

## КОМПЕНСАЦІЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ МАТЕРІАЛУ НА ПИТОМУ ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ПІД ЧАС ВИХРОСТРУМОВОЇ СТРУКТУРОСКОПІЇ

В. Г. Рибачук, В. М. Учанін

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

E-mail: [vgrybachuk@gmail.com](mailto:vgrybachuk@gmail.com), [vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com)

Досліджено вплив температури металевих конструкційних матеріалів на результати вимірювання питомої електричної провідності (ПЕП) вихрострумовим методом. Отримано аналітичний вираз для вихідного сигналу вимірювального каналу ПЕП вимірювача електропровідності залежно від значення ПЕП матеріалу за номінального значення температури (зазвичай 20°C), температурного коефіцієнта електричного опору матеріалу та відхилення його реальної температури від номінального значення. Показано, що для відлаштування від цього впливу та приведення результатів вимірювання до номінальної температури необхідно застосовувати вихрострумові вимірювачі з додатковим каналом вимірювання температури матеріалу в зоні контролю. Корекцію результатів вимірювання ПЕП здійснено перемноженням вихідного сигналу каналу вимірювання ПЕП з допоміжним, який формується з вихідного сигналу каналу вимірювання температури масштабним перетворенням та сумуванням з сигналом джерела опорної напруги. Запропоновано та розглянуто роботу функціональної схеми вихрострумового вимірювача ПЕП з температурною корекцією. За відсутності попередньої інформації про марку матеріалу та його температурний коефіцієнт електричного опору відлаштування від впливу температури запропоновано здійснювати тестовими змінами температури матеріалу в зоні контролю за одночасного регулювання коефіцієнта перетворення масштабного перетворювача.

**Ключові слова:** вихрострумовий метод, питома електрична провідність, питомий електричний опір, температурний коефіцієнт електричного опору, температурна корекція, тестова процедура.

## COMPENSATION OF THE MATERIAL TEMPERATURE INFLUENCE ON SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY DURING EDDY CURRENT STRUCTUROSCOPY

V. G. Rybachuk, V. M. Uchanin

H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv

The importance of eddy current measurements of specific electrical conductivity (SEC) of materials in non-destructive testing for solving problems of structuroscopy is discussed. In particular, their significant role is shown for estimation of the degree of changes in the mechanical characteristics of structural materials due to degradation processes in their structure. The influence of the temperature of metallic structural materials on the results of eddy current measuring of SEC has been studied. An analytical expression for the output signal of the SEC measuring channel of an electrical eddy current conductivity meter for real temperature of material is obtained. It depends on the value of the material SEC at a nominal temperature value (usually 20°C), temperature coefficient of electrical resistance of the material and the deviation of the material real temperature from the nominal value. It is shown that in order to tune out this effect and bring the measurement results to the nominal temperature, it is necessary to use eddy current meters with an additional channel for measuring the material temperature in the testing zone. The output signal of this channel is used to correct the SEC measurement results. This is carried out by multiplying the output signal of the SEC measurement channel and some auxiliary signal. This auxiliary signal is generated from the output signal of the temperature measurement channel

© В. Г. Рибачук, В. М. Учанін, 2023

by it scaling and summation with the signal of the direct current voltage reference source. A functional diagram of the eddy current SEC meter with temperature correction is proposed. A detailed description of its operation is given. In the absence of preliminary information about the grade of material and the value of its temperature coefficient of electrical resistance, it is proposed to suppress the influence of temperature by test changes in the temperature of the material in the testing zone. At the same time, it is necessary to adjust the gain of the scale converter. This is done until the readings of the eddy current SEC meter do not depend on the material temperature in the testing zone.

**Keywords:** *eddy current method, specific electrical conductivity, specific electrical resistance, temperature coefficient of electrical resistance, temperature correction, test procedure.*

**Вступ.** У неруйнівному контролі (НК) широко застосовують контроль структури немагнітних електропровідних матеріалів на основі вимірювання їх питомої електричної провідності (ПЕП) вихрострумовим методом [1–7]. Цей підхід до вирішення задач структуроскопії ґрунтується на кореляційних зв'язках між структурно-механічними характеристиками матеріалів та їх ПЕП. У багатьох галузях промисловості все вагомішою є проблема своєчасного оцінювання змін механічних характеристик матеріалів конструкцій внаслідок деградаційних процесів в їх структурі під час експлуатації [8, 9]. Так, експлуатаційна деградація конструкційних алюмінієвих сплавів (АС) пов'язана з багатьма чинниками, серед яких найвпливовішими є статичні і циклічні навантаження, температура, вплив агресивних середовищ тощо [10–13]. Вони впливають на матеріал конструкцій у різний спосіб, що призводить до збільшення кількості дисперсних інтерметалідів і густини дислокацій, дифузії легувальних елементів та їх сегрегації вздовж меж зерен, мікророзтріскування включень вторинної фази тощо [11, 13]. Особливе значення має їх синергія, коли кожний з них окремо не спричиняє суттєвої деградації матеріалів, а вирішальне значення має їх сумісна дія. Без оцінювання деградаційної зміни механічних властивостей матеріалів неможливо достовірно оцінити залишковий ресурс конструкцій і, зокрема, авіаційну техніку за сучасним принципом допустимої пошкоджуваності. Деградацію властивостей АС можна оцінювати руйнівними і неруйнівними методами [13]. Руйнівні методи встановлення реальних ресурсних характеристик матеріалів базуються на механічних випробуваннях зразків-свідків чи зразків, вирізаних з експлуатованих конструкцій під час ремонту та заміни окремих частин конструкцій. Під час експлуатації такий підхід об'єктивно неможливий, що стимулює пошук інших підходів і актуалізує необхідність експлуатаційного моніторингу деградаційних змін структури матеріалів методами НК.

Встановлено, що зниженню порогу втоми і втомної довговічності зразків деградованих сплавів типу Д16 і В95 у 1,5–2 рази відповідає ріст ПЕП всього на 20...30% (3...4 МСм/м при похибці вимірювання 2%) [14, 15]. З цього випливає, що вірогідність результатів вихрострумового НК здебільшого залежить від точності вимірювання ПЕП. Основним джерелом похибок вихрострумових вимірювачів електропровідності традиційно вважають зазор між вихрострумовим перетворювачем (ВСП) та поверхнею матеріалу. Методи оцінки впливу зазору та його усунення у вихрострумовому контролі досить ґрунтовно висвітлені у науково-технічній літературі [16–18]. Проте, якщо інформативні зміни ПЕП невеликі і не перевищують 1 МСм/м, то на надійність результатів контролю впливають і інші чинники. Одним із таких є температура.

Температура на результати вихрострумових вимірювань ПЕП впливає так. По-перше, внаслідок температурних змін параметрів ВСП (електричний імпеданс і геометричні розміри обмоток, магнітна проникність феритового осердя). По-друге, через температурний вплив на параметри електричних і електронних компонентів вимірювальної схеми вимірювача ПЕП (призводять до відповідних інструментальних похибок). І нарешті – це залежність ПЕП матеріалу об'єкта контролю

(ОК) від температури. Методи боротьби з похибками, які виникають у перших двох випадках, відомі і докладно висвітлені у відповідній науково-технічній літературі [16–19]. Вони, зокрема, передбачають використання ВСП трансформаторного типу, які характеризуються значною термостабільністю параметрів, фазового способу обробки вихідного сигналу ВСП, кварцової стабілізації робочої частоти тощо. Водночас вивченню третього шляху температурного впливу на результати вимірювання ПЕП не надавали належної уваги.

У зв'язку з цим метою роботи є дослідити вплив температури матеріалу ОК на результати вимірювання ПЕП вихрострумовим методом та розробити підходи для його компенсації.

**Вплив температури на ПЕП металів і сплавів.** Відомо, що ПЕП матеріалів, зокрема металів, вироби із яких є основними об'єктами вихрострумового контролю, суттєво залежить від температури [20]. Тому останнім часом у вихрострумовій структуроскопії намітилася тенденція до врахування впливу температури на електропровідні властивості матеріалу ОК. Так, у вихрострумовому структуроскопі ВЭ-26НП передбачена можливість калібрування приладу за поточного значення температури та вимірювання електропровідності ОК, приведеної до температури 20°C [21]. До складу структуроскопа вказаного типу, крім функціональних вузлів, характерних для вихрострумового приладу, входить вбудований термометр, який вимірює поточну температуру ОК, та мікроконтролер. У пам'ять останнього внесено температурні коефіцієнти електропровідності калібрувальних зразків різних матеріалів. Якщо необхідно визначити ПЕП матеріалу ОК за поточної температури, оператор встановлює температурний коефіцієнт рівний нулю. Щоб визначити ПЕП, яка відповідає температурі 20°C, необхідно ввести в пам'ять мікроконтролера з панелі управління приладу температурний коефіцієнт електропровідності матеріалу ОК. Після цього мікроконтролер на основі показів термометра та вимірювального каналу електропровідності розраховує ПЕП, приведено до температури 20°C.

Проте в практиці НК дуже часто можливі ситуації, коли марка матеріалу ОК і відповідно температурний коефіцієнт ПЕП невідомі. Тоді структуроскоп ВЭ-26НП (та прилади аналогічні йому) не дозволяє відлаштуватися від впливу температури.

Нижче проаналізовано можливість вихрострумового контролю з врахуванням впливу температури на ПЕП матеріалу за невідомого температурного коефіцієнта.

**Вимоги до функції перетворення вимірювального каналу вихрострумового вимірювача ПЕП з врахуванням температури матеріалу ОК.** Вихрострумові засоби придатні для НК виробів лише з електропровідних матеріалів. Переважно їх застосовують на металевих ОК. Тому подальший аналіз стосується цього класу матеріалів.

Відомо, що температурну залежність питомого електричного опору металів описують так [20]:

$$\rho_T = \rho_n(1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (1)$$

де  $\rho_T$  і  $\rho_n$  – відповідно поточне і номінальне значення питомого електричного опору металу (сплаву), які відповідають поточному  $T$  і номінальному  $T_n$  значенням температури;  $\Delta T = T - T_n$  – відхилення поточної температури  $T$  сплаву від її номінального значення  $T_n$ ;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт електричного опору контрольованого металу (сплаву).

Оскільки ПЕП є фізичною величиною зворотною до питомого електричного опору, то враховуючи рівняння (1), її можна подати так:

$$\sigma_T = \frac{1}{\rho_T} = \frac{1}{\rho_n(1 + \alpha \cdot \Delta T)} = \frac{\sigma_n}{1 + \alpha \cdot \Delta T}, \quad (2)$$

де  $\sigma_T$  і  $\sigma_n = \frac{1}{\rho_n}$  – відповідно поточне і номінальне значення ПЕП сплаву, які відповідають поточному  $T$  і номінальному значенням  $T_n$  температури.

У науково-технічній літературі та довідниках найчастіше подають значення  $\rho$  за температури 20°C. Тому в подальшому саме їх розглядатимемо як номінальні.

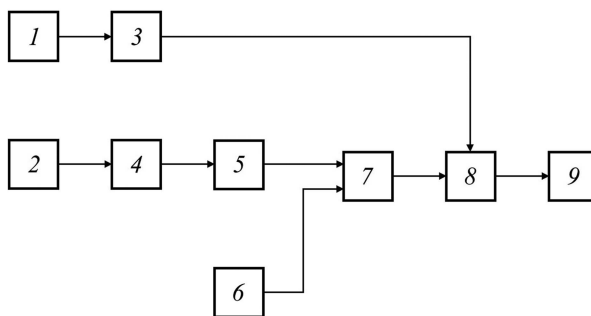
Вихідний сигнал вимірювального каналу вихрострумowego вимірювача ПЕП зазвичай є у вигляді сталої напруги, яка пропорційна значенню ПЕП за поточної температури матеріалу ОК. На основі формули (2) її описують так:

$$U_{\sigma_T} = k_{\sigma} \cdot \sigma_T = k_{\sigma} \frac{\sigma_n}{1 + \alpha \cdot \Delta T}, \quad (3)$$

де  $k_{\sigma}$  – коефіцієнт перетворення вимірювального каналу вихрострумowego вимірювача електропровідності.

Аналіз формули (3) показує, що для усунення температурного впливу на покази вимірювача електропровідності необхідно помножити напругу  $U_{\sigma_T}$  на допоміжний сигнал, який повинен складатися з суми двох доданків. Перший – сталий, а другий – пропорційний відхиленню поточної температури матеріалу ОК від номінального значення. Підбирати значення цих складників допоміжного сигналу необхідно так, щоб вони були еквівалентні знаменнику формули (3). Для цього у схему вихрострумowego вимірювача електропровідності необхідно додатково ввести канал вимірювання температури матеріалу ОК у зоні контролю.

**Вихрострумований вимірювач електропровідності з температурною корекцією.** Можливий варіант функціональної схеми такого приладу показано на рисунку.



Функціональна схема вихрострумowego вимірювача електропровідності з температурною корекцією: 1 – ВСП; 2 – давач температури; 3 та 4 – канали вимірювання ПЕП та температури, відповідно; 5 – масштабний перетворювач; 6 – джерело опорної напруги; 7 – суматор напруг; 8 – перемножувач напруг; 9 – індикатор.

Прилад має два вимірювальні канали: вимірювання ПЕП матеріалу 3, до входу якого підключено ВСП 1, та температури 4. До входу каналу вимірювання температури підключено давач 2, який конструктивно інтегрований з ВСП 1. Це забезпечує вимірювання температури матеріалу ОК саме у місці розташування ВСП 1. На виході вимірювального каналу 3 формується напруга  $U_{\sigma_T}$ , пропорційна ПЕП матеріалу за поточного значення температури  $T$ . Одночасно давач температури 2 формує сигнал, пропорційний поточному значенню температури  $T$  мате-

ріалу в зоні контролю. Цей сигнал далі перетворюється у вимірювальному каналі температури 4, на виході якого формується напруга, пропорційна відхиленню поточного значення температури матеріалу від номінального

$$U_T = k_T \cdot \Delta T ,$$

де  $k_T$  – коефіцієнт перетворення вимірювального каналу температури 4.

Отриману напругу масштабно перетворюють із коефіцієнтом перетворення  $k_5$ . В результаті на виході масштабного перетворювача 5 отримуємо сигнал

$$U_5 = k_5 \cdot U_T = k_5 \cdot k_T \cdot \Delta T .$$

Цей сигнал сумується в суматорі із постійною напругою  $U_6$ , яка поступає з виходу джерела опорної напруги 6 на другий вхід суматора. Значення  $U_6$  має бути відмінним від нуля і незмінним упродовж усього контролю. Таким чином, на виході суматора 7 формується допоміжна напруга

$$U_7 = U_5 + U_6 = U_6 \left( \frac{k_5 \cdot k_T}{U_6} \cdot \Delta T + 1 \right) , \quad (4)$$

яка перемножується з напругою  $U_{\sigma_T}$ . В результаті на виході помножувача напруг 8 отримуємо сигнал, який з врахуванням (3) та (4) описуємо так:

$$U_8 = U_{\sigma_T} \cdot U_7 = k_{\sigma} \cdot \frac{\sigma_n}{1 + \alpha \cdot \Delta T} \cdot U_6 \cdot \left( \frac{k_5 \cdot k_T}{U_6} \cdot \Delta T + 1 \right) . \quad (5)$$

Аналіз формули (5) показує, що якщо буде виконана умова

$$\alpha = \frac{k_5 \cdot k_T}{U_6} , \quad (6)$$

то вихідна напруга помножувача 8 не залежатиме від температури матеріалу ОК, а буде пропорційна його ПЕП за номінальної температури. Виконання умови (6) найпростіше досягти регулюванням коефіцієнта перетворення  $k_5$  масштабного перетворювача 5 та певною мірою підбором значення опорної напруги  $U_6$ . Що стосується коефіцієнта перетворення каналу вимірювання температури  $k_T$ , то його значення визначають вимоги з боку давача температури 2 і тому можливість регулювання може бути суттєво обмежена. Коефіцієнт перетворення  $k_{\sigma}$  вимірювального каналу 3 встановлюють під час калібрування структуроскопа за калібрувальними зразками (стандартні зразки ПЕП), і у подальшому він не змінюється.

З огляду на вираз (6), для відлаштування від впливу температури на електропровідні властивості матеріалу ОК коефіцієнт перетворення масштабного перетворювача 5 повинен дорівнювати такому номінальному значенню:

$$k_{5_n} = \frac{\alpha \cdot U_6}{k_T} . \quad (7)$$

Підставляючи отримане номінальне значення  $k_{5_n}$  у вираз (5), отримуємо:

$$U_{8_n} = k_{\sigma} \cdot U_6 \cdot \sigma_n = k \cdot \sigma_n , \quad (8)$$

де  $k = k_{\sigma} \cdot U_6$  – коефіцієнт перетворення інформаційно-вимірювального тракту приладу з врахуванням температурної корекції.

З формули (8) випливає, що якщо виконується умова (7), то вихідний сигнал  $U_{8_n}$  помножувача напруги  $\delta$  пропорційний значенню ПЕП матеріалу за номінальної температури незалежно від конкретного значення температури у момент вимірювань. Номінальне значення коефіцієнта перетворення масштабного перетворювача можна отримати розрахунком на основі виразу (7). Але для цього необхідно попередньо знати точні значення температурного коефіцієнта електричного опору  $\alpha$  матеріалу ОК, напруги джерела опорної напруги  $b$  та коефіцієнта перетворення вимірювального каналу температури  $k_T$ . Дві останні величини залежать тільки від параметрів функціональних вузлів структуроскопа і їх можна визначити для конкретного приладу. Що стосується температурного коефіцієнта  $\alpha$ , то він має певне значення для кожної марки матеріалу. Для багатьох однокомпонентних матеріалів їх температурні коефіцієнти електричного опору відомі [20]. Для багатокомпонентних сплавів (наприклад, алюмінієвих) цей параметр залежить від співвідношення між компонентами і часто є невідомим. Для його визначення необхідні спеціальні зразки матеріалу і відповідні вимірювальні засоби. Крім того, в практиці НК часто буває, коли марка матеріалу ОК точно невідома. Відповідно невідомий і коефіцієнт  $\alpha$ . Тоді для відлаштування від температурного впливу на ПЕП матеріалу можна застосувати тестову процедуру [8], а саме, примусово кілька разів змінювати температуру матеріалу в зоні контролю. Тобто  $\Delta T$  приймає різні довільні значення. Під час виконання цих тестів підбирають таке значення коефіцієнта перетворення  $k_5$  масштабного перетворювача  $\delta$ , за якого покази індикатора  $\theta$  не залежать від змін температури матеріалу. Як випливає з виразу (7), це можливо лише за виконання умови (6). Таким чином, досягають незалежності показів вимірювача ПЕП від змін температури матеріалу ОК у зоні контролю.

### ВИСНОВКИ

Проаналізовано вплив температури на електропровідні властивості металевих матеріалів. Показано, що для відлаштування від температурного впливу на ПЕП матеріалу ОК необхідно застосовувати вихрострумові вимірювачі (структуроскопи) з додатковим каналом вимірювання температури матеріалу в зоні контролю. Відповідно до вихідного сигналу цього каналу, необхідно коректувати сигнал каналу вимірювання ПЕП. Для цього він перемножується на допоміжний сигнал, який формується з вихідного сигналу каналу вимірювання температури масштабним перетворенням та сумування зі сигналом джерела опорної напруги. Це дозволяє вимірювати ПЕП матеріалу ОК за номінального значення температури незалежно від її фактичного значення в зоні контролю. За відсутності попередньої інформації про марку матеріалу та його температурний коефіцієнт електричного опору налаштування режиму температурної корекції можна здійснювати тестовими змінами температури матеріалу в зоні контролю.

1. Rummel, W.D. Characterization and evaluation of 2014 aluminum alloy by eddy current conductivity techniques. *Materials Evaluation*. **1966**, 14(6), 322–326.
2. Dorofeev, A.L. *Induction structuroscopy*; Energiya: Moscow, 1973, 176. (in Russian)
3. Naumov, N.M.; Miklyaev, P.G. *Resistivity-metering nondestructive testing of aluminium wrought alloys*; Metallurgiya: Moscow, 1974. (in Russian)
4. Dorofeev, A.L.; Kazamanov, Yu.G. *Electromagnetic flaw detection*; Mashinostroenie: Moscow, 1980. (in Russian)
5. Dorofeev, A.L.; Ershov, R.E. *Physical fundamentals of electromagnetic structuroscopy*; Khlebopros, R.G., Ed.; Nauka. Sibirskoye otdeleniye: Novosibirsk, 1985. (in Russian)

6. *Nondestructive testing handbook*, 2<sup>nd</sup> ed. Vol. 4: Electromagnetic testing (Eddy current, flux leakage and microwave nondestructive testing), McMaster, R.C.; McIntire, P.; Mester M.L., Eds.; American Society for NDT: USA, 1986.
7. Bakunov, A.S. Evolution of equipment for eddy current structuroscopy of non-ferrous metals in Russia. *Kontrol'. Diagnostika*. **2004**, 4, 63–64. (in Russian)
8. Dobmann, G.; Boller, Ch.; Herrmann, H.-G.; Altpeter, I. Micromagnetic and electromagnetic NDT for lifetime management by monitoring ageing of structural materials. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*. **2014**, 9, 348–359. <https://doi.org/10.1504/IJMMP.2014.066915>
9. NDT methods for monitoring degradation. *Proc. of the Joint EC-IAEA Specislists Meeting*, Petten, The Netherlands, March 10–12, 1999; Estorff, U.; Davies, L.M.; Trampus, P., Eds.; Luxemburg, 1999.
10. Ostash O.P.; Fedirko, V.M.; Uchanin, V.M.; Bychkov, S.A.; Molyar, O.H.; Semenets', O.I.; Kravets', V.S.; Derecha, V.Ya. Strength and durability of aircraft materials and structural elements. In *Fracture Mechanics and Strength of Materials: A Handbook*. Vol. 9; Panasyuk, V.V., Ed.; Spolom, Lviv, 2007.
11. Ostash, O.P.; Andreiko, I.M.; Holovatyuk, Y.V. Degradation of materials and fatigue durability of aircraft constructions after long-term operation. *Materials Science*. **2006**, 42(4), 427–439. <https://doi.org/10.1007/s11003-006-0098-1>
12. Nesterenko, G.I.; Basov, V.N.; Nesterenko, B.G.; Petrusenko, V.G. The influence of long-term operation of aircraft on the properties of materials of their structures. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnost' mashin*. **2006**, 4, 41–50. (in Russian)
13. Ostash, O.P.; Kiva, D.S.; Uchanin, V.M.; Semenets O.I.; Andreiko I.M.; Golovatyuk Yu.V. Diagnostics of technical condition of aircraft structures after longterm service. *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrushayushchiy Kontrol'*. **2013**, 2, 15–22. (in Ukrainian)
14. Ostash, O.P.; Andreiko, I.M.; Markashova, L.I. et al. Influence of long-term operation on the structure and physicomechanical properties of D16- and V95-type aluminum alloys, *Materials Science*, **2013**, 49(1), 13–24. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9578-2>
15. Ostash, O.; Uchanin, V.; Semenets, O.; Holovatyuk, Y.; Kovalchuk, L.; Derecha, V. Evaluation of aluminium alloys degradation in aging aircraft. *Reseach in Nondestructive Evaluation*. **2018**, 29(3), 156–166. <https://doi.org/10.1080/09349847.2017.1302622>
16. Klyuev, V.V., Ed. *Instruments for non-destructive testing of materials and products: A Handbook*; Mashinostroenie: Moscow, 1986. (in Russian)
17. Gerasimov, V.G.; Pokrovskiy, A.D.; Sukhorukov, V.V. *Electromagnetic testing: Practical manual*; Sukhorukov, V.V., Ed.; Nondestructive Testing. In 5 books. Book 3; Vysshaya shkola: Moscow, 1992. (in Russian)
18. Uchanin, V.N.; Makarov, G.N. Suppression of lift-off influence in contactless measurement of specific electrical conductivity by eddy current method. *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrushayushchiy Kontrol'*. **1996**, 4, 41–45. (in Russian)
19. Shvetskiy, B.I. *Electronic digital devices*; Tekhnika: Kyiv, 1991. (in Russian)
20. Kalashnikov, S.G. *Electricity: Tutorial*; Nauka: Moscow, 1985. (in Russian)
21. Bakunov, A.S.; Muzhitskiy, V.F.; Shubochkin, S.E. Eddy current structuroscope ВЭ-26НП. In *Metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya i tekhnicheskoy diagnostiki, Proceedings of the 1-st National Scientific and Technical Conference and Exhibition*. October 21–24, 2003; Chisinau, Moldova, 2003, 109–110. (in Russian)

Одержано 27.09.2023