

УДК 620.179.14

МЕТОД ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО СИГНАЛУ ТА ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ ПИТОМОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ МАТЕРІАЛУ ІЗ ВИКЛЮЧЕННЯМ ВПЛИВУ ЗАЗОРУ

А. Я. Тетерко¹, Г. Г. Луценко², В. І. Гутник¹, О. А. Тетерко³

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Український науково-дослідний інститут неруйнівного контролю, Київ;

³ Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
ім. В. Лазаряна (Львівська філія)

E-mail: ayateterkowi@yahoo.com, ukrndink@ndt.com.ua,
hutnyk@gmail.com, alexteterko@yahoo.com

Запропоновано метод усунення похибки від зміни зазору під час контролю питомої електропровідності матеріалу формуванням інформаційного сигналу і умов відбору такої характеристики цього сигналу, що не залежить від впливу зазору. Розроблено метод калібрування апаратури контролю під час заміни вихрострумовевого перетворювача шляхом корекції режиму контролю без зміни функції зворотного перетворення апаратури.

Ключові слова: *вихрострумівий контроль, інформаційний сигнал, питома електропровідність, зазор, функція зворотного перетворення апаратури, вихрострумівий перетворювач.*

THE METHOD OF FORMATION OF INFORMATION SIGNAL AND INCREASE OF ACCURACY OF EDDY CURRENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY MEASURING WITH LIFT-OFF EFFECT EXCLUSION

A. Ya. Teterko¹, G. G. Lutsenko², V. I. Hutnyk¹, O. A. Teterko³

¹ Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv;

² Ukrainian Scientific Research Institute of Nondestructive Testing, Kyiv;

³ Lazarian Dnipropetrovsk National University of Rail Transport (Lviv Branch)

The new method of formation of Eddy current transducer information signal and extraction such characteristic of this signal that doesn't dependent on lift-off effect is presented. In the mentioned information signal must measure the magnitude, real and imaginary components. During the testing the air gap between Eddy current transducer and surface of the testing object is changed and the imaginary component of information signal is fixed in such a moment when its magnitude is equal to the preset value. The value of information signal mention characteristic depends on electrical conductivity of the testing object only, what allows to decrease the control error of the testing object material electric conductivity to 0.1% and less. The inverse transformation apparatus function for calculation of electric conductivity is designed by approximation of apparatus calibration data on specimens of the test object material electric conductivity. The mode of Eddy current apparatus calibration with a new Eddy current transducer by adjusting the working frequency and preset value of information signal without the mentioned apparatus function correction is proposed. The values of real and imaginary components of information signal are used also for calculation the air gap or dielectric coating between Eddy current transducer and the testing object surface.

Keywords: *Eddy current testing, information signal, electrical conductivity, lift-off effect, inverse transformation apparatus function, Eddy current transducer.*

© А. Я. Тетерко, Г. Г. Луценко, В. І. Гутник, О. А. Тетерко, 2015

відповідає значенню $u_{\text{вн}} = 0$.

За інформаційний сигнал, за фазовим кутом якого визначають ПЕП матеріалу ОК, приймають вектор з початком у точці O_K і кінцем в області зміни параметрів ОК. Для цього формують додатковий сигнал (вектор $O_1 O_K$), який векторно сумують із сигналом $u_{\text{вн}}$ внесеної у ВСПП напруги, що зміщує початок координат під час вимірювань у точку O_K . На фазовий кут інформаційного сигналу, а отже, похибку фазового методу вимірювання ПЕП впливає нелінійність годографів впливу зазору та зміщення вектора інформаційного сигналу від точки початку відліку O_K , яке залежить від ПЕП матеріалу ОК.

За поданою на рисунку схемою проаналізуємо запропонований підхід до формування інформаційного сигналу і відбору такої його характеристики, яка залежить тільки від ПЕП матеріалу ОК [8, 10].

Характеристики інформаційного сигналу вимірюємо у координатах ($\text{Re}U_{\text{інф}}$, $\text{Im}U_{\text{інф}}$) з початком у точці O_2 . Для цього ВСПП встановлюємо на зразок із номінальним значенням ПЕП матеріалу ОК за максимального значення зазору ($\sigma_{\text{ном}}, h_{\text{макс}}$) і до сигналу внесеної у ВСПП напруги додаємо сигнал компенсації так, щоб сумарний сигнал дорівнював нулю. Далі під час встановлення ВСПП на ОК або на контрольний зразок одержуємо інформаційний сигнал $U_{\text{інф}}$ з початком у точці O_2 і кінцем в області зміни параметрів ОК.

Для вимірювання характеристик інформаційного сигналу формуємо опорний сигнал $U_{\text{оп}}$ (вектор $O_2 A$). Для цього встановлюємо ВСПП на той самий зразок за номінального значення зазору ($\sigma_{\text{ном}}, h_{\text{ном}}$). Дійсну вісь системи координат ($\text{Re}U_{\text{інф}}, \text{Im}U_{\text{інф}}$) спрямовуємо за вектором $O_2 A$ інформаційного сигналу і визначаємо його амплітуду і фазовий кут $\theta_{\text{оп}}$ (вектор $O_2 A$). Амплітуду сигналу приймаємо за опорне значення амплітуди $\text{Mod}U_{\text{інф}}^*(\sigma_{\text{ном}}, h_{\text{ном}}) = \text{Mod}U_{\text{оп}}$, за яким фіксуємо значення ортогональних складових інформаційного сигналу, а його фазовий кут $\theta_{\text{оп}}$ приймаємо за фазу опорного сигналу, вимірюючи складові інформаційного сигналу.

Принцип виключення впливу зазору на задану характеристику інформаційного сигналу $U_{\text{інф}}$, сформованого за сигналом відгуку ВСПП, полягає у тому, що за зміни зазору в інтервалі $\{\alpha_{\text{макс}}; \alpha_{\text{мін}}\}$ під час встановлення ВСПП на ОК неперервно у реальному часі вимірюють поточні значення модуля $\text{Mod}U_{\text{інф}}$, дійсної $\text{Re}U_{\text{інф}}$ та уявної $\text{Im}U_{\text{інф}}$ складових інформаційного сигналу. Якщо під час зміни зазору його амплітуда становить задане опорне значення $\text{Mod}U_{\text{інф}}^* = \text{Mod}U_{\text{оп}}$, а дійсна складова додатна $\text{Re}U_{\text{інф}}^* > 0$, фіксують (*програмно запам'ятовують*) значення уявної складової сигналу $\text{Im}U_{\text{інф}}^* = \text{Mod}U_{\text{оп}} \cdot \sin \psi^* = C \cdot \sin \psi^*$. Таким чином, умова відбору уявної компоненти інформаційного сигналу як *незалежної від зазору характеристики*, має вигляд

$$y_{\text{інф}}^*(\sigma) = \text{Im}U_{\text{інф}}^*(\sigma) = C \cdot \sin \psi^*,$$

$$\text{якщо } \text{Mod}U_{\text{інф}}^* = \text{Mod}U_{\text{оп}} \text{ та } \text{Re}U_{\text{інф}}^* > 0. \quad (2)$$

Дійсно, за зміни зазору, наприклад при $\beta = 3,0$, вектор інформаційного сигналу $U_{\text{інф}}(\beta; \alpha)$ переміщується *по лінії годографа зазору* і за деякого значення зазору його амплітуда дорівнюватиме заданому опорному значенню (вектор $O_2 B_{i0}^*$), що позначено точкою B_{i0}^* на дузі радіусом $U_{\text{оп}}$, а уявну складову – точкою B_i^* на осі $\text{Im } U_{\text{інф}}$.

Загалом за виконання умови (2) сім'я годографів ПЕП матеріалу ОК в інтервалі $\{\sigma_{\text{мін}}; \sigma_{\text{макс}}\}$ проектується *за лініями годографів зазору* на дугу радіусом $U_{\text{оп}}$, відображається на осі $\text{Im } U_{\text{інф}}$ відрізком, що позначений крайніми точками, і не залежить від зазору. Зауважимо, що умова (2) виконується в динамічному режимі зміни зазору за різних його значень α^* залежно від ПЕП матеріалу ОК. Цей підхід принципово відрізняється від відомого, коли підтримують задане значення зазору [3], що потребує додатково прецизійного вимірювання зазору і його установки, а отже, додаткового застосування ємнісного вимірювача зазору і складної механічної системи [7].

За запропонованим методом формування інформаційного сигналу у разі зростає чутливість контролю порівняно з фазовим методом вимірювання ПЕП матеріалу:

$$\Delta\psi / \Delta\sigma \gg \Delta\theta / \Delta\sigma. \quad (3)$$

Зі зміною узагальненого параметра в інтервалі $3,0 \leq \beta \leq 7,0$ за фазовим методом вимірювання ПЕП фазовий кут θ інформаційного сигналу змінюється на 12...15 град [2, 3], тоді як за запропонованим – до 50...60 град (кут ψ на рисунку). Оскільки при цьому вимірюваний параметр $\text{Im } U_{\text{інф}}^*$ за умовою (2) не залежить від впливу зазору, то загалом похибку вимірювання ПЕП за запропонованим методом можна зменшити на порядок, зокрема, до десятої частки відсотка і менше. Для високої точності контролю ПЕП важливо побудувати функцію перетворення апаратури ВС контролю, а також метод її калібрування безпосередньо в умовах контролю.

Побудова функції зворотного перетворення. Параметр інформаційного сигналу $\text{Im } U_{\text{інф}}^*$, за яким визначають ПЕП матеріалу ОК, за умовою (2) його відбору залежить тільки від ПЕП ОК. Таким чином, ФЗП апаратури ВС контролю ПЕП, що реалізує запропонований метод, є однопараметровою і її можна побудувати з високою точністю.

Для цього використовують результати калібрування на комплекті з N зразків із різним значенням ПЕП матеріалу у заданому діапазоні її зміни на ОК. За даними вимірювань формують числовий масив із N рядків значень “*питома електропровідність зразка–зафіксоване значення уявної компоненти інформаційного сигналу*”:

$$\langle \sigma_k; \text{Im } U_{\text{інф}k}^* \rangle; k = 1, \dots, N. \quad (4)$$

За числовим масивом (4) відомими методами наближення функцій [12] визначають вектор Q коефіцієнтів ФЗП апаратури, що безпосередньо ставить у відповідність вимірюваному значенню параметра інформаційного сигналу значення ПЕП матеріалу ОК:

$$\sigma = f(\text{Im } U_{\text{інф}}^*; Q). \quad (5)$$

Під час контролю доцільно встановити також величину зазору між ВСПП та поверхнею ОК. Для цього необхідно за даними калібрування за областю зміни параметрів ОК побудувати масив із пар значень параметрів ОК (σ , h) і відповідних до них пар значень параметрів ($\text{Re}U_{\text{інф}}, \text{Im}U_{\text{інф}}$) інформаційного сигналу:

$$\langle \sigma_k, h_i; \text{Re}U_{\text{інф}k,i}, \text{Im}U_{\text{інф}k,i} \rangle; k=1, \dots, N; i=1, \dots, P; M = N \times P. \quad (6)$$

За масивом (6) будують двопараметрову ФЗП для визначення зазору [13, 14], яку можна зобразити, наприклад, поліномом третього степеня:

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

Подібно будують двопараметрову ФЗП для знаходження ПЕП. Приведені похибки визначення зазору і ПЕП за функціями типу (7) під час побудови масиву (6) за $M = 5 \times 5$ точками в області зміни параметрів ОК становлять $\gamma_\alpha \approx 1,0\%$, $\gamma_\beta \approx 0,5\%$. Зменшити похибки контролю за двопараметровими ФЗП можна, збільшуючи степінь полінома (7). Проте тоді зростає кількість членів функції, що породжує певні труднощі [15], щоб забезпечити задану похибку визначення невідомих коефіцієнтів. За запропонованим методом ПЕП матеріалу ОК визначають за однопараметровою функцією (5), яку можна побудувати за відомими методами наближення функцій. Зокрема, приведена похибка визначення ПЕП за ФЗП (5), зображеною поліномом третього степеня, не перевищує 0,1%.

Загалом точність контролю залежить від точності апроксимації ФЗП, що сумірна із точністю вимірюваних значень параметрів інформаційного сигналу та зразків [12, 13].

Метод калібрування апаратури контролю. На практиці важливо забезпечити точність контролю ПЕП під час заміни ВСПП, оскільки його основний конструктивний параметр – еквівалентний радіус R_e – змінюється. На значення R_e впливають незначні відхилення діаметра феритового осердя, розмірів обмоток і їх розташування на ньому [11, 16]. Тому однотипні вихрострумові перетворювачі зазвичай у межах $\pm 1\%$ можуть відрізнятися узагальненим параметром $\beta_e = R_e \cdot \sqrt{\omega \sigma \mu_0}$. Через це, а також різне відносне значення зазору $\alpha_e = h/R_e$ під час контролю область зміни сигналу відгуку ВСПП у комплексній площині напруженості може дещо відрізнятися. Це спричинює зменшення точності визначення ПЕП за функціональною залежністю, побудованою для зразкового ВСПП, який охарактеризуємо еквівалентним радіусом R_0 і узагальненим параметром β_0 на заданій робочій частоті ω_0 .

Щоб забезпечити задану похибку визначення ПЕП за заміни ВСПП та відмінності температурних умов під час контролю на ОК, калібрують апаратуру шляхом *корекції режиму контролю* за робочою частотою та рівнем опорного сигналу $\text{Mod } U_{\text{оп}}$, використовуючи два контрольні зразки.

Для цього *на першому кроці* корегують робочу частоту $\omega_e = \omega_0 \pm \Delta \omega_e$, застосовуючи контрольний зразок з номінальним значенням $\sigma_{\text{ном}}$ ПЕП матеріалу. Робочу частоту змінюють так, щоб значення узагальненого параметра β_e ВСПП із еквівалентним радіусом $R_e = R_0 \pm \Delta R_e$ при $\sigma_{\text{ном}}^T = \sigma_{\text{ном}} \pm \Delta \sigma(T)$, що залежить від зміни температури, дорівнювало значенню узагальненого параметра β_0 зразкового ВСПП:

$$\beta_e = (R_0 \pm \Delta R_e) \cdot \sqrt{(\omega_0 \pm \Delta \omega_e) \cdot (\sigma_{\text{ном}} \pm \Delta \sigma(T)) \cdot \mu_0} \Rightarrow \beta_0 = R_0 \cdot \sqrt{\omega_0 \cdot \sigma_{\text{ном}} \cdot \mu_0} \quad (8)$$

У результаті корекції частоти за повторних вимірювань ПЕП контрольного зразка відповідатиме $\sigma_{\text{ном}}$.

На другому кроці, щоб врахувати зміни під час контролю відносного значення зазору α_e і, відповідно, чутливості контролю, із використанням контрольного зразка з мінімальним σ_{min} (або максимальним) значенням ПЕП матеріалу ОК корегують опорне значення амплітуди інформаційного сигналу $U_{\text{оп}}^e = U_{\text{оп}} \pm \Delta U_e$. Амплітуду опорного сигналу регулюють так, щоб визначена при цьому ПЕП відповідала ПЕП матеріалу контрольного зразка з мінімальним σ_{min} (або максимальним) значенням. Зауважимо, що після корекції $U_{\text{оп}}^e = U_{\text{оп}} \pm \Delta U_e$ (див. рисунок) дещо змінюється довжина проекції сім'ї годографів ПЕП на вісь $\text{Im } U_{\text{інф}}$, тобто регулюється чутливість контролю.

Далі через взаємозалежний вплив ПЕП і зазору на сигнал відгуку ВСПП необхідно уточнити корекцію робочої частоти і опорного значення амплітуди інформаційного сигналу, щоб за повторних вимірювань похибка визначення ПЕП на контрольних зразках не перевищувала заданої похибки контролю.

Відзначимо також, що за результатами корекції робочої частоти і опорного значення амплітуди інформаційного сигналу, враховуючи, що за умовою (8) $\beta_e = \beta_0$, можна визначити зміну температурного режиму. При цьому вимірне значення ПЕП відповідатиме нормальній температурі 20°C, що регламентують нормативні документи.

ВИСНОВКИ

Запропоновано метод формування інформаційного сигналу для вихрострумівих вимірювань питомої електропровідності матеріалу контрольованого об'єкта та умови відбору незалежної від впливу зазору характеристики цього сигналу, що забезпечує підвищення не менше ніж на порядок точності контролю ПЕП порівняно зі сучасними засобами. При цьому двопараметрову задачу контролю ПЕП матеріалу ОК за одночасного впливу зазору на сигнал відгуку вихрострумівого перетворювача зведено до однопараметрової, що забезпечує побудову із необхідною заданою точністю функції зворотного перетворення апаратури контролю та визначення за нею ПЕП матеріалу із похибкою на рівні десятої частки відсотка і менше. Окрім того, за ортогональними складовими інформаційного сигналу, які вимірюють під час контролю, за необхідності можна визначити величину зазору між ВСПП та поверхнею ОК.

Розроблено метод калібрування апаратури контролю під час заміни ВСПП та температурних умов, що полягає у корекції режиму контролю апаратури. Метод забезпечує задану похибку визначення ПЕП матеріалу ОК за побудованою раніше функцією зворотного перетворення. Водночас за результатами корекції режиму контролю можна розрахувати температуру середовища, за якої контролюють.

1. *Діагностика* технічного стану авіаконструкцій після довготривалої експлуатації / О. П. Остап, Д. С. Ківа, В. М. Учанін, О. І. Семенець, І. М. Андрейко, Ю. В. Головатюк // Техн. діагностика и неразр. контроль. – 2013. – № 2. – С. 15–22.
2. *Гордиенко В. И., Рыбачук В. Г., Тетерко А. Я.* Влияние зазора на точность фазовых измерителей удельной электрической проводимости // Техн. электродинамика. – 1988. – № 5. – С. 96–101.
3. *Неразрушающий контроль.* Справ. в 8-ми т. Т. 2: Вихретоковий контроль / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – 954 с.

4. *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. – Оpubл. 16.03.71; Бюл. № 11.
5. *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. – Оpubл. 07.05.81; Бюл. № 17.
6. *Патент UA 98206 C2, МПК G01N 27/90.* Спосіб вимірювання електропровідності немагнітних матеріалів / В. М. Учанін. – Оpubл. 25.04.2012; Бюл. № 8.
7. *US Pat. 6 593 738. Int. class. G 01N 027/72, G 01B 007/10.* Method and apparatus for measuring thickness of conductive films with the use of inductive and capacitive sensors / R. Kesil, D. Margulis, E. Gershzon. – Publ. 07.15.2003.
8. *Тетерко А. Я.* Модель зворотної функції перетворення приладів багатопараметрових вихрострумівих вимірювань із виключенням впливу зазору // Відбір і обробка інформації. – 2014. – 41(117). – С. 5–11.
9. *Патент UA 105571 C2, МПК G 01 N 27/90, G01R 33/12.* Вихрострумівий спосіб вимірювання товщини та питомої електропровідності матеріалу оболонок виробів із неферомагнітних матеріалів із відлаштуванням від впливу зазору / А. Я. Тетерко, Г. Г. Луценко. – Оpubл. 26.05.2014; Бюл. № 10.
10. *Патент UA 104937 C2 МПК G01N 27/90, G01R 33/12.* Спосіб вихрострумівих вимірювань питомої електропровідності немагнітних матеріалів із відлаштуванням від впливу зазору / А. Я. Тетерко, В. М. Учанін, В. І. Гутник, О. А. Тетерко. – Оpubл. 25.03.2014; Бюл. № 6.
11. *Соболев В. С., Шкарлет Ю. М.* Накладные и экранные датчики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.
12. *Лоусон Ч., Хенсон Р.* Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
13. *Тетерко А. Я., Назарчук З. Т.* Селективна вихрострумова дефектоскопія. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – 248 с.
14. *Тетерко А. Я., Учанін В. М., Гутник В. І.* Підвищення точності вихрострумівого контролю електропровідності матеріалу та товщини діелектричного покриття оболонок // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – 49, № 6. – С. 133–139.
15. *Новицкий В. П., Зограф И. А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 302 с.
16. *Попов В. К., Кабышева А. А.* Влияние ферритовых сердечников на электрические параметры вихретоковых накладных датчиков // Дефектоскопия. – 1973. – № 4. – С. 80–85.

Одержано 16.10.2015