УДК 537.874:621.317

ЛОКАЛІЗАЦІЯ ВИДОВЖЕНИХ ПІДПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ ЗА ПЕРЕМІЩЕННЯ ДЖЕРЕЛА ПЕРВИННОГО ПОЛЯ ПО ПОВЕРХНІ МЕТАЛЕВОГО ВИРОБУ

І. І. Тригуб

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: tryhub@ipm.lviv.ua

Запропоновано метод кореляційної обробки сигналів для визначення місцерозташування видовженого підповерхневого дефекта в електропровідних матеріалах за переміщення джерела первинного поля по поверхні об'єкта контролю. В його основу покладено процедуру визначення максимального значення квадрата коефіцієнта кореляції між теоретично обчисленими значеннями магнетного поля нескінченно довгої нитки зі струмом (модель дефекту) та виміряними на поверхні об'єкта контролю сигналами дефекту. Числовими експериментами показано ефективність застосування цього методу для обробки та аналізу сигналів неруйнівного вихрострумового контролю.

Ключові слова: *вихрострумовий контроль, дефект, кореляційний метод, обернена задача.*

LOCALIZATION OF ELONGATED SUBSURFACE DEFECTS IN CASE OF MOVEMENT OF THE PRIMARY FIELD SOURCE ON THE SURFACE OF METALLIC PRODUCT

I. I. Tryhub

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine

To determine the location of elongated subsurface defects in conductive materials in case of movement of the primary field source on the surface of the object under inspected is proposed. The method of the correlation processing signals is used. The method is based on the procedure for determining the maximum value of square of the correlation coefficient between the theoretically calculated values of the magnetic field of an infinitely long thread with current (model of a defect) and defect signals measured on the surface the object under inspection. Numerical experiments have shown the efficiency of application of the method for processing and analysis of the signals of non-destructive eddy current testing.

Keywords: *eddy current testing, defect, correlation method, inverse problem.*

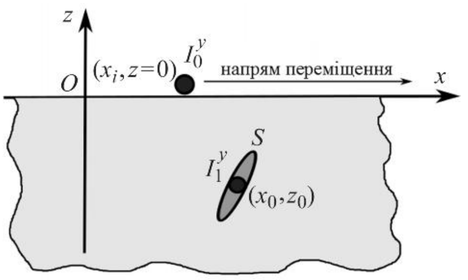
Обернена задача неруйнівного вихрострумового контролю полягає у визначені місцерозташування дефекту та його геометричних параметрів. Методи її розв'язання умовно можна поділити на дві групи [1–3]. У першу входять методи, в яких її розв'язок зведено до задачі розпізнавання образів [1, 4]. Характерною особливістю і водночас основним їх недоліком є необхідність набору сигналів від різних типів дефектів – навчальної вибірки. Її використовують для навчання певної автоматизованої системи розпізнавання. Якщо набір сигналів недостатньо великий, то це може призвести до низької точності під час класифікації сигналу.

Інша група методів багаторазово використовує математичну модель прямої задачі, в якій змінюються геометричні та електрофізичні параметри дефекту допоки норма різниці сигналів, одержаних за моделлю та експериментально, не буде мінімізована [3, 5–7]. Ефективність цього підходу визначають три основні чинники: теоретична модель задачі, вибір початкового наближення до розв'язку і алгоритми пошуку глобального мінімуму. В працях [5, 6] для визначення місцерозташування видовжених підповерхневих дефектів у металевих виробах запропоновано кореляційний метод обробки сигналів. Числова та експериментальна верифікації методу показали ефективність застосування його для обробки виміряних сигналів від дефектів. Проте на практиці часто діагностику металевих виробів виконують під час переміщення джерела первинного електромагнетного поля відносно поверхні виробу. Оскільки відстань від джерела поля до дефекту змінюється, то правомірним є припущення, що це, певним чином, відобразиться у значеннях виміряного сигналу, впливаючи на достовірність визначення місцерозташування дефекту.

Мета роботи – узагальнити метод кореляційної обробки сигналів для врахування в математичній моделі зміни відстані між джерелом первинного поля та дефектом.

Опис задачі. В тривимірному ізотропному середовищі розміщено металеву пластину, електрофізичні характеристики якої визначають хвильовим числом k. У пластині є видовжений підповерхневий дефект. На поверхні пластини переміщується нескінченно довга нитка зі змінним струмом (джерело первинного поля), таким чином, що вісь нитки і вісь дефекту (напрямлена по його довжині) паралельні між собою. Нехай на поверхні пластини в околі точок переміщення джерела первинного поля відомий розподіл сигналу вихрострумового перетворювача, значення якого наближено пропорційні амплітуді нормальної компоненти вектора магнетного поля, збуреного дефектом. Коефіцієнт пропорційності невідомий. Необхідно визначити місцерозташування дефекту.

Приймемо, що товщина пластини є достатньо великою, щоб зондувальне електромагнетне поле загасало в ній, не доходячи до нижньої грані. Це дає змогу замінити металеву пластину півпростором, заповненим провідним середовищем. Виберемо прямокутну систему координат (див. рисунок), вісь Oz якої напрямлена у верхній півпростір, а осі Ox і Oy лежать на поверхні поділу півпросторів, вісь Oy – паралельна до видовженого дефекту та нитки зі струмом.



Геометрія задачі.

Вважатимемо, що вздовж осі Oy властивості джерела первинного поля, середовища та дефекту однорідні, що дає змогу звести тривимірну задачу до двовимірної. Положення нескінченно довгої нитки зі струмом I_0^y на межі поділу півпросторів визначають координатами $(x_i, z=0)$. У нижньому півпросторі міститься видовжений дефект, в якого площа перерізу S є меншою порівняно з його довжиною. Тоді збурене дефектом первинне електромагнетне поле наближено можна описати полем нескінченно довгої нитки зі струмом I_1^y, що знаходиться у точці з координатами (x_0, z_0). Приймемо, що на межі поділу півпросторів $z=0$ у точках (x_i+d) відомо розподіл виміряного сигналу $U_i^s(x_i+d)$ від дефекту, значення якого пропорційні значенням вертикальної компоненти магнетного поля дефекту $H_z^s(x_i+d)$, де d – задана константа. Для визначення $H_z^s(x_i+d)$ маємо наближену рівність

$$H_z^s(x_i+d) = lU_i^s(x_i+d),$$

де $U^s(x_i+d)$ – виміряний сигнал на поверхні пластини; l – деяка невідома константа, яка залежить від конструктивних параметрів первинного перетворювача. Позначимо через $H_z^m(x_i+d; x_0, z_0)$ компоненту електромагнетного поля нескінченно довгої нитки зі струмом I_1^y на поверхні $z=0$, яка розміщена в області дефекту в деякій точці з координатами (x_0, z_0). Необхідно знайти координати (x_0, z_0), для яких функції $H_z^m(x_i+d; x_0, z_0)$ і $H_z^s(x_i+d)$ максимально близькі за значеннями.

Розв'язання задачі. В праці [8] розв'язано задачу збурення плоскої межі двох середовищ нескінченно довгою ниткою зі струмом. Згідно з цим розв'язком, нитка зі струмом I_0^y, яка переміщується по межі поділу середовищ, у довільній точці $(x', z') \in S$ створить поле, електричну компоненту якого визначають виразом

$$E_0(x_i; x', z') = \frac{i\omega I_0^y}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\lambda(x_i - x') - z'\sqrt{\lambda^2 - k^2}}}{\sqrt{\lambda^2 - k^2} + \lambda} d\lambda .$$

Відповідно це поле в точці (x', z') індукує струм I_1^y, густину якого визначають формулою $j_1 = \sigma E_0(x_i; x', z')$, а самі значення I_1^y виразом

$$I_1^y = \iint_S j_1 dx'dz' = \iint_S \sigma E_0(x_i; x', z') dx'dz' . \tag{1}$$

Приймемо, що область S є малою, а електричне поле $E_0(x_i; x', z')$ за фіксованих x_i, $z=0$ слабо змінюється від положення точки $(x', z') \in S$, тобто

$$E_0(x_i; x', z') \approx \text{const} = E_0(x_i; x_0', z_0') .$$

Тоді вираз (1) можна переписати у вигляді

$$I_1^y = \iint_S \sigma E_0(x_i; x_0', z_0') dx'dz' = \sigma E_0(x_i; x_0', z_0') \iint_S dx'dz' = P\sigma E_0(x_i; x_0', z_0') , \tag{2}$$

де (x_0', z_0') – координати точки розміщення нитки зі струмом I_1^y, електромагнетне поле якої найточніше описує поле видовженого дефекту; $P = \iint_S dx'dz'$ – площа поперечного перерізу дефекту.

Таким чином, надалі вважатимемо, що замість видовженого дефекту в електропровідному півпросторі в деякій точці (x_0', z_0') розміщено нескінченно довгу нитку зі струмом I_1^y, значення якого визначають формулою (2). Вертикальну компоненту магнетного поля цієї нитки $H_z^m(x_i+d; x_0', z_0')$, згідно з працею [8], визначають так:

$$\begin{aligned} H_z^m(x_i+d; x_0', z_0') &= \frac{I_1^y}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - k^2}} e^{-i\lambda(x_i + d - x_0') - z_0'\sqrt{\lambda^2 - k^2}} d\lambda = \\ &= I_1^y M(x_i + d; x_0', z_0') , \end{aligned} \tag{3}$$

а з врахуванням виразу (2) одержимо:

$$H_z^m(x_i+d; x_0', z_0') = P\sigma E_0(x_i; x_0', z_0') M(x_i+d; x_0', z_0') , \tag{4}$$

де (x_0', z_0') – координати місцерозташування нескінченно довгої нитки зі струмом, які необхідно знайти.

Для їх обчислення виберемо функціонал

$$K(x_0', z_0') = \frac{\left| \sum_{i=1}^{n} H_z^s(x_i + d) \overset{*}{H}{}_z^m(x_i + d; x_0', z_0') \right|^2}{\sum_{i=1}^{n} \left| H_z^s(x_i + d) \right|^2 \sum_{i=1}^{n} \left| H_z^m(x_i + d; x_0', z_0') \right|^2}, \qquad (5)$$

де “*” позначає комплексно спряжені значення поля.

Цей функціонал є мірою близькості функцій $H_z^m(x_i + d; x_0', z_0')$ і $H_z^s(x_i + d)$ та інтерпретується як квадрат коефіцієнта кореляції між виміряним та теоретично обчисленим сигналами від дефекту. Підставивши рівняння (4) в (5), одержимо такий вираз для функціонала:

$$K(x_0', z_0') = \frac{\left| \sum_{i=1}^{n} H_z^s(x_i + d) \overset{*}{E}_0(x_i; x_0', z_0') \overset{*}{M}(x_i + d; x_0', z_0') \right|^2}{\sum_{i=1}^{n} \left| H_z^s(x_i + d) \right|^2 \sum_{i=1}^{n} \left| E_0(x_i; x_0', z_0') M(x_i + d; x_0', z_0') \right|^2}. \qquad (6)$$

Координати точки (x_0, z_0), для яких функціонал (6) набуває максимального значення, визначають місцерозташування нескінченно довгої нитки зі струмом I_1^y, поле якої якнайточніше апроксимує поле видовженого дефекту. Таким чином, для визначення місцерозташування видовженого дефекту необхідно розв’язати таку задачу оптимізації:

$$K(x_0, z_0) = \max_{(x_0', z_0') \in D} K(x_0', z_0'), \qquad (7)$$

де D – область зміни (x_0', z_0') в електропровідному півпросторі, яку задають наперед.

Результати тестового випробування алгоритму. Для верифікації алгоритму розглянули таку тестову задачу: на площині $z = 0$ задано розподіл вертикальної складової магнетного поля $H_z^s(x_i + d)$ нескінченно довгої нитки зі струмом, яка розміщена в електропровідному півпросторі. Необхідно визначити координати точки її місцерозташування за рівномірного переміщення джерела первинного поля по межі поділу півпросторів.

Введемо безрозмірні величини: $\bar{x} = x|k|$, $\bar{d} = d|k|$, $\bar{z} = z|k|$, $\bar{k} = k/|k|$, $\bar{E}_0(\bar{x}_i; \bar{x}_0, \bar{z}_0) = E_0(x_i; x_0, z_0)/\omega I_0$, $\bar{M}(\bar{x}_i + \bar{d}; \bar{x}_0, \bar{z}_0) = M(x_i + d; x_0, z_0)/\sigma|k|$.

Для обчислення координат точки місцерозташування нескінченно довгої нитки зі струмом, в якій функціонал (6) досягне максимального значення, застосовано градієнтний метод найшвидшого спуску [9]. Наближені значення $\bar{H}_z^s(\bar{x}_i + \bar{d})$ на відрізку $x_i \in [a, b]$ обчислені за формулою

$$\bar{H}_z^s(\bar{x}_i + \bar{d}) = \bar{E}_0(\bar{x}_i; \bar{x}_0, \bar{z}_0) \bar{M}(\bar{x}_i + \bar{d}; \bar{x}_0, \bar{z}_0)(1 + g v_{i,j}),$$

де $v_{i,j}$ – випадкова величина, рівномірно розподілена на відрізку $[-1, 1]$; g – задана константа, $\bar{x}_0 = 5$, $\bar{z}_0 = -1{,}5$. Добуток $g v_{i,j}$ визначає відносну похибку значень $\bar{H}_z^s(\bar{x}_i + \bar{d})$. В основі запропонованого алгоритму локалізації лежить рекурсивна процедура визначення максимального значення функції. Зважаючи на це, його ефективність передусім визначається вдалим вибором початкових значень $\bar{x}'$, $\bar{z}'$. Числовими експериментами встановлено такі умови їх вибору: $\bar{x}' \in [\bar{a}, \bar{b}]$, $\bar{z}' < 0$.

Результати визначення координат точки місцерозташування нескінченно довгої нитки зі струмом для різних значень g подані в таблиці, де $\Delta\bar{x}' = |\bar{x}_0 - \bar{x}'_0|$, $\Delta\bar{z}' = |\bar{z}_0 - \bar{z}'|$ – відхилення обчислених координат від заданих у моделі.

З наведених даних випливає, що навіть за сильно спотвореного завадами сигналу від локального дефекту (g = 1,5 та g = 2) застосування методу кореляційної обробки сигналів дає змогу одержати прийнятні результати з точки зору неруйнівного вихрострумового контролю. Також встановлено, що за врахування в моделі зміни положення джерела первинного поля підвищується точність визначення місцерозташування видовженого дефекту на ~3%. Наведені вище викладки справедливі і коли замість вертикальної складової магнетного поля (z-компоненти), розглядати горизонтальну складову (x-компоненту).

Відхилення $\Delta\bar{x}'$, $\Delta\bar{z}'$ для різних значень g

g	$\Delta\bar{x}'$	$\Delta\bar{z}'$
0,5	0,012	0,041
1	0,092	0,062
1,5	0,163	0,080
2	0,271	0,150

ВИСНОВКИ

Узагальнено метод кореляційної обробки сигналів за зміни положення джерела первинного поля відносно видовженого підповерхневого дефекту. Числовими експериментами підтверджено ефективність його застосування для обробки та аналізу даних діагностики електропровідних матеріалів засобами неруйнівного вихрострумового контролю.

1. *Лунин В. П.* Феноменологические и алгоритмические методы решения обратных задач электромагнитного контроля // Дефектоскопия. – 2006. – № 6. – С. 3–16.
2. *Механіка* руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / Під ред. О. П. Осташа, В. М. Федірка. – Львів: Сполом, 2007. – 1068 с.
3. *Auld B. A. and Moulder J. C.* Review of Advances in Quantitative Eddy Current Nondestructive Evaluation // J. of Nondestructive Evaluation. – 1999. – **18**, № 1. – P. 3–36.
4. *Udpa L. and Udpa S.* Eddy current defect characterization using neural networks // Mat. Evaluation. – 1990. – № 48 (3). – P. 342–347.
5. *Кулинич Я. П., Тригуб І. І.* Метод локації видовженого підповерхневого дефекту в електропровідному матеріалі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 5. – С. 73–76.
6. *Кулинич Я. П., Тригуб І. І.* Застосування кореляційної обробки сигналів до локалізації видовжених підповерхневих дефектів // Відбір і обробка інформації, – 2007. – 26 (102). – С. 5–10.
7. *Bowler J. R., Norton S. J., Harrison D. J.* Eddy current interaction with an ideal crack. II. The inverse problem // J. Appl. Phys. – 1994. – **75**, № 12. – P. 501–512.
8. *Марков Г. Т., Чаплин А. Ф.* Возбуждение электромагнитных волн. – М.–Л.: Энергия, 1967. – 376 с.
9. *Бейко И. В., Бублик Б. Н., Зинько П. Н.* Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. – К.: Вищ. шк., 1983. – 512 с.

Одержано 03.09.2015