

## МЕТОД КОРЕКЦІЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ НЕОДНОРІДНИМИ ТЕРМОПАРАМИ

*Запропоновано метод корекції похибки вимірювання температури термопарами, що мають значну, набуту в процесі тривалої експлуатації при високій температурі, термоелектричну неоднорідність електродів. Розроблено засоби реалізації методу – піч зі змінним профілем температурного поля і систему вимірювання термо-е.р.с. термопар, що повіряються.*

*The method of error correction of temperature measurement using thermocouples with significant heterogeneity of electrodes is offered. This heterogeneity is acquired during long operation at high temperature. The means of realization of a method – furnace with a variable profile of a temperature field and system for thermo-e.m.f. measurement of tested thermocouples are developed.*

Ключові слова: вимірювання, температура, похибки.

### Вступ

Зазвичай використання індивідуальної характеристики перетворення (ХП) давача веде до різкого зростання точності вимірювання фізичних величин. Однак для термопар це не завжди справедливо. Причиною такого явища є те, що деградаційні процеси в електродах термопар, викликані тривалим перебуванням при високій температурі, проявляються одночасно як часовий дрейф ХП [1, 2] і як наростання набутої під час тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності їх електродів. Остання зумовлює залежність термо-е.р.с. термопар не тільки від різниці температур між гарячим і холодними кінцями, а й від змін профілю температурного поля вздовж електродів термопар [3]. У [4] показано, що максимальне значення похибки від неоднорідності термопар рівне максимальній похибці від дрейфу їх ХП. Тому корекція одного прояву деградаційних процесів в електродах термопар не забезпечує високої точності вимірювання температури [3] без врахування, тобто корекції або компенсації, дії іншого їх прояву.

Пропоновані у [2, 5– 8] методи перевірки або калібрування термопар на місці експлуатації з допомогою взірцевих термопар або калібраторів температури відповідно дозволяють реально підвищити точність вимірювання температури тільки при малих змінах профілю температурного поля вздовж електродів термопар, коли їх вплив на термо-е.р.с. термопар не перевищує допустимої похибки. В такому випадку, при повірці або калібруванні термопар власне на місці експлуатації, поточне значення похибки неоднорідності буде врахованим в отриманому значенні поправки і точність вимірювання температури зросте. Однак надалі, якщо виникне зміна профілю температурного поля, отримане значення поправки виявиться неактуальним – воно знайдене для інших умов, для іншого профілю температурного поля. І, хоча точність корекції часового дрейфу може бути висока за рахунок його індивідуального прогнозу за результатами перевірок або калібрувань (наприклад, з використанням методів, розроблених в [7– 10], похибка вимірювання температури буде велика за рахунок прояву похибки від набутої неоднорідності. Такий стан справ привів до того, що в [3] висловлена думка про принципову неможливість корекції похибок термопар.

На противагу твердженню про неможливість боротьби з набутою неоднорідністю термопар, в [11– 13] були розроблені методи перерахунку похибки неоднорідної термопар з одного профілю температурного поля (наприклад, температурного поля повірної печі) в інший профіль (наприклад, температурного поля експлуатації). Ці методи базувалися на розбитті термопар на окремі однорідні ділянки (тобто ділянки, в межах яких набута неоднорідність проявляє себе достатньо слабо), побудові індивідуальних математичних моделей похибки дрейфу ХП цих ділянок і наступному сумуванні отриманих для кожної ділянки значень поправок. Однак такий метод забезпечує підвищення точності вимірювання температури неоднорідними термопарами тільки у випадку адекватності індивідуальних математичних моделей похибки реальним процесам накопичення похибки. Безпосереднє визначення дійсних похибок окремих ділянок неможливе без руйнування самої термопар. Тому в [12, 13] запропоновано метод уточнення індивідуальних математичних моделей похибки дрейфу ХП термопар за результатами їх періодичної перевірки. Однак при повірці термопар ми отримуємо сумарну похибку всіх ділянок, а для уточнення індивідуальних математичних моделей необхідно знати їх індивідуальні відхилення від дійсних похибок. У [13] запропоновано розподілити похибку термопар, отриману при її повірці, на похибки окремих ділянок згідно різних критеріїв. Але запропоновані критерії були емпіричні, не підтверджені результатами теоретичних або експериментальних досліджень. В той же час похибка розподілу сильно впливає на результати процедури уточнення індивідуальних математичних моделей. Очевидно, що неправильний розподіл веде до росту неадекватності прогнозу, тобто збільшення похибки вимірювання температури, а не її зменшення. Таким чином, запропоновані в [11– 13] методи корекції похибки від термоелектричної неоднорідності електродів термопар є недостатньо надійними з точки зору метрології, а питання підвищення точності вимірювання температури неоднорідними термопарами залишається актуальним.

Метою даної статті є розробка методу корекції похибки вимірювання температури термопарами, які мають значну, набуту в процесі тривалої експлуатації, термоелектричну неоднорідність електродів [14].

**Метод корекції похибки вимірювання температурами неоднорідними термопарами**

Основна ідея запропонованого в [14] методу полягає в тому, що, якщо визначену при повірці термопар сумарну похибку прогнозу дрейфу її окремих ділянок розподілити між цими ділянками правильно і провести корекцію індивідуальних математичних моделей дрейфу ділянок, то прогноз похибок термопар (як часового дрейфу, так і похибки від неоднорідності) буде мати високу точність як для моменту поточної повірки, так і для майбутньої експлуатації. А точність оцінки похибки неоднорідності для моменту поточної повірки можна зразу ж перевірити – шляхом зміни профілю температурного поля вздовж електродів термопар, яку ми повіряємо. Якщо обчислена для всіх варіантів профілю температурного поля поправка буде близька експериментально визначеній похибці, то очевидно, що розподіл сумарної похибки проведено правильно.

На основі декількох правильних розподілів сумарної похибки термопар між її ділянками можна побудувати індивідуальний прогноз дрейфу для кожної ділянки. Для цього доцільно використати методи, запропоновані в [9, 10]. При цьому висока точність прогнозу похибки від неоднорідності термоелектродів буде поєднана з високою точністю прогнозу часового дрейфу, тобто в результаті проведених операцій будуть визначені математичні моделі індивідуальної зміни в процесі експлуатації термоелектричної здатності кожної ділянки термопар. Відповідно до цих моделей можна коригувати як часовий дрейф ХП термопар, так і похибку, викликану зміною профілю температурного поля при експлуатації.

Виходячи з основної ідеї запропонованого методу, можна визначити основні нові процедури експлуатації та повірки (додаткові до традиційних), необхідні для його реалізації:

1. Постійний контроль (як під час повірки, так і під час експлуатації) профілю температурного поля вздовж електродів термопар (головної), похибка якої повинна бути скоригована;
2. Можливість зміни під час повірки профілю температурного поля вздовж електродів головної термопар таким чином, щоб можна було зафіксувати достатній набір профілів, для яких буде визначено похибку термопар в цілому (сумарну похибку всіх ділянок), тобто отримати достатній набір даних для наступної обробки;
3. Обробка результатів повірки згідно методики, яка дозволяє визначити порядок розподілу отриманих під час повірки значень сумарної похибки всіх ділянок між окремими ділянками;
4. Використання під час експлуатації уточнених індивідуальних математичних моделей дрейфу всіх ділянок згідно методу корекції, запропонованого в [12].

Перші дві процедури реалізуються відомими методами. Третю процедуру можна реалізувати наступним чином. Допустимо, що кожен електрод термопар розбито на  $n$  ділянок, дрейф кожної з яких описується індивідуальною математичною моделлю. В результаті повірки термопар в повірній печі з деяким профілем температурного поля отримаємо дійсне значення її термо-е.р.с.  $E_{TCR}$ , яке є сумою номінального значення  $E_{TCN}$  і дійсного відхилення від нього  $\Delta E_{TCR}$

$$E_{TCR} = E_{TCN} + \Delta E_{TCR}.$$

В той же час поточна корекція похибки неоднорідності ведеться шляхом прогнозу цієї похибки  $\Delta E_{TCR}$  згідно математичної моделі, яка представляє собою суму індивідуальних математичних моделей похибок всіх  $n$  ділянок обох термоелектродів  $TE1$  і  $TE2$

$$\Delta E_{TCR} = \sum_{k=1}^n \Delta E_{TE1Pk} + \sum_{k=1}^n \Delta E_{TE2Pk}.$$

Тому можна записати аналогічне співвідношення для прогнозованого значення термо-е.р.с.  $E_{TCP}$

$$E_{TCP} = E_{TCN} + \Delta E_{TCP}.$$

В ідеальному випадку дійсне  $E_{TCR}$  і прогнозоване  $E_{TCP}$  значення термо-е.р.с. повинні співпадати, тобто  $\Delta E_{TCR} = \Delta E_{TCP}$ . Однак реально виникає похибка прогнозу  $\Delta \Delta E_{TCP}$ , яку можна визначити як

$$\Delta \Delta E_{TCP} = \Delta E_{TCP} - \Delta E_{TCR}.$$

Основною задачею запропонованого методу корекції похибки неоднорідності термопар є розподілити знайдену за результатами повірки похибку прогнозу  $\Delta \Delta E_{TCP}$  між всіма  $n$  індивідуальними математичними моделями дрейфу  $\Delta E_{TE1Pk}$  і  $\Delta E_{TE2Pk}$  окремих  $k$  ділянок обох електродів таким чином, щоб звести в наступний міжповірний інтервал похибку прогнозу  $\Delta \Delta E_{TCP}$  до нуля. Для цього розподілимо сумарну похибку прогнозу дрейфу термопар  $\Delta \Delta E_{TCP}$  між похибками  $\Delta \Delta E_{TE1Pk}$  і  $\Delta \Delta E_{TE2Pk}$  індивідуальних математичних моделей дрейфу  $\Delta E_{TE1Pk}$  і  $\Delta E_{TE2Pk}$  окремих ділянок електродів  $TE1$  і  $TE2$  згідно індивідуальних для кожної ділянки критеріїв  $K_{TE1k}$  і  $K_{TE2k}$ ,

$$\Delta \Delta E_{TCP} = \sum_{k=1}^n K_{TE1k} \Delta \Delta E_{TE1Pk} + \sum_{k=1}^n K_{TE2k} \Delta \Delta E_{TE2Pk}. \quad (1)$$

Критерії  $K_{TE1k}$  і  $K_{TE2k}$  повинні задовольняти умову

$$\sum_{k=1}^n K_{TE1k} + \sum_{k=1}^n K_{TE2k} = 1.$$

Критерії  $K_{TE1k}$  і  $K_{TE2k}$  можна визначити шляхом перевірки термопар в  $j$  температурних полях. Тоді можна записати систему  $j$  незалежних рівнянь виду (1). Якщо виконується умова  $j = 2n$ , то система має однозначне рішення.

Однак між  $j$  та  $n$  існує протиріччя. Для підвищення точності прогнозу  $n$  доцільно збільшувати. Тоді індивідуальні математичні моделі дрейфу можуть краще, адекватніше описати характер дрейфу ділянки. Але при зростанні  $n$  різко росте кількість профілів температурного поля, в яких необхідно перевірити термопару для виконання умови  $j = 2n$ , тобто для створення можливості знаходження критеріїв  $K_{TE1k}$  і  $K_{TE2k}$  шляхом рішення системи рівнянь. Відповідно такий шлях значно підвищує трудомісткість запропонованого методу корекції похибки вимірювання температури неоднорідними термопарами. Для зменшення кількості перевірок, тобто створення можливості виконання умови  $j < 2n$ , пропонується використати узагальнюючі властивості штучних нейронних мереж, зокрема, тривірневого перцептрона.

На рис. 1 представлено структуру нейронної мережі, яка реалізує процедуру розподілу похибки корекції  $\Delta E_{TSP}$ , тобто знаходження значень критеріїв  $K_{TE1k}$  і  $K_{TE2k}$  таким чином, щоб сумарне відхилення результатів прогнозу від знайдених дійсних значень  $\Delta E_{TSP}$  було мінімальним для всіх профілів температурного поля перевірки. Похибки обох електродів термопар мають слабкі кореляційні зв'язки. Хоча їх значення і залежать від одних і тих же забруднень, які поступають з оточуючого середовища, ці забруднення по різному діють на кожен електрод, крім того, електроди мають значні індивідуальні особливості реакції на зовнішні забруднення. Крім того, дрейф ХП термопар, а значить, і неоднорідність їх електродів, залежить не тільки від зовнішніх забруднень, а і від внутрішніх процесів (окислення, міграція, ріст міжкристалічних напружень). У зв'язку з тим, тривірневий перцептрон, представлений на рис. 1, розділений поелектродно – він складається з двох частин, об'єднаних одним вихідним нейроном ВихН. Крім вихідного нейрону ВихН, в склад нейронної мережі входить  $2n$  вхідних нейронів  $VxH1 \dots VxHn$  (кількість вхідних нейронів повинна відповідати кількості ділянок прогнозу дрейфу, на які розбито обидва електроди), а також нейрони схованого рівня  $CxH1 \dots CxHm$ .

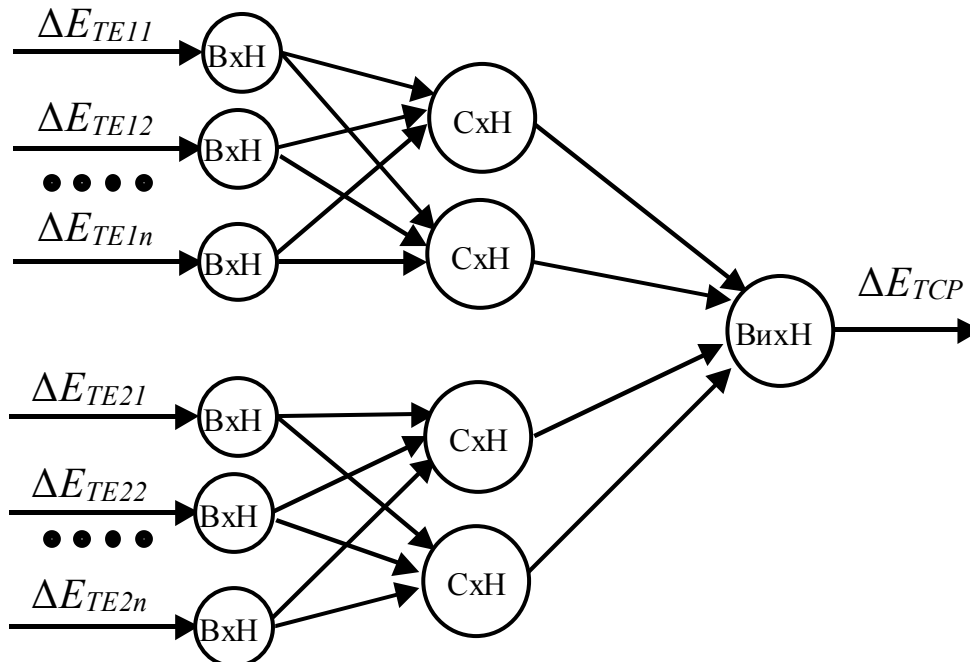


Рис. 1. Структура штучної нейронної мережі розподілу похибки корекції

Вхідні нейрони  $VxH1 \dots VxHn$  виконують тільки розподільчі функції. Основні узагальнюючі властивості мають нейрони схованого рівня  $CxH1 \dots CxHm$ . Їх вихідний сигнал  $h_m$  визначається добутком зваженої суми на функцію активації з врахуванням зміщення  $T_m$

$$h_m = F\left(\sum_{i=1}^g w_{im} \times X_{im} - T_m\right),$$

де  $w_{im}$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го входу  $m$ -го нейрона;  $X_{im}$  – значення, яке поступає на  $i$ -й вхід  $m$ -го нейрона з вхідних нейронів;  $F(\cdot)$  – функція активації, однакова для всіх нейронів схованого рівня.

Як функцію активації, в даному випадку доцільно використовувати сігмоїду

$$F = \frac{1}{1 + e^{-x}}.$$

Кількість нейронів схованого рівня  $m$  вибирається експериментально, однак вона не повинна перевищувати половини від кількості профілів температурних полів, при яких проводилася повірка, інакше трирівневий перцептрон втрачає узагальнюючі властивості (починає проявлятися його схильність до перетворення в асоціативну пам'ять).

Вихідний нейрон ВихН – лінійний, тобто його функція активації рівна одиниці.

Штучна нейронна мережа навчається за результатами повірки. При цьому на її вхід по чергово подаються вектори навчання. Кожен вектор складається з результатів прогнозу дрейфу для кожної ділянки обох електродів для даного профілю температурного поля повірки (подаються на вхідні нейрони) і результату повірки (дійсного відхилення  $\Delta E_{TCR}$ ). З цим дійсним відхиленням  $\Delta E_{TCR}$  порівнюється значення прогнозованої похибки  $\Delta E_{TCR}$ , обчислене на виході штучної нейронної мережі. Отримана різниця служить для цілеспрямованої зміни вагових коефіцієнтів  $w_{im}$  та зміщення  $T_m$  відповідно до алгоритму навчання нейронних мереж (back propagation).

У результаті багатьох циклів навчання нейронної мережі відхилення обчислених на виході штучної нейронної мережі значень будуть мінімально відрізнятися від отриманих експериментальним шляхом при повірці дійсних відхилень ХП термопари від номінальних  $\Delta E_{TCR}$ , тобто буде виконана третя процедура пропонованого методу. При цьому навчена нейронна мережа містить в собі в неявному виді критерії  $K_{TE1k}$  і  $K_{TE2k}$ . Така навчена нейронна мережа власне і повинна бути використана при прогнозі похибки термопари під час експлуатації для корекції похибки неоднорідності, коли на її вхід подаються прогнозовані індивідуальними математичними моделями дрейфу  $\Delta E_{TE1Pk}$  і  $\Delta E_{TE2Pk}$ , відповідні до актуального профілю температурного поля значення дрейфу всіх ділянок термопари, а на виході отримуємо значення похибки  $\Delta E_{TCR}$ , що відповідає дійсному.

### Реалізація пропонованого методу

Постійний контроль профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари можливий з допомогою додаткових давачів температури, розміщених вздовж цих електродів. Для цього вигідними є додаткові термопари, аналогічно до [15] (але без нагрівачів і відповідних підсистем регулювання). Додаткові термопари легко ввести в склад вимірювальної системи як додаткові канали, аналогічні каналу головної термопари. Зменшити затрати на ці додаткові термопари можна, об'єднуючи їх в одну багатозонну термопару [16]. Також можна зменшити кількість точок контролю профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари за рахунок апроксимації цього профілю довільним відомим методом.

Можливість зміни профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари під час повірки можна забезпечити двома методами: зміною глибини занурення термоелектричного перетворювача в цілому та оснащенням повірної печі додатковими нагрівачами з відповідними підсистемами регулювання. При цьому виникають дві задачі – розміщення взірцевої термопари та збільшення градієнту профілю температурного поля. Взірцеву термопару слід розмістити так [14], щоб профіль температурного поля вздовж її електродів при повірці не змінювався (щоб не проявлялася похибка від її неоднорідності). У традиційній трубчатій повірній печі цього можна досягнути, розміщуючи додаткову термопару так, щоб її вільні кінці виходили з іншої сторони, ніж вільні кінці термопари, що повіряється. Для того, щоб під час повірки, при зміні профілю температурного поля, не змінювалися умови теплообміну між робочими кінцями повірюваної та взірцевої термопари, доцільно помістити ці робочі кінці в додатковий термовирівнювач.

Конструктивну схему повірної печі з розміщеними в ній термопарами, а також структуру системи повірки термопар представлено на рис. 2. Трубочата повірна піч зображена як нагрівач Н0, давач його температури ДТ0 і канал С0 підсистеми регулювання. В середині Н0 розміщені взірцева термопара ВТП і термоелектричний перетворювач, що повіряється, який складається з головної термопари ГТП і додаткових термопар контролю профілю температурного поля вздовж електродів ГТП, що входять в багатозонну термопару БТП. Вільні кінці всіх термопар підключені до термовирівнювачів ТВКп (для ВТП) і ТВК (для ГТП і БТП), в яких розміщені відповідні давачі температури вільних кінців. Виходи всіх термопар (ВТП, ГТП, БТП) підключені до вимірювальної системи.

Для створення потрібного профілю температурного поля повірки і його зміни використано додаткові зони нагріву – нагрівачі Н1 і Н2, а також відповідні їм давачі температури ДТ1 і ДТ2 – зазвичай термопари, вільні кінці яких підключені до ТВК і, надалі, до відповідних входів вимірювальної системи. Підтримка потрібного значення температури здійснюється відповідними каналами регулятора. Додаткові зони нагріву теж оснащені термовирівнювачами. Для зменшення теплового потоку вздовж

термовирівнювачів, який не дозволить створити великі значення градієнту вздовж електродів ГТП, між термовирівнювачами розміщені теплоізоляційні вставки.

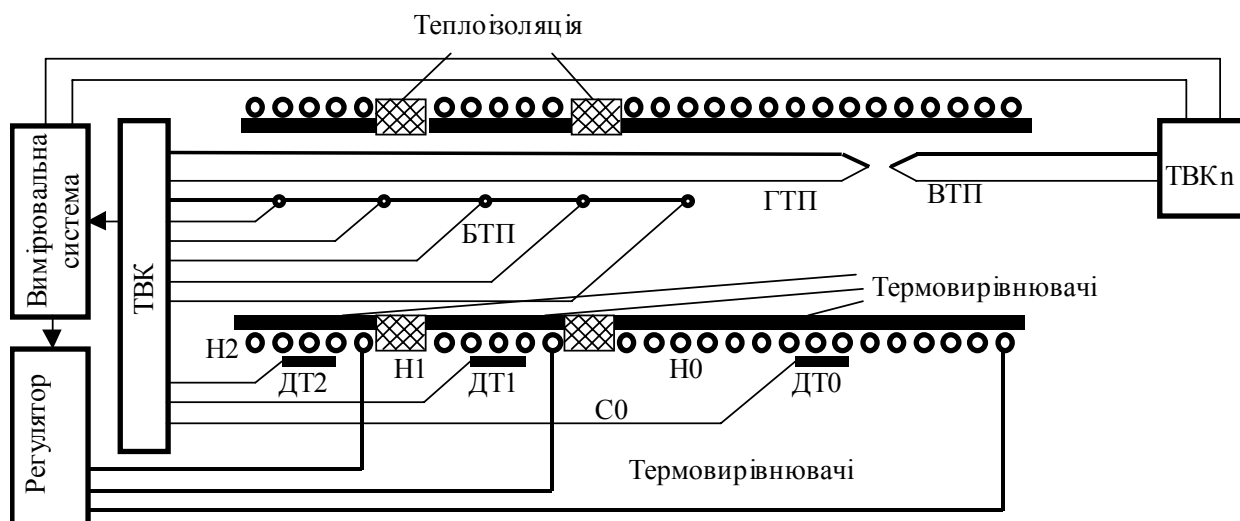


Рис. 2. Структура повітряної печі з розміщеними в ній термометрами

Похибка вимірювання температури при використанні запропонованого методу залежить від похибки відтворення індивідуальних відхилень математичних моделей всіх ділянок термопар з допомогою навченої нейронної мережі. А ця похибка в значній мірі залежить від похибки визначення дійсних значень її термо-е.р.с.  $E_{TCR}$  термопар під час перевірок в різних температурних полях. При цьому систематична похибка визначення дійсних значень її термо-е.р.с.  $E_{TCR}$  впливає тільки на систематичну похибку майбутнього прогнозу. А випадкова похибка впливає на розподіл знайдених за результатами перевірок в різних профілях температурного поля похибок прогнозу  $\Delta\Delta E_{TCR}$ , тобто впливає на адекватність індивідуальних відхилень математичних моделей всіх ділянок термопар. Тому випадкова похибка та короткочасна нестабільність вимірювальної системи є значно небезпечнішими, ніж її систематична похибка.

Представлена на рис. 2 конструктивна схема була реалізована у відповідному стенді, де використано вимірювальну систему, описану в [17]. У цій системі, призначеній для дослідження ефективності методів корекції та компенсації похибок термопар, застосовано спеціальні заходи, які забезпечили малу випадкову похибку і хорошу стабільність результатів вимірювання – похибка нестабільності не перевищує  $\pm (0,0025+0,002 (X/X_{max}-1)) \%$  за добу, що відповідає похибці дослідження зміни дійсних значень  $E_{TCR}$  в різних температурних полях не більше  $0,06^\circ\text{C}$ . Для досягнення таких результатів застосовано наступні заходи:

1. Як давачі температури вільних кінців термопар, використано мідні термометри опору [18], які розміщуються в головках термопар, що дозволило виключити використання подовжувальних проводів (які вносили б додаткову похибку).

2. Комутатор термопар і термометрів опору виконано на герконових реле [19] з додатковими термовирівнювачами, що дозволило зменшити паразитні термо-е.р.с. до рівня менше 1 мкВ.

3. Для вимірювання термо-е.р.с. термопар і спадів напруги на термометрах опору використано 24-х розрядний сігма-дельта аналого-цифровий перетворювач, що входить в мікроконвертор ADuC-834, що має велику чутливість і завадостійкість.

4. Для підвищення точності та стабільності вимірювального каналу передбачено періодичне встановлення нуля і калібрування. Джерело напруги калібрування виконано на прецизійному стабілізаторі AD780 та подільнику на резисторах C5-61.

5. Для зменшення дії завод нормального виду передбачено усереднення 8 результатів перетворення з попереднім цензуруванням вибірки.

6. Для зменшення дії завод загального виду передбачено екранування трансформатора живлення та розв'язку сигналів інтерфейсу RS-232 з допомогою двох оптронів типу АОТ128.

Експериментальні дослідження стенду показали, що він виконує поставлені вимоги.

### Висновки

Пропонований метод корекції похибки термопар, що мають значну, набуту в процесі тривалої експлуатації, неоднорідність термоелектродів, дозволяє значно, в декілька разів підвищити точність вимірювання температури об'єктів, профіль температурного поля яких змінюється. Метод є відносно простим в реалізації. Сам давач (термоелектричний перетворювач), крім головної термопар, вимагає вимірювання поточних параметрів профілю температурного поля вздовж електродів з допомогою власних (вбудованих) або зовнішніх термопар (або багатозонної термопар). Найбільше ускладнюється повірна піч,

яка може обслуговувати сотні робочих давачів. Але ускладнення повірної печі не буде значним – зміну профілю температурного поля повірної печі частково можна реалізувати шляхом зміни глибини занурення давачів, що повіряються. В такому випадку достатньо двох додаткових нагрівачів для зміни градієнта температурного поля вздовж електродів головної термопарі. При цьому регулятор додаткових нагрівачів повинен тільки орієнтовно задавати температуру і не змінювати потужність нагрівача в подальшому. Такий принцип дії регулятора дозволить уникнути самозбудження, до якого схильні системи, що мають тепловий зв'язок між зонами нагріву [20]. Тоді можна уникнути необхідності використовувати складні методи регулювання. Решта операцій методу виконуються обчислювальним шляхом, тобто не вимагають іншого додаткового обладнання, крім засобу обчислення (мікроконтролера або комп'ютера), які, зазвичай, і так присутні в складі сучасних вимірювально-керуючих систем.

### Література

1. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В. Самсонов, А.И. Киц, О.А. Кюздени и др. – К.: Наукова думка, 1972. – 242 с.
2. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis. – Vulkan-Verlag, Essen, 1981. – 523 p.
3. 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.
4. Кочан О., Васильків Н., Кочан Р., Яскілка В. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2007. – № 1. – С. 122-129.
5. United State Patent 3.499.340. 73-1, G01 -15/00. Self calibrating temperature sensing probe and probe – indicator combination / Alf Hundves, Henz G. Buschfort.. – 31p.
6. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 82 с.
7. Саченко А.А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температур в промышленных технологиях: Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. – Ленинград, ЛЭТИ, 1988. – 32 с.
8. Кочан В.В. Электрические измерители температуры повышенной точности со встроенными калибраторами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.05 / Киевск. политехн. ин-т. – К., 1989. – 18 с.
9. Патент 50830 України, МПК 7 G06F15/18. Спосіб формування навчальної вибірки прогнозуючої дрейф пристрою збору даних нейронної мережі / Саченко А., Кочан В., Турченко В. (Україна), Головка В. (ВУ), Савицький Ю. (ВУ), Лаопулос Т. (GR). Заявл. 04.01.2000; опубл. 15.11.2002. – 14 с.
10. Турченко В.О. Нейромережеві методи і засоби підвищення ефективності дистрибутивних мереж збору та обробки сенсорних даних: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.13. / Державний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2001. – 16 с.
11. Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.15. – М.: ВНИИФТРИ, 1984. – 25 с.
12. Чирка М.І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.04 – «Приклади та методи вимірювання теплових величин». – Львів: Державний університет «Львівська політехніка», 1997. – 16 с.
13. 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.
14. Заявка на патент № а 2008 05623, МПК G01K 7/00. – Заявл. 29.04.2008. Спосіб корекції похибки неоднорідності термопар Васильків Н.М., Кочан О.В., Кочан В.В. – 12 с.
15. Пат. а200701855 Україна. Термоелектричний перетворювач / Кочан О.В., Кочан Р.В (Україна). – Заявл. 22.02.2007. – 10 с.
16. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М.: Металлургия, 1971. – 447 с.
17. Васильків Н.М., Кочан О.В., Яскілка В.Я. Стенд дослідження термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. – № 1. – С. 122-130.
18. Белоусов И.А. Повышение точности многоканальных измерительных устройств с термоэлектрическими преобразователями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.05. – Львов ФМИ: 1991. – 16 с.
19. Кочан Р. В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 / «Інформаційно-вимірювальні системи». – Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України – Львів, 2005. – 16 с.
20. Соколов А. В. Повышение точности регулирования температурного поля путем совершенствования алгоритма управления многозонным термическим объектом: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – Рыбинск, 2004. – 159 с.

Надійшла 7.2.2010 р.