

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ВІД НАБУТОЇ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ ТЕРМОПАР

© Надія Васильків, Орест Кочан, Володимир Кочан, Анатолій Саченко, 2009

НДІ Інтелектуальних комп'ютерних систем
Тернопільського національного економічного університету

Розглянуто питання виникнення похибки від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар та її прояви під час вимірювання температури. На основі аналізу властивостей цієї похибки виконана класифікація існуючих методів корекції похибок часового дрейфу та власне неоднорідності термопар, а також розглянуто перспективні методи їх корекції.

Рассмотрены вопросы возникновения погрешности из-за приобретенной в процессе длительной эксплуатации термоэлектрической неоднородности электродов термопар и ее проявления при измерении температуры. На основании анализа свойств этой погрешности осуществлена классификация существующих методов коррекции погрешности временного дрейфа и собственно неоднородности термопар, а также рассмотрены перспективные методы их коррекции.

There are considered some problems of appearance of acquired error caused by long-term operation of thermocouple's electrodes, which lead to their thermoelectric heterogeneity and influence of this heterogeneity on temperature measurement error. There is done the analysis of the properties of indicated above component of temperature error and it allow us to make the classification of existing error correction methods oriented on correction the time drift and heterogeneity. Also there are proposed the perspective methods of error correction for time drift and heterogeneity for thermocouples.

Вступ. У прецизійних засобах і системах вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів похибка вимірювання практично повністю визначається похибками останніх [1, 2]. Це, передусім, пов'язано з порівняно великим початковим розкидом характеристик перетворення (ХП) термопар [3, 4]. Можливості його корекції за рахунок використання індивідуальної ХП [5, 6] обмежуються, зокрема, порівняно невеликою початковою термоелектричною неоднорідністю електродів термопар [7, 8]. Однак це стосується тільки до нових термопар. В процесі тривалої експлуатації проявляється значний дрейф ХП термопар, пов'язаний з деградаційними процесами в термоелектродах під дією високих температур і часу експлуатації [9, 10]. Швидкість проходження цих деградаційних процесів залежить від температури експлуатації окремих ділянок термоелектродів, що призводить до наростання їх набутої неоднорідності [11]. Набута неоднорідність в десятки разів більша від початкової. В [12] показано, що максимальна зміна вихідної термо-ЕРС термопар від зміни профілю температурного поля вздовж їх термоелектродів при незмінних температурах робочого і вільних кінців

термопар дорівнює максимальній зміні ХП (дрейфу) цієї термопар. Останній фактор ставить під сумнів саму можливість корекції похибок термопар [11]. Водночас відомий ряд методів і засобів корекції похибок термопар (посилання на них будуть дані пізніше), щодо яких питання про вплив на похибку результату вимірювання згаданої термоелектричної неоднорідності електродів термопар в явній формі не вирішене.

Метою цієї статті є дослідження властивостей похибки вимірювання температури від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар і класифікація методів корекції похибок термопар стосовно сфер їхнього застосування відповідно до обмежень, які накладає саме похибка від неоднорідності.

Виникнення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар. Якщо розділити кожен термоелектрод термопар на ділянки $i = \overline{1, n}$, електрорушійну силу (ЕРС) E_k для k -ї ділянки можна записати як [13, 14]

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

де $e_N, \Delta e_k$ – номінальне значення питомої ЕРС (термоелектрична здатність) для певного термоелектрода (матеріала) та індивідуальне її відхилення для k -ї ділянки відповідно; t_{k+1}, t_k – температури на межах k -ї ділянки термоелектрода.

Спрямуємо різницю $t_{k+1} - t_k$ до нуля і, перетворюючи (1), визначимо сумарну ЕРС E_{Σ} одного термоелектрода:

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

де $E_{\Sigma N}$ – номінальне значення ЕРС, яке генерує термоелектрод під дією заданої різниці температур $t_{rk} - t_0$.

Останній член (інтеграл) рівності (2) визначає сумарну похибку термоелектрода ΔE_{Σ} . Зазначимо, що індивідуальне відхилення питомої ЕРС для k -ї ділянки Δe_k є функцією багатьох змінних:

1. Індивідуальних відхилень хімічного складу матеріалу термоелектрода ділянки від номінального сплаву (спричинених ліквідацією та волочинням).

2. Температури експлуатації (витримки) t_e цієї ділянки.

3. Часу τ експлуатації ділянки при температурі t_e .

4. Поточної температури t ділянки в момент визначення похибки.

Першу причину похибки можна порівняно легко усунути, переходячи до індивідуальної ХП термопар [5, 6]. Друга і третя причини на момент визначення похибки неоднорідності є сталими, тобто відіграють роль параметрів функції, яка описує індивідуальне відхилення питомої ЕРС k -ї ділянки. В (2) вони відображені як індекс k функції $\Delta e_k(t)$, де t є поточною температурою k -ї ділянки, яка змінюється відповідно до зміни розподілу температур вздовж електродів термопари.

Для переходу від інтегрування по температурі t до інтегрування по довжині l термоелектродів позначимо градієнт температурного поля вздовж термоелектродів

$$\nabla t = \frac{\partial t}{\partial l}. \quad (3)$$

У ході тривалої експлуатації, під дією високих температур, змінюється хімічний склад термоелектродів (окиснення, міграція) та їх кристалічний стан [13, 15], причому інтенсивність змін сильно залежить від температури, при якій ця ділянка перебувала під час експлуатації [9, 10]. В результаті накопичення цих змін $\Delta e_k(t)$ окремих ділянок термоелектродів стає неоднаковою. Отже, на основі (2), з урахуванням (3) запишемо вираз, який визначає сумарну похибку ΔE_{Σ} термоелектрода в температурному полі експлуатації

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k(t) dt = \int_0^l \Delta e_k(t) \frac{\partial t}{\partial l} dl = \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t dl. \quad (4)$$

Отже, термо-ЕРС термопари, що тривало експлуатувалася, як сума ЕРС всіх ділянок обох термоелектродів, стає залежною від розподілу температурного поля (його профілю) вздовж термоелектродів, який описується градієнтом ∇t . Ситуація додатково ускладнена тим, що, як було показано вище, $\Delta e_k(t)$ кожної ділянки є функцією багатьох змінних – температур постійної експлуатації t_e та поточної t (яка виникла в результаті зміни профілю температурного поля), а також часу τ експлуатації. Тому, незважаючи на те, що небезпека виникнення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності відома давно [11], особливості її прояву під час вимірювання температури за допомогою термопар недостатньо досліджені. Доцільним є дослідження властивостей проявлення набутої термоелектричної неоднорідності та визначення на цій основі способів боротьби з нею.

Властивості похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар. Для дослідження властивостей похибки вимірювання температури від термоелектричної неоднорідності електродів термопар умовно задамо:

• Закон зміни температури t_e вздовж термоелектродів під час експлуатації (профіль температурного поля експлуатації) – лінійний

$$t_e = kl, \quad (5)$$

де l – поточна координата довжини; k – коефіцієнт пропорційності;

• Закон зміни питомої термо-ЕРС Δe_k від поточної температури t для заданого часу експлуатації та температури експлуатації t_e – кубічний

$$\Delta e_k(t) = a \times t_e^3, \quad (6)$$

де a – коефіцієнт пропорційності.

Отже, на основі (4), з урахуванням (5) і (6) запишемо вираз, який визначає сумарну похибку ΔE_Σ термоелектрода при лінійному температурному полі експлуатації

$$\begin{aligned} \Delta E_\Sigma &= \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k dt = \int_0^{t_{rk}} (a \times t_e^3) dt = \\ &= \int_0^l (a \times k^3 \times l^3 \times k) dl = (a \times k^4) \int_0^l l^3 dl \end{aligned} \quad (7)$$

При зміні температурного поля вздовж термоелектродів змінюються температури на границях ділянок і відповідно створювана ними термо-ЕРС. Для оцінки рівня похибки неоднорідності знайдемо зміну сумарної похибки ΔE_Σ за незмінної температури робочого кінця t_{rk} і при зміні температурного поля вздовж термоелектрода з лінійного, що відповідає залежності (5), на, наприклад, квадратичне, що відповідає залежності

$$t = k_1 l^2, \quad (8)$$

при відповідній (6) незмінній (для моменту оцінки похибки від неоднорідності термоелектрода) залежності Δe_k від поточної температури t для цього самого часу експлуатації. Для цього, на основі (4), з урахуванням (6) і (8) запишемо вираз, що визначає сумарну похибку ΔE_Σ термоелектрода при квадратичному температурному полі

$$\begin{aligned} \Delta E_\Sigma &= \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k dt = \int_0^{t_{rk}} (a \times t^3) dt = \\ &= 2 \int_0^l (a \times k^3 \times l^4 \times k_1) dl = (2 \times a \times k^3 \times k_1) \int_0^l l^4 dl \end{aligned} \quad (9)$$

Для оцінки похибок неоднорідності визначимо з (5) і (8) k та k_1 , прийнявши незмінною температуру робочого кінця t_{rk}

$$k = t_{rk} / l, \quad (10)$$

$$k_1 = t_{rk} / l^2. \quad (11)$$

Підставивши (10) і (11) в (7) та (9), для лінійного температурного поля експлуатації отримаємо

$$\begin{aligned} \Delta E_\Sigma &= (a \times k^4) \int_0^l l^3 dl = (a \times t_{rk}^4 \times l^4) / (l^4 \times 4) = \\ &= 0,25 \times a \times t_{rk}^4 \end{aligned} \quad (12)$$

а для квадратичного температурного поля, в яке ми перемістили термоелектрод, одержимо

$$\begin{aligned} \Delta E_\Sigma &= 2 \times a \times k^3 \times k_1 \int_0^l l^4 dl = \\ &= (2 \times a \times t_{rk}^3 \times t_{rk} \times l^5) / (l^3 \times l^2 \times 5) = 0,4 \times a \times t_{rk}^4 \end{aligned} \quad (13)$$

Отже, при зміні профілю температурного поля з лінійного до квадратичного отримаємо зміну похибки термоелектрода на значення

$$\begin{aligned} \Delta \Delta E_\Sigma &= 0,4 \times a \times t_{rk}^4 - 0,25 \times a \times t_{rk}^4 = \\ &= 0,15 \times a \times t_{rk}^4 \end{aligned} \quad (14)$$

незважаючи на те, що температура робочого кінця t_{rk} не змінилася.

Оцінимо похибку неоднорідності, яка виникає при зворотному переході – з квадратичного поля експлуатації в лінійне поле перевірки при незмінній температурі робочого кінця t_{rk} . Для цього, на основі (4), з урахуванням (6) і (8), запишемо вираз, що визначає сумарну похибку ΔE_Σ термоелектрода при квадратичному температурному полі експлуатації

$$\begin{aligned} \Delta E_\Sigma &= \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k dt = \int_0^{t_{rk}} (a \times t^3) dt = \\ &= \int_0^l (a \times k^3 \times l^6 \times k_1) dl = (a \times k^3 \times k_1) \int_0^l l^6 dl \end{aligned} \quad (15)$$

Для лінійного температурного поля похибка визначається виразом (7). Підставивши (10) і (11) в (15), для квадратичного температурного поля, в яке ми перемістили термоелектрод, одержимо

$$\begin{aligned} \Delta E_\Sigma &= (a \times k^3 \times k_1) \times \\ &\times \int_0^l l^6 dl = a \times t_{rk}^3 \times t_{rk} \times l^7 / (l^6 \times l \times 7) = (a \times t_{rk}^4) / 7. \end{aligned} \quad (16)$$

Отже, при зміні профілю температурного поля з квадратичного для експлуатації до лінійного при

перевірці отримаємо зміну похибки терморпар, відповідно до різниці (16) і (12)

$$\begin{aligned} \Delta\Delta E_{\Sigma} &= (a \times t_{rk}^4) / 7 - 0,25 \times a \times t_{rk}^4 \approx \\ &\approx -0,1 \times a \times t_{rk}^4 \end{aligned} \quad (17)$$

Як видно з (14) і (17), для похибки неоднорідності перехід з одного поля в інше не еквівалентний зворотному переходу.

Максимальне значення похибки поправки $\Delta\Delta E_{\Sigma}$, викликаной неоднорідністю термоелектродів, можна приблизно оцінити, наприклад, за поданими в [9] максимальними значеннями сумарного індивідуального відхилення (дрейфу) терморпар, підставивши їх в (6). Для терморпар типу ХА для 2000 годин експлуатації при 1000°C максимальне відхилення ХП (для обох термоелектродів) становить ≈ 18 °С, тобто ≈ 2 %. Відповідно середня зміна Δe_k повинна приблизно відповідати тим самим 2 % від e_N . Для терморпар типу ХА $e_N \approx 40 \text{ мВ} / ^\circ\text{С}$, звідки $\Delta e_k \approx 0,8 \text{ мВ} / ^\circ\text{С}$. Підставивши це значення в (6), одержимо

$$a = \Delta e_k / t_e^3 \approx 1,1 \times 10^{-15}, \quad (18)$$

Підставивши (18) в (12) і (13), отримаємо відповідно значення похибок терморпар в лінійному температурному полі $\approx 275 \text{ мВ}$, тобто $\approx 6,9$ °С, в квадратичному температурному полі $\approx 440 \text{ мВ}$, тобто ≈ 11 °С. Похибка поправки $\Delta\Delta E_{\Sigma}$ при зміні профілю температурного поля з лінійного в квадратичне згідно з (14) буде становити $\approx 4,1$ °С, тобто майже 40 % від самої поправки, чим при корекції похибок не можна нехтувати. При переході з квадратичного до лінійного профілю температурного поля отримаємо похибку $\approx -2,75$ °С, що теж істотно. Зазначимо, що такі похибки виникли тільки за рахунок порівняно невеликої зміни профілю температурного поля, без зміни глибини занурення терморпар.

З викладеного видно, що похибками неоднорідності при корекції похибок терморпар нехтувати не можна. Неврахування цих похибок та їх особливостей може призвести до настільки значної похибки корекції, що сама корекція, як стверджується в [11], втратить зміст.

Класифікація методів корекції похибок терморпар. Для класифікації відомих методів боротьби з похибкою дрейфу ХП терморпар і похибкою

неоднорідності виділимо в градієнті температурного поля вздовж термоелектродів ∇t постійну і змінну частини

$$\nabla t = \nabla t_{CONS} + \nabla t_{VAR} \quad (19)$$

і запишемо (4) з урахуванням (19)

$$\begin{aligned} \Delta E_{\Sigma} &= \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t dl = \int_0^l \Delta e_k(t) (\nabla t_{CONS} + \nabla t_{VAR}) dl = \\ &= \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t_{CONS} dl + \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t_{VAR} dl \end{aligned} \quad (20)$$

На основі аналізу (20) можна умовно виділити прояви деградаційних процесів, які проходять в термоелектродах терморпар – перший інтеграл суми “відповідає” часовому дрейфу, а другий – похибці неоднорідності. Можна виділити такі варіанти корекції похибок терморпар:

1. Якщо $\Delta e_k(t) \rightarrow 0$, то очевидно, що $\Delta E_{\Sigma} \rightarrow 0$. Це означає, що у разі відсутності деградаційних процесів ні дрейфу, ні набутої неоднорідності немає, обидва інтеграли залежності (20) дорівнюють нулю, зміни ХП терморпар відсутні. Такий випадок відповідає експлуатації терморпар за низьких (кімнатних) температур. Похибка терморпар, за умови переходу до використання індивідуальних ХП (при корекції початкового розкиду ХП) визначається початковою, порівняно невеликою, неоднорідністю термоелектродів [16].
2. Якщо $\nabla t_{VAR} \rightarrow 0$, то похибка терморпар ΔE_{Σ} визначається першим інтегралом залежності (20). Цей випадок відповідає експлуатації терморпар в стаціонарному температурному полі, де її похибка визначається $\Delta e_k(t)$, тобто деградаційні процеси в термоелектродах проявляються у вигляді часового дрейфу її ХП. За таких умов можна використовувати без обмежень всі методи корекції дрейфу, узагальнені в [1] – періодичну перевірку або калібрування [17], виключно прогноз, прогноз, що уточнюється за результатами періодичної перевірки або калібрування [18]. Однак треба зауважити, що для виконання умови $\nabla t_{VAR} \rightarrow 0$ періодичну перевірку слід виконувати не традиційним методом, в перевірній печі, а на місці експлуатації [10] або в перевірній печі, яка імітує температурне поле об’єкта експлуатації [19].
3. Якщо припустити, що деградаційні процеси в термоелектродах не залежать від температури, тобто

$\Delta e_k \neq f(t)$, то вже з (2) видно, що похибка термоелектродів залежить тільки від різниці температур робочого і вільних кінців. Це означає, що в такому гіпотетичному випадку похибка неоднорідності відсутня – термоелектроди дрейфують рівномірно, тому деградаційні процеси в термоелектродах проявляються у вигляді часового дрейфу її ХП. Такий випадок можливий, якщо не температура є головною причиною дрейфу, а, наприклад, проникаюча радіація.

4. Якщо зміна градієнта ∇t_{VAR} мала, то похибка термопар ΔE_{Σ} визначається передусім першим інтегралом залежності (20). Цей випадок відповідає експлуатації термопар в температурному полі, близькому до стаціонарного. Похибка термопар передусім визначається $\Delta e_k(t)$, тобто прояв деградаційних процесів у термоелектродах у вигляді часового дрейфу ХП домінує. За таких умов можна використовувати методи корекції дрейфу, узагальнені в [1] і перелічені в п. 2. Вплив другого інтеграла залежності (20) буде проявлятися як складова похибки корекції, яка погіршує її ефективність.

5. Безпосередньо після перевірки на місці експлуатації або калібрування можна вважати, що похибка термопар для цих умов відома. Упродовж деякого часу можна вважати, що $\Delta e_k(t) \rightarrow const$. У такому разі деградаційні процеси можуть проявити себе виключно як похибка неоднорідності, яка визначається другим доданком залежності (20). Похибка неоднорідності пропорційна до ∇t_{VAR} . Власне цей випадок описано в [11] і в результаті його аналізу зроблено недостатньо обґрунтований висновок про неможливість корекції похибок термопар взагалі. Однак, як показано в [19...21], навіть за значних змін ∇t_{VAR} , якими нехтувати не можна, для термопар, яка має значну набуту термоелектричну неоднорідність, можливий перерахунок похибки для одного профілю температурного поля (зокрема, перевірки) в похибку для іншого профілю температурного поля (зокрема, експлуатації). Але запропонований в [19...21] метод перерахунку ґрунтується на емпірично визначеному критерії розподілу отриманої в результаті перевірки сумарної похибки термопар між окремими ділянками. Такий критерій не є достовірним (детальніше див. п. 6) і не дає змоги прогнозувати подальший дрейф.

6. Якщо зміну градієнта ∇t_{VAR} не можна вважати малою, то похибка термопар ΔE_{Σ} визначається обома

інтегралами залежності (20). Цей випадок відповідає експлуатації термопар в температурному полі, яке настільки змінюється під час експлуатації, що впливом змін не можна нехтувати. Узагальнені в [1] методи корекції не дають змоги забезпечити істотне підвищення точності через те, що максимальний вплив похибки від набутої неоднорідності термоелектродів термопар, як показано в [12], дорівнює максимальній похибці дрейфу. Тобто при істотній зміні профілю температурного поля похибка часового дрейфу і неоднорідності співмірні – корекція однієї з них без урахування іншої фактично не забезпечує підвищення точності результату вимірювання. Метод перерахунку похибки від набутої неоднорідності, описаний в [19...21], не дає змоги забезпечити надійний прогноз зміни похибки термопар в процесі експлуатації через те, що в процесі перевірки або калібрування ми отримуємо сумарну похибку термопар ΔE_{Σ} , а індивідуальні особливості зміни $\Delta e_k(t)$ кожної ділянки не виявляються. Запропонований в [21] розподіл ΔE_{Σ} між окремими ділянками не забезпечує високої надійності прогнозу їх похибки під час подальшої експлуатації через те, що достовірний критерій розподілу невідомий, а розподіл згідно з неправильно вибраним критерієм може навіть збільшити похибку замість її зменшення. Мірою достовірності критерію розподілу похибки ΔE_{Σ} між окремими ділянками може бути вдалий прогноз змін похибки неоднорідності в умовах, які відповідають п. 4 – якщо розподіл виконано правильно, то при різних температурних полях прогнозована похибка ΔE_{Σ} термопар загалом буде відповідати її дійсному значенню. Відповідно до цього в [22] запропоновано метод корекції індивідуальних математичних моделей дрейфу окремих ділянок термопар шляхом її перевірки в наборі різних температурних полів, тобто при перевірці імітується зміна градієнта ∇t_{VAR} . При цьому отримуємо ряд значень похибок термопар $\Delta E_{\Sigma i}$, на основі яких, розв'язавши систему рівнянь або виконавши навчання нейронної мережі, визначаємо правильний розподіл похибок між окремими ділянками. Тоді побудовані у ході періодичних перевірок під час експлуатації термопар математичні моделі дрейфу окремих ділянок будуть ґрунтуватися на їх дійсних похибках, що зумовить підвищення точності прогнозу. Обмежує точність цього методу корекції похибок часового дрейфу і неоднорідності термопар зміна характеру самих деградаційних процесів в

термоелектродах через зміну умов експлуатації ділянок, яка викликана зміною профілю температурного поля. Тому цей метод доцільно використовувати, коли зміни градієнта ∇t_{VAR} , по-перше, хоч великі, але нетривалі (не впливають істотно на характер дрейфу), та, по-друге, проходять не плавно, а доволі чітко.

7. Крім запропонованого в п. 6 методу корекції похибок, для усунення впливу неоднорідності термоелектродів на результат вимірювання доцільно використати метод компенсації, який в [23] запропоновано реалізувати стабілізацією температурного поля вздовж електродів термопари. Похибка набутої неоднорідності, яка при випадковій зміні градієнта ∇t_{VAR} має випадковий характер, переводиться в систематичну похибку, що дає змогу використовувати для її корекції відповідні методи. Стабілізація температурного поля вздовж електродів головної термопари досягається розміщенням вздовж неї (в зоні градієнта) декількох підсистем регулювання температури, кожна з яких складається з давача температури (додаткової термопари), відповідного нагрівача і регулятора, який підтримує задану температуру на своїй ділянці. В результаті такий термоелектричний перетворювач створює вздовж термоелектродів головної термопари власне температурне поле, профіль якого не залежить від профілю зовнішнього температурного поля. Отже, в запропонованому в [23] термоелектричному перетворювачі ситуація відповідає п. 2, тобто $\nabla t_{VAR} \rightarrow 0$ і деградаційні процеси в термоелектродах не можуть себе проявити як похибка набутої термоелектричної неоднорідності. Вони проявляють себе тільки через перший інтеграл залежності (20), тобто як часовий дрейф. А часовий дрейф головної термопари можна успішно коригувати всіма переліченими в п. 2 методами, при цьому характер і тривалість зміни профілю зовнішнього температурного поля на процес корекції не впливають.

Висновки. Як показано в [12], деградаційні процеси в термоелектродах термопар проявляються і як похибка часового дрейфу (зміна ХП термопар в часі відповідно до дії високої температури експлуатації), і як похибка неоднорідності (зміна генерованої термопарою ЕРС від зміни профілю температурного поля вздовж її термоелектродів за незмінних температур робочого і холодних кінців). Виконане у цій

статті дослідження процесу виникнення і властивостей похибки термопар, викликані набутою в процесі тривалої експлуатації термоелектричною неоднорідністю їх електродів, дало змогу класифікувати відомі методи корекції похибок термопар з погляду прояву похибки неоднорідності.

Показано, що, на відміну від викладеної в [11] думки про неможливість корекції похибок термопар взагалі, існують умови, за яких похибка неоднорідності себе не проявляє або проявляє слабо, що дає змогу використовувати ряд методів боротьби з деградаційними процесами в термоелектродах, які проявляють себе як похибка часового дрейфу ХП термопар. Для умов, в яких проявами похибки неоднорідності нехтувати не можна, можлива її корекція або компенсація. Ефективний метод корекції похибки неоднорідності термопари (що коригує також її часовий дрейф) полягає у періодичній перевірці цієї термопари в температурних полях різного профілю і побудові таких математичних моделей похибки окремих ділянок термопари, які задовольняють умову достатньо точної корекції похибки неоднорідності в усіх температурних полях [22]. Метод компенсації реалізується створенням термоелектричним перетворювачем за допомогою додаткових підсистем регулювання температури власного профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари, незалежного від зміни профілю температурного поля об'єкта і перевірної печі [23]. У такому стабільному температурному полі результати деградації термоелектродів не можуть себе проявити як похибка неоднорідності, а тільки як похибка часового дрейфу ХП термопари. Це дає змогу використати відомі методи корекції такого дрейфу.

Отже, враховуючи викладене, існують можливості підвищення точності вимірювання температури в умовах зміни профілю температурного поля вздовж електродів термопари, яка має значну набуто у ході експлуатації неоднорідність термоелектродів.

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. Приборы для измерения температуры контактным способом / Под ред. Р.В. Бычковского. – Львов: Вища школа, 1979. – 208 с.
3. ГОСТ 3044-84. Преобразователи термоэлектрические. Номинальные статис-

- тические характеристики преобразования. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 56 с. 4. International standard IEC 584-2. 5. Саченко А.А., Обелевская К.М., Заничковская Л.В., Кочан В.А. Устройство для измерения температуры. А.с. № 352152 СССР. 6. Саченко А.А., Твердый Е.Я. Совершенствование методов измерения температуры. – К.: Техніка, 1983. – 104 с. 7. Б.К. Брагин, И.Л. Рогельберг, Г.Н. Покровская, Ю.Д. Тювин и др. Термоэлектрическая неоднородность проволок из сплавов хромель, алюмель и копель / В н-техн. сборнике «Исследование сплавов для термопар», Труды ин-та «Гипроцветметобработка», XXX. – М.: Металлургия, 1976. – С. 87–95. 17. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с. 18. Саченко А., Кочан В., Турченко В., Головки В. (BY), Савицький Ю. (BY), Лапоулос Т. (GR). Спосіб формування навчальної вибірки прогнозуючої дрейф пристрою збору даних нейронної мережі. Патент №50830 Україна, МПК 7 G06F15/18, Заявлено 04.01.2000; Опубл. 15.11.2002. – 14 с. 19. Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов / Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. по специальности 05.11.15 – М., ВНИИФТРИ, 1984. – 25 с. 20. Чирка М.І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях. Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня к.т.н. по спеціальності 05.11.04 – Львів: Державний університет “Львівська політехніка”, 1997. – 16 с. 21. Чирка М.І., Васильків Н.М., Кочан Р.В. Метод підвищення точності прогнозування нестабільності характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів // Вісник ТАНГ. Економіко-математичне моделювання. – 1999. – № 6. – С.37–42. 22. Васильків Н.М., Кочан О.В., Кочан В.В. Спосіб корекції похибки неоднорідності термопар. Заявка на патент № а 2008 05623, МПК G01K 7/00, заявлено 29.04.2008. 23. Кочан О.В., Кочан Р.В. Термоелектричний перетворювач. Пат. 200701855 Україна, Заявл. 22.02.2007.
- тические характеристики преобразования. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 56 с. 4. International standard IEC 584-2. 5. Саченко А.А., Обелевская К.М., Заничковская Л.В., Кочан В.А. Устройство для измерения температуры. А.с. № 352152 СССР. 6. Саченко А.А., Твердый Е.Я. Совершенствование методов измерения температуры. – К.: Техніка, 1983. – 104 с. 7. Б.К. Брагин, И.Л. Рогельберг, Г.Н. Покровская, Ю.Д. Тювин и др. Термоэлектрическая неоднородность проволок из сплавов хромель, алюмель и копель / В н-техн. сборнике «Исследование сплавов для термопар», Труды ин-та «Гипроцветметобработка», XXX. – М.: Металлургия, 1976. – С. 87–95. 17. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с. 18. Саченко А., Кочан В., Турченко В., Головки В. (BY), Савицький Ю. (BY), Лапоулос Т. (GR). Спосіб формування навчальної вибірки прогнозуючої дрейф пристрою збору даних нейронної мережі. Патент №50830 Україна, МПК 7 G06F15/18, Заявлено 04.01.2000; Опубл. 15.11.2002. – 14 с. 19. Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов / Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. по специальности 05.11.15 – М., ВНИИФТРИ, 1984. – 25 с. 20. Чирка М.І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях. Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня к.т.н. по спеціальності 05.11.04 – Львів: Державний університет “Львівська політехніка”, 1997. – 16 с. 21. Чирка М.І., Васильків Н.М., Кочан Р.В. Метод підвищення точності прогнозування нестабільності характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів // Вісник ТАНГ. Економіко-математичне моделювання. – 1999. – № 6. – С.37–42. 22. Васильків Н.М., Кочан О.В., Кочан В.В. Спосіб корекції похибки неоднорідності термопар. Заявка на патент № а 2008 05623, МПК G01K 7/00, заявлено 29.04.2008. 23. Кочан О.В., Кочан Р.В. Термоелектричний перетворювач. Пат. 200701855 Україна, Заявл. 22.02.2007.