

Дослідження і удосконалення вихрострумових перетворювачів для засобів контролю товщини діелектричних покриттів

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»

Вирішено актуальну науково-практичну задачу вдосконалення вихрострумових перетворювачів для засобів контролю товщини діелектричних покриттів на металевих поверхнях виробів. Показано доцільність застосування методу планування експерименту при отриманні математичних моделей вихрострумових перетворювачів, що дало змогу підвищити їхні техніко-економічні показники. Розроблено засоби контролю якості покриттів і системи для проведення багатофакторного експерименту, які дозволяють автоматизувати процеси визначення якості покриттів і реалізації планів багатофакторного експерименту.

Ключові слова: перетворювач, товщина, план, експеримент, модель, параметр

Постановка проблеми. Відомі методи безконтактного перетворення товщини діелектричних покриттів мають безліч недоліків, які не дозволяють створювати прилади з високими техніко-економічними показниками. Сучасні засоби безконтактного перетворення товщини діелектричних покриттів дозволяють перетворювати вказаний параметр з відносною похибкою від 3 до 10%, мають недостатню перешкодостійкість і складність технічної реалізації.

Для поліпшення техніко-економічних показників цих засобів необхідно вирішити такі задачі:

- дослідити вихрострумовий метод, як найбільш вільний від більшості недоліків, що є характерними при перетворенні товщини діелектричних покриттів на металевих виробках;
- провести експериментальні дослідження, що спрямовані на отримання адекватних математичних моделей вихрострумових перетворювачів і раціональних конструктивних параметрів;
- запропонувати шляхи підвищення техніко-економічних показників перетворювачів, розробити засоби контролю якості покриттів і системи для проведення багатофакторного експерименту.

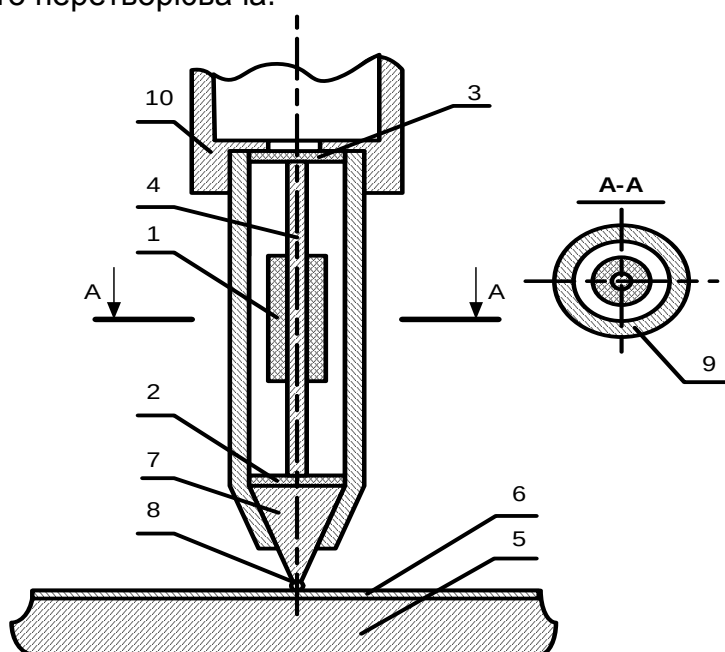
Аналіз останніх досліджень і публікацій. При створенні нових сучасних пристроїв, що реалізують вихрострумовий метод перетворення товщини діелектричних покриттів, широко застосовують математичне моделювання. Так, у роботі [1] наведені методи побудови математичних моделей, що ґрунтуються на вирішенні рівнянь Максвелла, перетворених для гармонічного квазістатичного стану. В роботі [2] наведено алгоритм створення математичних моделей із застосуванням еквівалентних схем, який базується на побудові схем заміщення взаємодії магнітного ланцюга перетворювача з об'єктом, що досліджується. Відомим є також метод застосування комбінацій функцій Неймана і Бесселя, що описаний в роботі [3], який оснований на контролі прирощення $\epsilon \cdot r \cdot c$ під дією зміни електропровідності й магнітного проникнення.

Спільними недоліками існуючих класичних методологій побудови математичних моделей вихрострумових перетворювачів є складність систем алгебричних рівнянь, вирішення яких можливе лише з численними допущеннями та спрощеннями, що призводить до появи суттєвих похибок. Це дає змогу зробити висновок про доцільність застосування експериментально-статистичних методів для дослідження вихрострумових перетворювачів.

Мета роботи: отримати адекватні математичні моделі та раціональні конструктивні параметри вихрострумових перетворювачів; запропонувати шляхи підвищення техніко-економічних показників перетворювачів; розробити засоби контролю якості покриттів і системи для проведення багатофакторного експерименту.

Основні результати досліджень. Аналіз існуючих методів і засобів для перетворення товщини діелектричних покриттів на металевих виробах показав, що для вирішення вказаної задачі найбільш доцільно застосовувати вихрострумовий метод безконтактного контролю. Вихрострумові методи (ВСМ) мають істотні переваги в порівнянні з іншими методами: безконтактність, простота конструкції й висока надійність первинних перетворювачів, слабка залежність результатів перетворення від фізичного стану середовища, здатність працювати в екстремальних умовах. Вихрострумовий метод є достатньо перешкодостійким і не має нижньої межі за частотою. Але до недоліків ВСМ можна віднести недостатню чутливість і складність фокусування силових ліній магнітного поля на малих площинах об'єкта, що контролюється.

Для усунення вказаних недоліків пропонується удосконалений вихрострумовий метод перетворення діелектричних покриттів на металевих поверхнях виробів, який базується на застосуванні способу установа обмотки збудження перетворювача паралельно електропровідній поверхні виробу, екрануванні перетворювача та застосуванні удосконаленого накладного вихрострумового перетворювача, який побудовано з використанням двох вимірювальних елементів Холла, з'єднаних диференціально й розташованих по обидві сторони осердя. На рисунку показано конструкцію удосконаленого вихрострумового перетворювача.



Конструкція вихрострумового перетворювача

Вихрострумовий перетворювач [4] складається з обмотки збудження 1, виводи якої підключені до джерела напруги змінного струму, і двох вимірювальних елементів Холла 2 і 3, з'єднаних диференціально, виводи яких підключені до блока обробки інформації. Вимірювальні елементи Холла 2 і 3 розміщені з обох кінців стрижневого феритового осердя 4 і розташовані на однаковій відстані від

обмотки збудження 1 так, щоб їхня вісь чутливості була спрямована по нормалі до металевої поверхні 5 із нанесеним на неї діелектричним покриттям 6. Коаксіально з осердям 4 розташовано полюсний наконечник 7, виконаний у вигляді усіченого феромагнітного конуса з кульовим наконечником 8. Вихрострумний перетворювач розміщують у металевому екрані 9 і встановлюють безпосередньо в корпус приладу 10.

Застосування удосконаленого вихрострумного методу та перетворювача, що його реалізує, дає можливість швидко й з великою точністю перетворювати товщину діелектричних покриттів на металевих виробах, забезпечувати перешкодостійкість, підвищити чутливість та ергономічні показники.

Слід зазначити, що визначення конструктивних параметрів складових компонентів запропонованого вихрострумного перетворювача є вельми складною задачею. Це зумовлено істотним впливом зміни його конструктивних параметрів на показники точності, чутливості та масогабаритні показники. Для визначення оптимальних значень конструктивних параметрів перетворювача, що приведуть до створення приладу, який буде відповідати заданим техніко-економічним показникам, використовують математичне моделювання. Задачею математичного моделювання є перехід від фізичних процесів, що відбуваються у середовищі «магнітна система перетворювача – об'єкт контролю», до систем алгебричних рівнянь, які описують ці процеси. У роботах [1–3] детально наведені методології побудови математичних моделей вихрострумних перетворювачів, але, як було сказано вище, застосування таких підходів не є ефективним. Тому запропоновано застосувати експериментально-статистичні методи для дослідження вихрострумних перетворювачів із залученням методу планування експерименту.

Як критерії оптимізації були вибрані такі техніко-економічні показники перетворювача: похибка виміру δ , %; чутливість S , мВ/мм; енергоспоживання P , мВт; максимальна межа виміру H_{max} , мм; маса m , г.

Факторами, що впливають на ці показники, були вибрані: x_1 – діаметр d осердя, мм; x_2 – висота h осердя, мм; x_3 – кількість витків W ; x_4 – частота f напруги живлення, Гц. Для реалізації факторного експерименту були вибрані рівні й інтервали варіювання за кожним із факторів (табл. 1).

Таблиця 1

Рівні й інтервали варіювання факторів

Фактори	Рівні факторів			Інтервали варіювання	Розмірність
	–	0	+		
$x_1(d)$	3	4,5	6	1,5	мм
$x_2(h)$	14	19,5	25	5,5	мм
$x_3(W)$	150	225	300	75	–
$x_4(f)$	300	500	700	200	Гц

Метою експериментального дослідження вихрострумного перетворювача є одержання математичних моделей, що характеризують залежність окремих його параметрів X_i з показниками якості y :

$$y(X_i, X_j, X_l, X_m) = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i X_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^4 b_{ij} X_i X_j + \sum_{\substack{i,j,l=1 \\ i < j < l}}^4 b_{ijl} X_i X_j X_l + b_{ijlm} X_i X_j X_l X_m,$$

де y – показник якості (δ, S, P, H_{max}, m);

$b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijl}, b_{ijlm}$ – коефіцієнти неповної квадратичної моделі;

X_i, X_j, X_l, X_m – фактори, що впливають на показник якості.

Отримані результати дають можливість:

1) вивчити вплив домінуючих факторів на перераховані показники якості й розташувати їх у ряд за ступенем впливу;

2) розробити заходи, спрямовані на поліпшення техніко-економічних показників вихрострумового перетворювача;

3) визначити раціональні конструктивні параметри вихрострумових перетворювачів.

При обробленні результатів повного факторного експерименту з використанням пакета прикладних програм щодо автоматизації планування експерименту [5] отримані статичні математичні моделі, що описують залежність техніко-економічних показників вихрострумового перетворювача (δ, S, P, H_{max}, m) від його конструктивних параметрів (X_1, X_2, X_3, X_4). Значення коефіцієнтів математичних моделей наведені в табл. 2. Незначущі коефіцієнти позначені «—».

Таблица 2

Значення коефіцієнтів математичних моделей для показників якості

Позначення коефіцієнтів	Показники якості				
	δ	S	P	m	H_{max}
b_0	11,070	89,375	402,125	1,899	2,281
b_1	1,719	29,375	-19,313	0,996	0,619
b_2	-1,354	-13,125	-3,188	0,441	0,831
b_3	1,351	26,875	-31,500	0,106	0,144
b_4	4,058	-3,125	-7,625	0,000	-0,094
b_{12}	0,403	6,875	-1,375	0,279	0,394
b_{13}	-2,158	16,875	-3,188	-	0,106
b_{14}	-0,329	-15,625	-0,563	0,000	-0,081
b_{23}	-3,765	-	1,813	-	-0,181
b_{24}	0,256	-5,625	-1,438	0,000	-0,043
b_{34}	0,914	9,375	-3,625	0,000	0,144
b_{123}	-0,841	19,375	1,625	-	0,206
b_{124}	4,058	11,875	-0,625	0,000	-
b_{134}	-2,010	-3,125	-0,563	0,000	-0,069
b_{234}	-2,010	-18,125	-	0,000	0,119
b_{1234}	0,329	-	-	0,000	-0,069

Проведені дослідження дозволили описати механізм явищ, що відбуваються у вихрострумовому перетворювачі, виявити ступінь впливу окремих конструктивних параметрів, розкрити можливості поліпшення техніко-економічних показників перетворювача, а також одержати певну інформацію для здійснення даної можливості.

Для поліпшення техніко-економічних показників вихрострумових перетворювачів необхідно виконати ряд заходів, розглянутих нижче.

У результаті аналізу експериментальних даних визначені раціональні параметри пристрою: $d = 6$ мм; $h = 25$ мм; $W = 300$ витків; $f = 300$ Гц. При цих параметрах перетворювача похибка вимірювань є мінімальною ($\delta = 1,16\%$), чутливість – максимальна ($S = 200$ мВ/мм), максимальна межа виміру $H_{max} = 4,5$ мм, енергоспоживання близьке до мінімального ($P = 361$ мВт), однак маса магнітної системи є максимальною ($m = 3,74$ г).

Для подальшої оптимізації вихрострумового перетворювача визначені шляхи поліпшення техніко-економічних показників, виходячи з інтерпретації коефіцієнтів математичних моделей:

- зменшення похибки перетворювача можливо шляхом зменшення діаметра d осердя, числа витків W і частоти f напруги живлення, а також збільшення його висоти h ;
- збільшення чутливості вихрострумового перетворювача можливо за допомогою збільшення таких параметрів, як d , W , і зменшення h , f ;
- зменшення маси перетворювача досягається шляхом зменшення діаметра d , висоти h й кількості витків W ;
- збільшення межі виміру перетворювача досягається за рахунок збільшення d , h , W і зменшення f ;
- зменшення енергоспоживання вихрострумовим перетворювачем можливо шляхом збільшення факторів d , h , W і f .

Як приклад запропоновано оптимізацію вихрострумового перетворювача за критерієм мінімуму маси.

Для критерію оптимізації m математична модель у натуральних значеннях факторів має такий вигляд:

$$m = -0,0083 + 0,0053d - 0,0718h + 0,0014W + 0,0338dh.$$

Оптимізацію за даним критерієм виконували методом найшвидшого спуску. Техніко-економічні показники δ, S, P, H_{max} виступали як обмеження. В результаті оптимізації отримані такі раціональні значення конструктивних параметрів:

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

При цьому значення $X_4(f)$ визначено за математичною моделлю

$\delta = F(X_1, X_2, X_3, X_4)$ для $X_1 = -1$, $X_2 = -0,51$, $X_3 = -0,11$, які відповідають натуральним значенням факторів $d = 3,0$ мм; $h = 16,7$ мм; $W = 217$ витків. У цьому випадку для похибки $\delta = 0,3\%$ $X_4 = -1,6$ або $f = 180$ Гц.

Обмеження S, P, H_{max} для цих значень факторів визначені за відповідними математичними моделями, коефіцієнти яких наведені в табл. 2.

При експериментальному дослідженні дослідного зразка з раціональними конструктивними параметрами ($d = 3,0$ мм; $h = 16,7$ мм; $W = 217$ витків; $f = 180$ Гц) отримані такі вихідні характеристики:

$$m = 0,84 \text{ г}; \delta = 0,29\%; S = 50 \text{ мВ/мм}; P = 375,5 \text{ мВт}; H_{\max} = 1,5 \text{ мм}.$$

Показники якості дослідного зразка вихрострумowego перетворювача з раціональними конструктивними параметрами з достатньою точністю збігаються з показниками, які визначені при оптимізації пристрою за математичними моделями. А це, у свою чергу, підтверджує адекватність математичних моделей і правильність рішення оптимізаційної задачі.

Вихрострумовой перетворювач із параметрами, отриманими при оптимізації за математичними моделями, дає вигоду за точністю майже в 4 рази, а за масою – майже в 4,5 рази при деякому погіршенні таких показників, як S, P і $H_{\max}$.

Таким самим чином можна виконати оптимізацію за кожним із критеріїв $\delta, S, P, H_{\max}$, розглядаючи інші як обмеження. При цьому якщо для перетворювача важлива висока точність вимірювань, то оптимізацію проводять за критерієм δ . Якщо потрібно забезпечити економію енергоспоживання перетворювачем, то оптимізацію доцільно здійснювати за критерієм P . Для підвищення чутливості перетворювача варто виконувати оптимізацію за критерієм S , а для розширення діапазону вимірювань товщини покриття – за критерієм $H_{\max}$.

Таким чином, однокритеріальну оптимізацію проводять залежно від вимог, які ставлять при виборі вихрострумowego перетворювача.

Для підвищення ефективності досліджень велике значення має розроблення стратегії оптимального планування експерименту. На вартість реалізації експерименту суттєво впливає порядок чергування рівнів зміни факторів, тобто порядок виконання дослідів у матриці планування, але відомі методи побудови планів багатфакторного експерименту цей факт не враховують. Вибір оптимального плану багатфакторного експерименту є комбінаторною задачею і відрізняється високою трудомісткістю при великому числі змінних.

Побудова оптимальних за вартістю планів багатфакторного експерименту є комбінаторною задачею, основою на генерації та аналізі варіантів цих планів. Із збільшенням кількості факторів і числа дослідів трудомісткість вирішення задачі також значно зростає. Для автоматизації процесу побудови оптимальних планів багатфакторного експерименту розроблено спеціальне програмне забезпечення [6], яке, на відміну від існуючих програм (наприклад – STATISTIKA, SPSS), урахує нерівноцінність дослідів і вартість змін значень рівнів факторів при виконанні наступного дослідів і дозволяє формувати оптимальні за вартістю комбінаторні плани експериментів. Розроблене спеціальне програмне забезпечення дозволить автоматизувати процес вирішення задачі, скоротити терміни розроблення оптимальних за вартістю планів, підвищити достовірність отриманих результатів, що в кінцевому підсумку приведе до скорочення часу і вартості експерименту.

Для проведення багатфакторного експерименту розроблено автоматизовану систему [7]. В основі роботи системи лежить використання оптимальних комбінаторних планів. За допомогою даної системи експериментатор має можливість вибирати різні варіанти проведення експерименту і послідовно генерувати відповідні значення рівнів факторів.

Для автоматизації процесу контролю параметрів технологічного процесу розроблено програмно-апаратний комплекс із розвинутою системою інтерфейсу. Апаратні засоби включають автоматизовану систему контролю [8], автоматизовану систему контролю параметрів [9] і автоматизовану систему

контролю якості покриття [10]. Апаратний комплекс виконує вимірювання товщини покриття в контрольних точках, визначає значення середньої товщини покриття й контрольні точки, в яких значення товщини відрізняються від допустимих.

Розроблено програмне забезпечення для параметричного контролю технологічних процесів [11], яке має ширші функціональні можливості в порівнянні з аналогічними розробками, бо дозволяє вводити вхідні дані, автоматизувати процес контролю параметрів технологічних процесів, протоколювати результати контролю, вчасно виявляти відхилення від заданих допусків і вже на ранньому етапі виявити брак, не чекаючи закінчення повного циклу виготовлення виробу.

Висновки. Застосування удосконаленого вихрострумowego методу та перетворювача, що його реалізує, дає можливість швидко й з великою точністю перетворювати товщину діелектричних покриттів на металевих виробах, забезпечувати перешкодостійкість, підвищити чутливість та ергономічні показники. Проведені дослідження дозволили описати механізм явищ, що відбуваються у вихрострумовому перетворювачі, виявити ступінь впливу окремих конструктивних параметрів, розкрити можливості поліпшення техніко-економічних показників перетворювача, а також одержати певну інформацію для здійснення даної можливості.

Список літератури

1. Дорофеев А.Л. Электромагнитная дефектоскопия. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.Л. Дорофеев, Ю.Г. Казамапов. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с.
2. Синеглазов В.М. Математическое моделирование процесса вихретокового контроля / В.М. Синеглазов, В.Г. Вовк // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – № 4. – С. 26-29.
3. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы / Ю.В. Афанасьев. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 188 с.
4. Пат. 75684 України, МПК G01B7/02. Вихрострумовий перетворювач / Цеховський М.В., Кошовий М.Д., Гаєвий В.О.; Заявник і патентовласник Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – № 2004021056; заявл. 13.02.2004; опубл. 15.05.2006; Бюл. №5. – 2 с.
5. Кошевой Н.Д. Разработка программного обеспечения по автоматизации планирования эксперимента / Н.Д. Кошевой // Авиационно-космическая техника и технология: труды Харьк. авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского за 1997 г. – Х.: ХАИ, 1998. – С. 242-244.
6. Комп'ютерна програма "Програма синтезу планів багатofакторного експерименту" / М.Д. Кошовий, С.Г. Бестань, Г.В. Дергачова, М.В. Цеховський, В.П. Сіроклин // Свідоцтво про реєстр. авторського права на твір № 18150. – Зареєстр. у Держ. департ. інтелектуальної власності М-ва освіти і науки України 03.10.2006 р.
7. Пат. № 18907 України, МПК G06F17/00. Автоматизована система для проведення багатofакторного експерименту / Кошовий М.Д., Дергачова Г.В., Світличний О.В., Цеховський М.В., Сіроклин В.П.; Заявник і патентовласник Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – № 200606727; заявл. 16.06.2006; опубл. 15.11.2006; Бюл. № 11. – 3 с.
8. Пат. № 21000 України, МПК G06F 11/30. Автоматизована система контролю / Кошовий М.Д., Дергачова Г.В., Цеховський М.В., Сіроклин В.П.; Заявник і патентовласник Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – № 200609956; заявл. 18.09.2006.; опубл. 15.02.2006; Бюл. № 2. – 3 с.

9. Пат. № 21379 України, МПК G 06 F 11/30. Автоматизована система параметричного контролю / Кошовий М.Д., Дергачова Г.В., Цеховський М.В., Сіроклин В.П., Троненко Д.С.; Заявник і патентовласник Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – № 200609963; заявл. 18.09.2006; опубл. 15.03.2007; Бюл. № 3. – 3 с.

10. Пат. № 21001 України, МПК G06F 11/30, G01B 7/02. Автоматизована система контролю якості покриття / Кошовий М.Д., Дергачов В.А., Цеховський М.В., Сіроклин В.П., Троненко Д.С.; Заявник і патентовласник Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – № 200609957; заявл. 18.09.2006; опубл. 15.02.2007; Бюл. № 2. – 4 с.

11. Комп'ютерна програма "Програмне забезпечення автоматизованої системи контролю" / М.Д. Кошовий, Г.В. Павлик, М.В. Цеховський, В.П. Сіроклин // Свідоцтво про реєстр. авторського права на твір № 20591. – Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності М-ва освіти і науки України 21.05.2007 р.

Рецензент: д.т.н., проф., зав. каф. О.Ю. Соколов, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків

Поступила в редакцію 15.09.09

Исследование и усовершенствование вихретоковых преобразователей для средств контроля толщины диэлектрических покрытий

Решена актуальная научно-практическая задача усовершенствования вихретоковых преобразователей для средств контроля толщины диэлектрических покрытий на металлических поверхностях изделий. Показана целесообразность применения метода планирования эксперимента при получении математических моделей вихретоковых преобразователей, что дало возможность повысить их технико-экономические показатели. Разработаны средства контроля качества покрытий и системы для проведения многофакторного эксперимента, которые позволили автоматизировать процессы определения качества покрытий и реализации планов многофакторного эксперимента.

Ключевые слова: преобразователь, толщина, план, эксперимент, модель, параметр

Research and improvement vortex-current converters for control devices of a thickness of dielectric coverings

The actual scientifically-practical problem of improvement vortex-current converters for control devices of a thickness of dielectric coverings on metal surfaces of products is solved. The expediency of application of a method of planning of experiment is shown at reception of mathematical models vortex-current converters that has given the chance to raise their technical and economic indicators. And system control devices of quality of coverings are developed for carrying out of multifactorial experiment which have allowed to automate processes of definition of quality of coverings and realisation of plans of multifactorial experiment.

Keywords: the converter, thickness, the plan, experiment, model, parameter