

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ВЕЛИЧИН

УДК 536.532

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА МІСЦІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Орест Кочан, 2014

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

Запропоновано метод періодичної метрологічної перевірки на місці експлуатації головної термопару термоелектричного перетворювача (ТП) з керованим профілем температурного поля без його демонтажу та без участі взірцевого ТП або будь-якого іншого взірцевого давача температури. Під час проведення первинної метрологічної перевірки такого ТП з використанням ТП першого / третього рівня робочої схеми метрологічної перевірки проведено оцінку похибки періодичної метрологічної перевірки, яка показала, що остання не перевищуватиме 1 / 1,2 °С.

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, которая 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. Найпоширенішими первинними перетворювачами (давачами, сенсорами) для вимірювання високих температур (понад 600 °С) 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 найпоширеніших ТП типу хромель-алюмель (ХА) досягають 5,5 °С за 600 °С та 8 °С за 1100 °С [6];

- значний дрейф ФП у процесі тривалої експлуатації за високих температур – для ТП типу ХА

досягає 0,5°С за 600 °С та 10 °С за 1100 °С за час експлуатації 1000 годин [7, 8];

- велика похибка від набутої в процесі тривалої експлуатації за високих температур термоелектричної неоднорідності електродів термопар – для ТП типу ХА досягає 2 °С за 600 °С та 11 °С за 1100 °С за час експлуатації 1000 годин [9, 10].

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

1. Аналіз методів підвищення точності ТП.

Методи підвищення точності вимірювання температури за допомогою ТП поділено на дві великі групи – конструктивно-технологічні та структурно-алгоритмічні [1]. Конструктивно-технологічні методи, незважаючи на доволі 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 потребують стаціонарного профілю температурного поля об’єкта вимірювання під час експлуатації ТП, та ті, що враховують можливість зміни профілю температурного поля вздовж електродів термопар.

До перших належать періодична (часта) перевірка ТП у лабораторних умовах та використання отриманих похибок як поправок [12, 13]. Однак, як показано в [10, 11, 14], такий метод дає значну похибку навіть за малих відхилень профілю температурного поля експлуатації від профілю температурного поля перевірки. 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 перевірки, що передбачає в конструкції ТП додатковий канал, в який вставляється взірцева термопара [17, 18]. Додаткове підвищенням точності вимірювання температури зі зменшення 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 калібрувальника [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 у разі зміни 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 перевіряти ТП в одному профілі температурного поля, а експлуатувати – в іншому. Цей перерахунок ґрунтувався на побудові індивідуальних моделей похибок окремих ділянок термопар, які можна було уточнити лише на основі результатів перевірки. Однак критерій розподілу отриманої під час перевірки сумарної похибки ТП між окремими ділянками був запропонований лише в [23].

Але такий перерахунок дає суттєве підвищення точності лише в умовах рідкісних детермінованих змін профілю температурного поля.

Істотне 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 за допомогою додаткових термопар і нагрівачів, під’єднаних до багатоканальної системи регулювання. Таке рішення дає змогу 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, розділивши кожен термоелектрод на ділянки $i = \overline{1, n}$, електрорушійну силу (ЕРС) E_k для k -ї ділянки можна записати як

$$E_k = (e_N + De_k) \cdot (t_{k+1} - t_k), \tag{1}$$

де e_N , De_k – номінальні значення питомої термо-ЕРС (термоелектрична здатність) матеріалу цього термоелектрода та індивідуальне її відхилення для k -ї ділянки відповідно; t_{k+1} , t_k – температури на межах k -ї ділянки термоелектрода.

Якщо спрямувати різницю $t_{k+1} - t_k$ до нуля і перетворити (1), можна визначити сумарну ЕРС E_S одного термоелектрода як

$$E_S = \int_0^{t_{rk}} (e_N + De_k) dt = \int_0^{t_{rk}} e_N dt + \int_0^{t_{rk}} De_k dt = E_{SN} + \int_0^{t_{rk}} De_k dt, \tag{2}$$

де E_{SN} – номінальне значення ЕРС, яке генерує кожен термоелектрод під дією заданої різниці температур $t_{rk} - t_0$. Інтеграл визначає сумарну похибку термоелектрода.

У процесі експлуатації, під дією високих температур, змінюється хімічний склад термоелектродів (окиснення, міграція) та їх кристалічний стан, причому інтенсивність змін сильно залежить як від часу експлуатації t , так і від температури експлуатації t_e , за якої ця ділянка перебувала під час експлуатації [1, 21, 22, 26], тобто $De_k = De(t_e, t)$. Отже, на основі (2), можна записати вираз, який визначає сумарну похибку DE_S термоелектрода за деякого профілю температурного поля експлуатації [9, 14, 23]

$$DE_S = \int_0^{l_{rk}} De_k dt = \int_0^l De(t_e, t) \frac{\partial t}{\partial l} dl = De(t_e, t) \int_0^l \frac{\partial t}{\partial l} dl. \quad (3)$$

Якщо профіль температурного поля сталий, тобто $dt/dl = const$, то вираз (3) набуде вигляду

$$DE_S = De(t_e, t) \frac{\partial t}{\partial l} l. \quad (4)$$

З (4) впливають такі висновки [9]:

1. Якщо $dt/dl \rightarrow 0$, то $DE_S \rightarrow 0$, тобто якщо термопара, наприклад, експлуатується в температурному полі, представленому як крива А на рис. 1, то дрейф $De_k = De(t_e, t)$ 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, за якого дрейф можна вважати неістотним, тобто $De(t_e, t) \rightarrow 0$, то $DE_S \rightarrow 0$ (термо-ЕРС ділянок $l_0 \dots l_3$ не змінюється під час експлуатації).

3. Якщо $De_k = De(t_e, t)$ описується функцією, що монотонно змінюється (насправді – наростає) зі збільшенням температури, то сумарна похибка дрейфу термоелектродів, згідно з (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-ЕРС, експлуатувалися за максимальної температури (робочого кінця t_{rk}), а тому мають максимальне відхилення питомої термо-ЕРС De_k від свого індивідуального значення перед експлуатацією, тобто $De_k \rightarrow \max$.

5. У разі переміщення термоелектродів у температурне поле, що відповідає кривій С (рис. 1), всі ділянки, що створюють термо-ЕРС термопари, експлуатувалися за мінімальної температури (температури вільних кінців t_{BK}), а тому не мають набутого в процесі експлуатації відхилення питомої термо-ЕРС De_k від свого індивідуального значення, тобто $De_k \rightarrow 0$. Тому результат вимірювання температури в цьому випадку буде вільний від дрейфу ФП термопари.

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

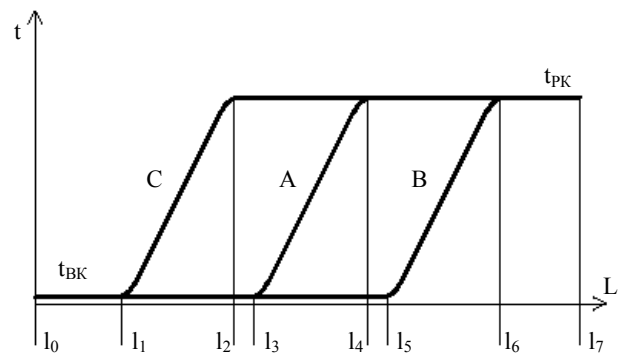


Рис. 1. Профілі температурного поля вздовж термоелектродів термопари

3. Реалізація пропонуваного методу. Суть пропонуваного 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-ЕРС головної термопари ТП з КПТП формуватиметься ділянкою $l_1 \dots l_2$, яка не перебувала тривалий час за високої температури робочого кінця t_{rk} , а за низької температури 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 пропонуванним методом є:

1. Сталість температури робочого кінця t_{rk} та вільних кінців t_{BK} упродовж часу визначення похибки.

2. Достатнє “винесення” градієнта температурного поля, тобто $l_2 \dots l_3 > 0$.

Для підвищення точності вимірювання температури необхідно усунути вплив на результат визначення поточної похибки початкового відхилення інди-

відуальної ФП ділянок $l_1...l_2$ від номінального. Для цього, випускаючи ТП з КППП з виробництва, метрологічну перевірку його здійснюють за допомогою робочого еталона (ТП) так, щоби термо-ЕРС ТП з КППП створювали ділянки, які в майбутньому її створюватимуть під час визначення поточної похибки, тобто $l_1...l_2$.

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

$$DE_S = \int_{l_0}^{l_1} De_1(t_e, t) \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_{l_1}^{l_2} De_2(t_e, t) \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_{l_2}^{l_3} De_3(t_e, t) \frac{\partial t}{\partial l} dl + \int_{l_3}^{l_4} De_4(t_e, t) \frac{\partial t}{\partial l} dl, \quad (5)$$

де $l_0...l_4$ – ділянки головної термопарі ТП з КППП згідно з рис. 2; $De_1(t_e, t)...De_4(t_e, t)$ – індивідуальні відхилення питомої термо-ЕРС ділянок головної термопарі ТП з КППП згідно з рис. 2.

Зазначимо, що на початку експлуатації, тобто під час первинної метрологічної перевірки, можна вважати, що $t = t_0$, а також, згідно з правилом – якщо $dt/dl \rightarrow 0$, то $DE_S \rightarrow 0$, записати

$$De_2(t_e, t_0) = De_3(t_e, t_0) = De_4(t_e, t_0) = 0, \quad (6)$$

тому (5) можна подати як

$$DE_S^{P1} = \int_{l_0}^{l_1} De_1(t_e, t_0) \frac{\partial t}{\partial l} dl, \quad (7)$$

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

Далі експлуатація проводиться в профілі температурного поля (рис. 2, б). При цьому дрейфують ділянки $l_2...l_4$, тобто, на відміну від (6), $De_3(t_e, t_1) \neq De_4(t_e, t_1) \neq 0$. Температура ділянок $l_0...l_2$ низька, вони не дрейфують, тобто $De_1(t_e, t_1) = De_2(t_e, t_1) = 0$. Однак, оскільки для ділянки $l_3...l_4$ градієнт $dt/dl \rightarrow 0$, то $DE_{l_3...l_4} \rightarrow 0$. Для цього випадку, аналогічно до (7), можна записати

$$DE_S^E = \int_{l_2}^{l_3} De_3(t_e, t_1) \frac{\partial t}{\partial l} dl, \quad (8)$$

де DE_S^E – похибка індивідуального відхилення ФП ділянки $l_2...l_3$ від номінальної під час експлуатації, для часу $t = t_1$ (включаючи часовий дрейф через вплив високої температури експлуатації).

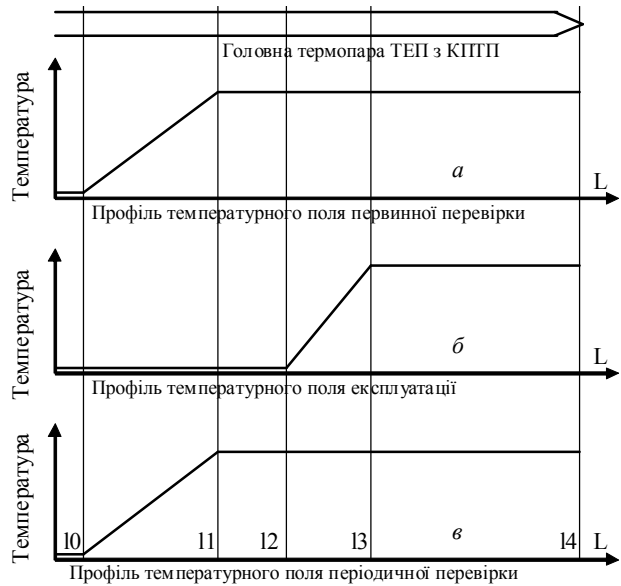


Рис. 2. Процес метрологічного обслуговування ТП з КППП упродовж життєвого циклу

Періодично, коли температура робочого кінця термопарі $t_{рк}$ деякий час не змінюється, а також можна прогнозувати відсутність змін упродовж 20...30 хв, визначають поточну похибку ТП з КППП. Для цього профіль температурного поля встановлюється відповідно до рис. 2, в, який повинен якнайточніше відповідати профілю температурного поля первинної метрологічної перевірки, тобто рис. 2, а. В такому випадку, хоча $De_3(t_e, t_1) \neq De_4(t_e, t_1) \neq 0$, вони не впливають на сумарну термо-ЕРС головної термопарі, оскільки $dt/dl \rightarrow 0$, тому $DE_{l_1...l_4} \rightarrow 0$. Через те, що $dt/dl \rightarrow 0$, також $DE_{l_1...l_2} \rightarrow 0$. Тому результат визначення похибки DE_S^{PP} можна записати як

$$DE_S^{PP} = \int_{l_0}^{l_1} De_1(t_e, t_1) \frac{\partial t}{\partial l} dl. \quad (9)$$

Оскільки ділянка $l_0...l_1$ перебувала за високої температури дуже короткий час (лише час визначення похибки), в першому приближенні можна вважати, що $De_1(t_e, t_1) = De_1(t_e, t_0)$, 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 у первинній метрологічній перевірці, зазвичай еталонного ТП D_N . Ця похибка залежить від розряду еталонного ТП, згідно з [27] вона може становити від 0,3 до 0,6 °С.

2. Похибка вимірювання термо-ЕРС еталонного ТП D_N^E . Ця похибка залежить від якості вимірювальної системи, що використовується для метрологічної перевірки, згідно з [28], для платинових ТП вона може не перевищувати 0,4 °С.

3. Похибка корекції температури вільних кінців еталонного ТП D_N^{VK} . Згідно з [29] вона може не перевищувати 0,1 °С.

4. Похибка визначення температури за термо-ЕРС еталонного ТП D_N^T . Ця похибка залежить від використовуваних методів лінеаризації та корекції похибок еталонного ТП. Згідно з [28] вона може не перевищувати 0,1 °С.

5. Похибка вимірювання термо-ЕРС D_X^E ТП, похибку якого визначають. Згідно з [28], для ТП типу ХА вона може не перевищувати 0,1 °С.

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

7. Похибка визначення температури за термо-ЕРС ТП, похибку якого визначають D_X^T . Ця похибка залежить від використовуваних методів лінеаризації та корекції похибок цього ТП. Згідно з [28], для ТП типу ХА вона може не перевищувати 0,1 °С.

8. Похибка від різниці температур робочих кінців еталонного ТП та ТП, похибку якого визначають D_X^{DT} . Ця похибка залежить від використовуваних методів вирівнювання температури в печі, в якій здійснюють метрологічну перевірку ТП. У разі застосування нікелевого термовирівнювача ця похибка не перевищуватиме 0,1 °С [29].

9. Похибка комутації ТП D^K . Згідно з [28], для платинових ТП похибка комутації D_N^K може не перевищувати 0,1 °С, а для ТП типу ХА похибка комутації D_X^K може не перевищувати 0,03 °С.

Отже, сумарну похибку первинної метрологічної перевірки D_S^{P1} можна визначити як

$$D_S^{P1} = \sqrt{D_N^2 + D_N^{E2} + D_N^{VK2} + D_N^{T2} + D_X^{E2} + D_X^{VK2} + D_X^{T2} + \sqrt{D_X^{DT2} + D_N^{K2} + D_X^{K2}}} \quad (10)$$

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

Під час визначення поточної похибки ТП основними джерелами похибки будуть:

1. Похибка «робочого еталона», що використовується для визначення поточної похибки ТП D_N^{PP} , тобто, згідно з пропонованим методом визначення похибки, ділянок $l_0...l_1$ головної термопари ТП з КПТП. Аналіз цієї похибки виконано нижче.

2. Похибка вимірювання термо-ЕРС D_X^E ТП, похибку якого визначають. Згідно з [28], для ТП типу ХА вона може не перевищувати 0,1 °С.

3. Похибка корекції температури вільних кінців ТП, похибку якого визначають D_X^{VK} . Згідно з [29], для ТП типу ХА вона може не перевищувати 0,1 °С.

4. Похибка визначення температури за термо-ЕРС ТП, похибку якого визначають D_X^T . Ця похибка залежить від використовуваних методів лінеаризації та корекції похибок цього ТП. Згідно з [28], для ТП типу ХА вона може не перевищувати 0,1 °С.

5. Похибка від зміни температури робочого кінця D_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. Допустиму різницю можна оцінити на основі 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 $D_X^{TRK} \leq 0,4^\circ\text{C}$.

6. Похибка комутації ТП D^K . Згідно з [28], для ТП типу ХА похибка комутації D_X^K може не перевищувати 0,03 °С.

7. Похибка від неідеальності профілю температурного поля ТП з КППП D_X^{POL} . Цю похибку теж оцінено нижче.

Згідно з запропонованим методом, засобом, який використовується для визначення поточної похибки головної термопари ТП з КППП, є її ділянки $l_0...l_1$. Відхилення їх ФП від номінальної враховується під час первинної метрологічної перевірки. Тому їх похибка визначатиметься дрейфом їх ФП за час їх експлуатації. Згідно з [7], для термопар типу ХА за температури експлуатації $T_E = 800\text{ }^\circ\text{C}$, D_X^{PS} не перевищуватиме $24,5\text{ }^\circ\text{C}$ за час експлуатації $t_E = 8000$ 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 КППП тривалість експлуатації ділянок $l_0...l_1$ його головної термопари не перевищуватиме $t_{EN} = 26$ годин. Зауважимо, що, згідно з [8], для термопар типу ХА за перші 100 годин експлуатації дрейф лише трохи менший від половини дрейфу за увесь час експлуатації. Тому доцільно перед первинною метрологічною перевіркою здійснити попередню підготовку головної термопари, що полягає у витримці її в профілі температурного поля, яке “накриває” майбутній профіль температурного поля первинної метрологічної перевірки упродовж 100...150 годин. Тоді D_{NP} відповідатиме приблизно половині максимального дрейфу термопар типу ХА за час експлуатації $t_E = 8000$ годин, віднесеній до тривалості експлуатації $t_{EN} = 26$ ділянок $l_0...l_1$ головної термопари за високої температури, тобто $D_{NP} = (0,5 \cdot t_{EN} \cdot D_X^{PS}) / t_E \leq 0,04\text{ }^\circ\text{C}$.

Похибка від неідеальності профілю температурного поля ТП з КППП D_X^{POL} , своєю чергою, визначається похибкою встановлення профілю температурного поля D_X^{PS} відносно профілю температурного поля ТП з КППП під час первинної метрологічної перевірки та похибкою регулювання D_X^{PC} . Похибка D_X^{PS} визначається дрейфом додаткових термопар систем керування температурним профілем ТП з КППП за час експлуатації (початкові відхилення їх ФП від номінальних враховуються під час первинної метрологічної перевірки головної термопари ТП з КППП). Як було вказано, у разі використання як

додаткових термопар типу ХА, $D_X^{PS} \leq 24,5\text{ }^\circ\text{C}$. Похибка регулювання D_X^{PC} , згідно з [30], не перевищуватиме $1,2\text{ }^\circ\text{C}$. Отже, похибка D_X^{POL} не буде перевищувати $D_X^{POL} = \sqrt{D_X^{PS2} + D_X^{PC2}} \approx 25\text{ }^\circ\text{C}$. Однак зауважимо, що D_X^{POL} не впливає безпосередньо на похибку метрологічної перевірки. Вона спричиняє похибку, яка полягає в тому, що у сумарну термо-ЕРС головної термопари як при первинній метрологічній перевірці, так і при визначенні поточної похибки ТП, входить термо-ЕРС, 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 у разі первинної метрологічної перевірки. Під час 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 під час первинної метрологічної перевірки, але під час експлуатації вони перебувають за високої температури, тому на результат визначення поточної похибки ТП впливає їх часовий дрейф. Як було вказано, $D_X^{PS} \leq 24,5\text{ }^\circ\text{C}$. Тому, у разі відхилення профілю температурного поля на $D_X^{POL} \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$, еквівалентний вплив D_X^{POL} на сумарну термо-ЕРС головної термопари становитиме $D_X^{EKV} = D_X^{PS} \cdot D_X^{POL} / T_E \leq 0,75\text{ }^\circ\text{C}$.

Отже, додаткова похибка D_X^{PP} , що виникає під час визначення поточної похибки ТП, становитиме

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

Сумарна похибка визначення поточної похибки ТП D_S^{PP} дорівнює сумі похибки первинної метрологічної перевірки D_S^{P1} та додаткової похибки D_X^{PP} , що виникає під час визначення поточної похибки ТП. У разі використання під час первинної метрологічної перевірки еталонного ТП першого розряду

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

Якщо для визначення поточної похибки ТП використовували еталонний ТП третього розряду, то сумарна похибка визначення поточної похибки ТП D_S^{PP} становитиме

$$D_S^{PP} = \sqrt{D_S^{P12} + D_X^{PP2}} \leq 1,2 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (13)$$

Висновки. Запропонований у 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 ніж $1,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ без його демонтажу та без участі еталонного термоелектричного перетворювача або будь-якого іншого еталонного давача температури, можна вважати доволі перспективним. Тому доцільно розробити методіку проектування таких термоелектричних перетворювачів для різних застосувань.

1. Саченко А.А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температур в промышленных технологиях: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – Ленинград, ЛЭТИ, 1988.
2. Скоропад П.І. Термоперетворювачі з металевих шкел – концепція, нормалізація термоструктурних характеристик, реалізація: автореф. дис. ... д-ра техн. наук.: спец. 05.11.04 "Прилади та методи вимірювання теплових величин" / П.І. Скоропад. – Львів, 2003. – 37 с.
3. Яцишин С.П. Развитие теоретических основ та створення методів і алгоритмів мінімізації похибок термоперетворювачів на базі статистичної термодинаміки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. ... спеціальності 05.11.04 "Прилади та методи вимірювання теплових 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 д-ра техн. наук: спец. 05.11.04 "Прилади та методи вимірювання теплових

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. – К.: Наукова думка, 1972.
8. Стабильность термоэлектродвижущей силы термонпар хромель – алюмель при нагреве на воздухе при температурах до $1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ / Рогельберг И.Л., Нужнов А.Г., Покровская Г.Н. и др. // Исследование сплавов для термонпар: сб. трудов института Гипроцветметобработка. – М.: Металлургия, 1967. – Т. 11. – Вып.24. – С.54–65.
9. Кочан О.В. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термонпар / 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 термонпарами / 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. – Л.: Энергия, Лен. отд., 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.; Опубл. 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. ... канд. техн. наук: спец. 05.11.04 – прилади і методи вимірювання Теплових 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. Thermolement 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. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 304 с. 21. Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.11.15 – М., ВНИИФТРИ, 1984. 22. Чирка М.І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях: автореф. дис. ... канд. техн. наук спеціальності 05.11.04 – прилади та методи вимірювання теплових 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. – № 2. – С. 102–108. 26. Павлов Б.П. Термоэлектрическая неоднородность электродов термopар / 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. ... 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. ... 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.