

УДК 620.179.14

А. Я. Тетерко, В. І. Гутник

КОМПОЗИЦІЙНА МОДЕЛЬ ЗВОРотної ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ ДВОПАРАМЕТРОВОГО ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

The concept of designing of nonlinear inverse transformation function of Eddy current apparatus as composition of partial function for nondestructive measuring of the testing object characteristics is presented. On example of control of material electric conductivity and dielectric coating of the testing object was proved that composition inverse transformation function is permitted to increase of measuring precision and simultaneously to make less complicated of processing of Eddy current transducer signal response.

Keywords: *Eddy current testing, electric conductivity, thickness of dielectric coating, lift off, nonlinear processing of Eddy current transducer signal, inverse transformation apparatus function.*

На прикладі розв'язання задачі контролю питомої електропровідності матеріалу контрольованого об'єкта і товщини діелектричного покриття або зазору подано концепцію побудови нелінійної зворотної функції перетворення апаратури вихрострумовеого контролю як композиції часткових функцій. Обґрунтовано, що такий підхід стосовно побудови зазначеної функції і визначення за нею контрольованих параметрів забезпечує підвищення точності багатопараметрового вихрострумовеого контролю і спрощує його апаратурну реалізацію.

Ключові слова: *вихрострумівий контроль, електрична провідність матеріалу, товщина діелектричного покриття, зазор, нелінійна обробка сигналу, вихрострумівий перетворювач, зворотна функція перетворення апаратури.*

У технічній діагностиці для розв'язання задач оцінки ступеня деградації та зношування матеріалу контрольованого об'єкта (ОК) на основі визначення товщини оболонок і питомої електричної провідності (ПЕП) матеріалу ОК застосовують засоби вихрострумовеого (ВС) контролю. При цьому у ВС контролі, як це загальноприйнято, використовують метод вимірювання фази інформаційного сигналу вихрострумовеого первинного перетворювача (ВСПП). Інформаційний сигнал ВСПП формують за допомогою додаткового сигналу компенсації так, щоб фаза сумарного сигналу мало залежала від зміни зазору між ВСПП і ОК [1, 3]. Є багато способів такого формування інформаційного сигналу [1, 3, 4, 9, 10]. Однак загалом *нелінійний характер зміни сигналу ВСПП при зміні параметрів ОК під час контролю не дає змоги за цими способами усунути методичну похибку, зумовлену впливом зазору, а також підвищити чутливість контролю.*

Сучасні засоби ВС контролю реалізують лінійні методи перетворення відгуку ВСПП, похибки яких в задачах контролю ПЕП матеріалу чи товщини оболонок становлять щонайменше 2–3%. Підвищення точності оцінок зазначених параметрів ОК є важливим чинником підвищення достовірності результатів технічної діагностики стану і прогнозування працездатності та ресурсу елементів конструкцій в авіації, енергетиці, залізничному транспорті, хімічному й трубному виробництві тощо. Розв'язання таких задач методами лінійної обробки відгуку ВСПП, що взаємодіє з ОК, виявляється неможливим і потребує нових підходів.

© А. Я. Тетерко, В. І. Гутник, 2013

Задача селективних вимірювань параметрів оболонок відповідно до концепції багатопараметрових ВС вимірювань [5] в цілому розв'язується нами на основі побудови нелінійної моделі зворотної функції перетворення (ЗФП) системи ВСПП–ОК, залежної від вектора інформаційних параметрів системи [6–8]. Таке розв'язання оберненої задачі ВС контролю ПЕП та товщини оболонок дає можливість до десятих часток відсотка зменшити похибки оцінок параметрів ОК. При цьому є необхідним подальший розвиток зазначеного підходу, з метою підвищення ефективності алгоритмів побудови ЗФП системи ВСПП–ОК.

Композиційна модель ЗФП системи ВСПП–ОК. Задача розвитку методу селективних вимірювань за ЗФП системи розв'язується в роботі за запропонованою нами концепцією побудови нелінійної ЗФП як суми часткових моделей меншої розмірності, що дає змогу покращити точність апроксимації ЗФП.

При побудові ЗФП системи ВСПП–ОК ми використовували також пряму функцію перетворення (ПФП) системи. Для побудови ПФП та ЗФП системи ВСПП–ОК необхідно для заданих значень вектора параметрів ОК з області $X_0 \subset X \subset R^n$ знати відповідні значення складових вектора інформаційних параметрів з області $Y_0 \subset Y \subset R^m$; $m \geq n$. Останні можуть бути визначені або за розв'язком відповідної прямої задачі чи/та за фізичним експериментом шляхом проведення процедури калібрування системи ВСПП–ОК на контрольних зразках.

Моделі прямої та зворотної функцій перетворення системи, що є важливим, будують за єдиним підходом методами наближення функції багатьох змінних, що задається масивом значень вектора параметрів ОК та відповідних значень вектора інформаційних параметрів по M точках області зміни параметрів ОК [5, 6]. Для i -ї складової моделі ФП має такий загальний вигляд:

$$G_{iN}(v) = w_i^{\delta} \cdot g(v), \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

де N – розмірність моделі; $w_i^{\delta} = (w_{0i}, w_{1i}, \dots, w_{Ni})$ – вектор з $(N+1)$ невідомих коефіцієнтів; $g(v) = (1, g_1(v), \dots, g_N(v))^{\delta}$ – вектор параметрів ОК ($v = \delta$) за ПФП або вектор інформаційних параметрів ($v = \delta$) за ЗФП системи; $g_r(v)$, $r = 1, \dots, N$ – ортогональні функції.

Розглянемо методику побудови композиційної моделі зворотної функції перетворення, що пропонується, на прикладі двопараметрової задачі оцінки питомої електричної провідності матеріалу оболонки та зазору між оболонкою і ВСПП за зображенням моделі повним кубом.

Складовими вектора $x = (x_1, x_2)^T$ параметрів оболонки є безрозмірний узагальнений параметр $x_1 = \beta = R_{\text{âââ}} \sqrt{\omega \sigma \mu_0}$, що характеризує ПЕП [3, 5] та відносне значення відстані h (зазору) між ВСПП та поверхнею ОК $x_2 = \alpha = h / R_{\text{âââ}}$ (тут $R_{\text{âââ}}$ – еквівалентний радіус ВСПП). При цьому як зазор може розглядатись наявність захисного діелектричного покриття або оксидної плівки. Компонентами вектора $y = (y_1, y_2)^{\delta}$ інформаційних параметрів є дійсні значення ортогональних компонент (Re, Im) відгуку ВСПП.

Модель (1) є лінійною відносно вектора невідомих коефіцієнтів. Система рівнянь для знаходження вектора невідомих коефіцієнтів моделі ЗФП, яка будується за масивом $\{x_k, y_k\}$; $k = 1, \dots, M$ по \dot{l} точках у заданій області $\delta_k \in \delta \subset \tilde{\delta} \subset \tilde{\delta}_0$ зміни параметрів ОК, у матричній формі має такий вигляд:

$$x = Y \cdot Q; \quad \tilde{\delta} = (\tilde{\delta}_1, \dots, \tilde{\delta}_l)^{\delta}. \quad (2)$$

Вектор Q невідомих коефіцієнтів визначають за розв'язком системи нормальних рівнянь методу найменших квадратів з рівняння [2, 5]

$$Q = (Y^{\dot{}} \cdot Y)^{-1} \cdot Y^{\dot{}} \cdot x = P^{-1} \cdot Y^{\dot{}} \cdot x. \quad (3)$$

Для складових вектора параметрів ОК $x = (\beta, \alpha)^T$ побудуємо зображення ЗФП системи ВСПП–ОК у вигляді двовимірного поліному третього степеня (тобто повним кубом) [5, 6], щоб для зручності запису не збільшувати розмірність моделі. При цьому виділимо складову, що відповідає номінальному значенню вектора параметрів ОК, складові, які залежать тільки від однієї із компонент вектора інформаційних параметрів, та змішану складову, а саме:

$$\begin{aligned} \frac{\beta_k}{\alpha_r} \Rightarrow x(\text{Re}; \text{Im}) = x(\text{Re}_{\text{ном}}; \text{Im}_{\text{ном}}) + \\ + (a_{11} \cdot \Delta \text{Re} + a_{12} \cdot \Delta \text{Re}^2 + a_{13} \cdot \Delta \text{Re}^3) + (a_{21} \cdot \Delta \text{Im} + a_{22} \cdot \Delta \text{Im}^2 + a_{23} \cdot \Delta \text{Im}^3) + \\ + (b_{11} \cdot \Delta \text{Re} \cdot \Delta \text{Im} + b_{12} \cdot \Delta \text{Re} \cdot \Delta \text{Im}^2 + b_{21} \cdot \Delta \text{Re}^2 \cdot \Delta \text{Im}_i). \end{aligned} \quad (4)$$

У зображенні (4) Re та Im – значення складових інформаційного параметра ВСПП, якими можуть бути внесена у ВСПП напруга, внесений опір та векторний потенціал (за теоретичними даними); $\text{Re}_{\text{ном}}$ та $\text{Im}_{\text{ном}}$ – номінальні значення складових інформаційного параметра при заданих номінальних значеннях складових $\beta_{\text{ном}}$ та $\alpha_{\text{ном}}$ вектора параметрів ОК. Зміна складових інформаційного параметра у заданій області зміни параметрів ОК становить:

$$\begin{aligned} \Delta \text{Re}_i = \text{Re}_i - \text{Re}_{\text{ном}}; \quad \Delta \text{Im}_i = \text{Im}_i - \text{Im}_{\text{ном}}. \\ \beta_{\text{мін}} \leq \beta_k \leq \beta_{\text{макс}}, \quad \beta_{\text{ном}} = 0,5 \cdot (\beta_{\text{макс}} + \beta_{\text{мін}}); \\ \alpha_{\text{мін}} \leq \alpha_r \leq \alpha_{\text{макс}}, \quad \alpha_{\text{ном}} = 0,5 \cdot (\alpha_{\text{макс}} + \alpha_{\text{мін}}). \end{aligned}$$

Зауважимо надалі, що коефіцієнти в (4) для зображення узагальненого параметра β_k та зазору α_r є різними. Позначивши

$$\Delta x(\Delta \text{Re}; \Delta \text{Im}) = x(\text{Re}; \text{Im}) - x(\text{Re}_{\text{ном}}; \text{Im}_{\text{ном}}), \quad (5)$$

в зображенні (4) виділимо такі часткові функції:

$$\Delta x(\Delta \text{Re}; \Delta \text{Im} = 0) = a_{11} \cdot \Delta \text{Re} + a_{12} \cdot \Delta \text{Re}^2 + a_{13} \cdot \Delta \text{Re}^3; \quad (5.1)$$

$$\Delta x(\Delta \text{Im}; \Delta \text{Re} = 0) = a_{21} \cdot \Delta \text{Im} + a_{22} \cdot \Delta \text{Im}^2 + a_{23} \cdot \Delta \text{Im}^3; \quad (5.2)$$

$$\Delta x(\Delta \text{Re}; \Delta \text{Im}) = b_{11} \cdot \Delta \text{Re} \cdot \Delta \text{Im} + b_{12} \cdot \Delta \text{Re} \cdot \Delta \text{Im}^2 + b_{21} \cdot \Delta \text{Re}^2 \cdot \Delta \text{Im}. \quad (5.3)$$

Як видно із (4), функції (5.1) та (5.2) можна отримати відповідно за умови $\Delta \text{Im} = 0$ та $\Delta \text{Re} = 0$. Вони є специфічними функціями у просторі параметрів ОК, аналогічними до функцій впливу параметрів ОК у просторі інформаційних параметрів [3, 5]. Функція (5.3) враховує нелінійний взаємозалежний вплив параметрів ОК на інформаційні характеристики відгуку ВСПП і забезпечує підвищення точності методу селективних вимірювань ПЕП матеріалу та зазору за їх одночасної зміни під час контролю на основі обчислень за ЗФП.

З урахуванням введених функцій (5.1)–(5.3) в цілому композиційна модель зворотної функції перетворення системи ВСПП–ОК матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta x(\Delta \text{Re}; \Delta \text{Im}) = x(\text{Re}; \text{Im}) - x(\text{Re}_i; \text{Im}_i) = \\ = \Delta x(\Delta \text{Re}; \Delta \text{Im} = 0) + \Delta x(\Delta \text{Im}; \Delta \text{Re} = 0) + \Delta x(\Delta \text{Re}; \Delta \text{Im}). \end{aligned} \quad (6)$$

Значимо важливу особливість композиційної моделі ЗФП системи ВСПП–ОК (6). У прикладному аспекті за функціями (5.1) та (5.2), що є частковими випадка-

ми композиційної моделі ЗФП (6), безпосередньо апаратними засобами можна визначити ПЕП матеріалу ОК і зазор між ВСПП і поверхнею ОК або шляхом вимірювання ΔRe за умови $\Delta Im \rightarrow 0$, або шляхом вимірювання ΔIm за умови $\Delta Re \rightarrow 0$. При цьому функція (5.3) взаємного впливу не використовується. Технічну реалізацію цього випадку розглянуто далі. В аспекті побудови безпосередньо ЗФП (6) для часткових функцій (5.1) та (5.2), що є функціями однієї змінної, є широкі можливості апроксимації їх із заданими малими похибками й іншим, окрім поліномів, типом функцій.

Методика побудови композиційної моделі ЗФП системи ВСПП–ОК. Для побудови композиційної моделі ЗФП системи ВСПП–ОК вимірювання ПЕП матеріалу та зазору під час попереднього дослідження моделі розроблено програмні засоби для розв'язання таких задач:

- задачі побудови масиву вхідних даних за розв'язком прямої задачі взаємодії ВСПП з ОК (зокрема, круговий виток зі струмом над електропровідним півпростором) [3, 5];
- задачі побудови моделі ПФП системи ВСПП–ОК [5];
- задачі визначення складових вектора параметрів ОК $x = (\beta, \alpha)^T$ за моделлю ПФП системи ВСПП–ОК [5].

За аналізом досліджень ЗФП системи ВСПП–ОК для заданої області зміни параметрів ОК та заданих похибок оцінок параметрів визначають розмірність моделі та вимоги до технічних характеристик системи, а саме: частоту збудження і параметри ВСПП, точність вимірювань інформаційних параметрів, точність контрольних зразків для калібрування системи. Номінальну ЗФП системи ВСПП–ОК остаточно будують за масивом даних, отриманих під час калібрування.

Основні кроки методики побудови ЗФП передбачають:

1. Визначення області зміни вектора параметрів ОК $x = (\beta; \alpha)^T$ та кількості інтервалів розбиття по кожному з параметрів:

$$\begin{aligned} \beta_{\min} \leq \beta_k \leq \beta_{\max}, \quad k = 0, \dots, K; \\ \alpha_{\min} \leq \alpha_r \leq \alpha_{\max}, \quad r = 0, \dots, R, \end{aligned} \quad (7)$$

а також визначення номінальних значень параметрів ОК:

$$\beta_{\text{nom}} = (\beta_{\min} + \beta_{\max})/2; \quad \alpha_{\text{nom}} = (\alpha_{\min} + \alpha_{\max})/2. \quad (8)$$

Розбиття інтервалів зміни параметрів може бути рівномірним або нерівномірним. Останнє властиве для постановки фізичного експерименту.

2. Визначення за розв'язком прямої задачі номінальних значень складових вектора інформаційних параметрів, відповідних заданим номінальним значенням параметрів ОК:

$$Re_{\text{nom}}(\beta_{\text{nom}}; \alpha_{\text{nom}}); \quad Im_{\text{nom}}(\beta_{\text{nom}}; \alpha_{\text{nom}}). \quad (9)$$

Номінальні значення складових вектора параметрів ОК та відповідні до них номінальні значення складових вектора інформаційних параметрів є одними і тими ж при побудові ПФП і ЗФП.

3. Визначення граничних значень складових вектора інформаційних параметрів з масиву даних, побудованому за розв'язком прямої задачі чи за ПФП системи для заданої області зміни вектора параметрів ОК:

$$(Re_{\min}; Re_{\max}) \text{ та } (Im_{\min}; Im_{\max}). \quad (10)$$

4. Визначення коефіцієнтів $(a_{11}; a_{12}; a_{13})$ функції $\Delta x (\Delta Re; \Delta Im = 0)$.

4.1. Розбиття інтервалу $(\text{Re}_{\min}; \text{Re}_{\max})$ через зміну інформаційного параметра відносно його номінального значення $\text{Re}_{\text{ном}}$:

$$(\text{Re}_{\min} - \text{Re}_{\text{ном}}) \leq \Delta \text{Re}_i \leq (\text{Re}_{\max} - \text{Re}_{\text{ном}}), \quad i = 0, \dots, N. \quad (11)$$

4.2. Визначення приросту складових вектора параметрів ОК для заданих значень приросту складових вектора інформаційних параметрів за розв'язком оберненої задачі з використанням ПФП системи

$$(\Delta \text{Re}_i; \Delta \text{Im}_i = 0)^T \Rightarrow (\Delta \beta_i; \Delta \alpha_i)^T, \quad i = 0, \dots, N. \quad (12)$$

4.3. Визначення за даними п. 4.2 коефіцієнтів $(a_{11}; a_{12}; a_{13})$ функції $\Delta \beta(\Delta \text{Re}; \Delta \text{Im} = 0)$ та функції $\Delta \alpha(\Delta \text{Re}; \Delta \text{Im} = 0)$ за системою рівнянь

$$\Delta \beta_i = a_{11k} \cdot \Delta \text{Re}_i + a_{12k} \cdot \Delta \text{Re}_i^2 + a_{13k} \cdot \Delta \text{Re}_i^3, \quad i = 0, \dots, N; \quad (13)$$

$$\Delta \alpha_i = a_{11r} \cdot \Delta \text{Re}_i + a_{12r} \cdot \Delta \text{Re}_i^2 + a_{13r} \cdot \Delta \text{Re}_i^3, \quad i = 0, \dots, N. \quad (14)$$

5. Визначення коефіцієнтів $(a_{21}; a_{22}; a_{23})$ функції $\Delta x(\Delta \text{Im}; \Delta \text{Re} = 0)$.

Порядок визначення невідомих коефіцієнтів функції $\Delta x(\Delta \text{Im}; \Delta \text{Re} = 0)$ аналогічний до п.4 порядку побудови функції $\Delta x(\Delta \text{Re}; \Delta \text{Im} = 0)$.

6. Визначення коефіцієнтів $(b_{11}; b_{12}; b_{13})$ функції взаємного впливу $\Delta x(\Delta \text{Re}; \Delta \text{Im})$ (5.3) за загальною системою рівнянь (4) для ЗФП системи ВСПП–ОК.

Для визначення коефіцієнтів $(b_{11}; b_{12}; b_{13})$ використовують масив даних по всіх $M = N \times P$ точках із заданої області зміни складових вектора інформаційних параметрів системи ВСПП–ОК. Коефіцієнти часткових функцій (5.1) і (5.2) відомі і є дійсними для всієї області апроксимації ЗФП (4). Тому система рівнянь (4) для визначення коефіцієнтів $(b_{11}; b_{12}; b_{13})$ функції взаємного впливу (5.3) матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} & [x(\text{Re}_i; \text{Im}_i) - x(\text{Re}_{\text{ном}}; \text{Im}_{\text{ном}})] - \Delta x(\Delta \text{Re}_i; \Delta \text{Im}_i) - \Delta x(\Delta \text{Im}_i; \Delta \text{Re}_i) = \\ & = b_{11} \cdot \Delta \text{Re}_i \cdot \Delta \text{Im}_i + b_{12} \cdot \Delta \text{Re}_i \cdot \Delta \text{Im}_i^2 + b_{21} \cdot \Delta \text{Re}_i^2 \cdot \Delta \text{Im}_i; \quad (15) \\ & i = 0, \dots, (N \times P). \end{aligned}$$

Як виявили дослідження, похибки оцінки ПЕП та зазору за композиційною моделлю ЗФП (6) збігаються із похибками поліноміальної моделі ЗФП (1) загального виду. Для апроксимації ЗФП за достатньо обмеженою кількістю $(K \times R = 5 \times 6)$ точок області зміни параметрів ОК

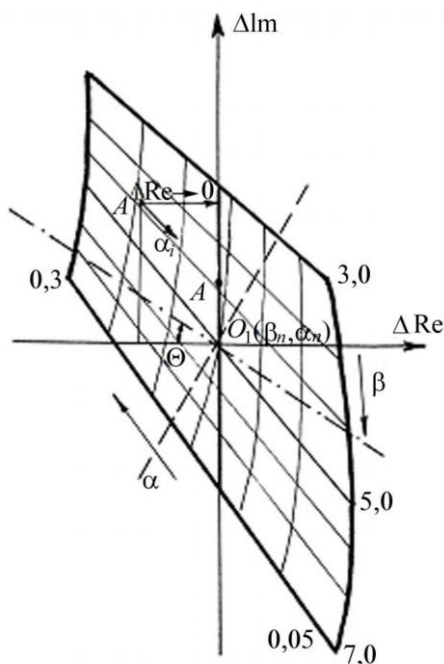
$$\beta = R \sqrt{\omega \sigma \mu_0} = 3; 4; 5; 6; 7; \quad \alpha = h/R = 0,5; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3, \quad (16)$$

що відповідає оптимальному діапазону вимірювань вихрострумів структуроскопів, приведена похибка оцінки ПЕП та зазору становила 1%. Підвищити точність оцінок параметрів ОК можна, зокрема, шляхом збільшення точок апроксимації області зміни параметрів ОК, збільшення розмірності моделі ЗФП та локалізації області зміни параметрів ОК. При цьому похибки оцінок параметрів ОК можуть бути зменшені до десятих часток відсотка. Зауважимо, що визначення коефіцієнтів ЗФП за методикою побудови композиційної моделі ЗФП особливо ефективно зі збільшенням точок апроксимації, збільшенням розмірності моделі та кількості параметрів ОК (три і більше). Це очевидно із зображень (5.1) та (5.2) для часткових функцій композиційної ЗФП, що призводить до принципового зменшення кількості рівнянь для визначення коефіцієнтів моделі порівняно із загальною моделлю ЗФП (1). Окрім цього, за аналізом композиційної моделі ЗФП можна запропонувати ефективні для апаратурної реалізації методи ВС контролю.

Визначення параметрів ОК за частковою функцією ЗФП системи ВСПП–ОК. Розглянемо часткові функції ЗФП (5.1) та (5.2), що наявні за умови $\Delta \text{Im} = 0$ або $\Delta \text{Re} = 0$. Зазначену умову можна реалізувати на практиці шляхом зміни одного з параметрів, яким переважно є зазор між ВСПП та ОК. На рисунку зображено у комплексній площині $(\Delta \text{Re}, \Delta \text{Im})$ область зміни вектора інформаційних параметрів системи ВСПП–ОК зі зміною вектора параметрів ОК в інтервалі $\beta = 3,0 \dots 7,0$; $\alpha = 0,05 \dots 0,3$. Точка $O_1(\beta_i, \alpha_i)$ відповідає прийнятним номінальним значенням параметрів ОК. У точку I_1 шляхом компенсації сигналу ВСПП, який встановлюють на зразку із номінальними значеннями параметрів ОК, перенесено початок відліку вектора інформаційних параметрів системи ВСПП–ОК

Нехай вектор y_i інформаційних параметрів системи відображається у комплексній площині $(\Delta \text{Re}, \Delta \text{Im})$ точкою A . Тоді для виконання вимоги $\Delta \text{Re}_i \rightarrow 0$ будемо змінювати зазор $\alpha_i = \text{var}$ так, щоб вектор y_i (точка A) перемістився уздовж годографа впливу зазору в точку A^* на осі ΔIm . При довільних значеннях вектора інформаційних параметрів виконання умови $\Delta \text{Re}|_{\alpha=\text{var}} \rightarrow 0$ шляхом зміни зазору ($\alpha = \text{var}$) реалізує процедуру відображення годографів ПЕП зі зміною зазору на вісь ΔIm , що фактично відображає розподілення узагальненого параметра β за частковою ЗФП (5.2) системи ВСПП–ОК:

$$\beta(\Delta \text{Im}; \Delta \text{Re} = 0) = a_{11} \cdot \Delta \text{Im} + a_{12} \cdot \Delta \text{Im}^2 + a_{13} \cdot \Delta \text{Im}^3; \quad \Delta \text{Re}|_{\alpha=\text{var}} \rightarrow 0. \quad (17)$$



До принципу контролю ПЕП матеріалу за частковою ЗФП системи.

зміни зазору у заданому діапазоні, обов'язкової при реалізації фазового методу контролю;

– спрощується процедура регулювання і калібрування апаратури, головним

Розглянута процедура по суті є новим методом апаратурної реалізації вимірювання питомої електропровідності матеріалу ОК із повним відстроюванням від нелінійного впливу зазору.

Метод характеризується суттєвими перевагами перед фазовим методом вимірювання ПЕП, який є базовим у вихрострумівому контролі [3]. Ці переваги полягають у наступному:

- принципово підвищено точність вимірювань унаслідок зменшення похибки методу, зумовленої нелінійним впливом зазору, а також зменшенням похибок вимірювань квадратурних компонент інформаційного сигналу ВСПП ΔRe та ΔIm порівняно з похибкою вимірювань малих фазових кутів, що притаманні фазовим вимірюванням;

- не обмежено діапазон допустимої зміни зазору через те, що знімається основна умова щодо лінеаризації годографів $f(\alpha; \beta_i = \text{const})$

положенням якої є компенсація відгуку ВСПП $y = (\text{Re}_{\text{ном}}; \text{Im}_{\text{ном}})^T \rightarrow 0$ за взірцем із номінальним значенням вектора $x = (\beta_{\text{ном}}; \alpha_{\text{ном}})^T$ параметрів ОК.

Розглянемо процедуру калібрування системи ВСПП–ОК. Для калібрування використовується комплект із N контрольних зразків із різними значеннями ПЕП у заданому діапазоні вимірювань. На кожному зразку вимірюється і фіксується значення складової ΔIm^* інформаційного сигналу ВСПП тоді, коли в результаті зміни зазору в заданому діапазоні дійсна складова сигналу стане рівною нулю $\Delta \text{Re}^* = 0$. Зазор необхідно змінювати за допомогою спеціального пристрою або маніпулятора. Під час контролю, як це запропоновано в [7], можна вимірювати неперервно і фіксувати значення складової ΔIm^* безпосередньо у процесі наближення (віддалення) ВСПП до поверхні ОК. За даними калібрування формують масив із N пар значень відомої ПЕП зразків і відповідних до них значень складової ΔIm^* інформаційного сигналу, а саме:

$$\langle \sigma_i; \Delta \text{Im}_i^* \rangle, i = 0, \dots, N. \quad (18)$$

За масивом (18) визначають невідомі коефіцієнти функціональної залежності ПЕП від виміряних значень складової ΔIm^* інформаційного сигналу:

$$\sigma = f(\Delta \text{Im}^*), \quad (19)$$

яка може бути апроксимована поліномом типу (17), а також сплайнами чи іншими функціями, щоб підвищити точність апроксимації ЗФП і відповідно точність контролю.

Аналогічно реалізується варіант цього підходу у разі вимірювання зазору з відстроюванням від впливу ПЕП, наприклад, за зображенням

$$\alpha(\Delta \text{Re}, \Delta \text{Im} = 0) = a_{21} \cdot \Delta \text{Re} + a_{22} \cdot \Delta \text{Re}^2 + a_{23} \cdot \Delta \text{Re}^3. \quad (20)$$

Виконання умови $\Delta \text{Im}|_{\beta=\text{var}} \rightarrow 0$ у цьому випадку можна реалізувати шляхом зміни частоти, внаслідок чого змінюють узагальнений параметр $\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0}$.

Як видно з рисунка, переріз віссю ΔRe не охоплює діапазон сім'ї годографів зазору у заданій області зміни вектора параметрів ОК. Зокрема, при $\alpha_{\text{max}} = 0,3$ для виконання умови $\Delta \text{Re} \rightarrow 0$ параметр β виходить із області, для якої побудовано модель ФП. Щоб задовольнити умову $\Delta \text{Re}|_{\beta=\text{var}} \rightarrow 0$ в усьому діапазоні $(\alpha_{\text{min}}, \alpha_{\text{max}})$, для побудови моделі ЗФП необхідно систему координат $(\Delta \text{Re}, \Delta \text{Im})$ повернути на деякий кут, як це зображено на рисунку пунктиром. Під час вимірювань складових інформаційного сигналу ВСПП це реалізують шляхом регулювання фази опорного сигналу.

Загальним підходом до ефективного вирішення задачі селективних вимірювань ПЕП та зазору ОК і задачі багатопараметрового ВС контролю в цілому є побудова і застосування композиційної моделі ЗФП системи ВСПП–ОК за зображенням типу (6).

ВИСНОВКИ

Запропоновано концепцію побудови нелінійної зворотної функції перетворення системи ВСПП–ОК як композиції часткових функцій, а саме: одновимірних функцій за компонентами вектора інформаційних параметрів системи та функції взаємного впливу, що залежить від компонент вектора інформаційних параметрів і враховує взаємний нелінійний вплив параметрів контрольованого

об'єкта на формування відгуку вихрострумowego первинного перетворювача. Часткові функції композиційної ЗФП мають меншу розмірність, що покращує точність апроксимації ЗФП особливо у разі збільшення кількості параметрів ОК, а також збільшення кількості точок апроксимації у заданій області зміни параметрів ОК. На прикладі двопараметрової задачі контролю питомої електропровідності матеріалу ОК та товщини діелектричного захисного покриття означено умови формування часткових функцій ЗФП та подано методику їх побудови.

На прикладі вирішення задачі контролю питомої електропровідності матеріалу ОК на основі реалізації часткової ЗФП системи ВСПП-ОК показано ефективність такого підходу порівняно із традиційним фазовим методом вихрострумowego контролю в частині підвищення точності контролю. Розглянутий метод селективного вимірювання ПЕП усуває обмеження, властиві фазовому методу вихрострумowych вимірювань, що зумовлені нелінійним і взаємозалежним впливом параметрів ОК на сигнал системи ВСПП-ОК. Загалом застосування концепції побудови композиційної ЗФП системи ВСПП-ОК є перспективним для подальшого розвитку методів і засобів багатопараметрового вихрострумowego контролю.

1. Гордиенко В. И., Рыбачук В. Г., Тетерко А. Я. Влияние зазора на точность фазовых вихретоковых измерителей удельной электрической проводимости // Техническая электродинамика. – 1988. – № 5. – С. 96–101.
2. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
3. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справ. / Под ред. В. В. Клюева.* – М.: Машиностроение, 1995. – 254 с.
4. Тетерко А. Я. Обобщенный фазовый метод увеличения чувствительности селективного вихретокового контроля // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1997. – № 2. – С. 9–19.
5. Тетерко А. Я., Назарчук З. Т. Селективна вихрострумова дефектоскопія. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – 248 с.
6. Тетерко А. Я., Гутник В. І. Побудова зворотної функції перетворення приладів вихрострумowego багатопараметрового контролю // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – № 3. – С. 103–108.
7. Фазовий спосіб вихрострумowego контролю із відлаштуванням від нелінійного впливу зазору / А. Я. Тетерко, В. М. Учанин, В. І. Гутник, О. А. Тетерко // Матер. 17-ої Міжнар. наук.-техн. конфер. "Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів". – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2012. – С. 23–24.
8. Патент на винахід UA 102446 C2, МПК G01N 27/90. Спосіб вихрострумowych селективних вимірювань параметрів оболонок / А. Я. Тетерко, Г. Г. Луценко, В. І. Гутник. – 10 10467; Опубл. 10.07.2013; Бюл. № 13.
9. Method and apparatus for measuring thickness of a test part by an eddy current sensor without contact and with lift off compensation: US Pat. 4 727 322. Int. class. G 01B 007/12. Lonchamp, Thierry, Manganet, Gerard Y. – Publ. 02/23/1988.
10. Method and apparatus for measuring thickness of conductive films with the use of inductive and capacitive sensors: US Pat. 6 593 738. Int. class. G 01N 027/72, G 01B 007/10. R. Kesil, D. Margulis, E. Gershzon. – Publ. 07/15/2003.