

УДК 537.874:621.317

## ВИЯВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ЛОКАЛЬНИХ ДЕФЕКТІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

Я. П. КУЛИНИЧ, І. І. ТРИГУБ

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

Для визначення місця розташування підповерхневих локальних дефектів у металевих конструкціях запропоновано метод кореляційної обробки сигналів. Подано результати числової та експериментальної верифікації, які підтверджують його ефективність та достовірність.

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

Для виявлення дефектів у виробках з електропровідних матеріалів методами неруйнівного вихрострумного контролю необхідно інтерпретувати параметри інформаційного сигналу. Оскільки інформація про структуру контрольованого виробу та дефекти у ньому закладена у вимірюваних характеристиках розсіяного електромагнетного поля, то важливо розв'язати обернену задачу, тобто визначити місце розташування дефектів та їх геометричні характеристики.

У теорії неруйнівного вихрострумного контролю запропоновано низку методів розв'язання цієї задачі [1–3], які можна розділити на дві групи. У першій розв'язання оберненої задачі зведено до задачі розпізнавання образів [4, 5]. Тут вимірний сигнал ідентифікують як один із вже відомих типів сигналів від дефектів, отриманих або експериментально, або за теоретичними моделями. Характерною особливістю і водночас основним недоліком цих методів є необхідність у навчальній вибірці сигналів від різних типів дефектів, яку 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 до тих пір, доки норма різниці сигналів, одержаних за моделлю та експериментально, не буде мінімізована [6, 7]. Ефективність цього підходу визначають три основні чинники: теоретична модель сигналу, вибір початкового наближення до розв'язку і алгоритми пошуку глобального мінімуму. Тут надзвичайно важливо вибрати математичну модель опису сигналу. Тільки моделі з найменшими спрощеннями в описі фізичного процесу гарантують прийнятний результат, хоча для цього потрібно значні обчислювальні ресурси.

До цієї групи належить і кореляційний метод визначення місця розташування видовжених підповерхневих дефектів [8, 9], який розглядають як перший етап розв'язання оберненої задачі неруйнівного вихрострумного контролю. Мета праці – застосувати цей метод для визначення місця розташування підповерхневого “локального дефекту”, тобто дефекту, електромагнетне поле якого наближено збігається з електромагнетним полем точкового джерела (еквівалентний електричний або магнетний диполі [10, 11]). Точку розміщення цього джерела і назвемо точкою локалізації дефекту.

**Постава задачі.** У тривимірному ізотропному середовищі розмістили металеву пластину з хвильовим числом  $k$  з підповерхневим локальним дефектом, на яку діє змінне електромагнетне поле. Прийmemo, що на поверхні пластини відомий розподіл сигналу первинного перетворювача, значення якого наближено пропорційне амплітуді нормальної компоненти вектора магнетного поля, збуреного дефектом. Коефіцієнт пропорційності невідомий. Необхідно визначити місце локалізації дефекту. Товщину пластини вважатимемо достатньо великою, щоб знехтувати вплив нижньої поверхні на наведені в ній вихрові струми. Це дає змогу під час математичного опису задачі замінити пластину півпростором, заповненим матеріалом пластини.

**Вихідні співвідношення.** Для подальшого викладу виберемо прямокутну систему координат, вісь  $z$  якої напрямлена у верхній півпростір, а осі  $x$  і  $y$  лежать на поверхні виробу (рис. 1). У нижньому півпросторі міститься локальний дефект  $A$ , який описує еквівалентний електричний диполь з моментом  $\vec{p}$ , що знаходиться у точці з координатами  $x_0, y_0$  і  $z_0$ .

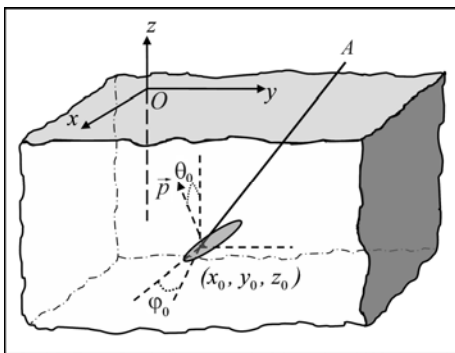


Рис. 1. Геометрія задачі.

Fig. 1. Geometry of the problem.

Вектор  $\vec{p}$  утворює кут  $\theta_0$  з віссю  $Oz$ , а його проекція на площину  $xOy$  – кут  $\varphi_0$  з віссю  $Ox$ . Таким чином, вектор  $\vec{q} = \{x_0, y_0, z_0, \theta_0, \varphi_0\}$  характеризує геометричні параметри дефекту і його розташування.

Позначимо через  $H_z^m(x, y; \vec{q})$  і  $H_z^s(x, y)$  компоненти вектора магнетного поля, створеного еквівалентним електричним диполем та дефектом на поверхні пластини ( $z = 0$ ). Маємо наближену рівність

$$H_z^s(x, y) \approx lU^s(x, y), \quad (1)$$

де  $U^s(x, y)$  – вимірний сигнал на поверхні пластини;  $l$  – деяка невідома константа, яка залежить від конструктивних параметрів первинного перетворювача. Згідно з працею [10] одержимо:

$$H_z^m(x, y; \vec{q}) = M(p, \theta_0) L(x, y; x_0, y_0, z_0; \varphi_0), \quad (2)$$

де  $M(p, \theta_0) = \frac{p}{2\pi k^2} \sin \theta_0$ ;  $L(x, y; x_0, y_0, z_0; \varphi_0) = \sin(\varphi - \varphi_0) \int_0^\infty \lambda^2 (\eta - \lambda) J_1(\lambda \rho) e^{z_0 \eta} d\lambda$ ,

$$\eta = \sqrt{\lambda^2 - k^2}, \quad \rho = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad \sin \varphi = \frac{y - y_0}{\rho}, \quad \cos \varphi = \frac{x - x_0}{\rho}.$$

Необхідно визначити компоненти вектора  $\vec{q}$ , для яких функції  $H_z^m(x, y; \vec{q})$  і  $H_z^s(x, y)$  максимально близькі за значеннями. Алгоритм локалізації, який базується на мінімізації квадрата відхилень теоретичних значень нормальної компоненти магнетного поля, обчислених за формулою (2), від знайдених за формулою (1), неефективний, оскільки використовує невідомі абсолютні значення  $H_z^s(x, y)$ . Цього недоліку позбавлений алгоритм, що базується на максимізації квадрата кореляції між цими функціями. Опишемо його детальніше.

**Алгоритм розв'язання задачі.** Спочатку розглянемо неперервний сигнал. Позначимо через  $(u, v)$  скалярний добуток двох функцій  $u(x, y)$  і  $v(x, y)$  та покладемо

$$h_z^m(x, y; \vec{q}') = \frac{H_z^m(x, y; \vec{q}')}{\|H_z^m\|}, \quad h_z^s(x, y) = \frac{H_z^s(x, y)}{\|H_z^s\|},$$

де  $\vec{q}' = \{x', y', z', \theta', \varphi'\}$ ,  $\|V\| = (V, V)$  – норма функції  $V(x, y)$ . За міру близькості між функціями  $H_z^m(x, y; \vec{q}')$  і  $H_z^s(x, y)$  приймемо значення функціонала

$$K(\vec{q}') = |(h_z^m, h_z^s)|^2. \quad (3)$$

Цю рівність інтерпретують як квадрат коефіцієнта кореляції між вимірним та теоретично обчисленим сигналами. Координати вектора  $\vec{q}$ , для якого функціонал (3) досягає максимального значення, визначають місце розташування еквівалентного електричного диполя та орієнтацію його моменту  $\vec{p}$ , поле якого найточніше (у вказаному вище сенсі) апроксимує поле локального дефекту.

Оскільки рівності (1) та (2) дають

$$h_z^m(x, y; \vec{q}) = \frac{L(x, y; x_0, y_0; \varphi_0)}{\|L\|}, \quad h_z^s(x, y) = \frac{U_z^s(x, y)}{\|U_z^s\|},$$

то значення функціонала (3) не залежить від кута  $\theta_0$  та моменту диполя  $p$ . Тому, за потреби їх знаходження, необхідно використовувати додаткову інформацію, наприклад, абсолютні значення параметрів компонент магнетного поля.

Таким чином, для визначення координат точки, в якій розміщено еквівалентний електричний диполь, треба розв'язати таку задачу оптимізації:

$$K(\vec{q}_0) = \max_{\vec{q}' \in D} K(\vec{q}'),$$

де  $\vec{q}_0 = \{x_0, y_0, z_0, \varphi_0\}$ ;  $\vec{q}' = \{x', y', z', \theta', \varphi'\}$ ;  $D$  – область зміни вектора  $\vec{q}'$ , яку задають наперед.

Подано вираз (3) для дискретного сигналу. Нехай значення  $h_z^s$  виміряні у точках  $\{(x_i, y_j)\}_{i,j=1}^n$  області сканування  $[a_1, b_1] \times [a_2, b_2]$ . Координати цих точок визначають рівності

$$x_i = a_1 + (i-1)\Delta x, \quad y_j = a_2 + (j-1)\Delta y, \quad \Delta x = (b_1 - a_1)/(n-1), \quad \Delta y = (b_2 - a_2)/(n-1). \quad (4)$$

Уведемо скалярний добуток

$$(u, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u(x_i, y_j) v(x_i, y_j).$$

Тоді міру близькості функції  $H_z^m(x_i, y_j; \vec{q})$  і  $H_z^s(x_i, y_j)$  оцінюватимемо значенням функціонала

$$K_d(\vec{q}) = \frac{\left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_z^m(x_i, y_j; \vec{q}) H_z^s(x_i, y_j) \right|^2}{\left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |H_z^s(x_i, y_j)|^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |H_z^m(x_i, y_j; \vec{q})|^2 \right)}. \quad (5)$$

**Результати тестового випробування алгоритму.** Верифікуємо алгоритм на тестовій задачі: визначимо розташування електричного диполя, якщо на дискретній множині точок (4) поверхні пластини задано з деякою похибкою нормальну компоненту створеного ним магнетного поля.

Для зручності подальшого викладу перейдемо до безрозмірних величин:

$$\bar{x} = |k|, \quad \bar{y} = y|k|, \quad \bar{z} = z|k|, \quad \bar{k} = k/|k|, \quad \bar{a}_1 = a_1|k|, \quad \bar{b}_1 = b_1|k|, \quad \bar{a}_2 = a_2|k|, \quad \bar{b}_2 = b_2|k|, \quad \bar{L}(\bar{x}_i, \bar{y}_j; \bar{x}', \bar{y}', \bar{z}'; \varphi) = L(\bar{x}_i/|k|, \bar{y}_j/|k|; \bar{x}'/|k|, \bar{y}'/|k|, \bar{z}'/|k|; \varphi)/|k|^4.$$

Магнетне поле у точках області сканування поверхні пластини задамо співвідношенням

$$H_z^s(\bar{x}_i, \bar{y}_j) = \bar{L}(\bar{x}_i, \bar{y}_j; \bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0; \varphi_0)(1 + gv_{ij}),$$

**Абсолютна похибка визначення координат місця розташування електричного диполя для різних значень константи  $g$**

$g$	$\Delta\bar{x}'$	$\Delta\bar{y}'$	$\Delta\bar{z}'$	$\Delta\varphi$ , grad
0,5	0,032	0,052	0,001	0,515
1	0,061	0,098	0,019	1,110
1,5	0,088	0,139	0,060	1,876
2	0,112	0,173	0,123	2,807

де  $\bar{x}_0 = 2$ ;  $\bar{y}_0 = 3$ ;  $\bar{z}_0 = -1$ ;  $\varphi_0 = 60^\circ$ ;  $v_{ij}$  – значення випадкової величини, рівномірно розподіленої на відрізок  $[-1, 1]$ ;  $g$  – задана константа. Добуток  $gv_{ij}$  можна інтерпретувати як похибку вимірювальної системи.

Для знаходження максимального значення функціонала (5) використали рекурсивну процедуру, в основі якої – градієнтний метод пошуку глобального мінімуму [12]. Його ефективність передусім залежить від вдалого вибору початкових значень  $\bar{x}'$ ,  $\bar{y}'$ ,  $\bar{z}'$ ,  $\varphi'$ .

Числовими експериментами встановлено такі умови їх вибору:  $\bar{x}' \in [\bar{a}_1, \bar{b}_1]$ ,  $\bar{y}' \in [\bar{a}_2, \bar{b}_2]$ ,  $\bar{z}' < 0$ ,  $0^\circ \leq \varphi' \leq 90^\circ$  (див. таблицю, де  $\Delta\bar{x}' = |\bar{x}_0 - x'_0|$ ,  $\Delta\bar{y}' = |\bar{y}_0 - y'_0|$ ,  $\Delta\bar{z}' = |\bar{z}_0 - z'_0|$ ,  $\Delta\varphi = |\varphi_0 - \varphi'_0|$ ;  $\{x'_0, y'_0, z'_0, \varphi'_0\}$  – обчислені значення координат місця розташування електричного диполя).

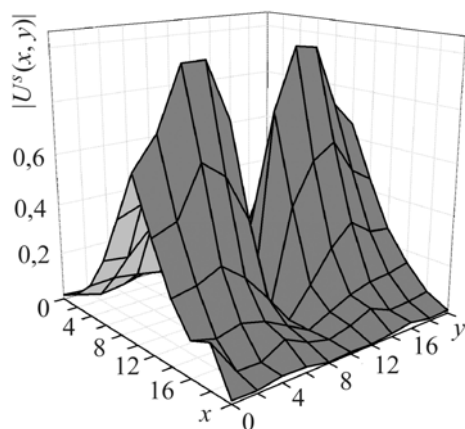


Рис. 2. Залежність амплітуди сигналу  $|U^s(x, y)|$  від координат центра вимірювальної котушки на поверхні пластини.

Fig. 2. Dependence of the signal  $|U^s(x, y)|$  amplitude on coordinates of the center of the measuring coil on the plate surface.

Отже, навіть за сильно спотвореного завадами сигналу (магнетного поля) диполя ( $g = 1,5$ , та 2) методом кореляційної обробки можна визначити місцезнаходження диполя з похибкою, прийнятною для методів неруйнівного вихрострумовевого контролю.

Встановили, що абсолютні похибки між координатами  $\Delta\bar{x}'$ ,  $\Delta\bar{y}'$ ,  $\Delta\bar{z}'$ ,  $\Delta\varphi$  залежать від взаємного розташування локального дефекту і області сканування. За умови  $|\bar{z}_0| \in (0, 3]$ ,  $\bar{a}_1 < \bar{x}_0 < \bar{b}_1$ ,  $\bar{a}_2 < \bar{y}_0 < \bar{b}_2$  і  $g \in [0, 2]$  значення  $\Delta\bar{x}'$ ,  $\Delta\bar{y}'$ ,  $\Delta\bar{z}'$ ,  $\Delta\varphi$  несуттєво відрізняються від наведених у таблиці. Проте, коли  $\bar{x}_0 \notin (\bar{a}_1, \bar{b}_1)$ , або  $\bar{y}_0 \notin (\bar{a}_2, \bar{b}_2)$ , значення  $\Delta\bar{x}'$ ,  $\Delta\bar{y}'$ ,  $\Delta\bar{z}'$ ,  $\Delta\varphi$  зростають у 10 і більше разів. Тоді для знаходження максимуму функціонала (5) необхідні спеціальні методи глобальної оптимізації [12].

**Експериментальна верифікація алгоритму.** Для моделювання локального підповерхневого дефекту у пластині з нержавної сталі товщиною 3,2 mm просвердлили отвір діаметром 3 mm і глибиною 1,5 mm. Пластину встановлювали на підкладку товщиною 10 mm з тієї самої марки сталі. Сканували поверхню пластини в околі дефекту у двох взаємно перпендикулярних напрямках мультифункціональним вихрострумівим приладом МВСП-1. Частота зондувального поля 25 kHz, коефіцієнт підсилення 8. Похибка приладу 5%. Область сканування вибирали у

вигляді квадрата зі стороною 20 mm так, що вісь дефекту проходила через центр квадрата. Крок сканування 2 mm. За результатами вимірювання сигналу, пронормованими на максимальне значення (рис. 2), верифікували описаний вище алгоритм за формулою (5). Для знаходження місця розташування локального дефекту застосовували градієнтний метод найшвидшого спуску [12] і отримали такі координати розташування еквівалентного диполя:  $x_d \approx 9,91$  mm,  $y_d \approx 10,08$  mm,  $z_d = -2,1$  mm,  $\varphi = 2^\circ$ . Таким чином, координати точки локалізації дефекту збіглися з координатами центра дефекту з точністю до десятих часток міліметра, що підтверджує ефективність запропонованого методу локалізації локальних дефектів в електропровідному матеріалі.

### ВИСНОВКИ

Для визначення місця розташування підповерхневого локального дефекту в електропровідному виробі запропоновано метод кореляційної обробки сигналів. В його основі – процедура знаходження максимального значення квадрата коефіцієнта кореляції між вимірним на поверхні виробу сигналом дефекту та теоретично обчисленим магнетним полем еквівалентного електричного диполя. Числові та натурні експерименти підтверджують ефективність методу для розв'язання задач неруйнівного вихрострумового контролю металевих конструкцій.

*РЕЗЮМЕ.* Для определения места расположения подповерхностных локальных дефектов в металлоконструкциях предложен метод корреляционной обработки сигналов. Приведены результаты численного и экспериментального тестирования, которые подтверждают его эффективность и достоверность.

*SUMMARY.* To determine the location of subsurface local defects in structures using the eddy current non-destructive testing method it is proposed to use the correlation signal processing method. The presented results of numerical and experimental testing, obtained by this method, prove its effectiveness and reliability.

1. *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.
2. *Лушин В. П.* Феноменологические и алгоритмические методы решения обратных задач электромагнитного контроля // *Дефектоскопия* – 2006. – № 6. – С. 3–16.
3. *Учанин В. Н.* Методы количественного вихретокового контроля с определением параметров дефектов // *Техн. диагностика и неразр. контроль*. – 2002. – № 1. – С. 33–38.
4. *An artificial neural network for eddy current testing of austenitic stainless steel welds / B. P. C. Rao, V. Raj, T. Jayakumar, and P. Kalyanasundaram* // *NDT&E Int.* – 2002. – **35**, № 6. – P. 393–398.
5. *Udpa L. and Udpa S.* Eddy current defect characterization using neural networks // *Mat. Evaluation*. – 1990. – № 48(3). – P. 342–347.
6. *Bowler J. R., Noton S. J., and Harrison D. J.* Eddy current interaction with an ideal crack. II. The inverse problem // *J. Appl. Phys.* – 1994. – **75**, № 12. – P. 501–512.
7. *Dobson D. C. and Santosa F.* Nondestructive Evaluation of plates using eddy current methods // *Int. J. of Engng. Sci.* – 1998. – **36**, № 4. – P. 395–409.
8. *Кулинич Я. П., Тригуб І. І.* Метод локації видовженого підповерхневого дефекту в електропровідному матеріалі // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2004. – **40**, № 5. – С. 73–76.  
(*Kulynych Ya. P. and Tryhub I. I.* A method for the localization of an elongated subsurface defect in a conducting material // *Materials Science*. – 2004. – **40**, № 5. – P. 656–661.)
9. *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.
10. *Гордиенко В. И., Кулынич Я. П., Убогий В. П.* Моделирование электромагнитных полей в морской среде. – К.: Наук. думка, 1988. – 222 с.
11. *Колодій Б. І., Орловський А. А., Панасюк В. В.* Розсіяння електромагнітних хвиль на дрібних дефектах в плоскошаруватих середовищах. – К.: Наук. думка, 1985. – 132 с.
12. *Бейко И. В., Бублик Б. Н., Зинько П. Н.* Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. – К.: Вищ. шк., 1983. – 512 с.

Одержано 15.05.2013