

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ
ДЕГРАДАЦІЙНИХ ЗМІН ПИТОМОЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ
АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ**

З. Т. Назарчук, В. М. Учанін, Я. П. Кулинич

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

E-mail: yar.kulynych@gmail.com

Шляхом числового моделювання вибрано оптимальні параметри вихрострумowego контролю під час визначення варіацій питомої електропровідності, що зустрічаються за експлуатаційної деградації алюмінієвих сплавів тривало експлуатованих авіаційних конструкцій. Досліджено вплив питомої електропровідності і зазору для різних робочих частот на передатний імпеданс вихрострумowego перетворювача трансформаторного типу. Запропоновано нову методику, що дає можливість отримати найбільшу чутливість під час визначення варіацій електропровідності через діелектричне захисне покриття шляхом вибору оптимальної робочої частоти.

Ключові слова: *вихрострумовой перетворювач, питома електропровідність, робоча частота, передатний імпеданс, годограф, алюмінієвий сплав, деградація, старіючі літаки.*

**EDDY CURRENT TECHNIQUE PARAMETERS OPTIMIZATION
FOR EVALUATION OF SPECIFIC CONDUCTIVITY CHANGES
INITIATED BY ALUMINUM ALLOYS DEGRADATION**

Z. T. Nazarchuk, V. M. Uchanin, Ya. P. Kulynych

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

The evaluation of the structural changes in conductive materials by nondestructive eddy current techniques is based on the measurements of electric conductivity as a structure sensitive parameter. In this case surface layers only are evaluated due to the skin-effect influence. The main advantage of the eddy current method is the possibility to carry out the measurements without the direct contact with the inspected surface. In the presented paper the possibility to optimize the choice of eddy current inspection parameters for determination of the specific electric conductivity variations, initiated by in-service degradation of aluminum alloys in aging long-term exploited aircraft was investigated by numerical simulation. The main emphasis was done on the choice of the operational frequencies possible to optimize the inspection reliability when the measurements were done through the dielectric protective coating without its removal. The influences of the specific electric conductivity and dielectric coating thickness (or lift-off) for different operational frequencies on the transformer type eddy current probe transfer impedance were evaluated. New methodology to ensure the maximal sensitivity to the variations of the specific electric conductivity, determined through the dielectric coating by the optimal operational frequency selection, was proposed. For this purpose, the mathematical expression for eddy current probe sensitivity to electrical conductivity changes for different dielectric coating thicknesses was formulated. It was shown that for any determined dielectric coating thickness it was possible to find the optimal operational frequency with maximal sensitivity to conductivity changes. The angles between the directions of electric conductivity and the influence of the protective coating thickness on different operational frequencies were also investigated. The results obtained are important for the development of the inspection techniques possible to monitor the aluminum alloys degradation processes in ageing aircraft by noncontact electric conductivity measurements in in-service conditions.

Keywords: *eddy current probe, electrical conductivity, operating frequency, transfer impedance, hodograph, aluminum alloy, degradation, ageing airplanes.*

© З. Т. Назарчук, В. М. Учанін, Я. П. Кулинич, 2019

Вихрострумові методи контролю структури немагнітних електропровідних матеріалів ґрунтуються на безконтактному вимірюванні питомої електропровідності (ПЕП). При цьому контролюють поверхневі шари товщиною 1...2 мм, обумовлені скін-ефектом. За допомогою цих методів сортують матеріали та сплави за марками, оцінюють їх хімічну чистоту, виявляють неоднорідні за структурою зони, оцінюють глибину та якість зміцнених шарів після хіміко-термічної та поверхневої обробки, контролюють результати термічної та механічної обробки, визначають вплив повторного нагріву на механічні властивості термічно зміцнених сплавів, виявляють місця корозійних пошкоджень різного типу тощо [1–3].

Авіаційна галузь формулює нові завдання, серед яких важливий моніторинг деградації алюмінієвих сплавів під час довготривалої експлуатації літаків [3–5]. Переходячи на експлуатаційний контроль авіаційних конструкцій (АК), слід вдосконалити існуючі методи і засоби вимірювання ПЕП. Через велику кількість заклепкових отворів та інших елементів необхідно забезпечити високу локальність контролю, чого досягають, зменшуючи діаметр вихрострумового перетворювача (ВСП) до 1 мм [4]. Крім того, важливо знизити додаткову похибку за зміни зазору (або товщини діелектрика) між ВСП і поверхнею об'єкта контролю (ОК), так як експлуатаційний моніторинг необхідно виконувати, не знімаючи захисні лакофарбові покриття, товщина яких може змінюватись у певних межах [6–9]. Зазначимо, що для робочих частот, які використовують для вимірювання ПЕП вихрострумовим методом, вплив діелектричного немагнітного покриття такий самий, як й повітряного зазору (проміжку) між ВСП і поверхнею ОК, через що можуть суттєво спотворюватись результати вимірювання ПЕП. Тому, розробляючи засоби вимірювання ПЕП, цей вплив потрібно послабити. Для цього запропоновано низку методів, найсучасніші з яких побудовані на вимірюванні фазового кута вихідного сигналу ВСП [8–11].

Мета цього дослідження – розробити методологію вибору оптимальних параметрів під час вимірювання зміни ПЕП алюмінієвих сплавів АК через шар діелектричного захисного покриття вихрострумовим методом. Для цього необхідно встановити, як на годограф вихідного сигналу ВСП впливають зміни ПЕП і зазору на різних робочих частотах. Тут свідомо не використовували узагальнений параметр вихрострумового контролю [1–3], що дає кращі передумови для застосування отриманих результатів на практиці. Аналізували локальний ВСП зі зовнішнім діаметром обмоток 1 мм під час безконтактного (з зазором до 1 мм) контролю варіацій ПЕП немагнітного матеріалу з номінальним її значенням 18 МСм/м, що відповідає алюмінієвому сплаву Д16 у стані постачання [3, 4].

Формування розрахункової моделі. Розглянемо ВСП трансформаторного типу з двома однаковими котушками (збудження і вимірювання), розташованими з зазором h_a над електропровідним неферромагнітним півпростором, ПЕП матеріалу якого дорівнює σ (рис. 1). Передатний імпеданс Z такого ВСП можна записати як суму доданків $Z_0 = j\omega M_0$ і $\Delta Z = \Delta R + j\omega \Delta M$, де M_0 – взаємна індуктивність між котушками ВСП за відсутності електропровідного ОК (у повітрі), ΔZ – зміна імпедансу, привнесена електропровідним ОК. Зовнішній радіус котушок r_a використали для нормування геометричних параметрів моделі.

Використовуючи результати праці [12] та безрозмірні параметри $\Delta r = \Delta r_a / r_a$, $l = l_a / r_a$, $h = h_a / r_a$, отримали:

$$M_0 = \frac{\pi \mu_0 N^2 r_a^5}{4l^2 (\Delta r)^2} \int_0^\infty \frac{1}{\lambda^6} \Delta T^2(\lambda, \lambda \Delta r) (1 - e^{-2\lambda l})^2 e^{-2\lambda l} d\lambda,$$

$$\Delta Z = \frac{j\pi^2 f \mu_0 N^2 r_a^5}{2l^2 (\Delta r)^2} \int_0^\infty \frac{1}{\lambda^6} F(\lambda) \Delta T^2(\lambda, \lambda \Delta r) (1 - e^{-2\lambda l})^2 e^{-2\lambda(l+h)} d\lambda .$$

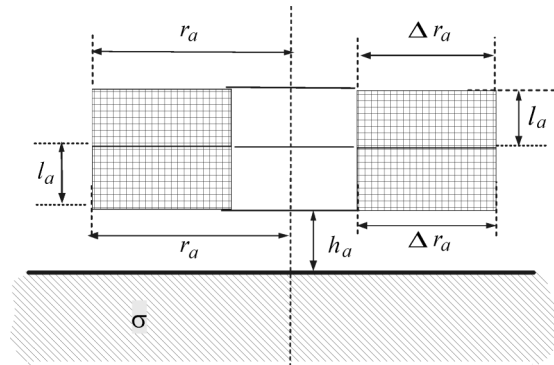


Рис. 1. Розрахункова модель досліджуваного ВСП трансформаторного типу.

Тут $F(\lambda) = (\lambda - u)/(\lambda + u)$, $u = \sqrt{\lambda^2 + 2\pi j r_a^2 f \sigma \mu_0}$, $\Delta T(x, \Delta x) = T(x) - T(x - \Delta x)$;

$T(x) = \frac{\pi}{2} x [J_1(x) H_0(x) - J_0(x) H_1(x)]$, f – робоча частота, σ – ПЕП, μ_0 – магнітна стала; N – кількість витків у кожній котушці, $J_0(x)$ і $J_1(x)$ – функції Бесселя;

$H_0(x)$ і $H_1(x)$ – функції Струве. Зауважимо, що підінтегральний вираз через функції Струве, властивості яких ґрунтовно досліджено [13], подано вперше. Розроблено числові алгоритми обчислення їх значень, які реалізовані у системах комп'ютерної алгебри Mathcad, Mathematica тощо, що дає можливість ефективно моделювати задачі вихрострумowego контролю.

Результати числового моделювання. Для досліджень використали такі розміри ВСП: $r_a = 0,5$ мм, $\Delta r_a = 0,1$ мм, $l_a = 0,5$ мм. Взаємна індуктивність між котушками ВСП вибраних розмірів у повітрі становить 38,8 нГн.

Під час контролю найважливіше вибрати оптимальну частоту, яка забезпечує достатню чутливість до зміни ПЕП, усунути додаткову похибку за зміни зазору, а також вивчити залежність від частоти чутливості зміни передатного імпедансу від варіацій ПЕП та кута між напрямками зміни ПЕП та зазору на площині імпедансу.

На рис. 2 подано годографи відносного передатного імпедансу ВСП, розташованого над електропровідним неферромагнітним півпростором, за зміни робочої частоти f і ПЕП σ для різних значень зазору h_a . Тут і далі криві 1–6 відповідають значенням зазору $h_a = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ і 1 мм. Годографи на рис. 2b побудовані для робочої частоти $f = 100$ кГц за зміни ПЕП від 15 до 47 МСм/м, що відповідає її значенням для різних конструкційних алюмінієвих сплавів [1, 3]. Виявили, що зі збільшенням зазору суттєво зменшується абсолютне значення компонент імпедансу ΔZ . Зокрема, з його зростанням від 0 до 1 мм максимальні значення $\Delta R / Z_0$, $\Delta L / Z_0$ зменшуються на порядок, що підтверджує суттєвий вплив зазору на вихідний сигнал ВСП і необхідність оптимізувати параметри вихрострумowego контролю під час вимірювання ПЕП через захисне покриття. Вибором оптимальної робочої частоти можна дещо поліпшити умови вимірювання, коли діелектричне покриття зменшує абсолютне значення сигналу ВСП.

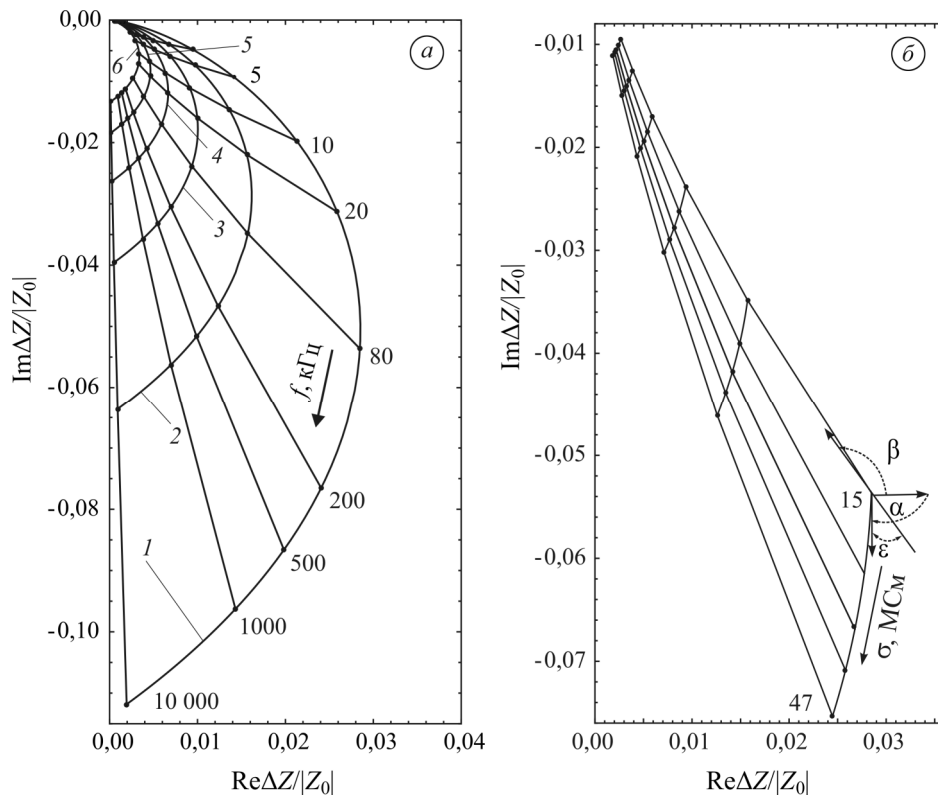


Рис. 2. Годографи імпедансу ВСП за зміни робочої частоти (а) і ПЕП (б) для різного зазору.

Аналіз чутливості параметрів локального ВСП до зміни ПЕП. Під час визначення оптимальних умов контролю будь-якого параметра ОК необхідно знати, як ВСП реагує на його зміну. Під чутливістю розуміємо приріст передатного імпедансу ВСП, викликаний незначним збільшенням контрольованих чинників. Це дає можливість застосувати параметр чутливості, щоб оптимізувати режими вихрострумовеї контролю через діелектричне покриття за допомогою локального накладного ВТП за невеликих (на 10...20%) відхилень контрольованих параметрів. Для аналізу чутливості застосуємо відповідні похідні, які характеризують чутливість до зміни ПЕП і зазору:

$$S_{\sigma} = \frac{1}{|Z_0|} \frac{\partial \Delta Z}{\partial \sigma} = - \frac{\pi^2 f \mu_0 r_a^5 N^2}{|Z_0| \sigma l^2 (\Delta r)^2} \int_0^{\infty} \frac{\Delta M^2(\lambda, \lambda \Delta r) F(\lambda)}{u \lambda^5} (1 - e^{-2\lambda l})^2 e^{-2\lambda(l+h)} d\lambda, \quad (1)$$

$$S_h = \frac{1}{|Z_0|} \frac{\partial \Delta Z}{\partial h} = - \frac{j \pi^2 f \mu_0 r_a^5 N^2}{|Z_0| l^2 (\Delta r)} \int_0^{\infty} \frac{\Delta M^2(\lambda, \lambda \Delta r) F(\lambda)}{\lambda^5} (1 - e^{-2\lambda l})^2 e^{-2\lambda(l+h)} d\lambda. \quad (2)$$

На рис. 3 подано похідну S_{σ} в комплексній площині залежно від робочої частоти для різних значень зазору. Як бачимо, за певних значень робочої частоти f модуль чутливості до зміни ПЕП досягає максимуму. На рис. 4 зображено залежність модуля комплексної похідної S_{σ} , тобто абсолютну чутливість до змін ПЕП, від робочої частоти. Кожна крива на рис. 3 і 4 має чіткий максимум у діапазоні частот 20...70 кГц. Ці результати підтвердили існування оптимальної частоти і дали можливість побудувати її залежність від зазору (рис. 5). Дослідимо АК зі сплаву Д16 з ПЕП 18 МСм/м, яку необхідно контролювати через лакофарбове

покриття товщиною 0,5 мм (номінальне значення). У цьому випадку робоча частота має становити 30 кГц, тобто бути більш ніж удвічі меншою проти оптимальної під час контролю за безпосереднього доступу до поверхні ОК. На рис. 6 побудовано залежність чутливості S_σ до зміни ПЕП від зазору за різних значень робочої частоти.

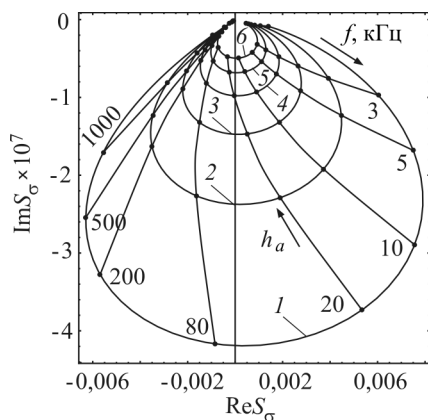


Рис. 3.

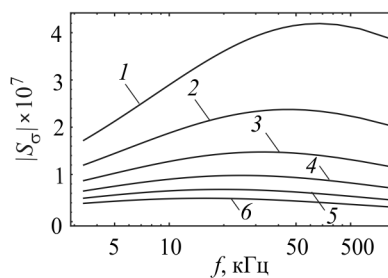


Рис. 4.

Рис. 3. Діаграми чутливості S_σ до змін ПЕП для різних значень зазору h_a .

Рис. 4. Залежність чутливості S_σ до зміни ПЕП від робочої частоти для різних значень зазору h_a .

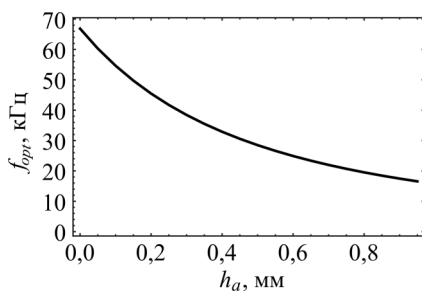


Рис. 5.

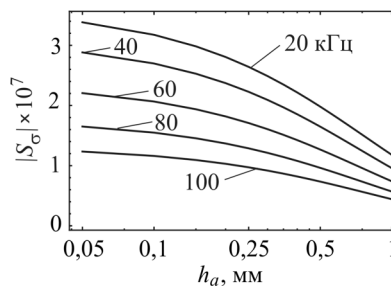


Рис. 6.

Рис. 5. Залежність оптимальної робочої частоти від зазору.

Рис. 6. Залежність чутливості до зміни ПЕП від зазору для фіксованих значень робочої частоти f .

Аналіз можливості послабити вплив зміни товщини покриття. Щоб позбутися впливу змін товщини діелектричного покриття або зазору на результати вимірювання ПЕП, традиційно використовують різні варіанти фазового способу обробки сигналів ВСП [1, 3, 8–11]. Для зменшення додаткової похибки під час контролю через діелектричне покриття, товщина якого може змінюватись, необхідно забезпечити ортогональність дотичних до ліній впливу зміни ПЕП і зазору в робочій точці, яку визначимо вибором робочої частоти (див. рис. 2). Відповідний кут ε між дотичними до згаданих ліній впливу ПЕП і зазору розрахуємо так:

$$\varepsilon = |180^\circ + \alpha - \beta|,$$

де α і β – кути між віссю дійсних значень передатного імпедансу і напрямками зміни ПЕП та зазору відповідно, тобто,

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\text{Im } S_{\sigma}}{\text{Re } S_{\sigma}}\right) \quad \text{і} \quad \beta = \arctg\left(\frac{\text{Im } S_h}{\text{Re } S_h}\right).$$

Залежності кутів α , β і ε від робочої частоти подано на рис. 7–9 для шести значень зазору. Як бачимо, за збільшення частоти f кути α і β монотонно зменшуються від -20° до -135° та від 175° до 90° , відповідно, а кут ε збільшується від 12° до 45° і практично не змінюється за зростання робочих частот вище 200 кГц (рис. 9). Проте зі збільшенням зазору за фіксованої частоти кути α і β зменшуються, а кут ε зростає.

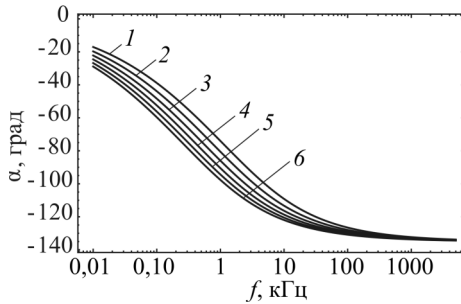


Рис. 7.

Рис. 7. Залежність кута між лінією впливу змін ПЕП і віссю дійсних значень від робочої частоти.

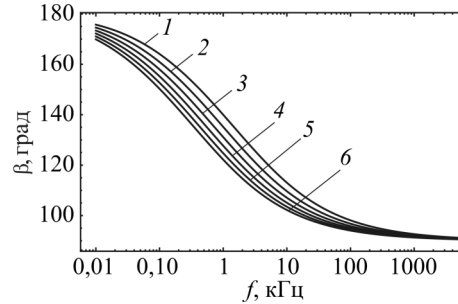


Рис. 8.

Рис. 8. Залежність кута між лінією впливу змін зазору і віссю дійсних значень від робочої частоти.

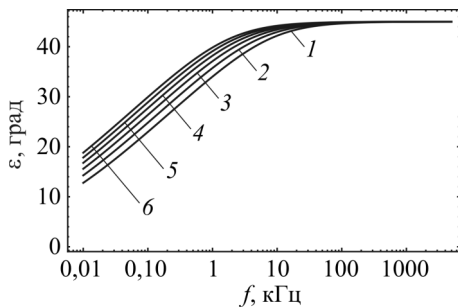


Рис. 9. Залежність кута між лініями впливу змін ПЕП і зазору від робочої частоти.

Кут ε за усіх значень робочої частоти і зазору за умови, що сигнал ВСП вимірюють відносно початку координат (точка 0 на рис. 2), не перевищує 40° (рис. 9). Це означає, що для ефективного відлаштування від впливу зазору необхідно ввести додатковий сигнал, який змінює точку, відносно якої вимірюють фазу сигналу ВСП [8–10]. При цьому діапазон відлаштування від впливу зазору суттєво залежатиме від нелінійності його ліній.

ВИСНОВКИ

Запропонована методологія оптимізації режимів вихрострумowego контролю під час вимірювання ПЕП. Шляхом числового аналізу аналітичних виразів (1) і (2) досліджено вплив варіацій ПЕП на значення передатного імпедансу за різних робочих частот і зазорів. Подано залежність чутливості передатного імпедансу ВСП до варіацій ПЕП та кута між напрямками зміни ПЕП та зазору на площині імпедансу від робочої частоти. Виявлено, що зі збільшенням зазору максимальне значення чутливості суттєво зменшується. При цьому знижується також і робоча частота, за якої воно досягається. Тобто, для кожної товщини захисного діелектричного покриття (або зазору) існує оптимальне значення робочої частоти, за якого чутливість до змін ПЕП максимальна. Встановлено, що кут між напрямками зміни ПЕП та зазору збільшується за зростання значень зазору і не перевищує 40° . Тому під час реалізації фазового методу вихрострумowego контролю слід ввести сигнал компенсації впливу зміни зазору. Отримані результати необхідно

врахувати під час розробки технологій моніторингу деградації алюмінієвих сплавів авіаційних конструкцій за довготривалої експлуатації на основі безконтактного (через діелектричне покриття) вимірювання ПЕП.

1. *Дорофеев А. Л., Еришов Р. Е.* Физические основы электромагнитной структуроскопии. – Новосибирск: Наука, 1985. – 184 с.
2. *Цирг В. Н., Учанин В. Н., Макаров Г. Н.* Применение вихрековых измерителей электропроводности для анализа механических свойств алюминиевых сплавов // Совершенствование технологических процессов ремонта авиационной техники на заводах ГА. – М.: ВГПО “Авиаремонт”, 1984. – С. 39–40.
3. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Остащ, В. М. Федірко, В. М. Учанин та ін. – Львів: Сполом, 2007. – 1068 с.*
4. *Діагностика технічного стану авіаконструкцій після довготривалої експлуатації / О. П. Остащ, Д. С. Ківа, В. М. Учанин та ін. // Техн. діагностика и неразр. контроль. – 2013. – № 2. – С. 15–22.*
5. *Патент 113736 України, МПК G01N27/90. Спосіб моніторингу ступеня локальної деградації матеріалів тривало експлуатованих авіаційних конструкцій / О. П. Остащ, В. М. Учанин, О. І. Семенець, Ю. В. Головатюк, Л. Б. Ковальчук, В. Я. Дереча. – Опубл. 10.02.2017; Бюл. № 3.*
6. *Dziczkowski L.* Elimination of Coil Liftoff from Eddy Current Measurements of Conductivity // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2013. – **62**, – № 12. – P. 3301–3307.
7. *Abu-Nabah B., Nagy P.* Lift-off effect in high-frequency eddy current conductivity spectroscopy // NDT&E Int. – 2007. – **40**. – P. 555–565.
8. *Косовский Д. И., Никитин А. И., Шкарлет Ю. И.* Подавление влияния зазора при вихре-токовом измерении удельной проводимости // Дефектоскопия. – 1982. – № 9. – С. 56–62.
9. *Учанин В. Н., Макаров Г. Н.* Подавление влияния зазора при бесконтактном измерении удельной электрической проводимости методом вихревых токов // Техн. диагностика и неразр. контроль. – 1996. – № 4. – С. 41–45.
10. *Патент 98206 України, МПК G01N27/90. Спосіб вимірювання електропровідності немагнітних матеріалів / В. М. Учанин. – Опубл. 25.04.2012; Бюл. № 28.*
11. *Патент 97304 України, МПК G01N 27/90, МПК G01R33/12. Вихрострумний вимірювач питомої електропровідності ферромагнітних матеріалів / В. М. Учанин, Г. М. Макаров, В. В. Черленевський. – Опубл. 10.01.2012; Бюл. № 2.*
12. *Dodd C. V., Deeds W. E.* Analytical Solutions to Eddy Current Probe-Coil Problems // J. of Appl. Phys. – 1968. – **39**, № 6. – P. 2829–2838.
13. *Ватсон Г. Н.* Теория бесселевых функций. – М.: Изд-во иностр. лит., 1949. – Т. 1. – 798 с.

Одержано 03.09.2019