

УДК 05.01.02

СЕБКО В.В.<sup>\*</sup>, ЗДОРЕНКО В.Г.<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<sup>\*\*</sup>Київський національний університет технологій та дизайну

**ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЕПЛООВОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО  
ВИХОРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ПЛОСКИМ  
ВИРОБОМ, ЩО НАГРІВАЄТЬСЯ В ПРОЦЕСІ КОНТРОЛЮ**

**Мета.** Стаття присвячена дослідженню теоретичних і практичних завдань визначення похибок функції декількох аргументів, яка пов'язує сигнали теплового трансформаторного вихорострумowego перетворювача (ТВП) з електромагнітними параметрами плоского виробу, що нагрівається в процесі контролю.

**Методика.** На основі загальної теорії похибок вимірювань, зокрема, визначення похибок непрямих вимірювань, а також методів визначення похибок вимірювання аргументів ступеневої функції запропоновано методу визначення похибок сумісних (багатопараметрових) вимірювань відносної магнітної проникності  $\mu_r$ , питомої електричної провідності  $\sigma_r$  та температури  $t$  плоского виробу.

**Результати.** Запропонована методика дозволяє визначити діапазони зміни складових сигналів ТВП, які відповідають межах зміни температури контрольованого виробу.

**Наукова новизна.** Отримала подальший розвиток загальна теорія оцінювання похибок сумісних електромагнітних вимірювань фізико-механічних параметрів плоских виробів, що досліджуються, за рахунок запропонованих у роботі теоретичних положень визначення похибок сумісних багатопараметрових вимірювань відносної магнітної проникності  $\mu_r$ , питомого електричного опору  $\rho_r$  та температури  $t$  плоских виробів при реалізації трипараметрового електромагнітного методу на базі теплового ТВП.

**Практична значимість.** Запропонована методика визначення похибок електромагнітних вимірювань параметрів плоских виробів надає можливість проектування вихорострумowych пристроїв вимірювального контролю плоских виробів широкого асортименту на основі визначення метрологічних характеристик теплових вихорострумowych пристроїв та похибок сумісних вимірювань декількох параметрів виробів плоскої форми.

**Ключові слова:** тепловий трансформаторний вихорострумовой перетворювач, нормовані характеристики перетворювачів, багатопараметровий метод вимірювань, відносні похибки сумісних вимірювань, вірогідність контролю.

**Вступ.** В теперішній час дослідження параметрів металевих виробів плоскої форми представляють суттєвий теоретичний та практичний інтерес, оскільки сталеві пластини являються елементами засобів обладнання машинобудування, приладобудування, з'єднувальних елементів та вузлів обладнання машинобудування, плоских деталей трансформаторів, контакторів, реле, ретортів, теплообмінників, деталей виробів хімічного машинобудування. При цьому, більшість з цих деталей і конструкцій підлягає термообробці [1-6]. Для створення технології раціональної термообробки необхідно безконтактно вимірювати температуру матеріалу, деталі або конструкції з високою точністю [1]. При цьому, терморезистори (металеві та напівпровідникові) не можуть забезпечити необхідну точність під час вимірювання температури безпосередньо плоского виробу, що контролюється. Саме тому найбільш зручним методом є вихорострумовой метод, який надає змогу безконтактного і достатньо точного сумісного одночасного визначення магнітних,

електричних і температурних параметрів плоских виробів одним і тим же тепловим перетворювачем в одній і тій же зоні контролю.

В сучасній літературі відсутній загальний підхід до оцінювання похибок спільних одночасних електромагнітних вимірювань магнітних, електричних і температурних параметрів плоских виробів. На теперішній час, у відповідності з загальною теорією похибок, під час оцінювання метрологічних характеристик вихорострумів засобів неруйнівного контролю (НК) застосовують в основному, методики визначення похибок прямих та непрямих вимірювань [7-12], при цьому, теоретичні положення, які пов'язані з оцінюванням похибок сумісних вимірювань функції багатьох змінних, наприклад функції перетворення, що виражена залежністю нормованих характеристик перетворювачів (ЕРС, фазових кутів зсуву, частот магнітного поля, опору обмоток та інших характеристик електромагнітних перетворювачів) від багатьох параметрів об'єкту контролю (геометричних, електричних, температурних, механічних та інших фізико-механічних характеристик зразків різної форми) потребують подальшого розвитку. На теперішній час практично не розроблено способи визначення метрологічних характеристик теплових вихорострумів багатопараметрових пристроїв із широкими межами виміру, не розглянуті особливості роботи теплових вихорострумів пристроїв з плоскими виробами, що нагріваються у процесі контролю, не встановлено діапазони зміни сигналів теплових вихорострумів багатопараметрових перетворювачів, які відповідають межах зміни фізико-механічних параметрів плоских виробів обладнання машинобудування та приладобудування.

Таким чином, важливою науково-практичною проблемою застосування загальної теорії похибок вимірювань стосовно оцінювання похибок сумісного визначення магнітних, електричних і температурних параметрів плоских виробів при реалізації теплових багатопараметрових вихорострумів методів є удосконалення існуючих методик визначення похибок сумісних вимірювань багатьох параметрів магнітних і немагнітних плоских виробів на базі теплового ТВП та створення нових теоретичних положень для реалізації способів і методик визначення похибок сумісних вимірювань фізико-механічних параметрів досліджуваних зразків плоскої форми. У свою чергу, визначення похибок вимірювань фізико-механічних параметрів об'єктів контролю, надає можливість встановлення раціональних режимів роботи теплових багатопараметрових вихорострумів перетворювачів, а також дозволяє оцінювати якість роботи теплових вихорострумів пристроїв, які здійснюють нагрів виробів в процесі неруйнівного електромагнітного контролю.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є дослідження теоретичних і практичних положень визначення похибок функції багатьох аргументів, яка пов'язує сигнали теплового ТВП з електромагнітними параметрами плоского виробу, що нагрівається в процесі контролю. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Дослідити теоретичні положення оцінювання похибок сумісного визначення магнітних, електричних і температурних параметрів магнітних плоских виробів при реалізації теплових багатопараметрових вихорострумів методів.

2. Навести приклад реалізації запропонованої методики оцінювання похибок сумісних вимірювань відносної магнітної проникності  $\mu_z$ , питомого електричного опору  $\rho_r$  і температури  $t$  плоского сталевих виробу.

**Результати дослідження.** У роботах [1-3] розглянуто два різновиди електромагнітного методу, перший з них засновано на визначенні ЕРС ТВП, яку обумовлено проходженням магнітного потоку безпосередньо у плоскому виробі і фазовий метод, заснований на визначенні фазового кута зсуву цієї ж ЕРС у порівнянні з опорною ЕРС, тобто ЕРС ТВП без виробу [1-3], реалізацію цих методів пов'язано з теорією роботи теплового ТВП. В роботах [1-3] наведено основні співвідношення, які охоплюють відповідні теоретичні положення роботи теплових ТВП з плоскими виробами. Під час проведення дослідження авторами робіт [1-3], було введено нормовані параметри  $K$  і  $K_x$  та встановлено універсальні функції перетворення, тобто залежності параметрів  $K$  і  $K_x$  від фазового кута зсуву  $\varphi$  (фазовий кут зсуву поміж ЕРС  $E_2$ , яка обумовлена проходженням магнітного потоку безпосередньо у виробі, та ЕРС  $E_0$  ТВП, при відсутності пластини у перетворювачі). В роботі [12], розглянуто визначення похибок вимірювань характеристик плоского виробу, при реалізації екстремального електромагнітного методу. Слід визначити, що результати роботи [12] не дають можливості визначення основних шляхів розв'язку загальної проблеми, а представляють собою тільки окремий випадок оцінювання похибок вимірювань параметрів плоских виробів при реалізації екстремальних електромагнітних методів контролю. В роботах [2-4] наведено схеми включення вихорострумів перетворювачів, розглянуто алгоритми вимірювальних і розрахункових процедур визначення сигналів ТВП і електромагнітних параметрів пластин. Нижче з урахуванням основних положень загальної теорії похибок та результатів робіт [1-12], надано методику оцінювання похибок сумісних вимірювань відносної магнітної проникності  $\mu_r$ , питомої електричної провідності  $\sigma_r$  (або питомого електричного опору  $\rho_r$ ) і температури  $t$  магнітної пластини на базі теплового ТВП.

Спочатку за допомогою відомих схем включення ТВП необхідно вимірювати фазовий кут зсуву  $\varphi$  (фазовий метод), після цього застосувавши залежність  $\varphi$  від  $x$ , визначити параметр  $x$ , далі на основі функції  $K=f(x)$  (амплітудний метод), знайти параметр  $K$  та після цього на основі вимірювань  $E_{2t}$  і  $E_0$ , знаючи коефіцієнт заповнення  $\eta$ , знайти електромагнітні параметри пластини  $\mu_{rt}$  і  $\sigma_t$  [2-5]. У відповідності з результатами робіт [1-5] вираз для визначення параметра  $x_t$  має наступний вигляд:

$$x_t = d \sqrt{\mu_0 \mu_{rt} \pi \sigma_t f_t}, \quad (1)$$

де  $d$  – товщина пластини,  $\mu_0$  – магнітна стала,  $f_t$  – частота магнітного поля ТВП [1 -3]. З виразу (1) можливо визначити значення питомої магнітної проникності  $\mu_{rt}$  [2-5]

$$\mu_{rt} = \frac{x_t^2}{\pi d^2 \mu_0 \sigma_t f_t} \quad (2)$$

Знаючи виміряні характеристики теплового ТВП  $E_{2t}$  та  $E_0$ , а також коефіцієнт заповнення  $\eta$ , відносну магнітну проникність  $\mu_{rt}$  знаходять за формулою [2-5]:

$$\mu_{rt} = \frac{E_{2t}}{E_0 \eta K_t} \quad (3)$$

Далі з виразів (2) та (3) знаходимо параметр  $K_t$ , з урахуванням температури плоского виробу

$$K_t = \frac{E_{2t} \pi d^2 \mu_0 \sigma_t f_t}{E_0 \eta x_t^2} \quad (4)$$

При цьому, для підвищення точності вимірювань, необхідно ввести параметр  $K_{xt}$ , який характеризує собою питому нормовану ЕРС ТВП, обумовлену проходженням магнітного потоку, який пронизує одиничну площину зразка, що обмежена класичною глибиною проникнення  $\delta$  магнітного поля у зразок

$$K_{xt} = K_t x_t^2 = \frac{E_{2t} \pi d^2 \mu_0 \sigma_t f_t}{E_0 \eta} \quad (5)$$

Звідси:

$$\eta = hd / h_k d_k \quad (6)$$

де  $d_k$  і  $h_k$  – товщина та ширина каркаса теплового ТВП;  $h$  – ширина пластини.

У відповідності з правилами визначення похибок вимірювання степеневі функції [5-11], маємо

$$\mu_{rt} = E_{2t} d_k h_k E_0^{-1} d^{-1} h^{-1} K_t^{-1} \quad (7)$$

Для визначення відносних похибок сумісних вимірювань  $\gamma_\mu$  і  $\gamma_\sigma$  (для степеневі функції), маємо

$$\gamma_{\mu_r} = \gamma_{E_{2t}} + \gamma_{h_k} + \gamma_{d_k} - \gamma_{E_0} - \gamma_d - \gamma_h - \gamma_{K_t}, \quad (8)$$

де  $\gamma_{E_{2t}}$ ;  $\gamma_{h_k}$ ;  $\gamma_{d_k}$ ;  $\gamma_{E_0}$ ;  $\gamma_d$ ;  $\gamma_h$ ;  $\gamma_{K_t}$  – відносні похибки величин, що вказані відповідними індексами.

При довірчій вірогідності 0,95 з урахуванням [5-11], маємо

$$\gamma_{\mu_r} = 1,1 \sqrt{\gamma_{E_{2t}}^2 + \gamma_{h_k}^2 + \gamma_{d_k}^2 + \gamma_{E_0}^2 + \gamma_d^2 + \gamma_h^2 + \gamma_{K_t}^2} \quad (9)$$

При цьому величину  $\gamma_{K_t}$  можна подати наступним чином

$$\gamma_{K_t} = \frac{\delta K_t}{K_t}, \quad (10)$$

де  $\delta K_t$  – абсолютна похибка визначення параметра  $K_t$ .

На основі функцій перетворення  $K_t = f(\varphi_t)$  та  $K_{xt} = f(\varphi_t)$  вирази для визначення похибок  $\delta K_t$  і  $\delta K_{xt}$  виглядають наступним чином:

$$\delta K_t = \frac{\partial K_t}{\partial \varphi_t} \delta \varphi_t, \quad (11)$$

$$\delta K_{xt} = \frac{\partial K_{xt}}{\partial \varphi_t} \delta \varphi_t \quad (12)$$

де  $\partial K_t / \partial \varphi_t$  і  $\partial K_{xt} / \partial \varphi_t$  – часткові похідні величин  $K_t$  та  $K_{xt}$  по фазовому куту зсуву  $\varphi_t$ ;  $\delta \varphi_t$  – абсолютна похибка вимірювання фазового куту зсуву  $\varphi_t$  фазометром.

Переходячи від абсолютних похибок до відносних, маємо:

$$\gamma_k = \frac{\delta K_t}{K_t} = \frac{\partial K}{\partial \varphi} \frac{\varphi}{K} \frac{\delta \varphi}{\varphi} \quad (13)$$

$$\gamma_{k_x} = \frac{\partial K_x}{\partial \varphi} \frac{\varphi}{K_x} \frac{\delta \varphi}{\varphi} \quad (14)$$

Таким чином при довірчій вірогідності 0,95, маємо

$$\gamma_{\mu_r} = 1,1 \sqrt{\gamma_{E_{2t}}^2 + \gamma_{hk}^2 + \gamma_{dk}^2 + \gamma_{E_0}^2 + \gamma_d^2 + \gamma_h^2 + C_\varphi^2 \gamma_{\varphi_t}^2}, \quad (15)$$

де  $\gamma_{\varphi_t} = \delta \varphi_t / \varphi_t$  - відносна похибка вимірювання фазового кута зсуву  $\varphi_t$ ;  $C_{\varphi_t}$  - коефіцієнт впливу.

$$C_{\varphi_t} = \frac{\partial K_t}{\partial \varphi_t} \frac{\varphi_t}{K_t} \quad (16)$$

В свою чергу, величину  $\gamma_{K_{xt}}$  знаходять використавши залежність  $K_{xt}$  від  $\varphi_t$  [2, 3].

При цьому формула для визначення відносної похибки  $\gamma_{K_{xt}}$  має наступний вигляд:

$$\gamma_{K_{xt}} = \frac{\partial K_{x_t}}{\partial \varphi_t} \frac{\varphi_t}{K_{x_t}} \frac{\delta \varphi_t}{\varphi_t}, \quad (17)$$

де  $\partial K_x / \partial \varphi$  - частинна похідна величини  $K_{xt}$  по фазовому куту зсуву  $\varphi_t$  в робочій точці  $x = x_0$ , яка відповідає умовам  $\varphi = \varphi_0$ ,  $K_{x_t} = K_{x_0}$  [2-5].

Для визначення похибки вимірювання величини  $\sigma_t$ , спочатку необхідно представити функцію визначення  $\sigma_t$  у вигляді степеневі функції

$$\sigma_t = E_0 d h K_{x_t} E_{2t}^{-1} \pi^{-1} \mu_0^{-1} f_t^{-1} d_k^{-1} h_k^{-1} \quad (18)$$

Формула для визначення похибки вимірювань  $\gamma_{\sigma_t}$  має наступний вигляд:

$$\gamma_{\sigma_t} = \gamma_{E_0} + \gamma_d + \gamma_h + \gamma_{K_{x_t}} - \gamma_{E_{2t}} - \gamma_{f_t} - \gamma_{hk} - \gamma_{dk}, \quad (19)$$

де  $\gamma_{f_t}$  - відносна похибка вимірювання частоти магнітного поля теплового ТВП  $f_t$  [12].

При довірчій вірогідності 0,95, формула для визначення відносної похибки  $\gamma_{\sigma_t}$ , має наступний вигляд:

$$\gamma_\sigma = 1,1 \sqrt{\gamma_{E_0}^2 + \gamma_d^2 + \gamma_h^2 + \gamma_{E_{2t}}^2 + \gamma_{f_t}^2 + \gamma_{hk}^2 + \gamma_{dk}^2 + C_\sigma^2 \gamma_\varphi^2}, \quad (20)$$

де  $C_\sigma$  - коефіцієнт впливу.

$$C_\sigma = \frac{\partial K_{x_t}}{\partial \varphi_t} \frac{\varphi_t}{K_{x_t}} \quad (21)$$

Температура плоского виробу визначається за виразом [12]

$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \left( \frac{\rho_t}{\rho_1} - 1 \right) + t_1 \quad (22)$$

де  $\rho_t$  і  $\rho_1$  – питомі електричні опори матеріалу виробу при температурі  $t$  і  $t_1$ ;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору матеріалу пластини [12].

Звідси вираз для визначення відносної похибки вимірювання температури  $\delta t/t$ , можна записати у наступному вигляді:

$$\frac{\delta t}{t} = C_\alpha \frac{\delta \alpha}{\alpha} + C_{t_1} \frac{\delta t_1}{t_1} + C_\rho \frac{\delta \rho_t}{\rho} + C_{\rho_1} \frac{\delta \rho_1}{\rho_1}, \quad (23)$$

де  $\delta \alpha/\alpha$ ,  $\delta t_1/t_1$ ,  $\delta \rho_t/\rho$  – відносні похибки вимірювання  $\alpha$ ,  $t_1$  і  $\rho_t$ ;  $C_\alpha$ ,  $C_{t_1}$ ,  $C_\rho$  і  $C_{\rho_1}$  – коефіцієнти впливу, які визначають у робочій точці  $x = x_0$ .

$$C_\alpha = -\frac{1}{\alpha t} \left( \frac{\rho_t}{\rho_1} - 1 \right); \quad (24)$$

$$C_{t_1} = \frac{\rho_t t_1}{\rho_1 t}; \quad (25)$$

$$C_\rho = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha t} \frac{\rho_t}{\rho_1} \quad (26)$$

$$C_{\rho_1} = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha t} \frac{\rho_t}{\rho_1}. \quad (27)$$

Тоді при довірчій вірогідності 0,95, маємо

$$\frac{\delta t}{t} = 1,1 \sqrt{\left( C_\alpha \frac{\delta \alpha}{\alpha} \right)^2 + \left( C_{t_1} \frac{\delta t_1}{t_1} \right)^2 + \left( C_\rho \frac{\delta \rho_t}{\rho} \right)^2 + \left( C_{\rho_1} \frac{\delta \rho_1}{\rho_1} \right)^2} \quad (28)$$

Результати вимірювань характеристик теплового ТВП згідно зі схемою та алгоритмами, наведеними в роботах [2-4], подано у таблиці. Матеріал пластини - 08X18H10;  $E_0 = 0,803$  В;  $l = 0,15$  м;  $d_k = 0,5$  мм;  $\mu_{r_t} = 3,02$ ;  $\rho_l = 7,408 \cdot 10^{-7}$  Ом·м;  $x_l = 1,902$ ;  $\alpha = 8,344 \cdot 10^{-4}$  1/°С;  $f = 900 \cdot 10^3$  Гц;  $h_k = 5$  мм.

Також у таблиці подані чисельні значення похибок вимірювання відносної магнітної проникності  $\mu_r$ , питомого електричного опору  $\rho_r$  при температурі  $t$  сталеві пластини. При цьому зниження похибок вимірювань фізико-механічних параметрів плоских виробів, надає можливість підвищення інструментальної складової вірогідності контролю  $D_i$  та призводить до підвищення загальної вірогідності контролю

$$D_{\text{заг}} = D_M D_i \quad (29)$$

Згідно з відомою методикою [9], також виконано оцінювання загальної вірогідності контролю  $D_{\text{заг}}$  під час реалізації досліджуваного багатопараметрового вихорострумовевого методу, яка склала  $D_{\text{заг}} = 0,985$ .

Таблиця

**Результати експериментальних досліджень**

$E_{\Sigma t}$ , В	$\varphi_0$ , град.	$E_{2t}$ , В	$X_t$	$\mu_{r_t}$	$\rho_t \cdot 10^{-7}$ , Ом·м	$t$ , °С	$t'$ , °С	$\gamma_{\mu_r}$ , %	$\gamma_t$ , %	$\gamma_\rho$ , %
0,531	6,29	0,083	1,902	3,022	7,410	19,85	20	0,07	-0,75	0,08
0,532	6,39	0,085	1,900	3,029	7,469	29,99	30	0,29	-0,03	0,42

0,534	6,49	0,087	1,887	3,037	7,529	39,90	40	0,56	-0,25	0,73
0,535	6,56	0,088	1,879	3,045	7,590	49,94	50	0,83	-0,12	0,91
0,537	6,66	0,090	1,872	3,053	7,651	59,97	60	1,09	-0,05	1,14
0,538	6,73	0,092	1,864	3,062	7,712	70,02	70	1,39	0,03	1,43
0,540	6,80	0,093	1,856	3,070	7,773	80,02	80	1,66	0,03	1,82
0,541	6,87	0,095	1,849	3,078	7,834	90,07	90	1,92	0,07	2,10
0,543	6,94	0,096	1,842	3,087	7,894	99,93	100	2,22	-0,07	2,41
0,544	7,00	0,098	1,835	3,095	7,955	109,97	110	2,43	-0,027	2,74
0,546	7,07	0,099	1,828	3,103	8,016	120,01	120	2,74	0,01	2,81
0,547	7,14	0,100	1,822	3,112	8,077	130,04	130	3,05	0,03	3,12
0,549	7,20	0,101	1,815	3,120	8,138	140,07	140	3,31	0,05	3,43
0,550	7,23	0,104	1,808	3,129	8,198	149,94	150	3,61	-0,04	3,72

**Висновки.** Досліджено теоретичні положення оцінювання похибок сумісного визначення магнітних, електричних і температурних параметрів магнітних плоских виробів при реалізації теплових багатопараметрових вихорострумових методів, отримано вирази для визначення похибок сумісних вимірювань відносної магнітної проникності  $\mu_r$ , питомої електричної провідності  $\sigma_r$  (або питомого електричного опору  $\rho_r$ ) і температури  $t$  плоских магнітних виробів, які нагріваються у процесі контролю, наведено приклад реалізації запропонованої методики, стосовно сумісних електромагнітних вимірювань параметрів  $\mu_r$ ,  $\rho_r$  і  $t$  плоского сталевго виробу при реалізації теплового трипараметрового електромагнітного методу вимірювального контролю на базі ТВП. Отримано результати оцінювання загальної вірогідності контролю під час реалізації розглянутого в роботі трипараметрового вихорострумового методу вимірювального контролю електромагнітних і температурних параметрів магнітних плоских виробів. Запропонована методика оцінювання похибок сумісних вимірювань дозволяє знайти діапазони зміни сигналів безконтактних теплових ТВП, які відповідають межах зміни фізико-механічних параметрів плоских виробів, здійснювати вибір вимірювальної апаратури, встановити раціональні за похибками і чутливостями режими роботи теплових ТВП та автоматизованих пристроїв, які їх використовують. Перспективи подальших досліджень полягають в створенні автоматизованих систем багатопараметрового вимірювального контролю параметрів магнітних і немагнітних плоских виробів на основі безконтактних теплових ТВП.

#### Список використаних джерел

1. Герасимов В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. / Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
2. Себко В.П. Электромагнитные методы контроля параметров плоских изделий / Себко В.П., Кириченко Р.И., Сиренко Н.Н. // Матеріали науково-технічної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті». – Алушта. – 2001. – № 4. –С. 83-86.
3. Себко В.П. К теории работы трансформаторного электромагнитного преобразователя с плоским проводящим изделием / Себко В.П., Кириченко Р.И. // Технічна електродинаміка. – Київ: Ін-т електродинаміки НАНУ. - 2000. – Тем. випуск, Ч. 1. – С. 93-98.

4. Себко В.В. Вихретоковый многопараметровый метод контроля плоских изделий авиационного оборудования / В.В. Себко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2010. – Вип. №5 (72). – С. 83-89.

5. Себко В.В. Точность индентификации ферромагнитных плоских изделий за счет создания информационной избыточности. / Себко В.В., Питак И.В., Себко В.П., Здоренко В.Г., Защепкина Н.М. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – №.47. – С.133 – 140.

6. Алукер Ш.М. Электрические измерения. / Алукер Ш.М.– Москва. – Изд-во "Колос", 1972. – 347 с.

7. Касандрова О.М. Обработка результатов наблюдений./ Касандрова О.М., Лебедев В.В. – М.: Наука. – 1970. – 104 с.

8. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин./ Левшина Е.С., Новицкий П.В. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

9. Дунаев Б.Б. Точность измерений при контроле качества./Дунаев Б.Б. – К. – Техніка, 1981. – 150 с.

10. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань навч. посіб. / І. С. Кісіль. - Івано-Франківськ : Факел, 2002. – 400 с.

11. Чинков В.М. Основы метрології та вимірювальної техніки / Чинков В.М. /Навчальний посібник. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – 524 с.

12. Себко В.В. Расчет относительных погрешностей измерения магнитных, электрических и температурных параметров плоского ферромагнитного изделия с помощью ТЭД, реализующего экстремальный вихретоковый метод / Себко В.В., Ноздрачева Е.Л., Хассан Муссу Диаб, Алаа Файад Макки, Вараксин Ю.А. // Наукові праці V-ї Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія – 2006)". – Харків. – 2006. – Т. 2. – С. 221 – 226.

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООВОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПЛОСКИМ ИЗДЕЛИЕМ, КОТОРОЕ НАГРЕВАЕТСЯ В ПРОЦЕССЕ КОНТРОЛЯ**

СЕБКО В.В.<sup>\*</sup>, ЗДОРЕНКО В.Г.<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт

<sup>\*\*</sup>Киевский национальный университет технологий и дизайна

**Цель.** Статья посвящена исследованию теоретических и практических задач определения погрешностей функции нескольких аргументов, которая связывает сигналы теплового трансформаторного вихретокового преобразователя (ТВП) с электромагнитными параметрами плоского изделия, которое нагревается в процессе контроля.

**Методика.** На основе общей теории погрешностей измерений, в частности, определения погрешностей непрямых измерений, а также методов определения погрешностей измерения аргументов степенной функции предложена методика определения погрешностей совместных (многопараметровых) измерений относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$ , удельной электрической проводимости  $\sigma_r$  и температуры  $t$  плоского изделия.



**Результаты.** Предложенная методика позволяет определить диапазоны изменения составляющих сигналов теплового ТВП, которые соответствуют границам изменения температуры контролируемого изделия.

**Научная новизна.** Получила дальнейшее развитие общая теория оценки погрешностей совместных электромагнитных измерений физико-механических параметров исследуемых плоских изделий за счет предложенных в работе теоретических положений определения погрешностей совместных многопараметровых измерений относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$ , удельного электрического сопротивления  $\rho_r$  и температуры  $t$  плоских изделий при реализации трехпараметрового метода на базе теплового ТВП.

**Практическая значимость.** Предложена методика определения погрешностей электромагнитных измерений параметров плоских изделий дает возможность проектирования вихретоковых устройств измерительного контроля плоских изделий широкого ассортимента на основе определения метрологических характеристик тепловых вихретоковых устройств и погрешностей совместных измерений нескольких параметров изделий плоской формы.

**Ключевые слова:** тепловой трансформаторный вихретоковый преобразователь, нормированные характеристики преобразователей, многопараметровый метод измерений, относительные погрешности совместных измерений, достоверность контроля.

#### **DETERMINATION OF HEAT TRANSFORMER METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF EDDY-CURRENT TRANSDUCER WITH FLAT PROBES, WHICH IS HEATED DURING TESTING**

SEBKO V.V. \*, ZDORENKO V.G. \*\*

\*National Technical University «Kharkiv Polytechnic institut»

\*\*Kiev National University of Technology and Design

**Purpose.** The article is devoted to research of theoretical and practical problems of definition error function of several arguments, which connects the signals of thermal transformer eddy-current transducer (TVP) with the electromagnetic parameters of the flat product, which is heated in the monitoring process.

**Methodology.** On the basis of the general theory of measurement errors, including errors in determining the indirect measurements, as well as methods for determining measurement arguments error power function proposed method of determining the errors of the joint (multi-parameter) measurements of relative permeability  $\mu_r$ , conductivity  $\sigma_t$  and temperature  $t$  of flat products.

**Findings.** The proposed method allows to determine the ranges of components of the heat TVP signals that correspond to the boundaries change controlled temperature products.

**Originality.** Has continued to develop a general theory of estimation errors joint electromagnetic measurements of physical and mechanical parameters of the test flat products by offering the theoretical position of certain errors joint multi-parameter measurements of relative permeability  $\mu_r$ , electrical resistivity  $\rho_r$  and temperature  $t$  of flat products during the implementation three-parameter method based on the heat TVP.

**Practical value.** The method of determining the dimensions of flat products, electromagnetic parameter errors enables the design of eddy current measuring devices control a wide range of flat products on the basis of the definition of the metrological characteristics of eddy current heating devices and errors joint measurements of several parameters of the flat form products.

**Key words:** transformer eddy current transducer (TVP), normalized characteristics converters, multi-parameter measurement method, the relative error of the joint measurements, the accuracy of control.