

УДК 620.179.14

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ МАТЕРІАЛУ ТА ТОВЩИНИ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО ПОКРИВУ ОБОЛОНОК

А. Я. ТЕТЕРКО, В. М. УЧАНІН, В. І. ГУТНИК

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

На основі побудови двопараметрової нелінійної моделі зворотної функції перетворення системи “вихрострумний первинний перетворювач–об’єкт контролю” запропоновано метод вимірювання питомої електричної провідності матеріалу і товщини діелектричного покриття оболонок. Метод забезпечує суттєве зменшення похибок оцінок зазначених параметрів за їх одночасної зміни під час контролю, підвищення достовірності результатів діагностики стану контрольованого об’єкта, а також принципово спрощує апаратну та програмну реалізацію контролю.

Ключові слова: *вихрострумний контроль, нелінійна модель системи, зворотна функція перетворення, контроль характеристик оболонок, питома електропровідність, товщина діелектричного покриття.*

Засоби вихрострумного (ВС) неруйнівного контролю питомої електричної провідності (ПЕП) як структурочутливої характеристики металу широко використовують для оцінки ступеня деградації і корозійного пошкодження матеріалу внаслідок тривалої експлуатації різноманітних конструкцій в енергетиці, авіації, обладнання хімічної і нафтогазової галузей тощо. Зазвичай поверхня контрольованого об’єкта має шар захисного покриття (фарба, полімерні матеріали тощо), зміна товщини якого обумовлює додаткову, до 3...7%, похибку ВС контролю ПЕП. Притому зменшення цієї похибки є важливим чинником підвищення достовірності результатів діагностики стану і прогнозування ресурсу конструкцій.

У сучасній апаратурі ВС контролю ПЕП реалізують так званий фазовий метод відстроювання від впливу заважаючих чинників [1], що базується на відмінності нелінійних функцій дії окремих параметрів об’єкта контролю (ОК) у комплексній площині сигналу відгуку вихрострумного первинного перетворювача (ВСПП). За цим методом похибку вимірювань ПЕП матеріалу, зумовлену зміною товщини діелектричного покриття як чинника завади, мінімізують шляхом векторного додавання до сигналу відгуку ВСПП деякого сигналу компенсації і вимірюванням фази сумарного сигналу, за якою визначають ПЕП матеріалу ОК. На вирішення задачі зменшення похибки від дії зазначеної завади спрямовано численні технічні рішення, зокрема в працях [2–4]. Однак її зменшення є проблематичним через нелінійний і взаємозалежний вплив на відгук ВСПП як питомої електричної провідності матеріалу, так і товщини діелектричного покриття, які змінюються під час контролю одночасно. Проте сучасні засоби ВС контролю ПЕП реалізують лінійне перетворення сигналу відгуку ВСПП, що принципово обмежує можливості зменшення похибки контролю ПЕП. Розробка і застосування методів нелінійної обробки сигналу відгуку ВСПП дає змогу знизити цю похибку до десятих часток відсотка [5].

В цій роботі на основі побудови нелінійної моделі зворотної функції перетворення (ЗФП) системи “вихрострумний первинний перетворювач–об’єкт кон-

тролю” (ВСПП–ОК) подали метод вирішення задачі підвищення точності оцінок за двопараметрового ВС контролю ПЕП матеріалу ОК та товщини захисного діелектричного покриття, що змінюються одночасно.

Модель двопараметрової зворотної функції перетворення системи ВСПП–ОК. Загальний підхід до розв’язання задач підвищення точності за багатопараметрового ВС контролю базується на побудові прямої (ПФП) та зворотної нелінійних функцій перетворення системи ВСПП–ОК [5, 6]. Модель як ПФП, так і ЗФП будують за єдиним підходом методами наближення функції багатьох змінних, яка задається таблицею значень вектора параметрів ОК $x_k = (x_{1k}, \dots, x_{nk})^T$, $i = 1, \dots, n$ по $k = 1, \dots, M$ точках області X_0 зміни параметрів ОК $x_k \in X_0 \subset X \subset R^n$ і відповідних до нього значень із області Y_0 зміни вектора інформаційних параметрів сигналу відгуку ВСПП $y_k = (y_{1k}, \dots, y_{mk})^T$, $y_k \in Y_0 \subset Y \subset R^m$, $m \geq n$ (множини X_0 та Y_0 -компакт [7]). При цьому ефективнішим для апаратурної реалізації є застосування ЗФП [6], за якою заданому параметру ОК x_i , $i = 1, \dots, n$ безпосередньо відповідає деяка нелінійна залежність від складових багатовимірного вектора інформаційних параметрів, тоді як для визначення кожної зі складових вектора параметрів ОК за ПФП системи ВСПП–ОК необхідно розв’язувати відповідну систему нелінійних рівнянь.

Для i -ої складової вектора параметрів ОК модель ЗФП має такий вигляд:

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

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

Модель ЗФП за формулою (1) є лінійною відносно вектора невідомих коефіцієнтів. Щоб їх знайти, будують масив значень заданого параметра ОК і відповідних значень складових вектора інформаційних параметрів $\{x_{ik}; y_{ik}\}$, $k = 1, \dots, M$ по M точках у заданій області X_0 зміни вектора параметрів ОК.

Система рівнянь для знаходження складових вектора невідомих коефіцієнтів моделі ЗФП (1) у матричній формі має такий загальний вигляд:

$$x = Y \cdot q; \quad x = (x_1, \dots, x_M)^T. \quad (2)$$

Найзагальнішим зображенням моделі зворотної функції перетворення системи ВСПП–ОК є подання її багатовимірним поліномом. Для неї матриця інформаційних параметрів Y буде такою [5, 6]:

$$Y = \begin{pmatrix} 1; y_{11}; y_{21}; y_{31}; \dots; y_{11}^2; y_{21}^2; y_{31}^2; \dots; y_{11} \cdot y_{21}; \dots; y_{11}^2 \cdot y_{21}; \dots; y_{11} \cdot y_{21}^2; \dots; y_{11} \cdot y_{21} \cdot y_{31}; \dots \\ \dots \\ 1; y_{1M}; y_{2M}; y_{3M}; \dots; y_{1M}^2; y_{2M}^2; y_{3M}^2; \dots; y_{1M} \cdot y_{2M}; \dots; y_{1M}^2 \cdot y_{2M}; \dots; y_{1M} \cdot y_{2M} \cdot y_{3M}; \dots \end{pmatrix} \quad (3)$$

Вектор q невідомих коефіцієнтів визначає рівняння

$$q = (Y^T \cdot Y)^{-1} \cdot Y^T \cdot x = P^{-1} \cdot Y^T \cdot x, \quad (4)$$

що є єдиним розв’язком системи нормальних рівнянь методу найменших квадратів [8].

На основі вищевикладеного подамо зображення моделей ЗФП для двопараметрової задачі контролю питомої електропровідності матеріалу і товщини діелектричного покриття. При цьому складові вектора параметрів ОК, як це прийнято в теорії методів ВС контролю, відобразимо у безрозмірному виді [1], а саме:

$$x = (x_1, x_2)^T = (\beta, \alpha)^T ;$$

$$\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0} , \quad \alpha = d/R , \quad (5)$$

де σ – питома електропровідність; $\omega = 2\pi f$ – частота струму збудження ВСПП; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м – магнетна стала; d – товщина покритву; R – еквівалентний радіус ВСПП.

Складовими вектора інформаційних параметрів можуть бути значення фазового кута, модуля, дійсної та уявної компонент відгуку ВСПП. Зауважимо, що сучасні засоби ВС контролю питомої електропровідності матеріалу ОК розроблені за фазовим методом вимірювання інформаційного сигналу, сформованого на основі відгуку ВСПП. У цій роботі для побудови моделі ЗФП як складові вектора інформаційних параметрів прийняті дійсна $\text{Re}(\ast)$ і уявна $\text{Im}(\ast)$ компоненти відгуку ВСПП, що дає змогу суттєво поліпшити алгоритм апаратурної реалізації та точність оцінок питомої електропровідності і товщини покритву ОК. Таким чином, вектор інформаційних параметрів має такий вигляд:

$$y = (y_1, y_2)^T = (\text{Re}, \text{Im})^T . \quad (6)$$

Двопараметрова ЗФП системи ВСПП–ОК для визначення питомої електричної провідності матеріалу ОК та товщини покритву, яку подамо поліномом до третього степеня, має такий вигляд:

$$\beta(\text{Re}, \text{Im}) = b_0 + b_1 \cdot \text{Re} + b_2 \cdot \text{Im} + b_3 \cdot \text{Re} \cdot \text{Im} + b_4 \cdot \text{Re}^2 + b_5 \cdot \text{Im}^2 + b_6 \cdot \text{Re}^2 \cdot \text{Im} + b_7 \cdot \text{Re} \cdot \text{Im}^2 + b_8 \cdot \text{Re}^3 + b_9 \cdot \text{Im}^3 ; \quad (7a)$$

$$\alpha(\text{Re}, \text{Im}) = a_0 + a_1 \cdot \text{Re} + a_2 \cdot \text{Im} + a_3 \cdot \text{Re} \cdot \text{Im} + a_4 \cdot \text{Re}^2 + a_5 \cdot \text{Im}^2 + a_6 \cdot \text{Re}^2 \cdot \text{Im} + a_7 \cdot \text{Re} \cdot \text{Im}^2 + a_8 \cdot \text{Re}^3 + a_9 \cdot \text{Im}^3 . \quad (7b)$$

Результати визначення параметрів ОК за ЗФП системи ВСПП–ОК. Матрицю вхідних даних $\{x_{ik}; y_{ik}\} = \{\beta_k, \alpha_k; \text{Re}_k, \text{Im}_k\}$ для знаходження невідомих коефіцієнтів моделей ЗФП за формулами (7a) та (7b) будується по $k = 1, \dots, M = 5 \times 6$ точках таких значень параметрів ОК:

$$\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0} = 3, 4, 5, 6, 7 ; \quad \alpha = d/R = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 . \quad (8)$$

Вибраний діапазон зміни параметрів ОК відповідає оптимальному діапазону вимірювань вихрострумівих структуроскопів. Кількість точок масиву обмежена, щоб не збільшувати таблицю вхідних даних. Зауважимо також, що у формулі (8), таблиці та подальших формулах подані тільки значущі цифри для компактності запису.

В таблиці подано масив вхідних даних, побудований за розв'язком відомої задачі про взаємодію витка зі змінним струмом із електропровідним півпростором [1]. Притому як складові вектора інформаційних параметрів взято віднесені до нормального поля значення ортогональних компонент векторного потенціалу, яким пропорційна внесена у ВСПП *e.p.c.* [1].

За розв'язком рівняння (4) і масивом вхідних даних визначили вектори коефіцієнтів ЗФП системи ВСПП–ОК для обчислень питомої електропровідності матеріалу ОК та товщини діелектричного покритву, складові яких відповідно становлять:

$$b = (b_0, b_1, \dots, b_9)^T ,$$

$$b = (3,805; -41,13; 73,415; -258,693; 13,402; 452,244; 43,241; -522,692; 1,739; 859,621)^T ; \quad (9a)$$

$$a = (a_0, \dots, a_9)^T,$$

$$a = (0,69; 0,401; 4,216; 12,557; -2,598; 0,535; 3,044; 15,787; -1,936; -8,318)^T. \quad (9b)$$

Масив вхідних даних вектора параметрів об'єкта контролю та вектора інформаційних параметрів

№ з/п	α	β	Re	Im
0	0,05	3	-0,304	-0,271
1	0,05	4	-0,429	-0,287
2	0,05	5	-0,525	-0,28
3	0,05	6	-0,6	-0,265
4	0,05	7	-0,657	-0,246
5	0,1	3	-0,261	-0,225
6	0,1	4	-0,363	-0,237
7	0,1	5	-0,442	-0,231
8	0,1	6	-0,503	-0,219
9	0,1	7	-0,549	-0,204
10	0,15	3	-0,225	-0,188
11	0,15	4	-0,31	-0,195
12	0,15	5	-0,374	-0,19
13	0,15	6	-0,423	-0,18
14	0,15	7	-0,461	-0,168
15	0,2	3	-0,195	-0,157
16	0,2	4	-0,265	-0,162
17	0,2	5	-0,318	-0,156
18	0,2	6	-0,358	-0,148
19	0,2	7	-0,389	-0,138
20	0,25	3	-0,169	-0,131
21	0,25	4	-0,228	-0,135
22	0,25	5	-0,271	-0,129
23	0,25	6	-0,304	-0,122
24	0,25	7	-0,329	-0,113
25	0,3	3	-0,148	-0,111
26	0,3	4	-0,197	-0,112
27	0,3	5	-0,233	-0,107
28	0,3	6	-0,26	-0,101
29	0,3	7	-0,281	-0,094

модель ЗФП системи слід будувати за приростами складових вектора інформаційних параметрів відносно деякого фіксованого значення сигналу відгуку, одер-

значення приведених похибок оцінок параметрів ОК у заданій області їх зміни, визначені за поліноміальними моделями ЗФП (7a) та (7b), становлять:

$$- \text{для ПЕП матеріалу, } \gamma_\beta = 0,52\%, \quad (10a)$$

$$- \text{для товщини покриття, } \gamma_\alpha = 1,107\%. \quad (10b)$$

Відповідно до заданої області зміни параметрів ОК за ПФП системи ВСПП–ОК, побудованою за цим же масивом вхідних даних, визначили максимальні та мінімальні значення складових вектора $y_v = (Re_v, Im_v)^T$ інформаційних параметрів:

$$Re_{\max} = -0,148 \geq Re_v \geq Re_{\min} = -0,657;$$

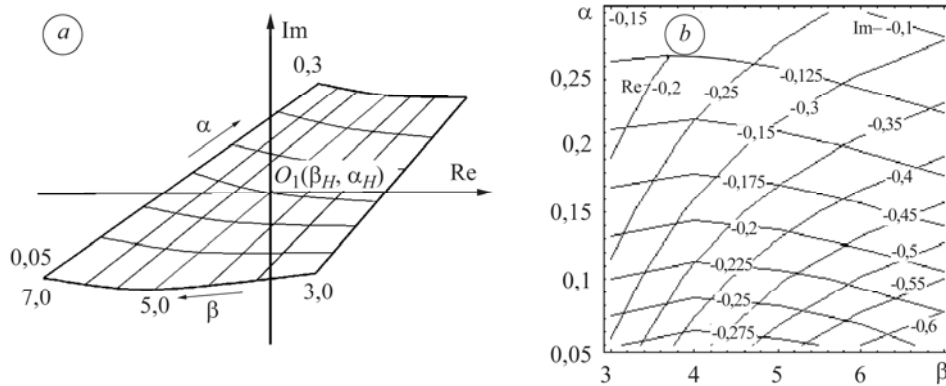
$$Im_{\max} = -0,094 \geq Im_v \geq Im_{\min} = -0,287. \quad (11)$$

Область визначення ПЕП матеріалу та товщини діелектричного покриття має відповідати умові приналежності множини вимірних значень вектора інформаційних параметрів системи ВСПП–ОК області $y_v \subset Y_0 \subset Y \subset R^m, m = 2$, для якої мінімальні та максимальні значення складових цього вектора задано формулою (11), а складові вектора параметрів ОК належать області (8), для якої побудовано ЗФП.

У комплексній площині відгуку ВСПП побудовано сім'ю годографів складових вектора інформаційних параметрів від зміни у заданій області (8) складових вектора параметрів ОК (див. рисунок, графік *a*), а у площині параметрів ОК подано обернену залежність, а саме: сім'ю годографів складових вектора параметрів ОК від зміни складових вектора інформаційних параметрів (див. рисунок, графік *b*). При цьому обернену залежність побудовано за ЗФП системи ВСПП–ОК за рівномірного розбиття інтервалу зміни складових вектора інформаційних параметрів у заданому діапазоні (11).

Зауважимо, що для ефективної апаратурної реалізації методології ВС контролю, щоб вилучити неінформативну постійну складову відгуку системи ВСПП–ОК,

жаного, зокрема, на контрольному зразку із заданими номінальними значеннями вектора параметрів ОК. Залежність дійсної та уявної складових відгуку ВСПП від зміни ПЕП матеріалу і товщини діелектричного покриття за компенсації постійної складової сигналу ВСПП на зразку із заданими номінальними значеннями вектора параметрів ОК $x_H = (\beta_H, \alpha_H)^T$ відповідає переносу точки вимірювань у комплексній площині сигналу відгуку ВСПП у точку $O_1(\beta_H, \alpha_H)$ фрагмента зазначеної залежності (див. рисунок, графік *a*).



Фрагмент залежності дійсної та уявної складових відгуку ВСПП від зміни ПЕП матеріалу і товщини діелектричного покриття (*a*) та обернена залежність (*b*).

Fragment of the dependence of real and imaginary components of Eddy current transducer signal response on the change of material conductivity and dielectric coating thickness (*a*) and inverse dependence (*b*).

Модель ЗФП системи для визначення ПЕП матеріалу за приростами вектора інформаційних параметрів матиме такий вигляд:

$$\beta(\text{Re}, \text{Im}) = \beta(\text{Re}_H, \text{Im}_H) + \Delta\beta(\Delta \text{Re}, \Delta \text{Im}) ;$$

$$\begin{aligned} \Delta\beta(\Delta \text{Re}, \Delta \text{Im}) = & b_1^* \cdot \Delta \text{Re} + b_2^* \cdot \Delta \text{Im} + b_3^* \cdot \Delta \text{Re} \cdot \Delta \text{Im} + b_4^* \cdot \Delta \text{Re}^2 + \\ & + b_5^* \cdot \Delta \text{Im}^2 + b_6^* \cdot \Delta \text{Re}^2 \cdot \Delta \text{Im} + b_7^* \cdot \Delta \text{Re} \cdot \Delta \text{Im}^2 + b_8^* \cdot \Delta \text{Re}^3 + b_9^* \cdot \Delta \text{Im}^3, \end{aligned} \quad (12a)$$

а модель ЗФП для визначення товщини покриття – такий:

$$\alpha(\text{Re}, \text{Im}) = \alpha(\text{Re}_H, \text{Im}_H) + \Delta\alpha(\Delta \text{Re}, \Delta \text{Im}) ;$$

$$\begin{aligned} \Delta\alpha(\text{Re}, \text{Im}) = & a_1^* \cdot \Delta \text{Re} + a_2^* \cdot \Delta \text{Im} + a_3^* \cdot \Delta \text{Re} \cdot \Delta \text{Im} + a_4^* \cdot \Delta \text{Re}^2 + \\ & + a_5^* \cdot \Delta \text{Im}^2 + a_6^* \cdot \Delta \text{Re}^2 \cdot \Delta \text{Im} + a_7^* \cdot \Delta \text{Re} \cdot \Delta \text{Im}^2 + a_8^* \cdot \Delta \text{Re}^3 + a_9^* \cdot \Delta \text{Im}^3. \end{aligned} \quad (12b)$$

Значення приведених похибок оцінки параметрів ОК, які визначені за моделями ЗФП, побудованими за масивом вхідних даних за приростами вектора параметрів ОК і вектора інформаційних параметрів $\{\Delta\beta_k, \Delta\alpha_k, \Delta\text{Re}_k, \Delta\text{Im}_k\}$, повністю збігаються із похибками оцінок параметрів ОК (10a) та (10 b), визначеними за поліноміальними моделями ЗФП (7a) та (7b). Масив вхідних даних $\{\Delta\beta_k, \Delta\alpha_k, \Delta\text{Re}_k, \Delta\text{Im}_k\}$ побудований на основі масиву вхідних даних $\{\beta_k, \alpha_k, \text{Re}_k, \text{Im}_k\}$ (див. таблицю).

Зауважимо, що похибки оцінки параметрів ОК можна зменшити. Зазвичай для цього нелінійну одновимірну залежність апроксимують не менше ніж за 11-ма точками. В цій роботі апроксимували по двопараметровій області зміни параметрів ОК і обмежили достатньо малою кількістю точок апроксимації, а саме: $k = 1, \dots, M; M = 5 \times 6$, а також обмежили розмірність N моделей ЗФП, які зображені повним кубом. При цьому отримали принципове зменшення впливу зміни одного з параметрів ОК на похибку оцінки другого параметра, яка суттєва за ліній-

ного перетворення сигналу системи ВСПП–ОК за відомими у ВС контролі способами.

Для апаратурної реалізації ЗФП системи будують за масивом вхідних даних, одержаних за результатами вимірювань сигналу відгуку ВСПП на комплекті контрольних зразків із різною ПЕП матеріалу ОК у заданому діапазоні зміни ПЕП за різних відстаней між ВСПП і поверхнею ОК, яку задають із використанням зразків діелектричних прокладок. Відмітимо, що значення параметрів ОК і інформаційного сигналу системи ВСПП–ОК у масиві вхідних даних можна задавати не у безрозмірних величинах, а в реальному масштабі кожного з параметрів, а саме: $\{\sigma_k, d_k, \operatorname{Re} u_k, \operatorname{Im} u_k\}$. Такий спосіб побудови ЗФП системи є процедурою калібрування, в результаті якої вводять значення коефіцієнтів до заданої програмно ЗФП і приймають її за номінальну [9].

Похибки оцінки параметрів ОК визначаються похибкою наближення ЗФП системи, яка, окрім способу апроксимації, залежить від похибок електричних вимірювань і похибок параметрів контрольних зразків, та є співмірними з ними. Похибки електричних вимірювань складових вектора інформаційних параметрів системи ВСПП–ОК і розмірних вимірювань товщини зразків діелектричних прокладок можуть бути малими і не перевищувати сотих часток відсотка. Зменшення похибки оцінки ПЕП контрольних зразків досягають методологічними підходами або за вимірювання ПЕП змінно-частотним методом [1, 5]. Загалом похибки оцінки параметрів ОК за зменшення діапазону зміни параметрів можуть не перевищувати сотої частки відсотка.

Особливістю ЗФП системи для заданого параметра ОК є те, що вона відображена безпосередньо заданим параметром і складовими вектора інформаційних параметрів, які вводять до системи з $k = 1, \dots, M$ рівнянь (2) для знаходження вектора невідомих коефіцієнтів ЗФП. Значення інших параметрів ОК із масиву вхідних даних при цьому не вводять. Це, зокрема, означає, що похибки інших параметрів ОК під час побудови ЗФП для заданого параметра ОК неважливі. Проте принциповим є те, що масив вхідних даних і відповідна до нього система рівнянь (2) охоплює всю задану область зміни параметрів ОК. У такий спосіб враховується вплив інших параметрів ОК на ЗФП заданого параметра, що фізично означає компенсацію цього впливу із певною заданою точністю. Врахування зазначеної особливості побудови ЗФП важливе, зокрема, у таких задачах, як контроль деградації матеріалу за зміною ПЕП матеріалу з відстроюванням від впливу зазору між ВСПП і поверхнею ОК або товщини оксидної плівки на поверхні ОК із відстроюванням від впливу зміни ПЕП основного матеріалу.

На основі аналізу розглянутих моделей ЗФП системи запропоновано низку нових технічних рішень щодо селективного контролю з малими похибками ПЕП матеріалу ОК і товщини діелектричного покриття. Зокрема, розроблено спосіб [10] вимірювання ПЕП матеріалу із відстроюванням від нелінійного впливу зміни зазору між ВСПП і поверхнею ОК на похибку контролю ПЕП, за яким як інформаційні параметри прийняті фазовий кут і модуль спеціально сформованого інформаційного сигналу.

ВИСНОВКИ

Визначення за нелінійною зворотною функцією перетворення системи ВСПП–ОК товщини діелектричного покриття і такого структурочутливого параметра, як питома електропровідність матеріалу, дає можливість принципово, до десятих часток відсотка, зменшити похибки оцінок зазначених параметрів ОК під час контролю і таким чином підвищити достовірність діагностики деградації та корозійного пошкодження матеріалу. Водночас вирішення оберненої задачі визначення параметрів ОК за ЗФП є надзвичайно ефективним для апаратурної реалізації, оскільки безпосередньо ставить у відповідність заданому параметру ОК

нелінійну залежність від виміряних значень складових вектора інформаційних параметрів системи ВСПП–ОК, що суттєво спрощує програмне забезпечення засобів ВС контролю.

РЕЗЮМЕ. На основе построения двухпараметровой нелинейной модели обратной функции преобразования системы “вихретоковый первичный преобразователь–объект контроля” предложен метод измерения удельной электропроводности материала и толщины диэлектрического покрытия оболочек. Метод обеспечивает существенное уменьшение погрешностей оценки указанных параметров при одновременном изменении их в процессе контроля, повышение достоверности результатов диагностики состояния контролируемого объекта, а также принципиально упрощает аппаратную и программную реализацию контроля.

SUMMARY. The method of measuring the specific electric conductivity of the material and thickness of the dielectric coating of shells, based on construction of two-parameter non-linear inverse function of transformation of the system “Eddy current primary transformer–control object” is proposed. The method provides a significant decrease in errors when evaluating the mentioned parameters under their simultaneous variation during testing, increase of diagnostic results reliability of the state of the object under control, and also greatly simplifies its tool and software realization.

1. *Неразрушающий контроль:* Справ. в 8-ми т. Т. 2: Вихретоковый контроль, кн. 2 / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – 954 с.
2. *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. – № 1359833/18-10; заявл. 25.08.69. – Оpubл. 16.03.71, Бюл. № 11.
3. *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. – № 2784589/25-28; заявл. 22.06.79. – Оpubл. 07.05.81, Бюл. № 17.
4. *Патент UA 98206 C2*, МПК G01N 27/90. Спосіб вимірювання електропровідності немагнітних матеріалів / В. М. Учанін. – № а 2010 10467; заявл. 30.08.2010. – Оpubл. 25.04.2012, Бюл. № 8.
5. *Тетерко А. Я., Назарчук З. Т.* Селективна вихреструмова 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 вихреструмового багатопараметрового контролю // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 3. – С. 103–108.
(*Teterko A. Ya. and Hutnyk V. I.* Construction of the inverse transformation function for eddy current multiparameter testing devices // *Materials Sci.* – 2011. – 47, № 3. – P. 386–392.)
7. *Колмогоров А. Н., Фомин С. В.* Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1981. – 544 с.
8. *Лоусон Ч., Хенсон Р.* Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
9. *Новицкий П. В., Зограф И. А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 302 с.
10. *Фазовий спосіб вихреструмового контролю із відлаштуванням від нелінійного впливу зазору / А. Я. Тетерко, В. М. Учанін, В. І. Гутник, О. А. Тетерко // Матер. 17 Міжнар. наук.-техн. конф. “Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів”.* – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2012. – С. 23–24.

Одержано 16.04.2013