

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА МІСЦІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Кочан Орест

Науково-дослідний інститут інтелектуальних комп'ютерних систем тернопільського національного економічного університету. м. Тернопіль вул. Львівська 11

*В статті запропоновано метод періодичної метрологічної перевірки на місці експлуатації головної термопарі термоелектричного перетворювача (ТП) з керованим профілем температурного поля без його демонтажу та без участі взірцевого ТП або будь-якого іншого взірцевого датчика температури. При проведенні первинної метрологічної перевірки такого ТП з використанням ТП першого / третього рівня робочої схеми метрологічної перевірки проведена оцінка похибки періодичної метрологічної перевірки показала, що остання не буде перевищувати 1 / 1,2 °С.*

*В статье предложен метод периодической поверки на месте эксплуатации главной термопары термоэлектрического преобразователя (ТП) с управляемым профилем температурного поля без его демонтажа и без участия образцового ТП или любого другого образцового температурного сенсора. При проведении первичной поверки такого ТП с использованием ТП первого / третьего уровня рабочей поверочной схемы проведена оценка погрешности периодической поверки показала, что она не превышает 1 / 1,2 °С.*

*The method of periodic verification in operation condition of the main thermocouple of thermocouple based sensor with controlled profile of temperature field (TBS with CPTP) is proposed in this paper. This periodic verification can be done without dismantling out of sensor from operation place as well as without any working standards. The reference thermocouples of either 1-st or 3-rd level of hierarchy scheme can be used for verification of TBS with CPTP right after produce. Evaluation of self verification error in this case has shown value of error at either 1°C or 1.2°C respectively.*

### ВСТУП

Найбільш широко розповсюдженими первинними перетворювачами (датчиками, сенсорами) при вимірюванні високих температур (вище 600°C) залишаються термоелектричні перетворювачі (ТП) на базі термопар. Однак вони вже давно стали найменш надійною та точною ланкою вимірювального каналу [1]. Незважаючи на цілий ряд досліджень [2 - 5], похибки поширених стандартизованих ТП не стали меншими, а нові типи ТП не випускаються. Одними з основних недоліків ТП є:

- великі початкові відхилення їх функції перетворення (ФП) від номінальної – для найбільш поширених ТП типу хромель-алюмель (ХА) досягають 5,5°C при 600°C та 8°C при 1100°C [6];
- значний дрейф ФП в процесі тривалої експлуатації при високих температурах – для ТП типу ХА досягає 0,5°C при 600°C та 10°C при 1100°C за час експлуатації 1000 годин [7, 8];
- велика похибка від набутої в процесі тривалої експлуатації при високих температурах термоелектричної неоднорідності електродів термопар – для ТП типу ХА досягає 2°C при 600°C та 11°C при 1100°C за час експлуатації 1000 годин [9, 10].

Останній недолік привів до поспішного висновку, що похибку ТП, які побували в експлуатації взагалі не можна коригувати [11]. Але останнім часом появились дослідження, які дають змогу коригувати похибки ТП, що експлуатуються в температурних полях, профіль яких змінюється в процесі експлуатації. Тому розглянемо можливості підвищення точності вимірювання температури з допомогою ТП детальніше.

### 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТП

Методи підвищення точності вимірювання температури з допомогою ТП діляться на дві великі групи – конструктивно-технологічні та структурно-алгоритмічні [1]. Конструктивно-технологічні методи, незважаючи на досить велику кількість досліджень [2 - 5], не привели до появи на ринку ТП, що забезпечують значно вищу точність вимірювання температури. Структурно-алгоритмічні методи можна розділити на ті, що вимагають стаціонарного профілю температурного поля об'єкта вимірювання при експлуатації ТП, та ті, що враховують можливість зміни профілю температурного поля вздовж електродів термопар.

До перших відносяться періодична (часта) повірка ТП в лабораторних умовах та використання отриманих похибок як поправок [12, 13]. Однак, як показано в [10, 11, 14], такий метод має значну похибку навіть при малих відхиленнях профілю температурного поля експлуатації від профілю температурного поля повірки. Практично усунути цей недолік дозволяють методи, що передбачають визначення похибки ТП на місці його експлуатації – метод калібрування за допомогою температурного калібрувальника [1, 15, 16] та метод повірки, що передбачає в

конструкції ТП додатковий канал, куди вставляється взірцева термопара [17, 18]. Додаткове підвищення точності вимірювання температури при зменшенні трудомісткості можливе за рахунок побудови моделі похибки ТП для її індивідуального прогнозу в процесі експлуатації. Однак, незважаючи на високу точність, метод калібрування не набув поширення через проблеми виготовлення калібруатора [19]. А метод перевірки вимагає використання робочих еталонів у робочих умовах, що суперечить вимогам до їх експлуатації [20]. Крім того, обидва методи вимагають повторного калібрування або перевірки при зміні профілю температурного поля.

Для корекції похибки ТП при змінах профілю температурного поля в [21] було запропоновано, а в [22] вдосконалено, метод перерахунку похибки неоднорідної термопари з одного профілю температурного поля в інше, що дозволяє повірити ТП в одному профілі температурного поля, а експлуатувати – в іншому. Цей перерахунок базувався на побудові індивідуальних моделей похибок окремих ділянок термопар, які можна було уточнити лише на основі результатів перевірки. Однак критерій розподілу отриманої при проверці сумарної похибки ТП між окремими ділянками був запропонований лише в [23]. Але такий перерахунок дає суттєве підвищення точності лише в умовах рідких детермінованих змін профілю температурного поля.

Суттєве підвищення точності в умовах нестабільного температурного поля експлуатації забезпечує термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля (ТП з КПП) [24, 25]. В ньому профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари стабілізовано з допомогою додаткових термопар і нагрівачів, підключених до багатоканальної системи регулювання. Таке рішення дозволяє також встановлювати під час експлуатації потрібний профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари, що створює додаткові можливості підвищення точності вимірювання температури.

**Метою статті** є розроблення методу визначення поточної похибки термоелектричних перетворювачів на місці експлуатації без використання робочих еталонів.

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ

Допустимо, що електроди ТП експлуатуються в температурному полі, що описується монотонною залежністю. Тоді, розбивши кожен термоелектрод на ділянки  $i = \overline{1, n}$ , електрорушійну силу (е.р.с.)  $E_k$  для  $k$  – тої ділянки можна записати як

$$E_k = (e_N + \Delta e_k) \cdot (t_{k+1} - t_k) \quad , \quad (1)$$

де  $e_N$ ,  $\Delta e_k$  – номінальне значення питомої термо-е.р.с. (термоелектрична здатність) матеріалу даного термоелектроду та індивідуальне її відхилення для  $k$  – тої ділянки відповідно;  $t_{k+1}$ ,  $t_k$  – температури на межах  $k$  – тої ділянки термоелектроду.

Якщо спрямувати різницю  $t_{k+1} - t_k$  до нуля і перетворити (1), можна визначити сумарну е.р.с.  $E_\Sigma$  одного термоелектроду як

$$E_\Sigma = \int_0^{t_{rk}} (e_N + \Delta e_k) dt = \int_0^{t_{rk}} e_N dt + \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k dt = E_{\Sigma N} + \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k dt \quad , \quad (2)$$

де  $E_{\Sigma N}$  – номінальне значення е.р.с., яке генерує кожен термоелектрод під дією заданої різниці температур  $t_{rk} - t_0$ . Інтеграл визначає сумарну похибку термоелектроду.

В процесі експлуатації, під дією високих температур, міняється хімічний склад термоелектродів (окислення, міграція) та їх кристалічний стан, причому інтенсивність змін сильно залежить як від часу експлуатації  $\tau$ , так і від температури експлуатації  $t_e$ , при якій дана ділянка перебувала під час експлуатації [1, 21, 22, 26], тобто  $\Delta e_k = \Delta e(t_e, \tau)$ . Таким чином, на основі (2), можна записати вираз, який визначає сумарну похибку  $\Delta E_\Sigma$  термоелектроду при деякому профілі температурного поля експлуатації [9, 14, 23]

$$\Delta E_\Sigma = \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k dt = \int_0^l \Delta e(t_e, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl = \Delta e(t_e, \tau) \int_0^l \frac{\partial t}{\partial l} dl \quad . \quad (3)$$

Якщо профіль температурного поля сталий, тобто  $\frac{dt}{dl} = const$ , то вираз (3) набуде вигляду

$$\Delta E_{\Sigma} = \Delta e(t_e, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} l \quad . \quad (4)$$

З (4) випливають наступні висновки [9]:

1. Якщо  $\frac{dt}{dl} \rightarrow 0$ , то  $\Delta E_{\Sigma} \rightarrow 0$ , тобто, якщо термопара, наприклад, експлуатується в температурному полі, представленому як крива А на рис. 1, то дрейф  $\Delta e_k = \Delta e(t_e, \tau)$  ділянок  $l_0 \dots l_3$  та  $l_4 \dots l_7$  не вносить похибки в результат вимірювання.

2. Якщо температура експлуатації ділянки нижча за деяке мінімальне значення, при якому дрейф можна вважати неістотним, тобто  $\Delta e(t_e, \tau) \rightarrow 0$ , то  $\Delta E_{\Sigma} \rightarrow 0$  (термо-е.р.с. ділянок  $l_0 \dots l_3$  не змінюється під час експлуатації).

3. Якщо  $\Delta e_k = \Delta e(t_e, \tau)$  описується функцією, що монотонно змінюється (в дійсності – наростає) при збільшенні температури, то сумарна похибка дрейфу термоелектродів, згідно (3), буде мати значення, що формується не тільки ділянками з максимальним дрейфом, а і ділянками з усіма проміжними значеннями дрейфу.

4. Максимальне значення дрейфу термоелектродів можна визначити, перемістивши їх в температурне поле, що відповідає кривій В (рис. 1), де всі ділянки, які створюють термо-е.р.с., експлуатувалися при максимальній температурі (робочого кінця  $t_{PK}$ ), а тому мають максимальне відхилення питомої термо-е.р.с.  $\Delta e_k$  від свого індивідуального значення перед експлуатацією, тобто  $\Delta e_k \rightarrow \max$ .

5. При переміщенні термоелектродів в температурне поле, що відповідає кривій С (рис. 1), всі ділянки, що створюють термо-е.р.с. термопари, експлуатувалися при мінімальній температурі (температурі вільних кінців  $t_{BK}$ ), а тому не мають набутого в процесі експлуатації відхилення питомої термо-е.р.с.  $\Delta e_k$  від свого індивідуального значення, тобто  $\Delta e_k \rightarrow 0$ . Тому результат вимірювання температури в цьому випадку буде вільний від дрейфу ФП термопари.

Останній висновок може служити основою для методу визначення поточної похибки ТП на місці експлуатації.

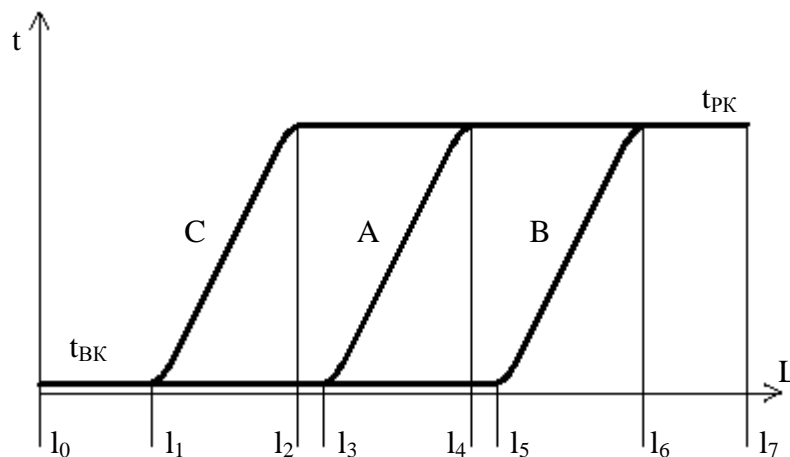


Рис. 1. Профілі температурного поля вздовж термоелектродів термопари

### 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ

Суть пропонованого методу визначення поточної похибки ТП з КПТП на місці експлуатації полягає в тому, що профіль його температурного поля зміщують з профілю експлуатації (крива А на рис. 1) в профіль метрологічної перевірки (крива С на рис. 1). В цьому випадку термо-е.р.с. головної термопари ТП з КПТП буде формуватися ділянкою  $l_1 \dots l_2$ , яка не перебувала тривалий час при високій температурі робочого кінця  $t_{PK}$ , а при низькій температурі вільних кінців  $t_{BK}$ , тобто не дрейфувала. Потім профіль температурного поля ТП з КПТП повертають до профілю експлуатації (крива А на рис. 1). Умовами визначення похибки пропонованим методом є:

1. Сталість температури робочого кінця  $t_{PK}$  та вільних кінців  $t_{BK}$  на протязі часу визначення похибки.
2. Достатнє “винесення” градієнту температурного поля, тобто  $l_2 \dots l_3 > 0$ .

Для підвищення точності вимірювання температури необхідно усунути вплив на результат визначення поточної похибки початкового відхилення індивідуальної ФП ділянок  $l_1..l_2$  від номінального. Для цього при випуску ТП з КППП з виробництва метрологічну перевірку його здійснюють за допомогою робочого еталону (ТП) таким чином, щоби термо-е.р.с. ТП з КППП створювали ділянки, які в майбутньому будуть її створювати під час визначення поточної похибки, тобто  $l_1..l_2$ .

Процес метрологічного обслуговування ТП з КППП ілюструє рис. 2. При випуску з виробництва ТП з КППП метрологічну перевірку здійснюють за допомогою робочого еталону (ТП) в профілі температурного поля рис. 2а). При цьому враховуються індивідуальні відхилення ФП ділянок  $l_0..l_1$  від номінальної ФП. Відповідно до (3) можна записати

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_{l_0}^{l_1} \Delta e_1(t_e, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_{l_1}^{l_2} \Delta e_2(t_e, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_{l_2}^{l_3} \Delta e_3(t_e, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_{l_3}^{l_4} \Delta e_4(t_e, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl, \quad (5)$$

де  $l_0..l_4$  – ділянки головної термопари ТП з КППП згідно рис. 2;  $\Delta e_1(t_e, \tau).. \Delta e_4(t_e, \tau)$  – індивідуальні відхилення питомої термо-е.р.с. ділянок головної термопари ТП з КППП згідно рис. 2.

При цьому слід відзначити, що на початку експлуатації, тобто під час первинної метрологічної перевірки можна вважати, що  $\tau = \tau_0$ , а також, згідно правила – якщо  $\frac{dt}{dl} \rightarrow 0$ , то  $\Delta E_{\Sigma} \rightarrow 0$ , записати

$$\Delta e_2(t_e, \tau_0) = \Delta e_3(t_e, \tau_0) = \Delta e_4(t_e, \tau_0) = 0, \quad (6)$$

тому (5) можна представити як

$$\Delta E_{\Sigma}^{P1} = \int_{l_0}^{l_1} \Delta e_1(t_e, \tau_0) \frac{\partial t}{\partial l} dl, \quad (7)$$

де  $\Delta E_{\Sigma}^{P1}$  – результат первинної метрологічної перевірки (індивідуальне відхилення ФП ділянки  $l_0..l_1$  від номінальної).

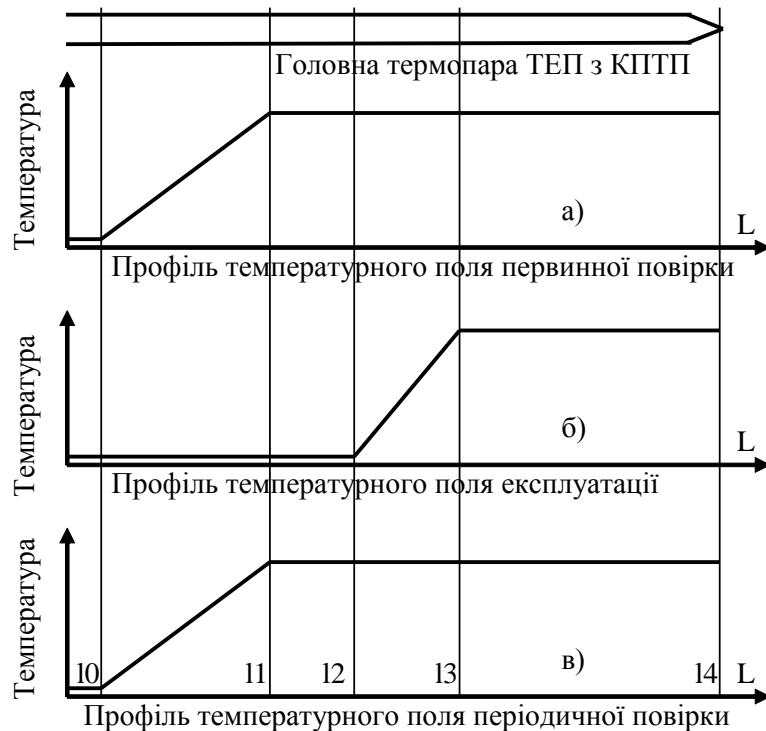


Рис. 2. Процес метрологічного обслуговування ТП з КППП на протязі життєвого циклу

Далі експлуатація проводиться в профілі температурного поля рис. 2.б). При цьому дрейфують ділянки

$l_2..l_4$ , тобто, на відміну від (6),  $\Delta e_3(t_e, \tau 1) \neq \Delta e_4(t_e, \tau 1) \neq 0$ . А ділянки  $l_0..l_2$  знаходяться при низькій температурі та не дрейфують, тобто  $\Delta e_1(t_e, \tau 1) = \Delta e_2(t_e, \tau 1) = 0$ . Однак, через те, що для ділянки  $l_3..l_4$  градієнт  $\frac{dt}{dl} \rightarrow 0$ , тому  $\Delta E_{l_3..l_4} \rightarrow 0$ . Для цього випадку, аналогічно до (7), можна записати

$$\Delta E_{\Sigma}^E = \int_{l_2}^{l_3} \Delta e_3(t_e, \tau 1) \frac{\partial t}{\partial l} dl, \quad (8)$$

де  $\Delta E_{\Sigma}^E$  – похибка від індивідуального відхилення ФП ділянки  $l_2..l_3$  від номінальної під час експлуатації, для часу  $\tau = \tau_1$  (включаючи часовий дрейф через вплив високої температури експлуатації).

Періодично, коли температура робочого кінця термопари  $t_{PK}$  деякий час не змінюється, а також можна прогнозувати відсутність змін на протязі 20...30 хвилин, проводиться визначення поточної похибки ТП з КППП. Для цього профіль температурного поля встановлюється відповідно до рис. 2в), який повинен якнайточніше відповідати профілю температурного поля первинної метрологічної перевірки, тобто рис. 2а). В такому випадку, хоча  $\Delta e_3(t_e, \tau 1) \neq \Delta e_4(t_e, \tau 1) \neq 0$ , вони не впливають на сумарну термо-е.р.с. головної термопари, через те, що  $\frac{dt}{dl} \rightarrow 0$ , тому  $\Delta E_{l_1..l_4} \rightarrow 0$ . Через те, що  $\frac{dt}{dl} \rightarrow 0$ , також  $\Delta E_{l_1..l_2} \rightarrow 0$ . Тому результат визначення похибки  $\Delta E_{\Sigma}^{PP}$  можна визначити як

$$\Delta E_{\Sigma}^{PP} = \int_{l_0}^{l_1} \Delta e_1(t_e, \tau 1) \frac{\partial t}{\partial l} dl. \quad (9)$$

Через те, що ділянка  $l_0..l_1$  перебувала при високій температурі дуже короткий час (лише час визначення похибки) в першому приближенні можна вважати, що  $\Delta e_1(t_e, \tau 1) = \Delta e_1(t_e, \tau 0)$ , тому (9) повністю відповідає (7).

#### 4. ОЦІНКА ПОХИБКИ ПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ

Аналіз (5), а також (7)...(9), дає змогу виявити джерела похибки пропонованого методу визначення поточної похибки ТП. Під час первинної метрологічної перевірки основними джерелами похибки будуть:

1. Похибка робочого еталону, який використовується при первинній метрологічній перевірці, зазвичай, еталонного ТП  $\Delta_N$ . Ця похибка залежить від розряду еталонного ТП, згідно [27] вона може становити від 0,3 до 0,6°C.

2. Похибка вимірювання термо-е.р.с. еталонного ТП  $\Delta_N^E$ . Ця похибка залежить від якості вимірювальної системи, що використовується при метрологічній перевірці, згідно [28], для платинових ТП вона може не перевищувати 0,4°C.

3. Похибка корекції температури вільних кінців еталонного ТП  $\Delta_N^{VK}$ . Згідно [29] вона може не перевищувати 0,1°C.

4. Похибка визначення температури за термо-е.р.с. еталонного ТП  $\Delta_N^T$ . Ця похибка залежить від використовуваних методів лінеаризації та корекції похибок еталонного ТП. Згідно [28] вона може не перевищувати 0,1°C.

5. Похибка вимірювання термо-е.р.с.  $\Delta_X^E$  ТП, похибку якого визначають. Згідно [28], для ТП типу ХА, вона може не перевищувати 0,1°C.

6. Похибка корекції температури вільних кінців ТП, похибку якого визначають  $\Delta_X^{VK}$ . Згідно [29], для ТП типу ХА, вона може не перевищувати 0,1°C.

7. Похибка визначення температури за термо-е.р.с. ТП, похибку якого визначають  $\Delta_X^T$ . Ця похибка

залежить від використовуваних методів лінеаризації та корекції похибок цього ТП. Згідно [28], для ТП типу ХА, вона може не перевищувати  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

8. Похибка від різниці температур робочих кінців еталонного ТП та ТП, похибку якого визначають  $\Delta_X^{DT}$ . Ця похибка залежить від використовуваних методів вирівнювання температури в печі, в якій здійснюють метрологічну перевірку ТП. При застосуванні нікелевого термовирівнювача ця похибка не буде перевищувати  $0,1^{\circ}\text{C}$  [29].

9. Похибка комутації ТП  $\Delta^K$ . Згідно [28], для платинових ТП похибка комутації  $\Delta_N^K$  може не перевищувати  $0,1^{\circ}\text{C}$ , а для ТП типу ХА похибка комутації  $\Delta_X^K$  може не перевищувати  $0,03^{\circ}\text{C}$ .

Таким чином, сумарну похибку первинної метрологічної перевірки  $\Delta_{\Sigma}^{P1}$  можна визначити як

$$\Delta_{\Sigma}^{P1} = \sqrt{\Delta_N^{K^2} + \Delta_N^{E^2} + \Delta_N^{VK^2} + \Delta_N^{T^2} + \Delta_X^{E^2} + \Delta_X^{VK^2} + \Delta_X^{T^2} + \Delta_X^{DT^2} + \Delta_N^{K^2} + \Delta_X^{K^2}} . \quad (10)$$

Підставивши вказані вище значення похибок отримаємо  $\Delta_{\Sigma}^{P1} \leq 0,6..0,8^{\circ}\text{C}$ , залежно від того, чи при первинній метрологічній перевірці використовується еталонний ТП першого, чи третього розряду.

Під час визначення поточної похибки ТП основними джерелами похибки будуть:

1. Похибка «робочого еталону», що використовується при визначенні поточної похибки ТП  $\Delta_N^{PP}$ , тобто, згідно запропонованого методу визначення похибки, ділянок  $I_0..I_1$  головної термопари ТП з КППТ. Аналіз цієї похибки буде проведено нижче.

2. Похибка вимірювання термо-е.р.с.  $\Delta_X^E$  ТП, похибку якого визначають. Згідно [28], для ТП типу ХА, вона може не перевищувати  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

3. Похибка корекції температури вільних кінців ТП, похибку якого визначають  $\Delta_X^{VK}$ . Згідно [29], для ТП типу ХА, вона може не перевищувати  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

4. Похибка визначення температури за термо-е.р.с. ТП, похибку якого визначають  $\Delta_X^T$ . Ця похибка залежить від використовуваних методів лінеаризації та корекції похибок цього ТП. Згідно [28], для ТП типу ХА, вона може не перевищувати  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

5. Похибка від зміни температури робочого кінця  $\Delta_X^{TRK}$  ТП, похибку якого визначають. Ця похибка залежить від вибраного моменту визначення поточної похибки ТП і не може бути наперед строго оцінена. Для її оцінки під час визначення поточної похибки ТП необхідно виконати замкнений цикл вимірювання – виміряти температуру об'єкта до і після визначення поточної похибки. Допустима різниця може бути оцінена виходячи з допустимої похибки визначення поточної похибки ТП. Якщо різниця перевищує допустиму необхідно повторити визначення поточної похибки ТП ще раз. Аналіз швидкості зміни температури потужних термоагрегатів, зокрема, котлів теплових електростанцій, показав, що можна прийняти  $\Delta_X^{TRK} \leq 0,4^{\circ}\text{C}$ .

6. Похибка комутації ТП  $\Delta^K$ . Згідно [28], для ТП типу ХА похибка комутації  $\Delta_X^K$  може не перевищувати  $0,03^{\circ}\text{C}$ .

7. Похибка від неідеальності профілю температурного поля ТП з КППТ  $\Delta_X^{POL}$ . Ця похибка теж буде оцінена нижче.

Згідно запропонованого методу, засобом, який використовується при визначенні поточної похибки головної термопари ТП з КППТ, є її ділянки  $I_0..I_1$ . Відхилення їх ФП від номінальної враховується при первинній метрологічній перевірці. Тому їх похибка буде визначатися дрейфом їх ФП за час їх експлуатації. Згідно [7], для термопар типу ХА при температурі експлуатації  $T_E = 800^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta_X^{PS}$  не буде перевищувати  $24,5^{\circ}\text{C}$  за час експлуатації  $\tau_E = 8000$  годин. Якщо прийняти, що час одного визначення поточної похибки не перевищує  $0,5$  години, а визначення поточної похибки проводиться один раз на тиждень, то за рік експлуатації ТП з КППТ

тривалість експлуатації ділянок  $l_0..l_1$  його головної терморпар не буде перевищувати  $\tau_{EN} = 26$  годин. Слід відзначити, що, згідно [8], для терморпар типу ХА за перші 100 годин експлуатації дрейф складає лише дещо менше половини дрейфу за увесь час експлуатації. Тому доцільно перед первинною метрологічною перевіркою провести попередню підготовку головної терморпар, що полягає у витримці її в профілі температурного поля, яке “накриває” майбутній профіль температурного поля первинної метрологічної перевірки на протязі 100...150 годин. Тоді  $\Delta_{NP}$  буде відповідати приблизно половині максимального дрейфу терморпар типу ХА за час експлуатації  $\tau_E = 8000$  годин, віднесені до тривалості експлуатації  $\tau_{EN} = 26$  ділянок  $l_0..l_1$  головної терморпар при високій температурі тобто,  $\Delta_{NP} = (0,5 \cdot \tau_{EN} \cdot \Delta_X^{PS}) / \tau_E \leq 0,04^\circ\text{C}$ .

Похибка від неідеальності профілю температурного поля ТП з КППП  $\Delta_X^{POL}$ , в свою чергу, визначається похибкою встановлення профілю температурного поля  $\Delta_X^{PS}$  відносно профілю температурного поля ТП з КППП при первинній метрологічній перевірці та похибкою регулювання  $\Delta_X^{PC}$ . Похибка  $\Delta_X^{PS}$  визначається дрейфом додаткових терморпар систем керування температурним профілем ТП з КППП за час експлуатації (початкові відхилення їх ФП від номінальних враховуються під час первинної метрологічної перевірки головної терморпар ТП з КППП). Як було вказано, при використанні як додаткових терморпар типу ХА,  $\Delta_X^{PS} \leq 24,5^\circ\text{C}$ . Похибка регулювання  $\Delta_X^{PC}$ , згідно [30], не буде перевищувати  $1,2^\circ\text{C}$ . Таким чином, похибка  $\Delta_X^{POL}$  не буде перевищувати

$\Delta_X^{POL} = \sqrt{\Delta_X^{PS2} + \Delta_X^{PC2}} \approx 25^\circ\text{C}$ . Однак, слід відзначити, що  $\Delta_X^{POL}$  не впливає безпосередньо на похибку метрологічної перевірки. Вона спричиняє похибку, яка полягає в тому, що у сумарну термо-е.р.с. головної терморпар як при первинній метрологічній перевірці, так і при визначенні поточної похибки ТП, входить термо-е.р.с., генерована ділянками  $l_1..l_4$ . При цьому на ділянці  $l_1..l_2$  можуть впливати на результат визначення поточної похибки ТП лише індивідуальні відхилення її ФП від номінальних, які вже враховано при первинній метрологічній перевірці. При експлуатації ділянки  $l_1..l_2$  не потрапляють під дію високих температур, тому їх впливом на дрейф можна нехтувати. А вплив ділянок  $l_2..l_4$  значно більший. Індивідуальні відхилення їх ФП від номінальних також враховано при первинній метрологічній перевірці, але під час експлуатації вони перебувають при високій температурі, тому на результат визначення поточної похибки ТП впливає їх часовий дрейф. Як було вказано,  $\Delta_X^{PS} \leq 24,5^\circ\text{C}$ . Тому, при відхиленні профілю температурного поля на  $\Delta_X^{POL} \leq 25^\circ\text{C}$ , еквівалентний вплив  $\Delta_X^{POL}$  на сумарну термо-е.р.с. головної терморпар буде складати  $\Delta_X^{EKV} = \Delta_X^{PS} \cdot \Delta_X^{POL} / T_E \leq 0,75^\circ\text{C}$ .

Таким чином, додаткова похибка  $\Delta_X^{PP}$ , що виникає при визначенні поточної похибки ТП, буде складати

$$\Delta_X^{PP} = \sqrt{\Delta_N^{PP2} + \Delta_X^E2 + \Delta_X^{VK2} + \Delta_X^T2 + \Delta_X^{TRK2} + \Delta_X^K2 + \Delta_X^{EKV2}} \approx 0,8^\circ\text{C} \quad (11)$$

Сумарна похибка визначення поточної похибки ТП  $\Delta_\Sigma^{PP}$  рівна сумі похибки первинної метрологічної перевірки  $\Delta_\Sigma^{P1}$  та додаткової похибки  $\Delta_X^{PP}$ , що виникає при визначенні поточної похибки ТП. При використанні під час первинної метрологічної перевірки еталонного ТП першого розряду

$$\Delta_\Sigma^{PP} = \sqrt{\Delta_\Sigma^{P12} + \Delta_X^{PP2}} \leq 1^\circ\text{C} \quad (12)$$

Якщо при визначенні поточної похибки ТП використовували еталонний ТП третього розряду, то сумарна похибка визначення поточної похибки ТП  $\Delta_\Sigma^{PP}$  буде складати

$$\Delta_\Sigma^{PP} = \sqrt{\Delta_\Sigma^{P12} + \Delta_X^{PP2}} \leq 1,2^\circ\text{C} \quad (13)$$

## ВИСНОВКИ

Запропонований в статті метод визначення поточної похибки головної термопари термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, що забезпечує похибку визначення поточної похибки термоелектричного перетворювача на місці експлуатації не більше 1,2°C без його демонтажу та без участі еталонного термоелектричного перетворювача або будь-якого іншого еталонного давача температури, можна вважати досить перспективним. Тому доцільним є розроблення методики проектування таких термоелектричних перетворювачів для різних застосувань.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Саченко А.А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температур в промышленных технологиях: автореферат диссертации на соискание ученой сТПени д.т.н. - Ленинград, ЛЭТИ, 1988.
2. Скоропад П.І. Термоперетворювачі з металевих шкел – концепція, нормалізація термоструктурних характеристик, реалізація: автореф. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.11.04 "Прилади та методи вимірювання ТПлових величин"/ П.І. Скоропад. – Львів, 2003. – 37 с.
3. Яцишин С.П. Розвиток теоретичних основ та створення методів і алгоритмів мінімізації похибок термоперетворювачів на базі статистичної термодинаміки : автореф. дис. на здобуття наук, ступеня докт. тех. наук : по спеціальності 05.11.04 "Прилади та методи вимірювання ТПлових величин"/ С.П. Яцишин.- Львів 2008. – 37 с.
4. Гук О.П. Кабельні первинні термоелектричні перетворювачі з покращеними метрологічними і експлуатаційними характеристиками: дис... канд. техн. наук: 05.11.04 / О.П. Гук, "Науково-виробниче об'єднання "Термоприлад" ім. В.Лаха" АТЗТ. - Л., 2004. - 144 арк.
5. Ромака В.А. Фізичні засади розроблення термоелектричних елементів на основі інтерметалічних напівпровідників: автореф. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.11.04 "Прилади та методи вимірювання ТПлових величин"/ В.А. Ромака. – Львів, 2008. – 36 с.
6. Приборы для измерения температуры контактным способом / Под ред. Р.В. Бычковского. - Львов.: Вища школа, 1979.
7. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В. Самсонов, А.И. Киц, О.А. Кюздени и др. – Киев: Наукова думка, 1972.
8. Рогельберг И.Л., Нужнов А.Г., Покровская Г.Н. и др. Стабильность термоэлектродвижущей силы термодпар хромель – алюмель при нагреве на воздухе при температурах до 1200 С // Исследование сплавов для термодпар: Сб. трудов института Гипроцветметобработка.- М.: Металлургия, 1967. Т.11. Вып.24.- С.54-65.
9. Кочан О.В. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термодпар / О.В. Кочан, Р.В. Кочан, В.Я. Яскілка, Н.М. Васильків // Вісник Тернопільського Державного Технічного Університету. – 2007. - №1 - С. 122-129.
10. Васильків Н. Дослідження впливу змін профілю температурного поля на похибку вимірювання температури неоднорідними термодпарами / Н. Васильків, О. Кочан // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2010. – №2. – С. 146–154.
11. Киренков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности // Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области температурных измерений. “Энергия”, Ленинградское отд-ние, 1975, вып 171 (231). С.11-15.
12. А.с. 352152 СРСР. Устройство для измерения температуры. А.А. Саченко, К.М. Обелевская, Л.В. Заничковская и др.; Оpubл. 1972, Бюл. № 28.
13. Саченко А.А. Совершенствование методов измерения температуры / А.А. Саченко, Е.Я. Твердый. – К.: Техніка, 1983. – 104 с.
14. Кочан О.В. Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.04 – прилади і методи вимірювання ТПлових величин / О.В. Кочан. – Львів, 2011. – 20 с.
15. Alf Hundves, Henz G. Buschfort. Self calibrating temperature sensing probe and probe –indicator combination- United State Patent 3.499.340. 73-1, G01 -15/00.
16. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
17. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis.- Vulkan-Verlag, Essen, 1981.
18. Патент № 2325622 Россия, МПК G01K15/00. Способ контроля достоверности показаний термоэлектрического преобразователя в процессе его эксплуатации. Каржавин А.В. (RU), Каржавин В.А. (RU), Богатов В.В (RU), Белевцев А.В. (RU). Заявлено 27 мая 2008 г.
19. Бернхард Ф. Применение самокалибрующихся термоэлементов с реперным материалом при температурах



500 – 650 С в парогенераторах / Ф. Бернхард, Д. Богун, С. Августин, Х. Маммен, А. Донин // Вимірювальна техніка та метрологія. - № 63. – 2003. – С. 55-60.

20. Горин Н.И. Введение в метрологию. / Н.И. Горин. – Москва: Издательство стандартов, 1976 г. – 304 с.

21. Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов: автореферат диссертации на соискание ученой стПени к.т.н. по специальности 05.11.15 - М., ВНИИФТРИ, 1984.

22. Чирка М.І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних ТПлових полях: автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня к.т.н. по спеціальності 05.11.04 - Прилади та методи вимірювання ТПлових величин. – Львів, Державний університет “Львівська політехніка”, 1997.

23. Васильків Н.М. Підвищення точності вимірювання температури термopарами в процесі експлуатації: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Н.М. Васильків . – Львів, 2011. – 20 с.

24. Пат. № 97464 Україна, МПК G01K 15/00. Термоелектричний перетворювач / Кочан О.В., Кочан Р.В. - заявл. 22.02.2007.

25. Кочан О.В. Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля / Кочан О.В. // Вісник Тернопільського Державного Технічного Університету. - 2008. - N2. - С. 102-108.

26. Павлов Б.П. Термоэлектрическая неоднородность электродов термопар / Павлов Б.П. – Москва: Изд-во стандартов, 1979. – 109 с.

27. ГОСТ 8.338-2002 «Государственная система обеспечения единства измерений. Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки». / Минск: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 23 с.

28. Кочан Р. В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.16 “Інформаційно-вимірювальні системи” /Р. В. Кочан. – Львів, 2005. – 16 с.

29. Белоусов И.А. Повышение точности многоканальных измерительных устройств с термоэлектрическими преобразователями: автореф. дис. на соискание ученой стПени канд. техн. наук: 05.11.05 «Методы и средства измерения электрических и магнитных величин» /И.А. Белоусов. – Львов, - 1991. – 20 с.

30. Кочан О.В. Мікроконтролерний метод керування профілем температурного поля /О.В. Кочан , Р.В. Кочан // Вісник Національного університету “Львівська Політехніка”. Комп’ютерні системи та мережі. – 2008. - № 630. - С. 67-76.