

## ШЛЯХИ СИНТЕЗУ БАЗИСІВ ДЛЯ ЦИФРОВОГО АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ МАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

*І.В. Сторож, В.О. Нічога,  
Л.В. Ващишин*

Національний університет “Львівська  
політехніка”, м. Львів вул. С.Бандери, 12

*E-mail: nich@ipm.lviv.ua*

\*Фізико-Механічний інститут  
НАН України ім. Карпенка,  
Львів, вул. Наукова, 5а

*Розглядаються шляхи вирішення завдан-  
ня вдосконалення магнітної дефектоскопії  
залізничних рейок з використанням вейвлет-  
функцій, адаптованих під реальні сигнали від  
поперечних тріщин. Показана ефективність  
такого рішення.*

**Вступ.** Відомо [1, 2], що магнітна де-  
фектоскопія залізничних рейок базується  
на дослідженнях спотворення магнітного  
поля, яке виникає в місцях дефектів.

Якщо метал, з якого виготовлена  
рейка, однорідний за своїми магнітними  
властивостями, його магнітна проник-  
ність рівна  $\mu$  і лінії магнітної індукції  $B$ ,  
намагнічуючого рейку поля, практично  
не виходять з рейки, а коли рейка має  
дефект в вигляді тріщини, що проходить  
перпендикулярно напрямку намагнічую-  
чого поля, то магнітна проникність де-  
фектної ділянки виявляється набагато  
меншою від проникності рейки.

Внаслідок цього відбувається пере-  
розподіл магнітного потоку в зоні роз-  
ташування тріщини: одна частина магні-  
тного потоку проходить через тріщину,  
друга – через повітряні шляхи над defe-  
ктом і третя частина буде проходити під  
тріщиною по металу рейки. В результаті  
відбувається так звана магнітна поверх-  
нева і об’ємна поляризація металу рейки  
в зоні дефекту. Внаслідок цього резуль-  
туюче магнітне поле над тріщиною стає  
різко неоднорідним (спотвореним) як в  
поздовжньому (тангенціальному)  $H_y$ , так  
і в перпендикулярному (нормальному)  
 $H_z$  по відношенню до поверхні рейки  
напряму [3]. Величини складових цього  
магнітного поля  $H_y$ ,  $H_z$  залежать не тіль-

ки від форми і розмірів тріщини, але і від  
напруженості намагнічуючого поля і ма-  
гнітної проникності металу.

Тріщина в рейці це один з численних  
видів дефектів, які виявляє магнітна де-  
фектоскопія. По даним досліджень най-  
більш небезпечною є поперечна тріщи-  
на, яка часто приводить до аварійних  
ситуацій [2, 3], якщо вона не буде вчасно  
виявлена. Разом з тим необхідно в про-  
цесі дефектоскопії залізничних рейок  
виявляти, аналізувати і класифікувати  
інші сигнали дефектів. Цей процес є  
складний, в даний час не є повністю ав-  
томатизований і в основному лягає на  
плечі досвідчених операторів. Крім цьо-  
го процес обробки сигналів, тобто роз-  
шифровка дефектограм проводиться піс-  
ля проведення заїзду певних ділянок ко-  
лії, тобто з певною часовою затримкою.

**Постановка задачі.** В роботі розгля-  
даються питання пошуку шляхів автома-  
тизації процесу обробки сигналів дефек-  
тів, отриманих з магнітного вагону – де-  
фектоскопа, що в кінцевому результаті  
повинно привести до виявлення, аналізу  
і класифікації дефектів в режимі on-line.

Роботи, які ведуться по створенню  
систем та алгоритмів для автоматизова-  
ного виявлення дефектів [4–8] можуть  
бути ефективні лише у випадку, якщо у  
них буде закладена максимально можли-  
ва кількість варіантів сигналів від дефек-  
ту. Деякі дані по формах сигналу спри-  
чиненого повздовжньою (тангенціально-  
ною) складовою магнітного поля дефек-  
ту  $H_y$  є описані [2, 3, 9]. Водночас інфо-  
рмації про форми сигналів дефектів від  
вертикальної  $H_z$  і поперечної  $H_x$  ортого-  
нальних складових поля збудження ре-  
йок практично відсутні.

Отримання великої кількості реаль-  
них сигналів дефектів експерименталь-  
ним шляхом вимагає значних часових та  
фінансових витрат. Тому створення ма-  
тематичної моделі дефекту, яка би дозво-  
лила розрахувати всі компоненти поля  
сигналу ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) в залежності від  
геометричних параметрів дефекту, його  
положення в головці рейки та типу засто-  
сованого давача є актуальною задачею.

Зараз в багатьох країнах ведуться ро-  
боти по створенню систем, алгоритмів та  
програмного забезпечення для автомати-  
зованого виявлення дефектів. При цьому

при розробці таких автоматизованих систем все більшу актуальність набуває аналіз сигналів з метою виділення інформативних параметрів, на основі яких створюються бази даних для настройки роботи таких систем в режимі on-line. Тому розробка нових технологій обробки інформації з метою виділення сукупності характеристик, які несуть інформацію про досліджуваний об'єкт з використанням сучасних математичних моделей сприяє підвищенню ефективності систем технічної діагностики.

Для вирішення задач автоматизації опрацювання сигналів магнітної діагностики залізничних рейок пропонується математична модель найбільш небезпечних дефектів залізничних рейок, з допомогою якої може бути створений базис для цифрового вейвлет-аналізу сигналів дефектів, що в кінцевому варіанті дозволить створити нове програмне забезпечення процесу діагностики залізничної колії.

**Математична модель поперечної тріщини.** Так як найбільш небезпечним дефектом є поперечна тріщина [1, 9, 10], а її виявлення, розпізнавання і класифікація є однією з найважливіших задач діагностики залізничних рейок, то в основу математичної моделі була покладена саме вона.

Для вирішення поставленої задачі створення моделі було розглянуто два шляхи:

У першому випадку було взято модель на основі фіктивних магнітних зарядів, що утворюються на стінках розлому [9, 11]. Модель було розширено з одновимірної до тривимірної, що дало можливість моделювати поле від тріщини довільної форми у просторі над рейкою.

У другому – створено модель, у вигляді адаптованої материнської функції, на основі реально записаного сигналу шляхом апроксимації засобами Wavelet toolbox середовища Matlab.

**Обґрунтування вибору розрахункової моделі тріщини.** Для визначення форми сигналу, яка наведеться в пошуковому давачі необхідно спочатку визначити магнітне поле розсіяння від дефекту. Існує багато математичних моделей, які дозволяють описати це поле. В найпростішому випадку поле від дефек-

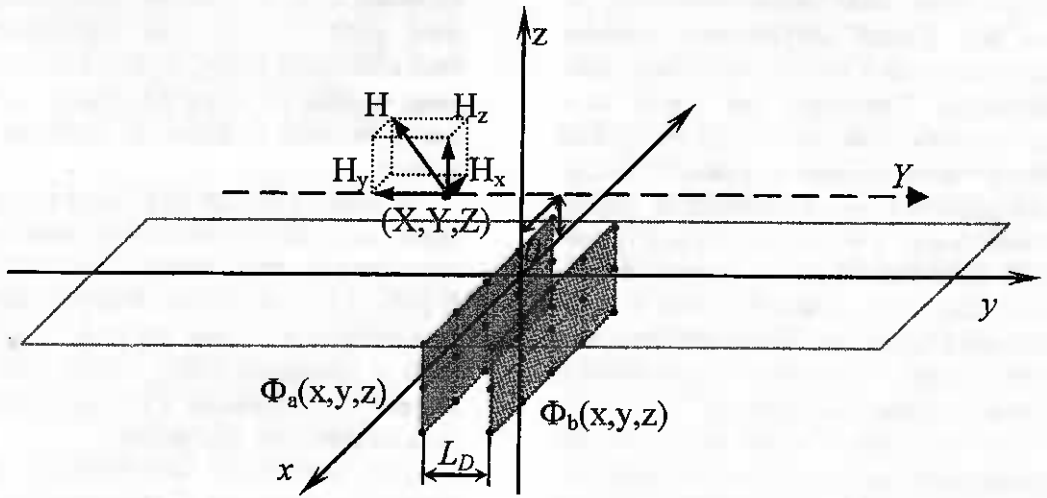
ту може бути описане як поле двопровідної лінії відстань між провідниками якої відповідає висоті дефекту [6]. Однак дана модель не може врахувати, наприклад, зміщення дефекту відносно осі рейки.

В інших роботах для опису поля тріщини використовуються або пара магнітних зарядів, або магнітний момент [11]. В роботі [9], наприклад використовується комбінація з двох зарядів. Дана модель є двовимірною, тобто вважається, що дефект є поперечний і розподілений по усій ширині головки рейки.

Для вирішення поставленої задачі найкраще підійшла б тривимірною модель. Тоді за відомим розподілом магнітних зарядів на стінках дефекту можна розрахувати усі складові поля в залежності від будь-яких геометричних параметрів дефекту та визначити сигнал, який наведеться в пошуковому давачі.

За основу взято модель дефекту, подану в [12]. Дефект представлено у вигляді невеликої внутрішньої області в рейці заповненої матеріалом з відносною магнітною проникністю  $\mu_2$ , яка є значно меншою від магнітної проникності матеріалу  $\mu_1$  самої рейки, у результаті чого намагніченість матеріалу  $J_2$ , що заповнює цю область, буде значно меншою намагніченості  $J_1$  решти ділянок рейки. При цьому частина векторів намагніченості в тілі рейки буде перериватися на границі області з магнітною проникністю  $\mu_2$  і знову починатися біля іншої границі цієї ж області з проникністю  $\mu_1$ . Кожний такий кінець лінії намагніченості діє як деякий додатний магнітний заряд, а кожний її початок – як від'ємний [12].

**Опис геометрії розрахункової моделі тріщини.** В запропонованій моделі (рис. 1) тріщина з розкривом LD представлена двома просторовими масивами додатних  $\Phi_a(x,y,z)$  і від'ємних  $\Phi_b(x,y,z)$  точкових джерел магнітного поля, які знаходяться в тілі головки рейки і показані точками. Поверхня головки рейки, яка умовно показана напівпрозорою площиною, співпадає з площиною  $xOy$ , а її поздовжня вісь з напрямком осі  $y$ . Траекторія переміщення пошукового давача задається віссю  $Y$  над поверхнею головки рейки і показана на рисунку пунктирною лінією.



Р и с. 1. Геометрія моделі тріщини

Крім поперечної тріщини можна побудувати модель похилої під довільним кутом тріщини, а також тріщини, поверхні якої мають різну форму і утворюють, наприклад, порожнину. Урахування впливу форми тріщини на характер розподілу сигналу здійснено шляхом надання відповідного розподілу інтенсивності потоку від кожного джерела.

Магнітне поле у будь-якій точці над головкою рейки з координатами  $(X, Y, Z)$  є суперпозицією полів від усіх джерел, а три ортогональні складові магнітного поля  $H_x$ ,  $H_y$  та  $H_z$  для цієї точки визначаються як проекції сумарного вектора на відповідні осі системи координат. При переміщенні пошукового давача

вдovж координати  $Y$  кожній складовій поля відповідає свій сигнал – відповідно  $E_x(Y)$ ,  $E_y(Y)$  та  $E_z(Y)$ .

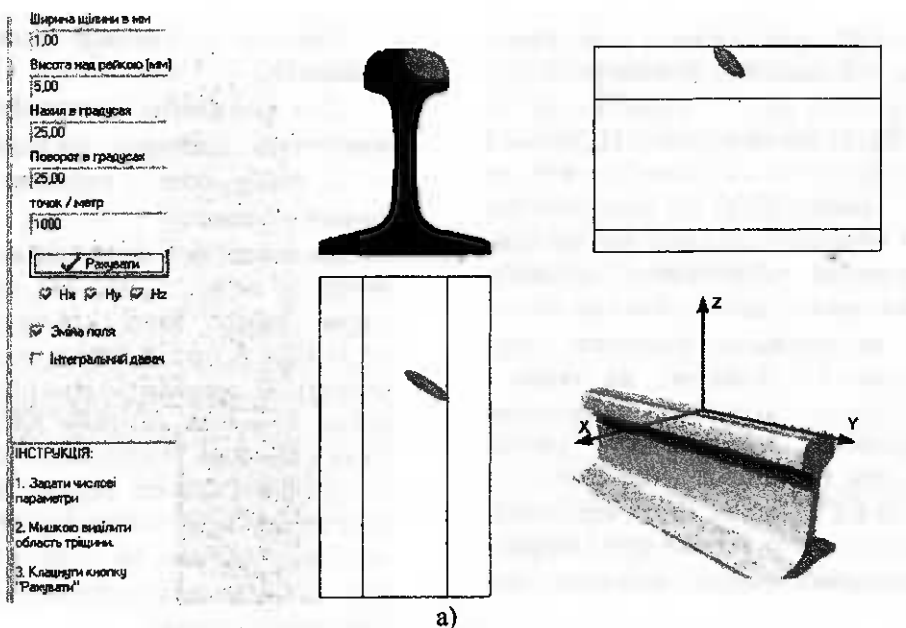
Положення кожного пошукового давача, який може бути як точковий, так і інтегральний, задається координатами  $(X, Y, Z)$ . Для кожного давача координати  $X$  та  $Z$  є постійними величинами, а  $Y$  – змінною. Також вважаємо, що швидкість переміщення давача є постійною величиною. Тому електрорушійну силу, яка в ньому наведеться визначено з урахуванням зміни магнітного поля по усьому об'єму давача шляхом інтегрування у межах цього об'єму. Наприклад для сигналу  $E_y(Y)$  цей вираз має вигляд:

$$E_y(Y) = -v\mu_0 w_0 \frac{\int \int \int H_y(X, Y, Z) dX dY dZ}{dY} \quad (1)$$

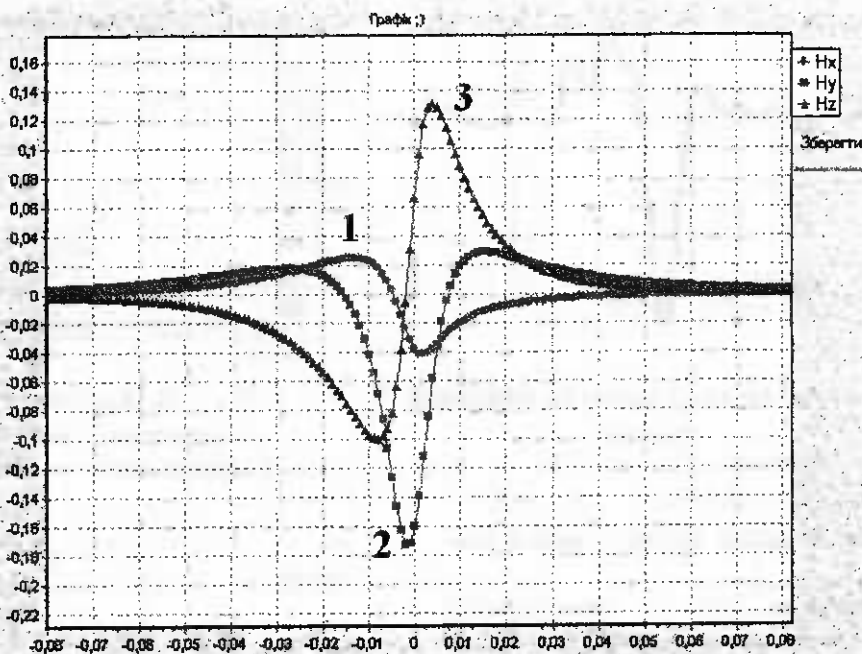
де  $v$  – швидкість переміщення давача;  $\mu_0$  – абсолютна магнітна проникність вільного простору;  $w_0$  – кількість витків на одиницю довжини давача;  $V$  – об'єм давача.

Для сигналів  $E_x(Y)$  та  $E_z(Y)$  вирази аналогічні. Запропонована модель дозволяє розраховувати форму сигналів для трьох ортогональних складових магнітного поля, в залежності від форми тріщини, розмірів, глибини залягання та кута нахилу її площини відносно осей координат, що визначається розташуванням точкових зарядів.

**Результати розрахунку форми сигналу на виході давача.** Для реалізації розрахунку форми сигналу від тріщини на основі приведеної моделі розроблена програма на мові Delphi. Графічний інтерфейс користувача розробленої програми (рис. 2а) дозволяє швидко задати параметри тріщини такі як розкриття тріщини, глибина її залягання відносно поверхні головки рейки, кути нахилу та повороту тріщини, а також висоту давача над головкою рейки.



а)



б)

Р и с. 2. а) Графічний інтерфейс користувача розробленої програми; б) три ортогональні складові сигналу при використанні точкового давача

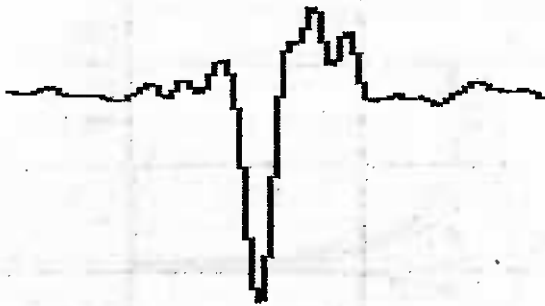
У вікні програми приведені зображення відрізка рейки у прийнятій системі координат та три проєкції рейки з заданою тріщиною на основні площини системи координат, що дозволяє користувачу чітко уявити положення тріщини відносно головки рейки. Результат роботи програми – це характер розподілу трьох ортогональних складових магнітного поля від тріщини та відповідні їм

сигнали, що наведуться в пошуковому давачі.

Як приклад, на рис. 2б представлено результати моделювання трьох ортогональних складових сигналу від поперечної тріщини, параметри і розташування якої показано у вікні програми на рис. 2а, у випадку використання точкового давача, який пересувається вздовж координати Y посередині рейки.

Результати проведеного моделювання добре співпадають з даними робіт [9].

На графіках рис. 26 крива 1 – це сигнал  $E_x(Y)$  від складової поля  $H_x$ , крива 2 – сигнал  $E_y(Y)$  від складової поля  $H_y$  та крива 3 – сигнал  $E_z(Y)$  від складової поля  $H_z$ . В більшості випадків при швидкій магнітній дефектоскопії залізничних рейок аналіз здійснюється по сигналу від поздовжньої складової поля  $E_y(Y)$  (крива 2). Водночас, як видно з рис. 26 значну додаткову інформацію про параметри тріщини несе сигнал  $E_x(Y)$  (крива 1) від поперечної складової поля  $H_x$  та  $E_z(Y)$  (крива 3) від вертикальної складової поля  $H_z$ , які при використанні двовірних моделей визначити неможливо.



Р и с. 3а. Реальний сигнал від поперечної тріщини

## 2. Апроксимація вибраної моделі (взірця).

Неперервне вейвлет перетворення (НВП) передбачає наявність  $\psi$  – функції, що визначає деталі сигналу і породжує деталізуючі вейвлет-коефіцієнти, і яка повинна задовольняти умову нульового середнього значення:

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

Апроксимацію заданого взірця було здійснено поліномом 6-го порядку на інтервалі  $[0,1]$  (рис.36 (суцільна лінія)) методом найменших квадратів:

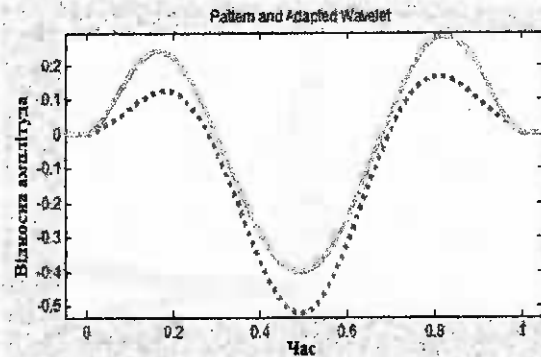
$$\sum_{k=1}^K [\psi(t) - y_k]^2 = \min, \quad (3)$$

## Модель у вигляді адаптованого вейвлету

Для створення адаптованого вейвлету було здійснено наступні кроки:

### 1. Вибір моделі сигналу від поперечної тріщини.

На основі фрагменту сигналу від дефекту по коду 21 (рис. 3а), отриманого під час заїзду Львів - Сянки – Чоп, 06.11.2009 р. (км:36 пікет:6 швидкість 47 км/год). За допомогою програми для обробки звукових сигналів Audition 1.0., було здійснено інтерполяцію даного сигналу (для плавності форми) та створено адаптовану модель сигналу від поперечної тріщини (рис. 3б (пунктирна лінія)), яка відповідає вищевказаним особливостям даного дефекту.



Р и с. 3б. Адаптована модель сигналу від поперечної тріщини-пунктирна лінія і апроксимоване значення-суцільна лінія

так щоб

$$\int_0^1 \psi(t) dt = 0, \quad (4)$$

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

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

### 3. Нормування вейвлет-функції $\psi(t)$ згідно наступної умови:

$$\|\psi(t)\|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \right|^2 dt = 1, \quad (5)$$

Дана умова (в Matlab вона виконується автоматично при збереженні апро-

ксованого значення взірця) необхідна для того, щоб можна було відновити аналізований сигнал  $f(t)$ .

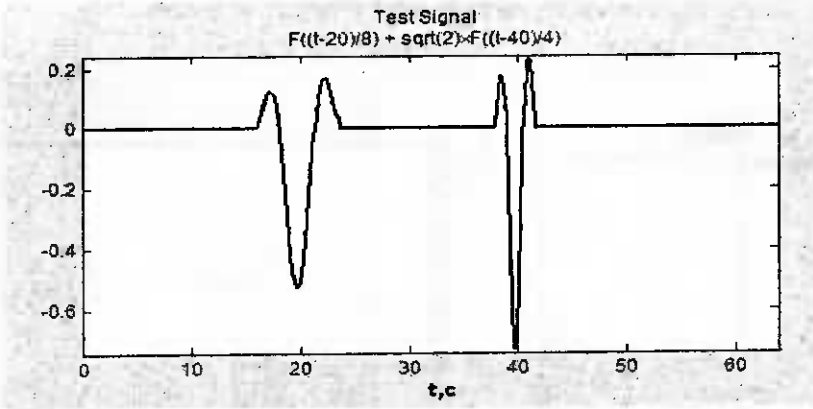
Отриманий «материнський» вейвлет задовольняє вимоги, пред'явлені до базисної функції НВП і може використовуватись для побудови скейлограм (скейлограма показує значення коефіцієнтів вейвлет-перетворення в площині масштаб – час (або масштаб – відліки)). Однак не завжди адаптована вейвлет-функція, в достатній мірі, відображає особливості модельної форми. Тому, необхідно виконати наступну перевірку та порівняння.

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

Для тестування нових та стандартних вейвлет-функцій на точність виявлення хвиль типу моделі Matlab створює тестовий сигнал (рис. 4), який описується наступною формулою:

$$S(t) = f\left(\frac{t-20}{8}\right) + \sqrt{2} \cdot f\left(\frac{t-40}{4}\right). \quad (6)$$

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



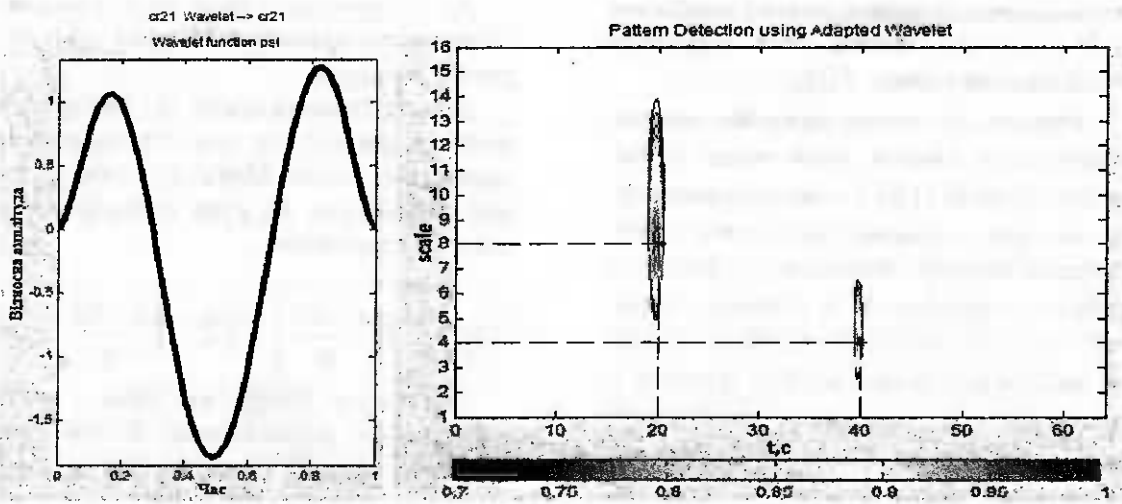
Р и с. 4. Тестовий сигнал  $S(t)$

НВП тестового сигналу за допомогою адаптованої вейвлет-функції (ліва частина рис.5) 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

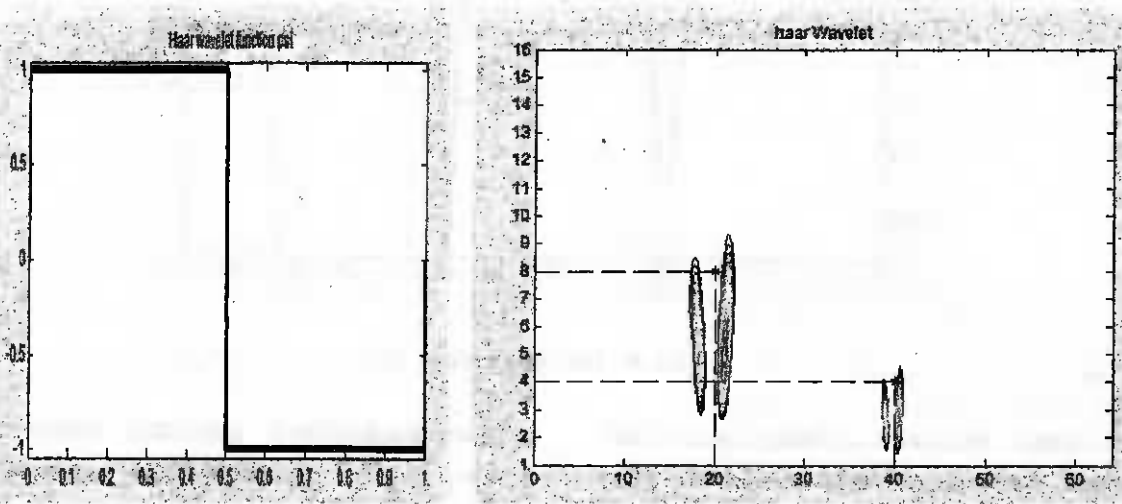
різні коефіцієнти кореляції (вейвлет-коефіцієнти). На скейлограмі (права частина рис.5) в позиції 20 на часовій осі найбільше значення коефіцієнту кореляції припадає на діапазон масштабів від 7 до 9, а в позиції 40 – приблизно на 4 масштаб. Це свідчить про добру роздільну здатність як по часу, так і по масштабі.

5. Порівняння здатності виявлення локальних особливостей тестового сигналу  $S(t)$  (рис .4) за допомогою адаптованої (рис. 5) та на явних стандартних вейвлет-функції.

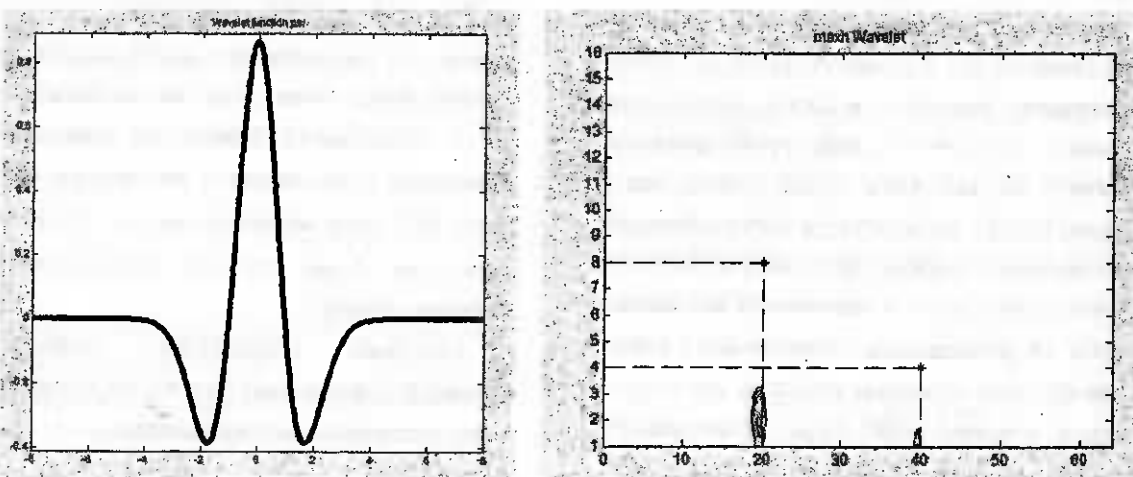
Оскільки стандартних вейвлет-функцій є достатньо багато, то обмежись лише кількома прикладами.



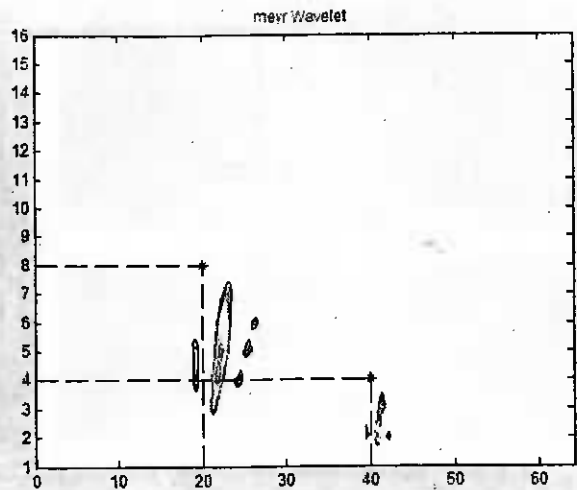
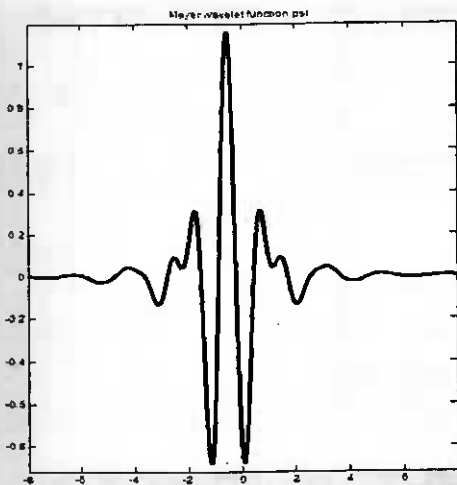
Р и с. 5.  $\psi$  – функція адаптованого до виявлення сигналу від поперечної тріщини вейвлету та скейлограма тестового сигналу  $S(t)$  отримана за її допомогою



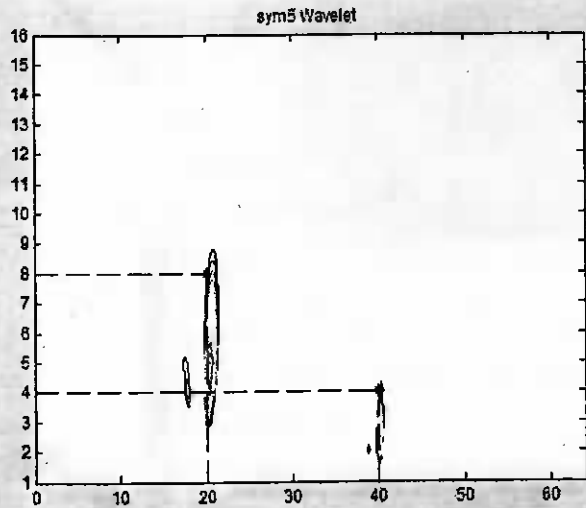
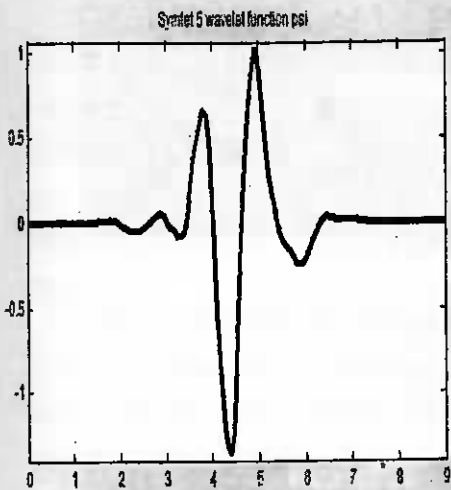
Р и с. 6.  $\psi$  – функція вейвлету Хаара та скейлограма тестового сигналу  $S(t)$  отримана за її допомогою



Р и с. 7.  $\psi$  – функція вейвлету мексиканський капелюх та скейлограма тестового сигналу  $S(t)$  отримана за її допомогою



Р и с. 8.  $\psi$  – функція вейвлету Мейера та скейлограма тестового сигналу  $S(t)$  отримана за її допомогою



Р и с. 9.  $\psi$  – функція вейвлету симлет 5-го порядку та скейлограма тестового сигналу  $S(t)$  отримана за її допомогою

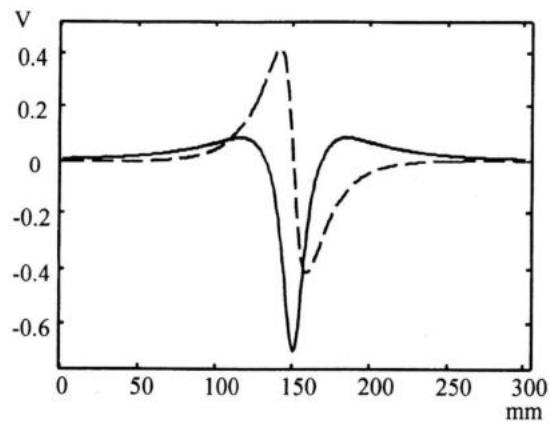
Як видно з рис. 6–9 жоден зі стандартних вейвлетів не дає кращого результату (не забезпечує чіткішої локалізації особливостей сигналу  $S(t)$ ) ніж адаптована вейвлет-функція. Це пояснюється тим, що чим подібніша  $\psi$  – функція вейвлету до образу сигналу, який очікується знайти – тим чіткішим (по осі часу) і правильнішим (по масштабній осі) буде його виявлення.

**Результати дослідження.** На основі розрахункової моделі тріщини було отримано форму поля над рейкою. Ця картина відповідає статичному розподілу. Для того, щоб врахувати те, що при русі вагона дефектоскопа індуктивний давач вимірює зміну поля, над отрима-

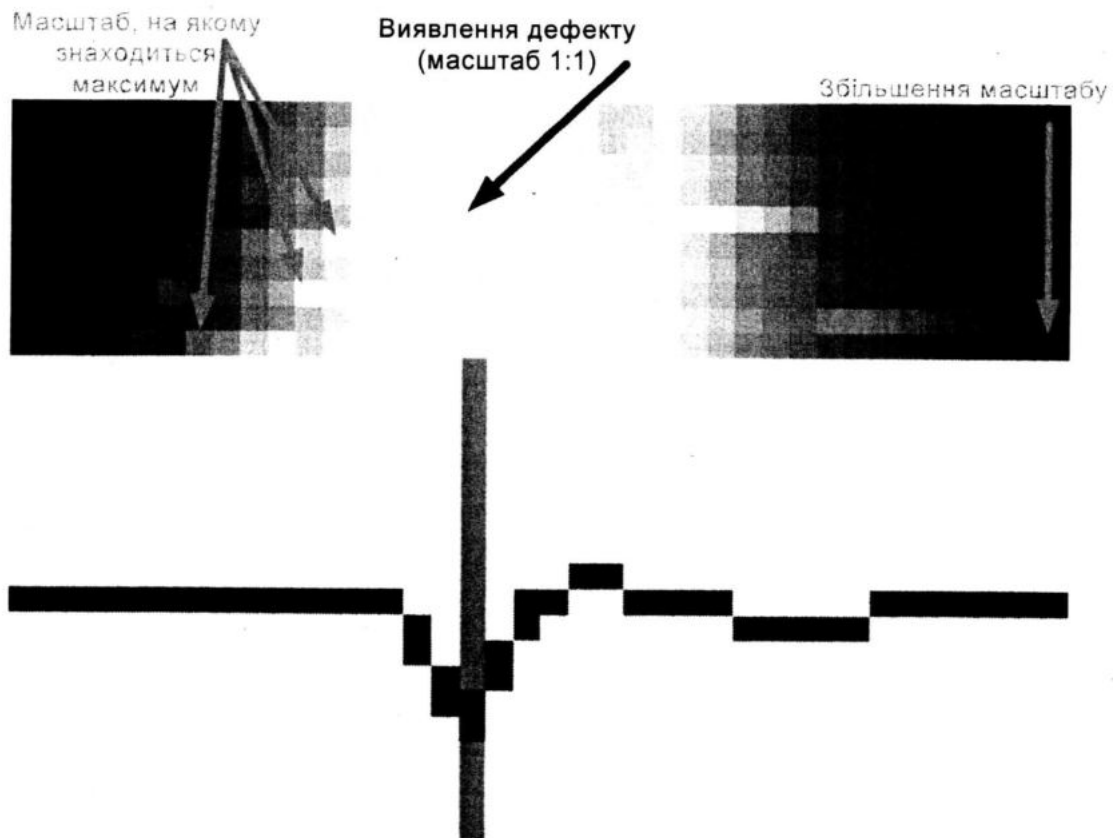
ним сигналом було проведено перетворення Гільберта, яке доповнило сигнал уявною складовою (рис. 10).

Отриманий на основі розрахункової моделі сигнал був передискретизований так, щоб утворити декілька масштабів, як в сторону стиснення, так і в сторону розтягнення. Зразки були нормовані відповідно до зміни масштабу, обернено пропорційно квадратному кореню коефіцієнту розтягнення. Після цього було проведено кореляцію дефектограми з кожним масштабом зразка. Було встановлено умову, що максимум повинен бути при масштабі 1:1 і не повинен досягати рівня кореляції зі стиком колії (рис.11.).





Р и с.10. Змодельований сигнал від тріщини і його ортогональне доповнення (пунктиром)

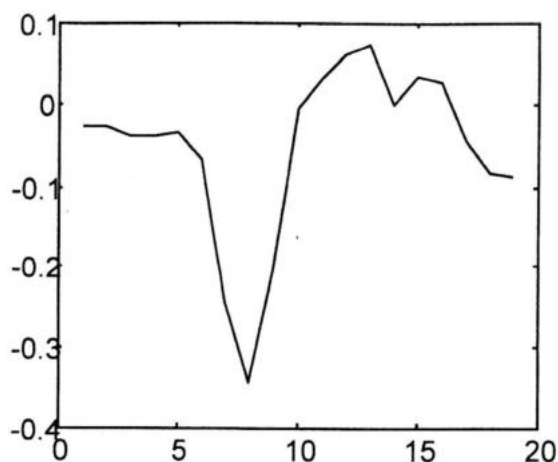


Р и с.11. Аналіз фрагменту дефектограми

Для перевірки практичного застосування запропонованої моделі магнітного поля з її допомогою була проаналізована дефектограма ділянки колії Львів – Сянки – Чоп довжиною 78 км, на якій було виявлено 97 підозрілих імпульсів, які в своїй більшості відповідають зварним стикам. Окрім них розроблена програма виявила поперечну тріщину без виходу на поверхню на 36-му кілометрі ділянки, яку раніше виявили

виявили оператори вагону дефектоскопу (рис. 13а).

Експеримент було повторено з адаптованим вейвлетом. При тих самих умовах спрацювання було виявлено 38 імпульсів серед яких також було виявлено сигнал від тріщини (рис. 13б). Таке покращення характеристик хибного виявлення можна пояснити тим, що адаптований вейвлет створювався на основі того самого сигналу від тріщини.



Р и с. 12. Сигнал від тріщини на 36-му кілометрі ділянки Львів–Сянки–Чоп

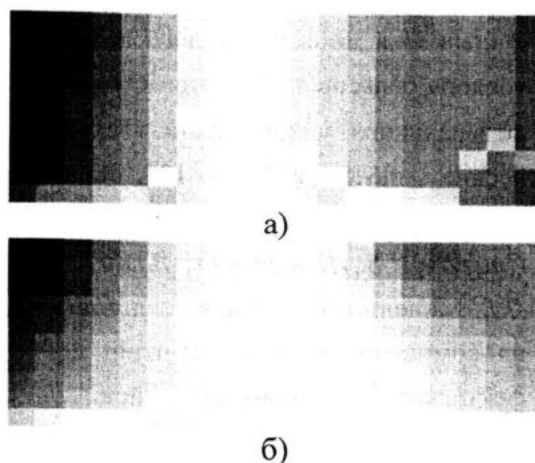
**Висновок.** Описаний метод може бути використаний для виявлення небезпечних дефектів у залізничних рейках. Програмна реалізація не вимагає великих обчислювальних затрат, що дозволяє проводити обробку сигналу в реальному часі.

Обидва варіанти моделювання сигналу є ефективними, проте адаптація до реального сигналу покращує виявлення саме такої форми сигналу.

Через відсутність достатньої кількості реальних сигналів від тріщини їх математичне моделювання потребує більшої уваги.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Марков А.А., Антипов Г.А. Современное состояние и перспективы развития магнитных методов контроля рельсового пути // Сб. научных трудов "Современные технологии извлечения и обработки информации", СПб. ОАО "Радиоавионика". – 2001. – С. 45–52.
2. А.К. Гурвич, Б.П. Довнар, В.Б.Козлов и др. Неразрушающий контроль



Р и с. 13. Результаты анализа фрагмента дефектограммы смодельованным сигналом (а) та адаптованим вейвлетом (б).

рельсов при их эксплуатации и ремонте // Под ред. канд. техн. наук А.К.Гурвича. – Москва: Транспорт, 1983. – 318 с.

3. В.А. Ильин, Г.И. Кожевников, Ф.В. Левыкин, Ю.Н. Штремер Дефектоскопия деталей подвижного состава железных дорог и метрополитена // Под ред. В.А. Ильина. – М.: Транспорт, 1983. – 315 с.
4. Нічoga В.О., Дуб П.Б. Особенности застосування багатоканальної і багатокomпонентної дефектоскопії при обстеженні залізничних рейок магнітними методами // Матеріали 16 Міжнародної науково-технічної конференції "Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів" (ЛЕОТЕСТ-2011). – 21–26 лютого 2011р. Славське Львівської області. – С. 131–133.
5. Trokhym Georgij, Niczoga Vitalij, Petro Dub. Kerunki rozwoju komputerowego do diagnostyki magnetycznej szyn torów kolejowych // IX szkola-konferencja "Metrologia wspomagana komputerowo, 24 – 27 maja 2011, Waplewo, Polska. – S. 115.

6. *Матюшин А.Ю., Мережин Н.И.* Блок сопряжения многоканального дефектоскопа рельсов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2010. – 106. № 5. С. 135 – 189.
7. *Сторож І.В., Нічога В.О., Вацішин Л.В.* Модель тріщини для дослідження компонент поля в магнітній дефектоскопії залізничних рейок. // Матеріали 17 Міжнародної науково-технічної конференції „Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів” (ЛЕОТЕСТ-2012). – 20 – 25 лютого 2012 р., Славське Львівської області. – С. 27 – 30.
8. *Grudzinski Eugeniusz , Niczoga Vitalij , Storozh Igor.* Estimated mathematical model of cracks in magnetic inspection of railroad rails, XV jubileuszowa międzynarodowa konferencja naukowa. Komputerowe systemy wspomaganie nauki, przemysłu i transportu, TRANSCOM-2011, Zakopane, Logistyka 6/2011, Polska, s. 1249 – 1258.
9. *Королев М. Ю.* Расчетные модели для оценки сигналов от объектов пути при магнитодинамическом методе НК рельсов // В мире неразрушающего контроля. – 2002. – № 4 (18). – С. 72 – 73.
10. *Нічога В.О., Сім'яновський М.В., Кучма І.С., Трохим Г.Р.* Особливості виявлення дефектів рейок магнітним і ультразвуковим вагонами-дефектоскопами в умовах Львівської залізниці // Відбір і обробка інформації. – 2011. – Вип. 34 (110). – С. 42 – 48.
11. *В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков.* Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3 Электромагнитный контроль // Практик. Пособие / Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1992. – 12 с.
12. *Матвеев А.Н., Лысенко И.М., Успенский Е.И., Гурвич А.К., Козлов В.Б., Круг Г.А., Кузьмина Л.И.* Дефектоскопия рельсов // Изд. 3-е. Изд-во транспорт, 1971. – 408 с.