеного на рис. 5, отримана за допомогою ДВП, при використанні вейвлету Добеші 6-го порядку.



4-й рівень декомпозиції сигналу було обрано тому, що в сигналі від дефекту провідну роль відіграють високочастотні складові та немає необхідності в детальному дослідженні низьких частот.

Як видно з рис. 8, перші три складові деталізації мають відносно великі значення вейвлет-коефіцієнтів в місці розташування сигналу від дефекту. Це справедливо для сильно розвинених дефектів. У випадку слабо розвинених дефектів та дефектів на ранніх стадіях розвитку, вейвлет-коефіцієнти будуть співмірними з вейвлет-коефіцієнтами від шпальних підкладок. Це пояснюється неоптимальною базовою функцією для ДВП. Створення материнської вейвлет-функції (а точніше – двох ортогональних вейвлет-функцій) є значно складнішим завданням, ніж для НВП. Крім того, ДВП можна використовувати для компресії сигналу та очистки його від шуму, точніше, – це основні напрямки його практичного застосування. Ці операції виконуються шляхом встановлення відповідних порогів на коефіцієнти деталізації, що в кінцевому результаті призводить до певних спотворень форми сигналу. Будь-які спотворення негативно впливають на подальше виявлення та розпізнавання сигналів від дефектів, а тому ДВП повинно використовуватись дуже обережно.

**В п'ятому розділі – «Побудова нейронної мережі для розпізнавання сигналів від дефектів залізничних рейок»** – побудовано ШНМ для виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки, та розроблено алгоритмічно-програмне забезпечення для аналізу дефектоскопічних сигналів на основі ШНМ та НВП.

ШНМ для автоматичного виявлення сигналів від поперечної тріщини в головці рейки представлена на рис. 9. Ця мережа 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). Материнською вейвлет-функцією для НВП був обраний вейвлет (рис. 3 в), адаптований до виявлення сигналів від поперечної тріщини.

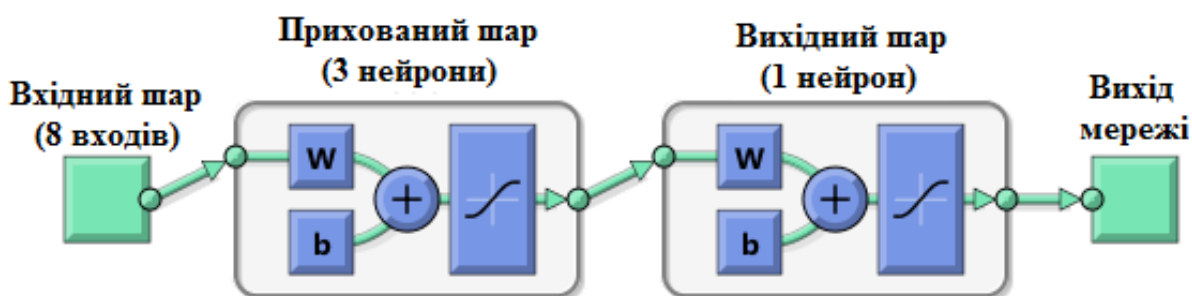


Рис. 9. Штучна нейронна мережа для автоматичного виявлення сигналів від поперечної тріщини рейки.

Вхідні сигнали дублюються і надходять на кожен з трьох вузлів прихованого шару, де перемножуються на вагові коефіцієнти  $W$ , додаються і, з урахуванням вузла зміщення  $b$ , ця сума поступає на передавальну функцію (в нашому випадку логістичну). Вагові коефіцієнти  $W$ , які визначаються впродовж навчання мережі, впливають на крутизну цієї функції. 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).

Підбір параметрів мережі здійснювався, виходячи із складності завдання та наявних даних для навчання. Для навчання ШНМ було використано змодельовані та реальні сигнали від поперечної тріщини в головці рейки та шпальних підкладок. Процес навчання мережі можна охарактеризувати графіком залежності середньоквадратичної похибки від епохи навчання (рис. 10) для трьох вибірок (у відсотках в межах навчальної послідовності):

- а) навчальної (70%), яка регулює вагові коефіцієнти впродовж навчання;
- б) узагальнювальної (15%), що перевіряє узагальнювальні властивості мережі та зупиняє навчання;
- в) тестової (15%), яка призначена для абсолютно незалежного тестування мережі.

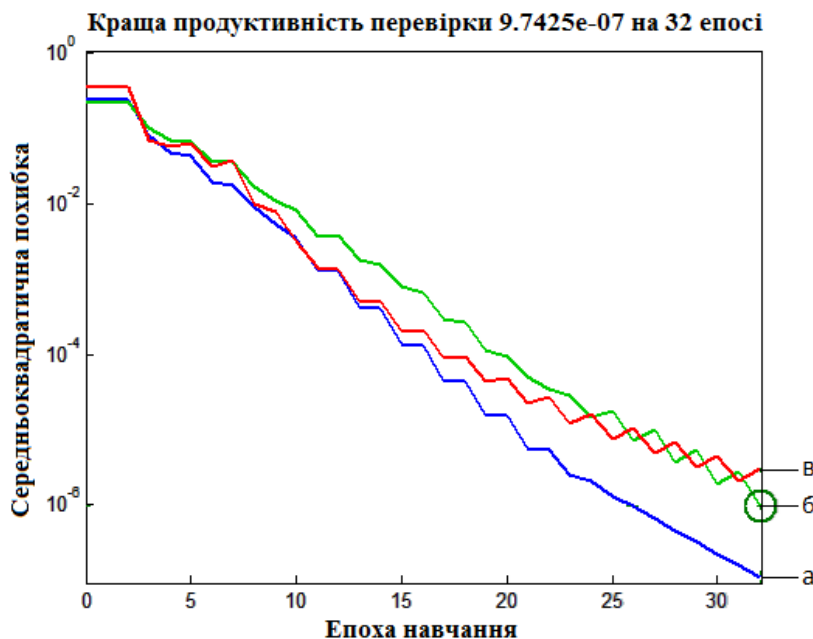


Рис. 10. Залежність середньоквадратичної похибки нейронної мережі від епохи навчання для навчальної (а), узагальнювальної (б) та тестової (в) вибірок.

Як видно з рис. 10, мережа досягла достатньо малого значення середньоквадратичної похибки (приблизно  $10^{-6}$ ), що засвідчило її готовність до практичного використання.

На рис. 11 представлено залежність імовірності правильного виявлення та хибної тривоги від співвідношення сигнал/шум для сигналів від поперечної тріщини в головці рейки та шпальних підкладок, відповідно.

На основі збудованої ШНМ в середовищі MATLAB, було розроблено програму "Defectogram Analyzer" для аналізу дефектоскопічних даних.

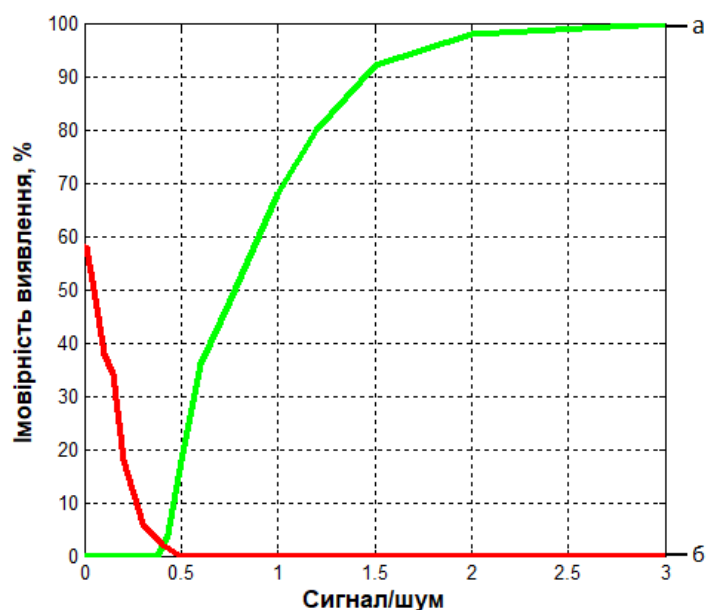


Рис. 11. Залежність імовірності правильного виявлення (а) та хибної тривоги (б) від співвідношення сигнал/шум (співвідношення амплітуди сигналу від поперечної тріщини в головці рейки до амплітуди сигналів від шпальних підкладок).

При аналізі дефектоскопічного сигналу, отриманого під час заїзду Львів – Сянки – Чоп, 06.11.2009 р., було виявлено десятки сигналів, які за формою нагадують сигнал від поперечної тріщини. Деякі з цих сигналів пройшли повз увагу оператора вагона-дефектоскопа (через відносно незначну амплітуду). Один з таких сигналів представлений на рис. 12.

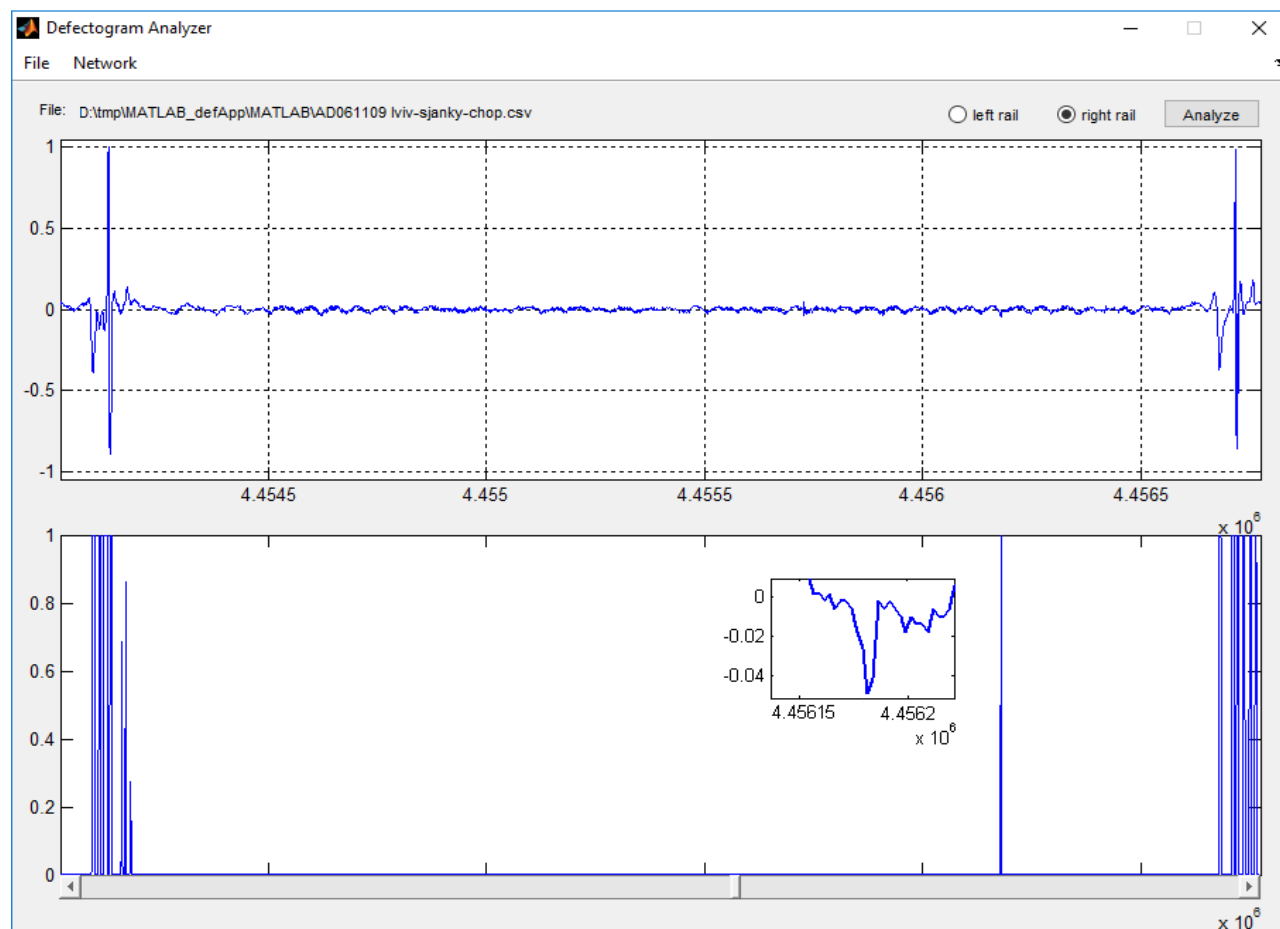


Рис.12. Результат аналізу фрагменту дефектоскопічного сигналу (заїзд Львів – Сянки – Чоп, 06.11.2009 р., км: 44, пікет:5) за допомогою ШНМ.

Амплітуда цього сигналу приблизно в 1,5 рази більша від амплітуди сигналів від шпальних підкладок, що свідчить про можливість виявлення сигналів від дефектів на ранніх етапах їх розвитку, коли сигнал має характерну форму, однак незначну величину. Такі дефекти 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.

Звичайно, серед сигналів, які виділила мережа, є і хибні виявлення. Їх імовірність 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, 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 рівнятися кількості типів дефектів. Це призведе до збільшення кількості входних елементів та нейронів прихованого шару. 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 окремої ШНМ для кожного нового типу дефекту. Такий підхід є більш безпечним, оскільки гарантує, що зміни, які мають місце для конкретного типу дефекту не вплинуть на роботу інших.

Отже, ШНМ та вейвлет-перетворення є потужними засобами ЦОС, які в поєднанні добре підходять для виявлення дефектів залізничних рейок. ШНМ не приймає і не повинна приймати рішення про придатність рейки до подальшої експлуатації. Вона не може замінити оператора вагона-дефектоскопа в цій відповідальній справі, але може значно полегшити та покращити якість його роботи шляхом виділення підозрілих фрагментів для подальшого їх опрацювання оператором.

## **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 розкриття 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 дає змогу 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ 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" – Радіоелектроніка 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. 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.

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

10. 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.

11. 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” – Радіоелектроніка та телекомунікації. — 2016. — №849. — С. 99–116. (Index Copernicus).

12. 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)

13. 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)

14. 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)

15. 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)

16. 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.

17. 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.

18. 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.

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. — Львів, 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. — Львів, 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., м. Львів : зб. тез доп. Львів, 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- Львів, 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 - Львів, 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 / 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 referatow. — 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 referatow. — Warszawa, 2013.— S. 79.

28. Nichoga V. Nowoczesna metoda przetwarzania sygnałow niebezpiecznych wad w szynach kolejowych przy szybkościowej defektoskopii magnetycznej / V. Nichoga, I. Prudyus, L. Vashchyshyn // Transport XXI wieku : Międzynarodowa konferencja naukowa, 16-19 wrzesnia 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 (АСІТ'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 wspomagania 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 : materialy 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 wspomaganie 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 : materialy konferencyjne. — Warszawa, 2017.— S.71.

## АНОТАЦІЯ

**Ващишин Л.В. Виявлення сигналів дефектів при магнітодинамічній діагностиці залізничних рейок шляхом використання вейвлет-перетворень та нейронних мереж.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, м. 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.

Створено материнську вейвлет-функцію для неперервного вейвлет-перетворення (НВП), яка наслідує основні особливості форми сигналів від дефектів типу поперечної тріщини в головці рейки. Це сприяє виділенню сигналів не лише від розвинених дефектів, але і від дефектів на ранніх стадіях їх розвитку.

Збудовано штучну нейронну мережу (ШНМ), на вхід якої подаються вейвлет-коефіцієнти, отримані за допомогою НВП з використанням створеної вейвлет-функції. Таке поєднання НВП і ШНМ дозволило автоматизувати процес виявлення сигналів від поперечної тріщини з представленням на розгляд оператора вагона-дефектоскопа сигналів, які потенційно спричинені дефектами. Це значно спрощує роботу оператора, оскільки замість перегляду всієї дефектограми, йому достатньо зробити експертні оцінки виділених фрагментів.

Запропоновано підходи для підвищення точності виявлення сигналів від поперечної тріщини рейки та описані можливі шляхи розширення ШНМ для виявлення інших типів дефектів.

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

#### АННОТАЦИЯ

**Ващишин Л.В. Выявление сигналов дефектов при магнитодинамической диагностике железнодорожных рельсов путем использования вейвлет-преобразований и нейронных сетей.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. Национальный университет «Львівська політехніка» МОН України, г. Львов, 2018.

В диссертационной работе решается актуальная научно-прикладная задача выявления дефектов на ранних стадиях их развития и увеличения скорости обработки диагностической информации путем автоматизации процесса выявления сигналов от дефектов при магнитодинамической дефектоскопии рельсов.

Создана материнская вейвлет-функция для непрерывного вейвлет-преобразования (НВП) которая наследует основные особенности формы сигналов от дефектов типа поперечной трещины в головке рельса. Это способствует выделению сигналов не только от развитых дефектов, но и от дефектов на ранних стадиях их развития.

Построена искусственная нейронная сеть (ИНС), на вход которой подаются вейвлет-коэффициенты, полученные при помощи НВП с использованием созданной вейвлет-функции. Такое сочетание НВП и ИНС позволило автоматизировать процесс выявления сигналов от поперечной

трещины с предоставлением оператору вагона-дефектоскопа сигналов, которые потенциально вызваны дефектами. Это значительно упрощает работу оператора, поскольку вместо просмотра всей дефектограммы, ему достаточно будет сделать экспертные оценки выделенных фрагментов.

Предложены подходы для повышения точности выявления сигналов от поперечной трещины рельса и описаны возможные пути расширения ИНС для выявления других типов дефектов.

**Ключевые слова:** дефектоскоп, магнитодинамический метод, неразрушающий контроль, нейронная сеть, автоматическое выявление дефектов.

### ABSTRACT

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

The dissertation for candidate degree in technical sciences on the specialty 05.12.17 – Radio Engineering and Television Systems. 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.

A mother wavelet function for continuous wavelet transform (CWT), which inherits the basic features of the form of the signal from transverse cracks in the rail head was created. It facilitates to locate signals both from developed defects and defects in the early stages of their development.

An artificial neural network (ANN) for automatic detection of signals from transverse cracks was constructed. The inputs of ANN are wavelet coefficients obtained by CWT using the created wavelet function. The outputs of ANN submit to the operator of the rail detector car signals that potentially could be caused by defects. It will significantly simplify the operator's work since instead of inspecting the entire flaw signal pattern, he will make expert estimates to only selected fragments.

Approaches for increasing the accuracy of detecting signals from the transverse cracks of the rails are proposed. Possible ways of extending ANN to identify other types of defects are also proposed.

**Key words:** rail spotter, magnetic flux leakage, non-destructive testing, wavelet transform, neural network, automatic flaw detection.

### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ:

**ВП** – вейвлет-перетворення; **ВПФ** – віконне перетворення Фур'є; **ДВП** – дискретне вейвлет-перетворення; **МДМ** – магнітодинамічний метод; **НВП** – неперервне вейвлет-перетворення; **НК** – неруйнівний контроль; **ПФ** – перетворення Фур'є; **ЦОС** – цифрова обробка сигналів; **ШНМ** – штучна нейронна мережа.