

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИЧНОЇ ПОХИБКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З КЕРОВАНИМ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

© Кочан О., 2009

Описано методику та результати експериментальних досліджень методичної похибки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля вздовж електродів головної термопари. Отримані результати порівняно з теоретичною оцінкою цієї самої похибки і показана їхня доволі добра збіжність.

The methodology and results of experimental investigation of methodology error of thermocouple with regulated profile of temperature field are described in this article. Also is done comparison of obtained results with analytically obtained the same error. This comparison show good enough convergence these two ways.

Вступ. Похибка вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів (ТЕП) при використанні сучасних прецизійних вимірювальних систем практично повністю визначається похибками термопар [1, 2]. Вони мають порівняно великий початковий розкид характеристик перетворення (ХП) [3, 4] та значний дрейф ХП під час експлуатації. Дрейф ХП термопар під дією високих температур і часу експлуатації [5, 6] пов'язаний з деградацією термоелектродів – зміною їхнього хімічного складу і кристалічної будови. Це веде до появи набутої термоелектричної неоднорідності термоелектродів, при якій різні їхні ділянки мають індивідуальні відхилення від номінальної ХП. При зміні градієнта температурного поля вздовж термоелектродів їх окремі ділянки змінюють генеровану термо-ЕРС відповідно до нових умов експлуатації та індивідуальних відхилень ХП. Тому вихідний сигнал термопари стає залежним не лише від різниці температур робочого та вільних кінців, але і від профілю температурного поля вздовж термоелектродів, що заважає корекції похибок термопар [7]. Для зниження впливу набутої неоднорідності на похибку корекції розроблено методи перевірки термопар на місці експлуатації [1, 6, 8] і корекції похибки на базі результатів перевірки за допомогою індивідуальних матмоделей дрейфу [1, 9] та методи побудови матмоделей самої похибки неоднорідності [10...12] для її корекції. Але перша група методів ефективна тільки при стабільному профілі температурного поля, а друга вимагає розподілу визначеної похибки термопари між окремими ділянками згідно з невідомим критерієм [13], що знижує їхню надійність.

Практично усунути вплив набутої неоднорідності на результат вимірювання температури дає змогу новий вид ТЕП [14, 15] – ТЕП з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП). Такий ТЕП має додаткові підсистеми регулювання температури вздовж термоелектродів головної термопари, тому при експлуатації та перевірці створює для них власне температурне поле і похибка від їх неоднорідності не може проявитися. Але в такому ТЕП виникає специфічна похибка від дії теплового потоку нагрівачів підсистем регулювання температури на робочий кінець головної термопари. Ця похибка була теоретично оцінена в [16, 17], однак при цьому використана спрощена модель теплоперенесення. Метою цієї статті є експериментальне дослідження методичної похибки пропонованого ТЕП з КПТП і порівняння результатів експерименту з теоретичною оцінкою.

Причини виникнення методичної похибки ТЕП з КПТП. Конструктивна схема макета, запропонованого в [14, 15] ТЕП з КПТП, подана на рис. 1. Стабілізація профілю температурного поля вздовж електродів головної термопарі ТПГ здійснюється за допомогою підсистем регулювання температури, які містять додаткові термопарі ТП1, ТП2, ... і відповідні їм нагрівачі Н1, Н2, ... Така конструктивна схема дає змогу забезпечити для ТПГ власний, сталий профіль температурного поля вздовж її електродів, незалежний від профілів перевірної печі, об'єкта вимірювання, а також їхніх змін в процесі експлуатації. Ця сама конструктивна схема є джерелом методичної похибки, причиною якої є тепловий потік q від нагрівача Н1 до робочого кінця головної термопарі ТПГ. Його наявність веде до того, що ТПГ не вимірює температури середовища T_s . Щоби зменшити вплив теплового потоку q , по-перше, робочий кінець ТПГ винесений на деяку відстань L від найближчого нагрівача Н1 (співвідношення L до діаметра чохла більше за 10), а, по-друге, уставка підсистеми регулювання, що включає ТП1 і Н1, задана такою, що дорівнює температурі робочого кінця ТПГ. При рівності цих температур тепловий потік q дорівнює нулеві і методична похибка відсутня. Але внаслідок похибок термопар ТПГ і ТП1 ця різниця температур не обов'язково дорівнює нулеві, тому тепловий потік q створює методичну похибку [16].

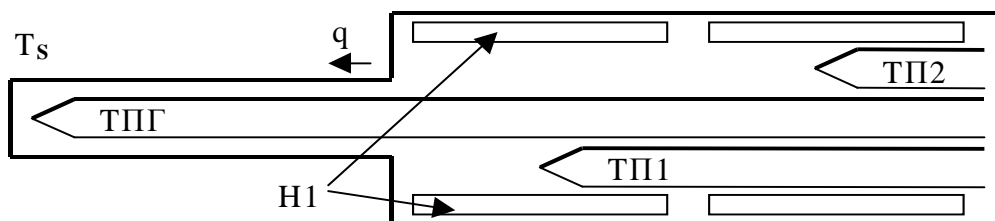


Рис. 1. Конструктивна схема ТЕП з КПТП

Зазначимо, що аналітичне визначення параметрів кривої розподілу температури вздовж чохла ТПГ є складним теплотехнічним завданням. Але для оцінки верхньої межі методичної похибки в [16] запропоновано замінити дію теплового потоку q , який діє вздовж чохла ТПГ, на дію еквівалентного потоку, який діє в радіальному напрямі. Це дає змогу записати диференціальне рівняння теплового балансу згідно із законом Ньютона–Ріхмана й оцінити верхню межу методичної похибки, визначивши границю перехідного процесу нагріву робочого кінця ТПГ при стрибкоподібному зростанні температури Н1 на сумарну похибку ТПГ і ТП1. Верхня межа оцінки методичної похибки Δ_{MET} , згідно з таким розрахунком [16], не перевищує

$$\Delta_{MET} = q / \alpha S, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі матеріалу чохла; S – площа тепловіддачі чохла.

Як показано в [16], обчислені згідно з (1) значення методичної похибки не тільки менші за похибки робочих термопар, але і менші приблизно в три рази за похибки вірцевих термопар, тобто запропонована конструкція повністю відповідає найжорсткішим вимогам корекції похибок. Однак при теоретичній оцінці похибок використано спрощену теплову модель ТЕП з КПТП, тому необхідно експериментально перевірити адекватність такої моделі. Для цього спочатку треба розробити методику таких експериментальних досліджень.

Методика експериментальних досліджень. Як показала теоретична оцінка [16], значення методичної похибки ТЕП з КПТП не перевищує декількох десятих градуса. Оскільки похибка самих термопар значно більша, то експериментальні дослідження методичної похибки методом прямих вимірювань неможливі. Тому запропоновано використати непрямий метод вимірювання, який ґрунтується на вимірюваннях змін температури, що виникають при зміні потужності нагрівача зони, найближчої до робочого кінця головної термопарі ТЕП з КПТП. У такому разі кожну зміну температури вимірюють одним і тим самим вимірювальним каналом, тобто систематична похибка кожного каналу під час вимірювання малих змін буде впливати тільки на саме значення темпе-

ратури і практично не буде впливати на виміряну зміну – систематична складова похибки буде взаємно коригуватися. Через те, що на результат експерименту можуть впливати випадкові зміни температури навколишнього середовища за час експерименту, робочий кінець головної термопари запропоновано помістити в пасивний термостат, температуру якого можна буде виміряти додатковим термометром опору. Загальну схему такого експерименту подано на рис. 2.

Відповідно до схеми рис. 2 розроблено методику експериментальних досліджень:

1. Помістити робочий кінець ТЕП з КПТП в пасивний термостат, в якому розмістити також термометр опору, і зібрати схему рис. 3. Витримати ТЕП з КПТП в кімнатних умовах без нагріву зон упродовж доби.



Рис. 2. Схема експериментального дослідження методичної похибки ТЕП з КПТП

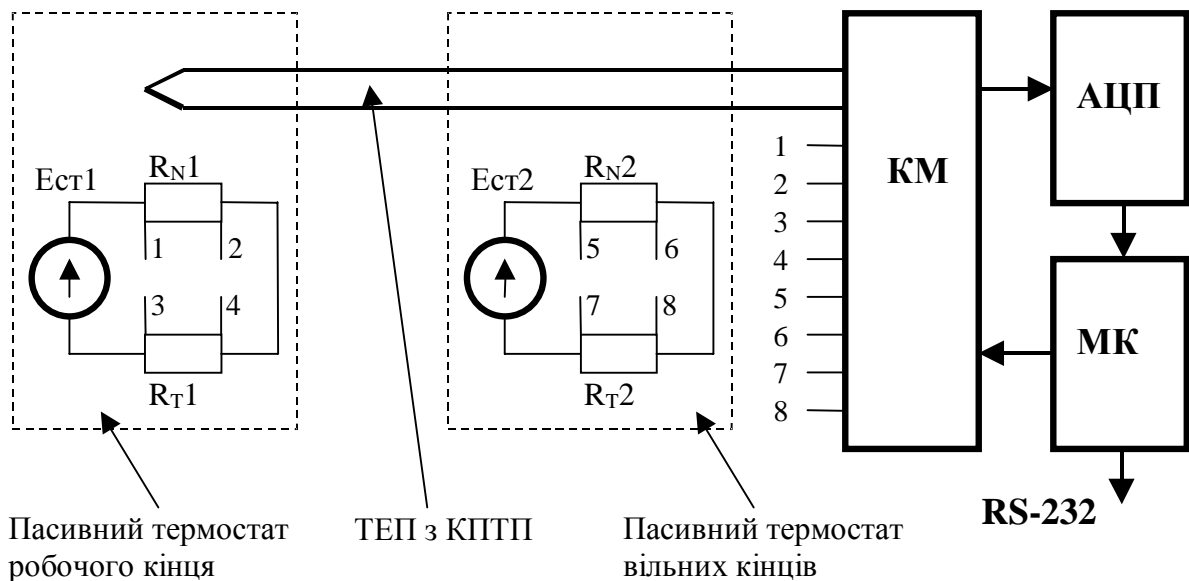


Рис. 3. Схема ввімкнення датчиків для експериментального дослідження методичної похибки ТЕП з КПТП

2. Виміряти (без увімкнення нагрівачів зон) температуру зовнішнього середовища T_S , спади напруги U_{RN2} на опорному резисторі R_{N2} , і U_{RT2} на термометрі опору R_{T2} вільних кінців, термо-ЕРС термопари першої зони E_{1Z} та головної термопари E_{GT} , спади напруги U_{RN1} на опорному резисторі R_{N1} , і U_{RT1} на термометрі опору R_{T1} пасивного термостата.

3. Ввімкнути повну потужність нагріву першої зони, витримати ТЕП з КПТП в цих умовах упродовж шести годин.

4. Виміряти температуру зовнішнього середовища T_{SZ} , спади напруги U_{RN2Z} на опорному резисторі R_{N2} і U_{RT2Z} на термометрі опору R_T2 вільних кінців, термо-ЕРС термопар першої зони E_{1ZZ} та головної термопар E_{GTZ} , спади напруги U_{RN1Z} на опорному резисторі R_{N1} , і U_{RT1Z} на термометрі опору R_T1 пасивного термостата;

5. Обчислити опір термометрів R_T1 і R_T2 до нагріву першої зони і R_T1_Z і R_T2_Z після її нагріву за формулами

$$R_{T1} = R_{N1} \frac{U_{RT1}}{U_{RN1}}, \quad R_{T2} = R_{N2} \frac{U_{RT2}}{U_{RN2}}, \quad R_{T1_Z} = R_{N1} \frac{U_{RT1Z}}{U_{RN1Z}}, \quad R_{T2_Z} = R_{N2} \frac{U_{RT2Z}}{U_{RN2Z}},$$

де $R_{N1} = 160,7 \text{ Ohm}$ і $R_{N2} = 109,83 \text{ Ohm}$.

6. Обчислити температури вільних кінців до нагріву першої зони T_{VK} і T_{VKZ} після її нагріву за формулами

$$T_{VK} = \frac{R_{T2} - R_{02}}{\alpha \times R_{02}}, \quad T_{VKZ} = \frac{R_{T2_Z} - R_{02}}{\alpha \times R_{02}}$$

де $R_{02} = 53 \text{ Ohm}$.

7. Обчислити температуру першої зони T_{1Z} і температуру головної термопар T_{GT} до нагріву першої зони, а також температуру першої зони T_{1ZZ} і температуру головної термопар T_{GTZ} після нагріву першої зони за приблизними формулами

$$T_{1Z} = E_{1Z} / S + T_{VK}, \quad T_{GT} = E_{GT} / S + T_{VK}, \quad T_{1ZZ} = E_{1ZZ} / S + T_{VKZ}, \\ T_{GTZ} = E_{GTZ} / S + T_{VKZ},$$

де $S = 42 \mu V$ – чутливість термопар типу ХА, які використано в макетному взірці ТЕП з КПТП.

8. Обчислити температури пасивного термостата до нагріву першої зони T_{PT} і T_{PTZ} після її нагріву за формулами

$$T_{PT} = \frac{R_{T1} - R_{01}}{\alpha \times R_{01}}, \quad T_{PTZ} = \frac{R_{T1_Z} - R_{01}}{\alpha \times R_{01}}$$

де $R_{01} = 100 \text{ Ohm}$.

9. Знайти зміни температур за час нагріву першої зони для першої зони $\Delta T_{1Z} = T_{1ZZ} - T_{1Z}$, для головної термопар $\Delta T_{GT} = T_{GTZ} - T_{GT}$ і для пасивного термостата $\Delta T_{PT} = T_{PTZ} - T_{PT}$.

10. Зміна температури робочого кінця головної термопар за час нагріву першої зони ΔT_{GT} буде визначатися зміною температури його середовища, тобто зміною температури пасивного термостата ΔT_{PT} і власне методичною похибкою Δ_{MET} ТЕП з КПТП. Звідси можна визначити Δ_{MET} за формулою

$$\Delta_{MET} = \Delta T_{GT} - \Delta T_{PT}. \quad (2)$$

11. Знайти температуру T , для якої сумарна максимальна допустима похибка головної термопар і термопар першої зони дорівнює нагріву першої зони ΔT_{1Z} , з виразу

$$\Delta T_{1Z} \times 42 \times 10^{-3} = 0,14 + 0,22 \times 10^{-3} (T - 300), \quad (3)$$

який складено згідно з [3].

Як видно, визначене в п. 10 наведеної вище методики значення Δ_{MET} обчислюється згідно з (2) як різниця, а члени (2) обчислюються в п. 9 методики теж як різниці. Крім того, очевидно, що зміни температури ΔT_{GT} і ΔT_{PT} будуть малі. Це означає, що систематичні похибки результатів вимірювання окремих каналів (див. пп. 2, 4 наведеної вище методики) будуть практично однакові та взаємно компенсуються при обчисленні різниць. Отже, на результат вимірювання переважно будуть впливати випадкові похибки, точніше короткочасна нестабільність результатів вимірювання. Стенд експериментальних досліджень [17] спеціально проектувався з урахуванням

необхідності виконання прецизійних відносних вимірювань, тому оцінювалася теоретично і досліджувалася експериментально короткочасна (за робочий день) нестабільність результатів його вимірювань, яка не перевищує $\pm(0,0005+0,002(X/X_{\max}-1))\%$ на діапазоні 80 мВ, тобто ± 2 мкВ.

Для оцінки похибки експериментальних досліджень методичної похибки необхідно визначити чутливість усіх вимірювальних каналів. Це можна зробити, знаючи спади напруги U_{RN1} і U_{RN2} на опорних резисторах R_{N1} і R_{N2} . Як видно з табл. 1, наведеної в наступному розділі, $U_{RN1} \approx 40$ мВ, а $U_{RN2} \approx 70$ мВ. Відповідно до значень $R_{N1}=160,7$ Ом і $R_{N2}=109,83$ Ом, струми I_{T1} і I_{T2} будуть становити $I1=U_{RN1}/R_{N1} \approx 0,25$ мА і $I2=U_{RN2}/R_{N2} \approx 0,65$ мА, а зміна спаду напруги на них при зміні температури на один градус (чутливість) буде становити $S_{T1}=I_{T1} \times \alpha \times R_0 \approx 0,1$ мВ/°С і $S_{T2}=I_{T2} \times \alpha \times R_0 \approx 0,13$ мВ/°С. При нестабільності вимірювального каналу за напругою $\Delta_U = \pm 2$ мкВ випадкова похибка вимірювання температури пасивного термостата і вільних кінців буде $\Delta_{RT1} = \Delta_U / S_{T1} \approx 0,02$ °С і $\Delta_{RT2} = \Delta_U / S_{T2} \approx 0,015$ °С. Випадкова похибка вимірювання термо-ЕРС головної термопари буде $\Delta_E = \Delta_U / S \approx 0,05$ °С. Зазначимо, що похибка вимірювання температури вільних кінців Δ_{RT2} тільки опосередковано впливає на результат вимірювання зміни температури головною термопарою, крім того, вона значно менша від випадкової похибки вимірювання термо-ЕРС Δ_E , тому нею нехтуємо.

Сумарна випадкова похибка визначення методичної похибки буде

$$\Delta\Delta_{MET} = \sqrt{\Delta_E^2 + \Delta_{RT1}^2 + \Delta_{RT2}^2} \approx 0,075^\circ\text{C}, \quad (4)$$

що становить значний відсоток від значення методичної похибки, знайденого при її теоретичній оцінці. Тому доцільно виконати декілька окремих експериментів для визначення збіжності результатів вимірювання.

Результати експериментальних досліджень. На рис. 4 наведено фотографію засобів експериментального дослідження методичної похибки. На ній позначено пасивний термостат робочого кінця і нагрівач Н1.

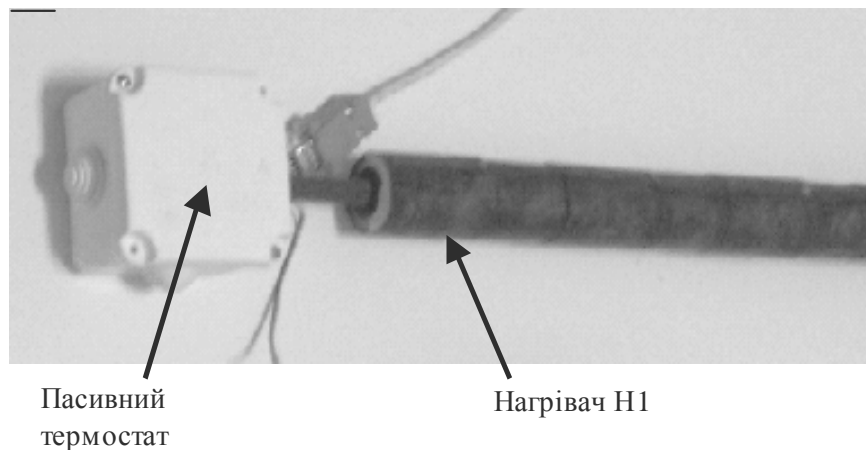


Рис. 4. Засоби експерименту для дослідження методичної похибки ТЕП з КПТП

Для вимірювання температури термометрами опору використана потенціометрична схема з чотирипровідним його під'єднанням. Результати вимірювань та обчислень згідно з описаною в попередньому розділі методикою подано у табл. 1. Як видно з табл. 1, виконано п'ять експериментів, їхні результати мало відрізняються, тому цензурування не вимагають.

Значення знайденої методичної похибки подано в рядку 10 табл. 1, а в рядку 11 – зміни температури нагрівача Н1 відносно змін температури навколишнього середовища, знайдені як $\Delta T_1 = \Delta T_{1z} - (\Delta T_{sz} - \Delta T_s)$. У рядку 12 подано температуру T , якій відповідає сумарна допустима похибка термопар ТПГ і ТП1 типу ХА, яка дорівнює зміні температури першої зони ΔT_1 . Значення T

знайдено згідно з (3) за умови, що похибки ТПГ і ТПІ однакові та незалежні, а їхня сумарна похибка обчислюється як квадратний корінь із суми квадратів. У результаті перетворення (3) отримаємо

$$T = \frac{(\Delta T_1 \times S / \sqrt{2}) - 0,14}{0,22 \times 10^{-3} \times S} + 300^\circ\text{C}, \quad (5)$$

Таблиця 1

Результати вимірювань і обчислень при дослідженні методичної похибки ТЕП з КПТГ

Етапи методики	Вимірювані величини	Експеримент №1	Експеримент №2	Експеримент №3	Експеримент №4	Експеримент №5
2	$T_S, ^\circ\text{C}$	19,76	18,66	18,72	18,72	20,88
	$U_{RN1}, \text{мкВ}$	43828	43812	43816	43821	43822
	$U_{RT1}, \text{мкВ}$	29741	29678	29682	29691	29699
	$U_{RN2}, \text{мкВ}$	75043	75121	75119	75113	75110
	$U_{RT2}, \text{мкВ}$	39262	39133	39141	39137	39144
	$E_{1Z}, \text{мкВ}$	8	4	4	4	4
	$E_{GT}, \text{мкВ}$	0	0	0	0	0
4	$T_{SZ}, ^\circ\text{C}$	21,26	21,03	20,96	20,85	20,88
	$U_{RN1Z}, \text{мкВ}$	43775	43732	43741	43748	43743
	$U_{RT1Z}, \text{мкВ}$	29838	29787	29793	29788	29793
	$U_{RN2Z}, \text{мкВ}$	75012	75002	75008	75011	75017
	$U_{RT2Z}, \text{мкВ}$	39477	39436	39428	39413	39421
	$E_{1ZZ}, \text{мкВ}$	215	211	217	210	206
	$E_{GIZ}, \text{мкВ}$	71	79	79	74	75
5	$R_{T1}, \text{Ом}$	109,05	108,86	108,86	108,82	108,91
	$R_{T2}, \text{Ом}$	57,46	57,21	57,23	57,23	57,24
	$R_{T1Z}, \text{Ом}$	109,54	109,46	109,46	109,42	109,45
	$R_{T2Z}, \text{Ом}$	57,80	57,75	57,73	57,71	57,72
6	$T_{VK}, ^\circ\text{C}$	19,76	18,66	18,72	18,72	18,77
	$T_{VKZ}, ^\circ\text{C}$	21,26	21,03	20,96	20,85	20,88
7	$T_{1Z}, ^\circ\text{C}$	19,95	18,76	18,82	18,81	18,87
	$T_{GT}, ^\circ\text{C}$	19,76	18,66	18,72	18,72	18,77
	$T_{1ZZ}, ^\circ\text{C}$	26,38	26,06	26,13	25,85	25,79
	$T_{GTZ}, ^\circ\text{C}$	22,95	22,91	22,84	22,61	22,67
8	$T_{PT}, ^\circ\text{C}$	21,24	20,79	20,80	20,85	20,91
	$T_{PTZ}, ^\circ\text{C}$	22,39	22,20	22,20	22,11	22,19
9	$\Delta T_{1Z}, ^\circ\text{C}$	6,43	7,30	7,31	7,04	6,92
	$\Delta T_{GT}, ^\circ\text{C}$	1,69	1,88	1,88	1,76	1,79
	$\Delta T_{PT}, ^\circ\text{C}$	1,15	1,41	1,40	1,26	1,27
10	$\Delta T_1, ^\circ\text{C}$	4,93	4,93	5,07	4,91	4,81
11	$T, ^\circ\text{C}$	331	331	350	330	315
12	$\Delta_{MET}, ^\circ\text{C}$	0,54	0,47	0,49	0,50	0,51

Як видно з табл. 1, знайдені експериментально значення методичної похибки ТЕП з КПТП мають порівняно невеликий розкид (не більше за $\pm 7\%$) відносно середнього, а їх абсолютні значення не перевищують оціненої згідно з (4) похибки визначення методичної похибки $\Delta\Delta_{MET}$. Тому можна вважати збіжність результатів експериментальних досліджень достатньо хорошою, самі результати коректними і порівнювати їх з результатами теоретичної оцінки методичної похибки.

Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень. Оцінимо згідно з [16] теоретичне значення методичної похибки Δ_{MET}^T для конкретної конструкції термоелектричного перетворювача, що ґрунтується на термопарах типу хромель-алюмель (ХА) і має корпус, виготовлений із конструкційної сталі Ст35. Для такого термоелектричного перетворювача значення параметрів, потрібні для оцінки методичної похибки Δ_{MET}^T , становитимуть

$$S_N = 6,3 \times 10^{-5} \text{ m}^2 ; L = 0,15 \text{ m} ; S = 5,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 ; \alpha = 44 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times \text{K}} ; \lambda = 47 \frac{\text{W}}{\text{m} \times \text{K}},$$

де S_N – площа поверхні, через яку передається тепловий потік; L – відстань від нагрівача до робочого кінця головної термопари ТСМ; S – площа зовнішньої поверхні, що охолоджується, тобто чохла головної термопари ТСМ; α – коефіцієнт теплоперенесення сталь-повітря; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу чохла головної термопари ТСМ (всі дані згідно з [18]).

Для вказаних в табл. 1 значень зміни температури нагріву першої зони ΔT_{1Z} оцінимо значення теплового потоку q згідно з [19]. Далі за методикою [16] знайдемо теоретичне значення методичної похибки Δ_{MET}^T . Отримані результати зведено в табл. 2. В останньому рядку табл. 2 наведено відхилення $\Delta\Delta_{MET}^E$ значень методичної похибки, знайдених експериментально, від знайдених теоретично для цих самих умов. Як видно, отримані експериментально і теоретично значення $\Delta\Delta_{MET}^E$ співмірні з похибками візцевих термопар, тому можна зробити висновок, що методична похибка ТЕП з КПТП доволі мала навіть при використанні конструкційних сталей.

Таблиця 2

Результати порівняння експериментальних і теоретичних значень методичної похибки

Фізичні величини	Експеримент № 1	Експеримент № 2	Експеримент № 3	Експеримент № 4	Експеримент № 5
$T, ^\circ\text{C}$	331	331	350	330	315
$\Delta_{MET}, ^\circ\text{C}$	0,54	0,47	0,49	0,50	0,51
$\Delta_{MET}^T, ^\circ\text{C}$	0,40	0,40	0,41	0,40	0,39
$\Delta\Delta_{MET}^E, ^\circ\text{C}$	0,14	0,07	0,08	0,10	0,12

Однак зазначимо, що знайдені експериментально значення методичної похибки Δ_{MET} в середньому на 20 % вищі від визначених теоретично. При цьому значення $\Delta\Delta_{MET}^E$ доволі істотно, в середньому на 25 % перевищують оцінену згідно з (4) похибку визначення методичної похибки $\Delta\Delta_{MET}$. Таке порівняно велике і систематичне відхилення $\Delta\Delta_{MET}^E$ від $\Delta\Delta_{MET}$ при малому розкиді експериментальних результатів Δ_{MET} не може бути визнане випадковим. Його можна пояснити впливом під час експерименту додаткової систематичної похибки теплового походження, зумовленої, імовірно, обмеженням об'ємом використаного пасивного термостата.

Висновки. Експериментальні дослідження методичної похибки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, результати яких наведено у цій статті, показали, що:

1. Запропонована методика експериментальних досліджень, яка ґрунтується на вимірюванні змін температури за час експерименту (відносні вимірювання) дає можливість достатньо точно дослідити методичну похибку термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля, яка викликана тепловим потоком від нагрівачів, що встановлюють заданий профіль температурного поля, до робочого кінця головної термопари. Отримані в результаті експери-

ментальних досліджень результати мають хорошу збіжність, що дає змогу робити на їхній основі коректні висновки.

2. Запропонована в [16] методика теоретичної оцінки методичної похибки термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля, незважаючи на спрощену модель теплових процесів, може бути визнана достатньо коректною. Відхилення значень методичної похибки, знайдених згідно із запропонованою методикою, від значень, знайдених експериментально, більш ніж втричі менші від похибок взірцевих термопар, які можуть використовуватися для перевірки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля. Отже, запропоновану в [16] методику можна використовувати для практичних потреб.

3. Коректність запропонованої в [16] методики оцінки методичної похибки термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля підтверджує вказаний там само спосіб зменшення методичної похибки за рахунок збільшення площі тепловіддачі чохла нанесенням канавок або різьби чи кріпленням на кінці чохла додаткового радіатора.

4. Як теоретична оцінка похибки експериментального визначення методичної похибки за запропонованою методикою, так і отримані в результаті виконаних експериментальних досліджень значення методичної похибки стосувалися (у межах цієї статті) дослідного зразка, виконаного з конструкційної сталі. Але для чохлавіх серійних термоелектричних перетворювачів використовують нержавіючу сталь, коефіцієнт тепловіддачі якої α приблизно в 3,4 раза менший від значення для конструкційної сталі. Отже, значення методичної похибки для серійних термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля повинно бути в 3,4 раза меншим (відповідати значенням, отриманим в [16]). Для них методичною похибкою можна нехтувати для більшості випадків вимірювання температури.

1. Саченко А.А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий. Дис... д-ра техн. наук: 05.11.16. – Ленинград, 1988. – 278 с. 2. Кочан Р.В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем. Автореферат дис. ... к.т.н. 05.11.16. Львів, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ, 2005, 16 с. 3. ГОСТ 3044-84. Преобразователи термоэлектрические. Номинальные статистические характеристики преобразования. – М.:Изд-во стандартов, 1984. – 56 с. 4. International standard IEC 584-2. 5. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В.Самсонов, А.И.Киц, О.А. Кюздени и др. – К.: Наукова думка, 1972. – 223 с. 6. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis. – Vulkan-Verlag, Essen, 1981. – S. 498. 7. Куренков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности // Исследование в области температурных измерений: Сб.тр. – М.: ВНИИМ. – 1976. – С. 11–15. 8. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с. 9. Березький О.М. Засоби вимірювання температури з елементами штучного інтелекту. Автореферат дис... к.т.н.: 05.11.04. – Львів: Державний університет “Львівська політехніка”, 1996. 10. Тартаковский Д.Ф. Расчет погрешности термопары от термоэлектрической неоднородности ее электродов // Труды метролог. ин-тов СССР. – 1969. – Вып. 105(165). – С. 107–114. 11. Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов. Автореферат дис...к.т.н.: 05.11.15. – М.: ВНИИФТРИ, 1984. 12. Чирка М.І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях. Автореферат дис... к.т.н.: 05.11.04. – Львів, Державний університет “Львівська політехніка”, 1997. 13. М.І. Чирка, Н.М. Васильків, Р.В. Кочан. Метод підвищення точності прогнозування нестабільності характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів // Вісник ТАНГ. Економіко-математичне моделювання. – 1999. – № 6. – С. 37–42. 14. Кочан О.В., Кочан Р.В. Термоелектричний перетворювач. Пат. 200701855 Україна, Заявл. 22.02.2007. 15. Кочан О. Термоелектричний перетворювач з корекцією похибки неоднорідності. // Вимірювальна техніка та метрологія. – Вып. 68. – 2008. – С. 144–152. 16. Кочан О., Демків Т., Саченко А. Оцінка методичної похибки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля // Вимірювальна техніка та метрологія. – Вып. 69. – 2008. – С. 79–84. 17. Кочан О., Васильків Н., Яскілка В. Піч дослідження впливу температурного поля на термоелектричний перетворювач. Матеріали 12-ї наукової конференції Тернопільського державного ун-ту ім. І. Пулюя. – Тернопіль, 14–15 травня 2008 р. – С. 150. 18. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с. 19. Крижанівський С.Є. Диференціальні рівняння. – Харків: Державне науково-технічне видавництво України ім. Гонти, 1938. – 398 с.