

УДК 620.179.14

А. Я. Тетерко

МОДЕЛЬ ЗВОРотної ФУНКЦІї ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРИЛАДІВ БАГАТОПАРАМЕТРОВИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ІЗ ВИКЛЮЧЕННЯМ ВПЛИВУ ЗАЗОРУ

The principle of lift off effect exclusion in characteristics of multidimensional signal response of Eddy current transducer is presented. On example of three-dimensional problem of measuring of testing object thickness and material conductivity with lift off effect exclusion was developed method of dimensional decrease of model of nonlinear inverse transformation function of Eddy current apparatus and designing said function model on base of apparatus calibration data. Uses in apparatus model of said inverse function simplifies of Eddy current transducer signal processing.

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

Подано принцип виключення впливу зазору на параметри багатовимірного сигналу відгуку вихрострумowego перетворювача. На прикладі трипараметрової задачі вимірювання товщини контрольованого об'єкта і питомої електропровідності матеріалу із виключенням впливу зазору розроблено метод зменшення розмірності нелінійної моделі зворотної функції перетворення апаратури вихрострумowego контролю і побудови цієї моделі за даними калібрування. Застосування зазначеної моделі спрощує обробку багатовимірного сигналу вихрострумowego перетворювача.

Ключові слова: *вихрострумований контроль, зворотна функція перетворення апаратури, товщина стінки оболонки, питома електропровідність, товщина діелектричного покриття, зазор, нелінійна обробка сигналу, вихрострумований перетворювач.*

Застосування засобів вихрострумowego (ВС) багатопараметрового контролю стану таких елементів конструкцій, як обшивка планера літака в авіації, труб теплообмінників та парогенераторів у енергетичній та інших галузях техніки під час експлуатації, з метою визначення ступеня їх корозійного та ерозійного зношування, а також деградації основного матеріалу, потребує суттєвого, до десятих часток відсотка, зменшення похибок селективних вимірювань таких трьох параметрів, як товщина стінки контрольованого об'єкта (ОК), питома електрична провідність (ПЕП) матеріалу та товщина захисного покриття [3].

Сучасні прилади ВС контролю забезпечують вимірювання тільки одного із зазначених параметрів, а саме: ПЕП матеріалу або товщини стінки ОК при частковому заглушенні впливу зміни товщини діелектричного покриття тобто зазору між вихрострумовим первинним перетворювачем (ВСПП) і поверхнею ОК. Зміна зазору під час контролю зумовлює методичну похибку [2, 5, 7], для зменшення якої пропонують багато способів вимірювання ПЕП або товщини, зокрема, за патентами [10–12, 14]. При цьому реалізується традиційний підхід, що полягає у вимірюванні фази спеціально сформованого інформаційного сигналу [5]. Так при контролі ПЕП матеріалу похибку від зміни зазору можна зменшити до 1...2% шляхом оптимізації параметрів обмоток ВСПП і корекцією фази інформаційного сигналу в заданому інтервалі зміни зазору. Проте при контролі товщини стінки наявна також додаткова похибка, зумовлена зміною через різні причини ПЕП основного матеріалу ОК, яка становить до 5...10%. Нелінійний і взаємозалежний

© А. Я. Тетерко, 2014

характер зміни сигналу відгуку ВСПП від значень параметрів ОК не дає змоги за традиційним підходом, що є лінійним перетворенням сигналу, зменшити похибки контролю, коли кількість параметрів, які впливають на формування відгуку ВСПП, становить три і більше.

Задача підвищення точності селективних вимірювань параметрів ОК вирішується у цій статті на основі розвитку методу побудови нелінійної моделі зворотної функції перетворення (ЗФП) системи “ВСПП–ОК–МОС” [8, 9], яка містить модуль обробки сигналу (МОС), і полягає у зменшенні розмірності ЗФП шляхом застосування нового способу відбору інформативних характеристик сигналу відгуку ВСПП, за яким виключено вплив на ці характеристики зміни зазору між ВСПП і поверхнею ОК під час контролю.

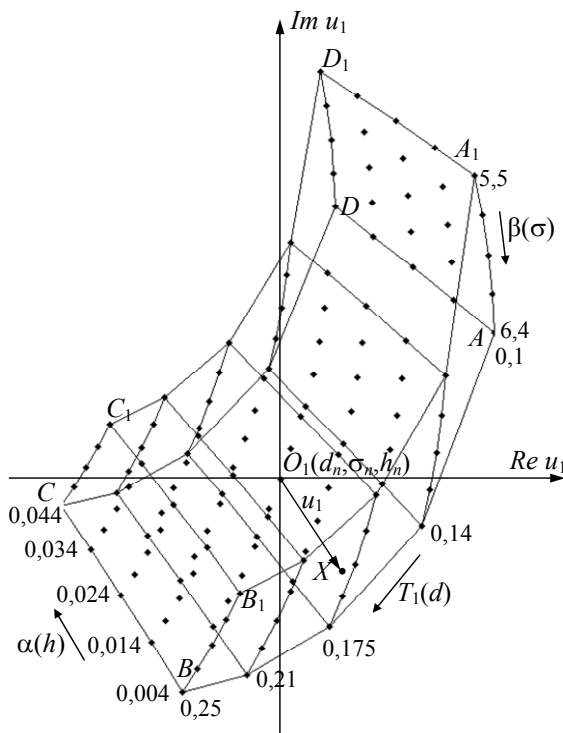


Рис. 1. Годографи впливу параметрів ОК у комплексній площині сигналу відгуку ВСПП.

$$0,1 \leq T_1 \leq 0,25; \quad 5,5 \leq \beta_1 \leq 6,4; \quad 0,004 \leq \alpha_1 \leq 0,044. \quad (1)$$

Початок координат вибрано у точці $O_1(d_n, \sigma_n, h_n)$ із номінальним значенням параметрів, що пов’язано з умовою подальшого калібрування реальної системи ВСПП–ОК–МОС.

Модель ЗФП системи будують методами наближення функції багатьох змінних [8, 9], яку подають таблицею значень n -вимірного вектора параметрів ОК $x_k = (x_{1k}, \dots, x_{nk})^T$ у $k = 1, \dots, M$ точках заданої області зміни параметрів і відповідних до них вимірних значень m -вимірного вектора інформаційних характеристик сигналу відгуку ВСПП $y_k = (y_{1k}, \dots, y_{mk})^T$; $m \geq n$.

Для складової вектора параметрів ОК модель ЗФП системи ВСПП–ОК–МОС зображено у такому загальному вигляді:

$$x_{iN} = q_i^T \cdot g(y), \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

Формування моделі ЗФП системи ВСПП–ОК–МОС.

На рис. 1 у комплексній площині $(Re u_1, Im u_1)$ внесеної у ВСПП напруги зображено годографи впливу товщини стінки ОК d , ПЕП матеріалу σ і зазору h між ВСПП і поверхнею ОК на сигнал відгуку ВСПП. Годографи побудовано за результатами обчислень відомої математичної моделі про взаємодію кругового витка зі струмом, що розташований над електропровідною пластиною [5, 7]. При цьому значення параметрів подано у безрозмірному виді, а саме: товщина $T = d/R$, узагальнений параметр $\beta = R \cdot \sqrt{\omega \sigma \mu_0}$, зазор $\alpha = h/R$, де R – еквівалентний радіус ВСПП; $\omega = 2\pi f$ – кругова частота; μ_0 – магнітна стала. Область зміни параметрів ОК розбита по 5 точках кожного із параметрів і становить:

де N – порядок моделі; $q_i^T = (q_{0i}, q_{1i}, \dots, q_{Ni})$ – вектор $(N + 1)$ коефіцієнтів моделі; $g(y) = (1, g_1(y), \dots, g_N(y))^T$ – вектор ортогональних функцій.

Модель ЗФП системи ВСПП–ОК–МОС по x_i ; $i = 1, \dots, n$ параметрам ОК із урахуванням умов апаратурної реалізації і метрологічної атестації системи зручно відобразити багатовимірним кубічним поліномом, що забезпечує при цьому похибку визначення параметрів ОК на рівні десятих часток відсотка [8, 9] і має такий вигляд:

$$x_i = b_{i0} + \sum_{j=1}^n b_{ij} y_j + \sum_{j=1}^n b_{ij2} y_j^2 + \sum_{j=1}^n b_{ij3} y_j^3 + \dots + \sum_{\substack{j,k=1 \\ (k \neq j)}}^n b_{ijk} y_j y_k + \sum_{\substack{j,k=1 \\ (k \neq j)}}^n b_{ij2k} y_j^2 y_k + \\ + \sum_{\substack{j,k=1 \\ (k \neq j)}}^n b_{ijk2} y_j y_k^2 + \sum_{\substack{j,k,l=1 \\ (j \neq k \neq l)}}^n b_{ijkl} y_j y_k y_l + \dots, \quad (3)$$

де $j, k, l \dots = 1, \dots, m$ – складові вектора інформаційних характеристик.

Розглянемо далі модель ЗФП системи (3) для трипараметрової задачі селективного контролю товщини стінки, ПЕП матеріалу ОК і зазору. При цьому багатовимірний сигнал відгуку ВСПП можна одержати за двома відомими способами формування лінійно незалежної інформації [5, 7], а саме: 1) частотним способом, що полягає у збудженні ВСПП струмом двох частот і мірянні інформаційних характеристик сигналу відгуку по двох частотних каналах та 2) параметричним способом, за яким збуджують ВСПП на одній частоті і вимірюють інформаційні характеристики сигналів відгуку на двох вимірювальних обмотках ВСПП, що мають різний еквівалентний радіус. Як інформаційні характеристики багатовимірного сигналу відгуку ВСПП приймаємо його дійсні та уявні складові, які позначимо як складові вектора інформаційних параметрів сигналу відгуку ВСПП.

Отже, для побудови моделі ЗФП системи зазначеної трипараметрової задачі ВС контролю для складових вектора параметрів ОК x_i ; $i = 1, 2, 3$

$$x = (x_1, x_2, x_3)^T = (T, \beta, \alpha)^T \quad (4)$$

маємо чотиривимірний вектор інформаційних параметрів сигналу відгуку ВСПП, зображення якого має такий вигляд:

$$y = (y_1, y_2, y_3, y_4)^T = (\text{Re}1, \text{Im}1, \text{Re}2, \text{Im}2)^T. \quad (5)$$

Подамо модель (3) ЗФП системи для складових вектора параметрів ОК у розгорнутому вигляді:

$$T; \beta; \alpha \Rightarrow x_i (\text{Re}1, \text{Im}1, \text{Re}2, \text{Im}2) = b_{11} \cdot \text{Re}1 + b_{12} \cdot \text{Re}1^2 + b_{13} \cdot \text{Re}1^3 + \\ + b_{21} \cdot \text{Im}1 + b_{22} \cdot \text{Im}1^2 + b_{23} \cdot \text{Im}1^3 + b_{31} \cdot \text{Re}2 + b_{32} \cdot \text{Re}2^2 + b_{33} \cdot \text{Re}2^3 + \\ + b_{41} \cdot \text{Im}2 + b_{42} \cdot \text{Im}2^2 + b_{43} \cdot \text{Im}2^3 + \\ + b_{11,21} \cdot \text{Re}1 \cdot \text{Im}1 + b_{12,21} \cdot \text{Re}1^2 \cdot \text{Im}1 + b_{11,22} \cdot \text{Re}1 \cdot \text{Im}1^2 + \\ + b_{11,31} \cdot \text{Re}1 \cdot \text{Re}2 + b_{12,31} \cdot \text{Re}1^2 \cdot \text{Re}2 + b_{11,32} \cdot \text{Re}1 \cdot \text{Re}2^2 + \\ + b_{11,41} \cdot \text{Re}1 \cdot \text{Im}2 + b_{12,41} \cdot \text{Re}1^2 \cdot \text{Im}2 + b_{11,42} \cdot \text{Re}1 \cdot \text{Im}2^2 + \\ + b_{21,31} \cdot \text{Im}1 \cdot \text{Re}2 + b_{22,31} \cdot \text{Im}1^2 \cdot \text{Re}2 + b_{21,32} \cdot \text{Im}1 \cdot \text{Re}2^2 + \\ + b_{21,41} \cdot \text{Im}1 \cdot \text{Im}2 + b_{22,41} \cdot \text{Im}1^2 \cdot \text{Im}2 + b_{21,42} \cdot \text{Im}1 \cdot \text{Im}2^2 +$$

$$\begin{aligned}
& +b_{41,31} \cdot \text{Im} 2 \cdot \text{Re} 2 + b_{42,31} \cdot \text{Im} 2^2 \cdot \text{Re} 2 + b_{41,32} \cdot \text{Im} 2 \cdot \text{Re} 2^2 + \\
& +b_{11,21,31} \cdot \text{Re} 1 \cdot \text{Im} 1 \cdot \text{Re} 2 + b_{11,21,41} \cdot \text{Re} 1 \cdot \text{Im} 1 \cdot \text{Im} 2 + \\
& +b_{31,21,41} \cdot \text{Re} 2 \cdot \text{Im} 1 \cdot \text{Im} 2 + b_{31,11,41} \cdot \text{Re} 2 \cdot \text{Re} 1 \cdot \text{Im} 2.
\end{aligned} \tag{6}$$

Для кожного із параметрів ОК модель ЗФП (6) відрізняється вектором коефіцієнтів $b_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{iN})^T$ і враховує взаємозалежний вплив параметрів ОК на сигнал відгуку ВСПП. Кількість членів моделі визначає її порядок N , який для ЗФП (6) становить $N = 34$ і є досить великим. Порядок моделі залежить від розмірності n вектора параметрів ОК (4) і степеня багатовимірного полінома. Збільшення порядку N моделі та кількості точок M у заданій області зміни параметрів ОК, за якими будується ЗФП, погіршує точність апроксимації моделі ЗФП [1, 4], що становить так звану проблему розмірності багатопараметрових моделей [6]. Залежно від заданої точності визначення параметрів ОК та діапазону їх зміни кількість точок розбиття діапазону по кожному із параметрів може становити 5; 7; 9; 11. При побудові трипараметрової ЗФП кількість точок апроксимації може збільшуватись до $M = 11^3$, що на практиці суттєво ускладнює процедуру калібрування системи.

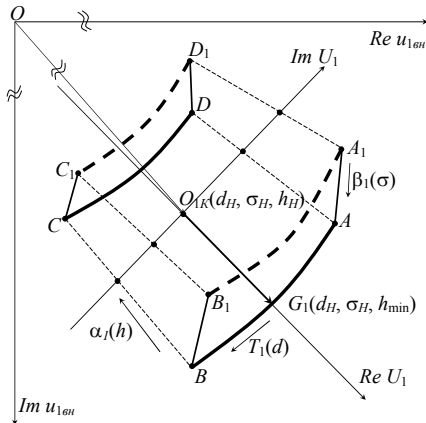


Рис. 2. До принципу відбору інформаційного параметра сигналу відгуку ВСПП із виключенням впливу зазору.

Зменшення порядку N моделі ЗФП (6) пропонується на основі реалізації нового принципу виключення впливу зазору h на складові багатовимірного вектора інформаційного сигналу відгуку ВСПП [13], в результаті чого трипараметрова задача ВС контролю зводиться до двопараметрової.

Фізичний зміст принципу виключення впливу зазору на інформаційні параметри сигналу відгуку ВСПП схематично пояснено на рис. 2. Інформаційні параметри сигналу відгуку ВСПП вимірюють у координатах $(\text{Re}U_1, \text{Im}U_1)$, початок якої розміщено в точці O_{1K} ,

що відповідає номінальним значенням (d_H, σ_H, h_H) параметрів ОК. Область зміни сигналу відгуку ВСПП при зміні товщини і ПЕП матеріалу ОК та мінімальному значенні зазору h_{\min} позначено $AB B_1 A_1 A$, а при максимальному h_{\max} – $DCC_1 D_1 D$.

Якщо змінювати зазор, наприклад, при номінальних значеннях товщини і ПЕП від h_{\min} , якому відповідає вектор $O_{1K}G_1$, до h_{\max} , то цей вектор буде переміщуватись по лінії годографа зазору і при деякому значенні зазора проходить через точку O_{1K} на осі $\text{Im}U_1$. На осі $\text{Im}U_1$ точками позначено координати уявної складової вектора інформаційного сигналу U_{1i} при зміні зазору для крайніх значень товщини і ПЕП матеріалу ОК.

За цим підходом принцип виключення впливу зазору h на сигнал U_{1i} відгуку ВСПП у заданій області зміни параметрів ОК полягає у тому, що у процесі змінювання зазору в інтервалі $\{\alpha_{\max}; \alpha_{\min}\}$, коли значення його дійсної складової за деякого значення зазору в цьому інтервалі стане рівним нулю, фіксують (програмно запам'ятовують) значення уявної складової сигналу U_{1i} .

Зазначену умову відбору значення уявної складової сигналу відгуку ВСПП U_{1i} як інформаційного параметра, позначивши індексом (*) ортогональні складові цього сигналу та інші величини, відобразимо у такому вигляді:

$$y_{1i}^* = \text{Im}U_{1i}^*, \text{ якщо } \text{Re}U_{1i}^* = 0 \text{ при } \alpha_{\text{var}}^* \subset \{ \alpha_{\text{min}}, \alpha_{\text{max}} \}. \quad (7)$$

За виконання умови (7) годограф впливу товщини при деякому значенні ПЕП матеріалу ОК в інтервалі $\{ \sigma_{\text{max}}; \sigma_{\text{min}} \}$ проектується за лініями годографа зазору на вісь $\text{Im}U_1$ і не залежить від зазору. Зокрема, такий годограф, зображений кривою AB при σ_{max} , відображається відрізком осі $\text{Im}U_1$, на яку за лініями годографа зазора проектується його крайні точки. Якщо змінюється ПЕП до σ_{min} , то цей відрізок переміщується уздовж осі $\text{Im}U_1$ і відображається проекцією кривої A_1B_1 годографа на вісь $\text{Im}U_1$.

Загалом інформаційний параметр $y_{1i}^* = \text{Im}U_{1i}^*$ сигналу відгуку ВСПП U_{1i} залежить тільки від товщини і ПЕП матеріалу ОК, а вплив зазору в ньому відсутній. Важливо зауважити, що умова (7) виконується при різних значеннях зазору α^* залежно від значення товщини і ПЕП матеріалу ОК (див. рис. 2), і цим принципово відрізняється від підходу, за яким під час вимірювання товщини або ПЕП встановлюють задане значення зазору. За таким підходом необхідно додатково вирішувати задачу вимірювання зазору і вводити до складу системи ВС контролю прецизійний пристрій регулювання зазору, як це реалізовано в [14], що суттєво ускладнює її апаратну реалізацію.

Аналогічно умові (7) на другій частоті $\omega_2 \gg \omega_1$ струму збудження ВСПП, яку вибирають за умови оптимальної чутливості до ПЕП матеріалу ОК і нечутливості до його товщини [5, 7], формується другий інформаційний параметр $y_{2i}^* = \text{Im}U_{2i}^*$ сигналу відгуку ВСПП U_{2i} , який залежить тільки від ПЕП матеріалу ОК.

Таким чином, для побудови ЗФП системи ВСПП–ОК–МОС вимірювання товщини і ПЕП матеріалу ОК отримуємо такі два інформаційні параметри:

$$y_1^* = \text{Im}U_1^* = f_1^*(T, \beta) \quad \text{та} \quad y_2^* = \text{Im}U_2^* = f_2^*(\beta); \quad (8)$$

$$y^* = (y_1^*, y_2^*)^T = (\text{Im}1^*, \text{Im}2^*)^T. \quad (9)$$

Вектор інформаційних параметрів (9) системи за способом його формування є частковим випадком вектора інформаційних параметрів (5) трипараметрової моделі (6) ЗФП системи ВС контролю, а саме:

$$y = (y_1, y_2, y_3, y_4)^T = (\text{Re}1 = 0, \text{Im}1, \text{Re}2 = 0, \text{Im}2)^T. \quad (10)$$

Якщо покласти у моделі (6) ЗФП системи ВСПП–ОК–МОС вектор інформаційних параметрів за представленням (10), то отримаємо незалежну від впливу зазору двопараметрову модель ЗФП системи для вимірювання товщини і ПЕП матеріалу ОК у такому вигляді:

$$\begin{aligned} T; \beta \Rightarrow x_i^* (\text{Im}1^*, \text{Im}2^*) &= x_i (\text{Re}1 = 0, \text{Im}1, \text{Re}2 = 0, \text{Im}2)^T = \\ &= b_{21} \cdot \text{Im}1^* + b_{22} \cdot \text{Im}1^{*2} + b_{23} \cdot \text{Im}1^{*3} + b_{41} \cdot \text{Im}2^* + b_{42} \cdot \text{Im}2^{*2} + b_{43} \cdot \text{Im}2^{*3} + \\ &+ b_{21,41} \cdot \text{Im}1^* \cdot \text{Im}2^* + b_{22,41} \cdot \text{Im}1^{*2} \cdot \text{Im}2^* + b_{21,42} \cdot \text{Im}1^* \cdot \text{Im}2^{*2}. \end{aligned} \quad (11)$$

За зображенням моделі ЗФП (11) принципово, до $N^* = 9$, зменшується порядок моделі ЗФП (6), що важливо для підвищення точності побудови моделі та точності вимірювання товщини і ПЕП матеріалу ОК. Зауважимо також, що за поданим перетворенням вектор коефіцієнтів моделі (11) залишається тим же, що й для трипараметрової моделі ЗФП (6), і є різним для кожного з параметрів ОК.

Щоб побудувати модель ЗФП системи типу $x_i^*(\text{Im}1^*, \text{Im}2^*) \Rightarrow T;\beta$, за даними математичної моделі необхідно попередньо побудувати модель прямої функції перетворення (ПФП). Тоді за ПФП системи для вектора інформаційних параметрів типу (10) визначають параметри ОК у заданій області їх зміни і на основі цих даних апроксимують модель ЗФП. Подібний підхід застосовано в роботі [9]. Він можливий для проведення попереднього аналізу, з метою оптимізації параметрів системи, і потребує подальших досліджень. Далі розглянемо практично важливий і водночас ефективніший спосіб побудови моделі (11) ЗФП системи ВСПП–ОК–МОС за даними калібрування.

Побудова ЗФП системи ВС контролю за даними калібрування. Попередньо перед проведенням калібрування на контрольному зразку із номінальними значеннями товщини, ПЕП матеріалу ОК і зазору (d_H, σ_H, h_H) компенсують сигнал відгуку ВСПП на частотах струму збудження ω_1 і ω_2 . На цьому ж зразку при мінімальному зазорі h_{\min} отримують контрольні інформаційні сигнали U_{1K} і U_{2K} . Зокрема, на частоті ω_1 сигналу U_{1K} відповідає вектор $O_{1K}G_1$ (див. рис. 2). За модулем сигналів $\text{Mod } U_{1K}$ і $\text{Mod } U_{2K}$ перевіряють задану чутливість вимірювань. Фазовий кут цих сигналів приймають за початкову фазу опорних напруг, за якими під час контролю за виконанням умови виключення впливу зазору (7) вимірюють ортогональні складові вектора інформаційних параметрів:

$$y^* = (y_1^*, y_2^*)^T = (\text{Im}U_1^*, \text{Im}U_2^*)^T. \quad (12)$$

Процедуру калібрування виконують одночасно на першій і другій частоті контролю. Для цього використовують комплект контрольних зразків із різною комбінацією товщини та ПЕП матеріалу в заданому інтервалі зміни цих параметрів ОК. Комплект контрольних зразків має P градацій по товщині d та R градацій ПЕП σ . Загалом комплект контрольних зразків складається із $M = P \times R$ зразків.

За даними вимірювань на $k = 1, \dots, M$ контрольних зразках формують перший числовий масив із M рядків значень параметрів ОК і відповідних до них виміряних одночасно значень інформаційних параметрів на частоті ω_1 і ω_2 :

$$\langle d_k, \sigma_k; \text{Im}U_{1k}^*, \text{Im}U_{2k}^* \rangle; k = 1, \dots, M. \quad (13)$$

Окремо формується другий числовий масив із R рядків пар значень ПЕП матеріалу й інформаційного параметра на частоті ω_2 :

$$\langle \sigma_k; \text{Im}U_{2k}^* \rangle; k = 1, \dots, R. \quad (14)$$

На основі моделі ЗФП системи (11) і даних числового масиву (13) за розв'язком системи рівнянь методом найменших квадратів визначають вектор Q невідомих коефіцієнтів моделі ЗФП із рівняння [4, 8]:

$$Q = (Y^T \cdot Y)^{-1} \cdot Y \cdot x. \quad (15)$$

Лінійну незалежність рядків матриці інформаційних параметрів $Y^T \cdot Y$ забезпечено моделюванням за різними точками області зміни інформаційних параметрів системи ВС контролю.

Таким чином, отримуємо модель ЗФП (d) системи ВСПП–ОК–МОС як функціональну залежність товщини ОК від виміряних значень складових вектора інформаційних параметрів на частотах ω_1 і ω_2 :

$$d = f_1(\text{Im}U_1^*, \text{Im}U_2^*; b_d). \quad (16)$$

Аналогічно з використанням числового масиву (14) визначають функціональну залежність ПЕП від виміряного значення інформаційного параметра на частоті ω_2 :

$$\sigma = f_2(\text{Im}U_2^*; b_h). \quad (17)$$

За функціональними залежностями (16) і (17) під час контролю визначають товщину стінки ОК і питому електропровідність матеріалу. При цьому зазначимо, що у прикладному використанні значення величин у масивах (13), (14) і функціональних залежностях (16), (17) можуть бути подані у прийнятих в апаратурі ВС контролю одиницях вимірювання цих параметрів.

ВИСНОВКИ

Розроблено метод побудови зворотної функції перетворення приладів вихрострумового контролю, в якому за принципом відбору інформативних параметрів багатовимірного сигналу відгуку вихрострумового первинного перетворювача виключено вплив зміни зазору між давачем і поверхнею контрольованого об'єкта на точність вимірювання контрольованих параметрів. Загалом точність контролю залежить від точності апроксимації моделей функцій перетворення за даними калібрування на контрольних зразках і вимірних значень інформаційних параметрів у заданій області їх зміни. Розглянуто трипараметрову задачу контролю, для якої в результаті виключення впливу зазору зменшено порядок моделі зворотної функції перетворення від $N = 34$ до $N = 9$, що є суттєвим для підвищення точності апроксимації моделі і спрощення обробки сигналу відгуку вихрострумового перетворювача апаратурую ВС контролю.

1. Беклемешев Д. В. Дополнительные главы линейной алгебры. – М.: Наука, 1983. – 333 с.
2. Гордиенко В. И., Рыбачук В. Г., Тетерко А. Я. Влияние зазора на точность фазовых измерителей удельной электрической проводимости // Техническая электродинамика. – 1988. – № 5. – С. 96–101.
3. Диагностика технічного стану авіаконструкцій після довготривалої експлуатації / О. П. Остап, Д. С. Ківа, В. М. Учанін та ін. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2013. – № 2. – С. 15–22.
4. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
5. Неразрушающий контроль. Справ. в 8-ми т. Т. 2. Вихретоковый контроль, кн. 2 / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – 954 с.
6. Новицкий В. П., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 302 с.
7. Соболев В. С., Шкарлет Ю. М. Накладные и экранные датчики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.
8. Тетерко А. Я., Назарчук З. Т. Селективна вихрострумова дефектоскопія. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – 248 с.
9. Тетерко А. Я., Гутник В. І. Композиційна модель зворотної функції перетворення для систем двопараметрового вихрострумового контролю // Відбір і обробка інформації. – 2013. – 39 (115). – С. 7–14.
10. А. с. 298880 СССР, МКИ G 01 N 27/04, G 01 R 27/02. Способ контроля удельного сопротивления электропроводных изделий / В. П. Денискин, А. С. Попов, Л. И. Трахтенберг (СССР). – № 1359833/18-10; Заявлено 25.08.69; Опубл. 16.03.71, Бюл. № 11. – 2 с.
11. А. с. 828062 СССР, МКИ G 01 N 27/90. Способ электромагнитного контроля и устройство для его осуществления / А. С. Бакунов, Е. Г. Беликов, Ю. Я. Останин (СССР). – № 2784589/25-28; Заявлено 22.06.79; Опубл. 07.05.81, Бюл. № 17. – 3 с.
12. Патент UA 98206 C2, МПК G 01 N 27/90. Спосіб вимірювання електропровідності немагнітних матеріалів / В. М. Учанін (UA). – Заявка № а 2010 10467; Заявлено 30.08.2010; Опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.
13. Патент на винахід UA 105571 C2, МПК G 01 N 27/90, G01R 33/12. Вихрострумовий спосіб вимірювання товщини та питомої електропровідності матеріалу оболонок виробів із ферромагнітних матеріалів із відлаштуванням від впливу зазору / А. Я. Тетерко, Г. Г. Луценко, (UA). – Заявка № а 2012 12324; Заявлено 29.10.2012; Опубл. 26.05.2014. Бюл. № 10.
14. 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.