

Дослідження і оптимізація вихрострумове-го вимірювача товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях виробів

М.Д. Кошовий¹, О.В. Заболотний¹, М.В. Цеховський¹, І.І. Кошова¹,
О.М. Костенко²

¹ Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", вул. Чкалова, 17, 61070, Харків, Україна
kafedraari@ukr.net

² Полтавська державна аграрна академія, вул. Сковороди, 1/3, 36003, Полтава, Україна
kostenko@pdaa.com.ua

Анотація

Мета дослідження – підвищення техніко-економічних показників вихрострумове-го перетворювачів товщини діелектричних покриттів.

Удосконалено вихрострумове-го метод вимірювання товщини діелектричних покриттів на металевих поверх-нях виробів і розроблено пристрій, що його реалізує. Основними завданнями вдосконалення вихрострумове-го методу і пристрою, що його реалізує, є підвищення точності вимірювання товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях і зниження впливу зовнішніх магнітних полів. Для досягнення мети використовуються такі методи: оптимального за вартісними витратами планування експерименту, заснованого на застосуванні коду Грея, і диференціального методу визначення первинного інформаційного параметра. Це дозволило скоротити вартіс-ні та часові витрати на дослідження вихрострумове-го перетворювачів, підвищити точність вимірювання товщини діелектричних покриттів на металевих виробках (невизначеність вимірювання не більше 0,3%), забезпечити стійкість і хороші ергономічні показники.

У результаті дослідження отримано математичну модель, яка характеризує залежність невизначеності вимі-рювання від таких чинників, як діаметр і висота осердя, кількість витків, частота напруги живлення. Отримано раціональні значення конструктивних параметрів вихрострумове-го вимірювача та розроблено дослідний зразок.

Ключові слова: вимірювання; вихрострумове-го перетворювач; точність; завадостійкість; ефективність.

Отримано: 14.02.2020

Відредаговано: 26.03.2020

Схвалено до друку: 02.04.2020

Постановка проблеми

Для забезпечення нормальної експлуатації обладнання і матеріалів, захисту їх від зовнішніх факторів і пошкоджень широко використовуються різні діелектричні покриття. При цьому якість ви-робу визначається товщиною і рівномірністю цього покриття. Для виміру цих параметрів використо-вуються товщиноміри покриттів, в основі роботи яких лежать такі методи безконтактного контро-лю: магнітний, інфрачервоного випромінювання, тепловий, акустичний, електроємнісний, індукцій-ний та інші.

Відомі методи вимірювання товщини діелек-тричних покриттів мають ряд недоліків. Основні з них: невизначеність вимірювання від 3 до 10%, недостатня перешкодозахищеність, складність тех-нічної реалізації. Причому на конструкцію і прин-цип роботи суттєво впливають вид діелектрично-го покриття, кількість шарів, допустима товщина

і рівномірність, підхід до покриття з одного або декількох сторін, технологія нанесення.

Від більшості недоліків вільний вихрострумове-го метод вимірювання товщини покриття, за-снований на аналізі взаємодії електромагнітного поля перетворювача з електромагнітним полем ви-хрових струмів, що наводяться в контрольованому виробі [1–5]. Вихрострумове-го методи мають суттєві переваги в порівнянні з іншими: безконтактність, простота конструкції, висока надійність первин-них перетворювачів, можливість роботи в екстре-мальних умовах, підвищена точність вимірювання, обумовлена високою завадостійкістю і відсутністю нижньої межі по частоті.

Основними завданнями вдосконалення вихро-струмове-го методу безконтактного вимірювання товщини діелектричних покриттів є підвищення точності перетворення та зниження впливу зо-внішніх наведень і полів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомі вихрострумові вимірювачі товщини шару покриття [1] мають діапазон 0...10 мм та невизначеність вимірювання 1...10%.

Диференціальний вимірювач товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях [2] має складну конструкцію, обумовлену наявністю двох ідентичних вимірювальних обмоток, розміщених на осерді. Присутність у конструкції таких рухомих елементів, як пружина і феромагнітне осердя, механічно з'єднане з вимірювальним щупом, зменшує надійність цього вимірювача.

У роботі [3] зроблено спробу підвищення точності вимірювання товщини діелектричного покриття на металевих поверхнях виробів, але це досягається за рахунок ускладнення конструкції вимірювача. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки пристрою спрощеної конструкції з підвищеною точністю вимірювання.

Для дослідження вихрострумових перетворювачів товщини діелектричних покриттів з метою покращення їхніх техніко-економічних показників доцільно застосовувати математичні методи теорії планування експериментів [6, 7].

Застосування методу рою часток для оптимізації за вартісними витратами планів експерименту [8] з дослідження таких вимірювачів вимагає розробки алгоритму і програм, що його реалізують, а також не завжди дає можливість отримувати оптимальне рішення. Тому авторами пропонується оптимізація таких планів з використанням коду Грея [9].

Мета статті – поліпшення техніко-економічних показників вихрострумових перетворювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях виробів, а також підвищення ефективності їх дослідження.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- розробити перетворювач, заснований на використанні диференціального методу визначення первинного інформаційного параметра;
- підвищити ефективність експериментальних досліджень, спрямованих на отримання адекватної математичної моделі процесу вимірювання;
- провести експериментальні дослідження, спрямовані на створення математичної моделі перетворювача і визначення раціональних конструктивних параметрів;
- запропонувати і реалізувати шляхи поліпшення показників якості розроблених перетворювачів.

Основний матеріал дослідження

На кафедрі інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут" розроблено пристрій

для вимірювання товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях виробів, заснований на використанні вихрострумових перетворювачів [10].

На рис. 1 зображено конструкцію перетворювача, а на рис. 2 – схему включення елементів перетворювача у вимірювальний ланцюг.

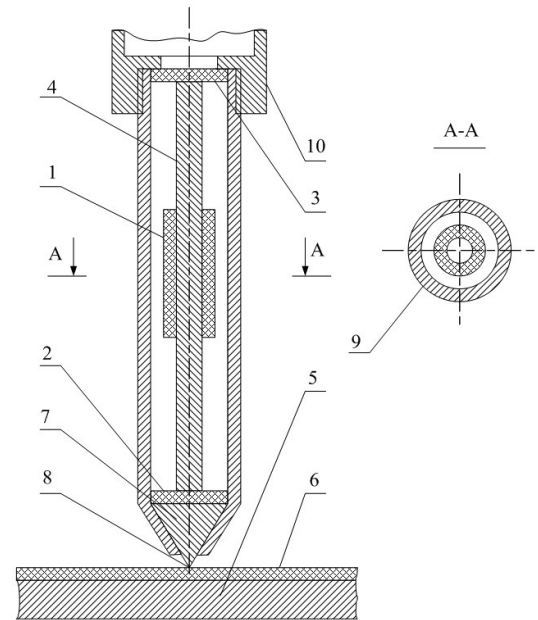


Рис. 1. Конструкція вихрострумового перетворювача товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях виробів

Вихрострумовий перетворювач складається з обмотки збудження 1, виводи $U_{вх}$ якої з'єднані з джерелом 11 напруги змінного струму, і двох зустрічно з'єднаних вимірювальних елементів Холла 2 і 3, виводи $U_{вих}$ яких підключені до блоку обробки інформації 12 (рис. 2). Вимірювальні елементи Холла розміщені з обох кінців стрижневого феритового осердя 4 на однаковій відстані від обмотки збудження 1 (рис. 1). Причому їхні осі чутливості повинні збігатися з віссю осердя і бути спрямовані по нормалі до вимірюваної металевої поверхні 5 з нанесеним на неї діелектричним покриттям 6. Полюсний наконечник 7, виконаний у вигляді зрізаного феромагнітного конуса з кульковою кінцівкою 8, розташований коаксіально з осердям 4. Елементи вихрострумового перетворювача захищають металевим екраном 9 і встановлюють у корпус приладу 10.

При включенні джерела 11 напруги змінного струму по обмотці збудження 1 протікає змінний струм (рис. 2), який викликає в стрижневому феритовому осерді 4 змінний магнітний потік (рис. 1), який наводить ЕРС у вимірювальних елементах Холла 2 і 3. Різницева ЕРС, пропорційна товщині покриття, виникає на виводах $U_{вих}$, підключених до блоку обробки інформації 12 (рис. 2).

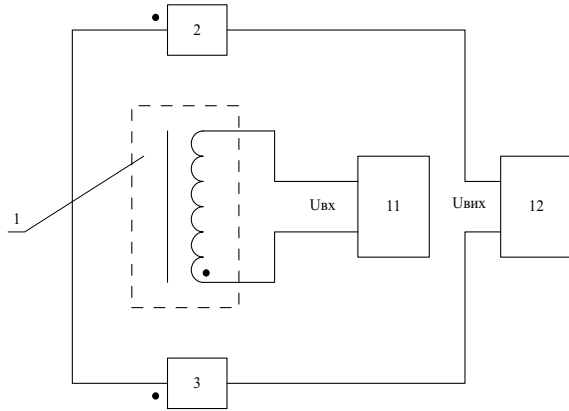


Рис. 2. Схема включення елементів перетворювача у вимірювальний ланцюг

Феромагнітний полюсний наконечник 7 (рис. 1) служить для концентрації магнітного потоку в зоні навколо вимірюваної поверхні 5 з метою зменшення крайового ефекту на точність вимірювання, а кулькова кінцівка 8 запобігає виникненню механічних пошкоджень діелектричного покриття 6 у процесі вимірювання.

Металевий екран 9, який є частиною корпусу приладу 10, захищає чутливі елементи перетворювача від дії зовнішніх магнітних полів.

З метою підвищення ефективності дослідження вихрострумівих перетворювачів товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях виробів доцільно застосування методів планування експериментів.

При дослідженні вихрострумівих перетворювачів як критерій оптимізації було обрано невідомість вимірювання δ , %.

Домінуючими чинниками, що суттєво впливають на цей показник, є: X_1 – діаметр осердя, мм; X_2 – висота осердя, мм; X_3 – кількість витків; X_4 – частота напруги живлення, Гц.

Початковий план повного факторного експерименту (ПФЕ) для дослідження вихрострумівих перетворювача синтезовано класичним методом [6] і наведено у табл. 1.

Для реалізації плану експерименту по кожному фактору було обрано рівні та інтервали варіювання, наведені у табл. 2.

Таблиця 1

Початковий план повного факторного експерименту

Порядковий номер	Фактори			
	X_1	X_2	X_3	X_4
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1

Таблиця 2

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактор	Рівень фактора			Інтервал варіювання ΔX_i	Розмірність
	-1	0	+1		
$X_1 (d)$	3	4,5	6	1,5	мм
$X_2 (h)$	14	19,5	25	5,5	мм
$X_3 (w)$	150	225	300	75	виток
$X_4 (f)$	300	500	700	200	Гц

План і результати дослідження

Порядковий номер	Фактори				$\delta, \%$
	X_4	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	-1	1,75
2	+1	-1	-1	-1	7,60
3	+1	+1	-1	-1	8,77
4	-1	+1	-1	-1	11,11
5	-1	+1	+1	-1	6,43
6	+1	+1	+1	-1	28,07
7	+1	-1	+1	-1	7,01
8	-1	-1	+1	-1	7,01
9	-1	-1	+1	+1	7,01
10	+1	-1	+1	+1	9,35
11	+1	+1	+1	+1	11,69
12	-1	+1	+1	+1	1,16
13	-1	+1	-1	+1	17,54
14	+1	+1	-1	+1	17,54
15	+1	-1	-1	+1	30,99
16	-1	-1	-1	+1	4,09

Для зменшення вартісних і часових витрат на дослідження вихрострумowych перетворювачів пропонується проводити експерименти за планом ПФЕ, побудованим з використанням коду Грея [9] і наведеним у табл. 3.

Порівняння планів експериментів, наведених у табл. 1 і табл. 3, показує, що план, побудований класичним методом (табл. 1), має 26 переходів значень рівнів факторів при його реалізації, а план, синтезований з використанням коду Грея (табл. 3), – 15 переходів. Таким чином, план експерименту, побудований з використанням коду Грея, є оптимальним за кількістю переходів значень рівнів факторів. Отже, він буде оптимальним за вартісними і часовими витратами при його реалізації.

$$\delta = 11,070 + 1,719 X_1 - 1,354 X_2 + 1,351 X_3 + 4,058 X_4 + 0,403 X_1 X_2 - 2,158 X_1 X_3 - 0,329 X_1 X_4 - 3,765 X_2 X_3 + 0,256 X_2 X_4 + 0,914 X_3 X_4 - 0,841 X_1 X_2 X_3 + 4,058 X_1 X_2 X_4 - 2,010 X_1 X_3 X_4 - 2,010 X_2 X_3 X_4 + 0,329 X_1 X_2 X_3 X_4.$$

Аналіз математичної моделі показує, що невизначеність вимірювання товщини покриття вихрострумowymi перетворювачами буде зменшуватися зі зменшенням таких параметрів, як діаметр осердя, кількість витків, частота напруги живлення, а також зі збільшенням висоти осердя.

В результаті оптимізації градієнтним методом [6] із використанням математичної моделі отримано раціональні значення конструктивних параметрів:

$$d = 3,0 \text{ мм}; h = 16,7 \text{ мм}; \\ W = 217 \text{ витків}; f = 180 \text{ Гц}.$$

На основі виконаних досліджень розроблено дослідний зразок вихрострумowego вимірювача

Крім того, для реалізації плану експерименту, побудованого класичним методом, необхідно 8 зразків вихрострумowych перетворювачів. Щоб реалізувати 8 дослідів (1–8) плану експерименту, синтезованого з використанням коду Грея, досить чотирьох дослідних зразків вихрострумowych перетворювачів. А для проведення решти 8 дослідів (9–16) необхідно на цих 4 дослідних зразках збільшити число витків до 300 на кожному, тобто домотати по 150 витків. І в цьому випадку ми також маємо вираш за вартісними і часовими витратами.

Реалізувавши експеримент за планом ПФЕ, побудованим з використанням коду Грея (див. табл. 3), отримано математичну модель вихрострумowych перетворювачів у перетворених змінних:

товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях, який забезпечує підвищену точність (невизначеність вимірювання 0,3%) і має просту конструкцію. Отримані раціональні конструктивні параметри вихрострумowego перетворювача можна використовувати при проектуванні засобів контролю товщини діелектричних покриттів і перспективних пристроїв для автоматизованих систем управління процесом нанесення покриттів.

Висновки

1. Удосконалено вихрострумовой метод вимірювання товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях виробів за рахунок: вико-

ристання способу установки обмотки збудження паралельно електропровідній поверхні виробу і екранування вимірювача; використання удосконаленого накладного перетворювача і цифрової обробки сигналів; використання способу вимірювання із застосуванням двох вимірювальних елементів Холла, з'єднаних диференціально і розташованих по обидві сторони осердя.

2. На основі цього методу розроблено вихрострумний вимірювач, який дозволяє з високою точністю (невизначеність не більше 0,3%) вимірювати товщину діелектричних покриттів на металевих

вих виробках, забезпечувати перешкодозахищеність і підвищувати ергономічні показники.

3. Розроблено методику підвищення ефективності експериментальних досліджень вихрострумних вимірювачів, що дозволяє скоротити вартісні й часові витрати на їх дослідження.

4. Розроблений вихрострумний перетворювач може знайти широке застосування як індивідуальний пристрій для вимірювання товщини діелектричного покриття на металевих поверхнях і в автоматизованих системах контролю та управління процесами нанесення покриттів.

Исследование и оптимизация вихретокового преобразователя толщины диэлектрических покрытий на металлических поверхностях изделий

Н.Д. Кошевой¹, А.В. Заболотный¹, М.В. Цеховской¹, И.И. Кошова¹,
Е.М. Костенко²

¹ Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", ул. Чкалова, 17, 61070, Харьков, Украина
kafedraapi@ukr.net

² Полтавская государственная аграрная академия, ул. Сквороды, 1/3, 36003, Полтава, Украина
kostenko@pdaa.com.ua

Аннотация

Усовершенствован вихретоковый метод измерения толщины диэлектрических покрытий на металлических поверхностях изделий и разработано устройство, его реализующее. Основными задачами усовершенствования вихретокового метода и реализующего устройства являются повышение точности измерения толщины диэлектрических покрытий на металлических поверхностях и снижение влияния внешних магнитных полей. Для достижения цели используются следующие методы: оптимального по стоимостным затратам планирования эксперимента, основанного на применении кода Грея, и дифференциального метода определения первичного информационного параметра. Это позволило сократить стоимостные и временные затраты на исследование вихретоковых преобразователей, повысить точность измерения толщины диэлектрических покрытий на металлических изделиях (погрешность не более 0,3%), обеспечить помехоустойчивость и хорошие эргономические показатели.

В результате исследования получена математическая модель, которая характеризует зависимость погрешности измерения от таких факторов, как диаметр и высота сердечника, количество витков, частота напряжения питания. Получены рациональные значения конструктивных параметров вихретокового измерителя и разработан опытный образец.

Ключевые слова: измерение; вихретоковый преобразователь; точность; помехоустойчивость; эффективность.

Research and optimization of the eddy current transducer of dielectric coatings' thickness on metal surfaces of products

M. Koshevoy¹, O. Zabolotnyi¹, M. Tsekhovskiy¹, I. Koshevaya¹,
O. Kostenko²

¹ National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Chkalova Str., 17, 61070, Kharkiv, Ukraine
kafedraapi@ukr.net

² Poltava State Agrarian Academy, Skovorody Str., 1/3, 36003, Poltava, Ukraine
kostenko@pdaa.com.ua

Abstract

Main purpose of the research is to increase the technical and economic performance of eddy current transducers of the thickness of dielectric coatings.

Eddy current method of dielectric coatings' thickness measurement on metallic surfaces was improved and appropriate measuring instrument was developed. Basic task of eddy current method and eddy current measuring instrument improvement was the accuracy increase of dielectric coatings' thickness measurement on metallic surfaces and reduction of the influence of external magnetic fields. For this reason, during the process of research relative error of dielectric coatings' thickness measurement δ was chosen as an optimization criterion. List of pre-potent factors that make significant influence on the accuracy of dielectric coatings' thickness measurement includes sensor's oxide core diameter X_1 , mm; oxide core's height X_2 , mm; number of turns in the energizing coil X_3 , frequency of energizing coil supply voltage X_4 , Hz.

Mathematical methods of experiment planning theory were used to research eddy current transducers measuring dielectric coatings' thickness following the task of increasing their technical and economic performance. Among them the cost-optimal planning of the experiment, based on the use of Gray code, and the differential method of determining the primary information parameter.

The analysis of different experiment plans showed that the plan built in a traditional way has 26 transitions of different factor levels during the process of its realization, and a plan using Grey code has only 15 transitions. It makes possible to say that the new plan of experiment, built on using Grey code, has optimal number of transitions for mentioned list of factors. It makes this plan optimal taking into account cost and time expenses.

Besides, to carry out the traditional plan of experiment, it was necessary to use eight prototype products of eddy current transducers. To perform eight experiments using plan based on Grey code we need only four prototype products of eddy current transducers.

Applying full factor experiment, built on using Grey code, mathematical model for eddy current measuring transducers was received with transformed variables.

Fulfilled experimental researches allowed to develop a prototype product of eddy current transducer of dielectric coatings' thickness that provides good accuracy (relative error of thickness is not more than 0.3%) with simple design.

Keywords: measurement; eddy current transducer; accuracy; noise immunity; effectiveness.

Список літератури

1. Поліщук Є.С. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник. За ред. Є.С. Поліщука. Львів: Бескид Біт, 2003. 544 с.
2. Поліщук Є.С. та ін. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: підручник. За ред. Є.С. Поліщука. Львів: Бескид Біт, 2008. 618 с.
3. Cehovski M.V. Design of the thickness meters for dielectric coating. *Telecommunications and radio engineering*, 2003, vol. 59, no. 7–9, pp. 172–176. doi: 10.1615/TelecomRadEng/V59.i7-9.140
4. Galchenko V.Ya, Yakimov A.N., Ostapushchenko D.L. Solution of the inverse problem of creating a uniform magnetic field in coercimeters with partially closed magnetic systems. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47, issue 5, pp. 3–18.
5. Halchenko V.Ya, Trembovetska R.V., Tychkov V.V. Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 2, pp. 28–38. doi: 10.20998/2074-272X.2019.2.05
6. Адлер Ю.П., Маркова Е.М., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий (программное введение в планирование эксперимента). Москва: Наука, 1971. 283 с.
7. Koshevoy N.D., Kostenko E.M., Beliaieva A.A. Comparative analysis of optimization methods in the investigation of a weighmeasuring system and termoregulator. *Radio electronics, computer science, control*, 2018, no. 4, pp. 179–187. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-4-17>
8. Koshevoy N.D., Beliaieva A.A. Application particle swarm algorithm to minimize the cost of conducting multivariate experiment. *Radio electronics, computer science, control*, 2018, no. 1, pp. 41–49. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-5>
9. Koshevoy N.D., Kostenko E.M., Pavlyk A.V., Koshevaya I.I., Rozhnova T.G. Research of multiple plans in multi-factor experiments with a minimum number of transitions of levels of factors. *Radio electronics, computer science, control*, 2019, no. 2, pp. 53–59. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-2-6>
10. Вихрострумний перетворювач: пат. 75684 Україна, МПК6 G01B 7/02. № 2004021056; заявл. 13.02.04; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.

References

1. Polishhuk Ye.S. (Ed.) et al. Metrolohiia ta vymiriuvalna tekhnika: pidruchnyk [Metrology and instrumentation technology: a textbook]. Lviv, Beskyd Bit Publ., 2003. 544 p. (in Ukrainian).
2. Polishhuk Ye.S. (Ed.) et al. Zasoby ta metody vymiriuvan neelektrychnykh velychyn: pidruchnyk [Non electric quantities means and methods of measurement: a textbook]. Lviv, Beskyd Bit Publ., 2008. 618 p. (in Ukrainian).
3. Cehovski M.V. Design of the thickness meters for dielectric coating. *Telecommunications and radio engineering*, 2003, vol. 59, no. 7–9, pp. 172–176. doi: 10.1615/TelecomRadEng/V59.i7-9.140
4. Galchenko V.Ya, Yakimov A.N., Ostapushchenko D.L. Solution of the inverse problem of creating a uniform magnetic field in coercimeters with partially closed magnetic systems. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47(5), pp. 3–18.
5. Halchenko V.Ya, Trembovetska R.V., Tychkov V.V. Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric addy current probe. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 2, pp. 28–38. doi: 10.20998/2074-272X.2019.2.05
6. Adler Yu.P., Markova E.M., Granovskiy Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyh uslovij (programmnoe vvedenie v planirovanie eksperimenta) [Experiment planning when searching optimal conditions (program introduction into experiment planning)]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 283 p. (in Russian).
7. Koshevoy N.D., Kostenko E.M., Beliaieva A.A. Comparative analysis of optimization methods in the investigation of a weighmeasuring system and termoregulator. *Radio electronics, computer science, control*, 2018, no. 4, pp. 179–187. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-4-17>
8. Koshevoy N.D., Beliaieva A.A. Application particle swarm algorithm to minimize the cost of conducting multivariate experiment. *Radio electronics, computer science, control*, 2018, no. 1, pp. 41–49. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-5>
9. Koshevoy N.D., Kostenko E.M., Pavlyk A.V., Koshevaya I.I., Rozhnova T.G. Research of multiple plans in multi-factor experiments with a minimum number of transitions of levels of factors. *Radio electronics, computer science, control*, 2019, no. 2, pp. 53–59. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-2-6>
10. Vykhrstromovy peretvoriuvach [Eddy current transducer]. Patent UA, 75684, MPK6 G01B 7/02, no. 2004021056, Publ. 15.05.2006, Byuleten no. 5 (in Ukrainian).