

Національний університет „Львівська політехніка”

Васильків Надія Михайлівна

УДК 536.531

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ  
ТЕРМОПАРАМИ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

05.11.04 – Прилади та методи вимірювання теплових величин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Тернопільському національному економічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент  
**Кочан Володимир Володимирович,**  
Тернопільський національний економічний  
університет,  
доцент кафедри інформаційно-обчислювальних  
систем та управління

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент  
**Яцишин Святослав Петрович,**  
Національний університет „Львівська політехніка”,  
професор кафедри „Інформаційно-вимірювальні  
технології”

кандидат технічних наук, доцент  
**Паракуда Василь Васильович,**  
Державне підприємство Науково-дослідний  
інститут метрології вимірювальних і управляючих  
систем (м. Львів), перший заступник директора з  
науково-технічної роботи

Захист відбудеться 25 березня 2011 р. о 16<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д35.052.08 Національного університету „Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. С.Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету „Львівська політехніка” ( 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий 24 лютого 2011 р.

*Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради, д.т.н., проф.*

Я.Т. Луцик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасне високопродуктивне обладнання вимагає високої точності контролю параметрів технологічних процесів, зокрема температури. У зв'язку з цим задача підвищення точності вимірювання температури є актуальною. Наприклад, підвищення температури спалювання палива на електростанції за рахунок вищої точності її вимірювання дає не тільки збільшення коефіцієнту корисної дії, але і знижує об'єм шкідливих викидів. Крім того, ряд галузей, зокрема, атомна енергетика, вимагає підвищення метрологічної надійності методів і засобів вимірювання температури.

Однак, хоча точність приладів і систем вимірювання температури постійно зростає, похибка вимірювання температури цими приладами і системами майже не зменшується. Такий стан пояснюється тим, що у вимірювальному каналі домінує похибка первинних перетворювачів (давачів, сенсорів). А похибка поширених давачів температури за останні десятиліття, незважаючи на те, що їх розробці та вдосконаленню присвячено ряд науково-дослідних робіт, майже не зменшилася.

Найпоширеніші контактні давачі температури – термоелектричні перетворювачі (ТЕП), досліджували вітчизняні та зарубіжні наукові школи – Львівська, Ленінградська, Свердловська та ін. Термопары ТЕП мають великий початковий розкид функцій перетворення (ФП) та, через деградаційні процеси у термоелектродах, значний дрейф ФП при експлуатації під дією високих температур. Методи корекції цих похибок розроблені. Але деградаційні процеси спричиняють також накопичення набутої термоелектричної неоднорідності, яка викликає зміну термо-е.р.с. від зміни профілю температурного поля вздовж термоелектродів при сталих температурах робочого з'єднання і з'єднань порівняння. Ця похибка небезпечна через те, що вона мало вивчена, а методи її зменшення складні та малоефективні. Тому корекція цієї похибки є актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана в рамках науково-дослідних робіт ОНІЛ-55-84 „Разработка автоматизированного комплекса экспериментальных исследований термоэлектрических преобразователей и системно-ориентированного коммутатора сигналов низкого уровня” ( № ГР 01840082120, 1984-1986рр.), ВТ 27-86 „Разработка и изготовление экспериментального образца многоканального системно-ориентированного контроллера на базе одноплатной микро-ЭВМ для измерения и регулирования тепловых режимов термического оборудования в составе децентрализованной АСУ ТП” ( № ГР 01860026239, 1986-1988рр.), ІОСУ-27-91 „Б” „Розробка системно-орієнтованого датчика для вимірювання температури з підвищеною точністю і типової методики метрологічної атестації вимірювального каналу інформаційно-вимірювальних систем” (№ ДР 0194U005003, 1991-1993рр.), ІОСУ-15-01 „К” „Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в спеціальних технологіях” (№ ДР 0101U002361, 2001-2004рр.), ІОСУ-05-04 „Б” “Розробка Web-базованої вимірювальної системи з розподілим

інтелектом” (№ ДР 0104U006975, 2004-2006pp), НДІ-ІКС-01-09 „К” “Розробка системи вимірювання температури з компенсацією похибки від неоднорідності електродів термопар” (№ ДР 0109U005419, 2008-2010pp.).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертації є розробка методу корекції похибки від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар на основі аналізу властивостей цієї похибки.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Розробити методику аналізу похибки від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар на основі результатів експериментальних досліджень часового дрейфу їх ФП;
2. Дослідити властивості похибки електродів термопар від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності;
3. Виявити найбільш небезпечні режими експлуатації ТЕП на об'єктах з різним характером змін профілю температурного поля з точки зору впливу на результат вимірювання температури похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар;
4. Провести класифікацію методів корекції часового дрейфу функцій перетворення ТЕП з точки зору впливу на результат вимірювання температури набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар;
5. Запропонувати метод корекції похибки від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар;
6. Розробити методику та провести метрологічні дослідження запропонованого методу корекції похибки від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар;
7. Розробити структуру прецизійної системи вимірювання температури, яка використовує запропонований метод корекції похибки від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар, а також стенд метрологічної перевірки (МП) ТЕП і термопар для забезпечення реалізації запропонованого методу корекції.

**Об'єкт дослідження** – процес вимірювання температури термоелектричними термометрами.

**Предмет дослідження** – підвищення точності вимірювання температури термоелектричними термометрами, термопари яких мають значну, набуту в процесі експлуатації, неоднорідність електродів.

**Методи дослідження** – теорія термоелектричних явищ, теорія похибок, теорія ймовірності, теорія електричних кіл, теоретичні основи інформаційно-вимірювальної техніки.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В дисертації розв'язано важливу науково-технічну задачу підвищення точності вимірювання температури та отримано такі наукові результати:

1. Вперше, на основі дослідження властивостей похибки від набутої під час тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар, розроблено

метод побудови коректних математичних моделей дрейфу електродів термопар, який дає змогу ідентифікувати найбільш небезпечні умови експлуатації термоелектричних перетворювачів з точки зору впливу похибки від неоднорідності електродів термопар на результат вимірювання температури.

2. Вперше проведено класифікацію методів корекції дрейфу функції перетворення термоелектричних перетворювачів з точки зору впливу похибки від набутої неоднорідності електродів термопар, що дало змогу запропонувати два нові методи зменшення впливу цієї похибки на результат вимірювання температури.
3. Вперше запропоновано та досліджено шляхом імітаційного моделювання метод корекції похибки від набутої під час експлуатації неоднорідності електродів термопар, який дав змогу зменшити її вплив на результат вимірювання до  $\pm 0,45^\circ\text{C}$  при відхиленні індивідуальної швидкості дрейфу окремих ділянок від максимального значення дрейфу до 20%, і до  $\pm 0,46^\circ\text{C}$  при індивідуальній нерівномірності дрейфу окремих ділянок термопари до 15% відносно максимального значення дрейфу.
4. Удосконалено метрологічний програмний тест вимірювального каналу для термоелектричних перетворювачів, що дало змогу дослідити запропонований метод корекції похибки від набутої неоднорідності електродів термопар.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено коректні математичні моделі дрейфу функцій перетворення електродів термопар типу ХА від температури експлуатації та поточної температури ділянок при заданому часі експлуатації.
2. Виявлено найбільш небезпечні умови експлуатації термоелектричних перетворювачів типу ХА з точки зору прояву похибки від набутої неоднорідності електродів термопар.
3. Розроблено структурну схему прецизійної системи вимірювання температури, придатну для реалізації запропонованого методу корекції.
4. Розроблено стенд метрологічної перевірки термоелектричних перетворювачів, термопари яких мають значну, набуту при експлуатації термоелектричну неоднорідність, придатний для реалізації запропонованого методу корекції.

Теоретичні та практичні результати роботи використані у: 1) - ЗАТ „НВО Термоприлад” для розробки та модернізації прецизійних систем вимірювання і контролю температури, що застосовуються на АЕС; 2) навчальному процесі при викладанні дисципліни “Сенсори спеціалізованих комп’ютерних систем”.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: у [1] – визначення калібрування або МП термопар на місці експлуатації, як умови зменшення впливу похибки від набутої неоднорідності; у [4, 11, 14, 15] – реалізацію вимог прецизійних систем вимірювання температури в структурі контролера і модуля; у [5] – виявлення небезпечних режимів експлуатації ТЕП з точки зору впливу неоднорідності на похибку вимірювання температури; у [6] – дослідження властивостей похибки від набутої неоднорідності термоелектродів і

класифікація методів корекції часового дрейфу їх ФП; у [7] – моделі дрейфу ФП термоелектродів; у [8] – встановлення зв'язку між часовим дрейфом ФП термоелектродів і похибкою від набутої неоднорідності; у [9] – адаптація стенду до запропонованого методу корекції похибки від набутої неоднорідності ТЕП; у [10] – критерії розподілу результатів МП між ділянками термоелектродів; у [12] – обґрунтування методу корекції похибки неоднорідних термоелектродів; у [13] – оцінка похибки від набутої неоднорідності електродів термопар в умовах дифузійної печі; у [16] – оцінка впливу похибки регулювання на похибку від неоднорідності електродів термопар.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації були висвітлені та обговорені на науково-технічних конференціях: 8-й міжнародній конференції "Температура 2003" (м. Львів, 2003); 3-й, 4-й та 5-й міжнародних наукових конференціях Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems (IDAACS'2005, м. Софія, Болгарія, 2005; IDAACS'2007, м. Дортмунд, Німеччина, 2007; IDAACS'2009, м. Ренде (Козенца), Італія, 2009).

**Публікації.** Усі основні положення дисертації знайшли повне відображення у 16 наукових працях, які містять 10 статей, з них 9 статей у фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженому ВАК України, 2 патенти, 4 праці у збірниках наукових конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, викладених на 122 сторінках основного машинописного тексту, списку використаних джерел (141 найменування). Робота містить 39 рисунків, 3 таблиці та 7 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, представлено наукову і практичну цінність отриманих результатів, а також відомості про особистий внесок здобувача, апробацію роботи і публікації.

У **першому розділі** розглянуто причини появи похибки від набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар, проаналізовано існуючі методи її корекції, сформульовано задачі дослідження.

В електродах термопар, під дією температури і часу експлуатації, проходять деградаційні процеси. При сталій температурі робочого з'єднання і з'єднань порівняння вони можуть проявити себе двояко – як похибка часового дрейфу (зміна в часі генерованої термо-е.р.с.) і як похибка від набутої термоелектричної неоднорідності (зміна генерованої термо-е.р.с. при зміні розподілу температури вздовж термоелектродів). Аналіз методів підвищення точності вимірювання температури показав, що похибка від набутої неоднорідності електродів термопар суттєво обмежує їх ефективність. Існуючі методи МП і корекції лише усувають її прояв для профілю температурного поля вздовж електродів, який існував при МП. При зміні профілю або неточній його імітації виникає додаткова похибка від неоднорідності.

Відомі методи корекції похибки від набутої неоднорідності передбачають роз-

биття кожного термоелектрода на ділянки і прогноз дрейфу ФП ділянок за індивідуальними математичними моделями. Але такий прогноз дає великі похибки, його уточнюють за результатами періодичної МП ТЕП. Однак при МП отримуємо сумарну похибку ТЕП, тому необхідний адекватний її розподіл між окремими ділянками. Достовірний критерій такого розподілу невідомий, його емпіричні оцінки мають невисоку точність, а похибки розподілу різко збільшують похибки індивідуальних математичних моделей прогнозу дрейфу. Тому відомі методи корекції похибки від набутої неоднорідності електродів термопар мають низьку метрологічну надійність.

У **другому розділі** визначено механізм впливу набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар на їх термо-е.р.с., що дало змогу розробити методіку аналізу цієї похибки на основі експериментальних досліджень часового дрейфу, дослідити властивості цієї похибки, побудувати адекватні математичні моделі дрейфу, виявити найбільш небезпечні щодо неї режими експлуатації ТЕП на об'єктах з різним характером змін профілю температурного поля і провести класифікацію методів корекції похибки дрейфу ФП ТЕП з точки зору впливу на них

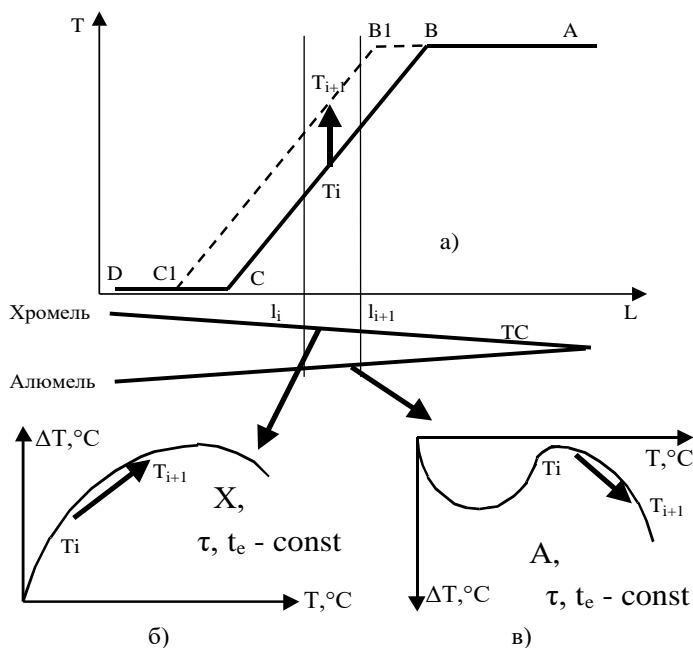


Рис. 1. Механізм впливу набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар на генеровану термо-е.р.с.

$k = \overline{1, n}$ , неоднорідністю яких нехтуємо, та визначимо термо-е.р.с.  $E_k$  для  $k$ -тої ділянки

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

де  $e_N$  – номінальна питома термо-е.р.с. даного термоелектроду;  $\Delta e_k$  – індивідуальне відхилення  $e_N$  для  $k$ -тої ділянки;  $t_{k+1}$   $t_k$  – температури на межах  $k$ -тої ділянки;  $E_{kN}$  – номінальна термо-е.р.с., генерована  $k$ -тою ділянкою під дією різниці температур

набутої неоднорідності термопар.

На рис. 1а представлено термопару, розміщену в профілі температурного поля експлуатації ABCD. Протягом часу експлуатації  $\tau$  в ділянці  $l_i$  електродів хромель і алюмель проходять деградаційні процеси під дією температури  $T_i$ . При зміні профілю до AB1C1D температура ділянки стає  $T_{i+1}$ , а похибка дрейфу ФП ділянок змінюється згідно векторів  $T_i - T_{i+1}$ , показаних на рис. 1б і 1в. Тому термо-е.р.с. термопари змінюється, незважаючи на сталі температури робочого з'єдну і з'єднів порівняння. Це і є механізм впливу набутої неоднорідності термоелектродів на термо-е.р.с. Для визначення цієї зміни розіб'ємо електроди на малі ділянки

$t_{k+1} - t_k$ ;  $\Delta E_k$  – відхилення генерованої  $k$ -тою ділянкою термо-е.р.с. від номінальної.

Якщо спрямувати різницю температур  $t_{k+1} - t_k$  до нуля, то з (1) отримаємо

$$E_{\Sigma} = \int_{t_0}^{t_{rk}} (e_N + \Delta e_k) dt = \int_{t_0}^{t_{rk}} e_N dt + \int_{t_0}^{t_{rk}} \Delta e_k(t) dt = E_{\Sigma N} + \int_{t_0}^{t_{rk}} \Delta e_k(t) dt \quad , \quad (2)$$

де  $t_{rk}$  і  $t_0$  – температури робочого зльоту і зльотів порівняння (нехай,  $t_0 = 0^\circ C$ );  $E_{\Sigma N}$  і  $E_{\Sigma}$  – номінальне і дійсне значення сумарної генерованої електродом термо-е.р.с.

Для переходу до інтегрування по довжині  $l$  електроду введемо градієнт температурного поля  $\nabla t = \frac{\partial t}{\partial l}$  і, виходячи з (2), знайдемо похибку  $\Delta E_{\Sigma}$  електроду

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

Якщо представити профіль температурного поля експлуатації як криву А (рис. 2), то з аналізу (1) - (3) виникає, що: 1) при  $\nabla t \rightarrow 0$  похибка ділянок  $l_4 - l_7$   $\Delta E_{l_4...l_7} = 0$ ; 2) ділянки  $l_0 - l_3$  не дрейфують,  $\Delta e_k = 0$ , бо знаходяться при низькій температурі; 3) при зміні профілю до кривої С (умова  $l_3 - l_2 > 0$ ) термо-е.р.с. створюють ділянки  $l_1 - l_2$ , де  $\Delta e_k = 0$ , тоді  $\Delta E_{\Sigma} = 0$ ; 4) при зміні профілю до кривої В (умова  $l_5 - l_4 > 0$ ) термо-е.р.с. створюють ділянки  $l_5 - l_6$ , де  $\Delta e_k = \max$  (якщо дрейф пропорційний температурі), тоді  $\Delta E_{\Sigma} = \max$ ; 5) при переході від С до В отримаємо максимальну похибку часового дрейфу цього електрода; 6) при переході від С до В отримаємо максимальну похибку від набутої неоднорідності, бо зміна  $\nabla t = \max$  для даного випадку; 7) максимальні похибки часового дрейфу і від набутої неоднорідності співпадають; 8) часовий дрейф і похибка від набутої неоднорідності є різними проявами деградаційних процесів і між ними існує тісний зв'язок; 9) дрейф для кривої А має проміжне значення  $0 < \Delta E_{\Sigma} < \max$ ; 10) похибку від набутої неоднорідності можна дослідити за результатами дослідження часового дрейфу.

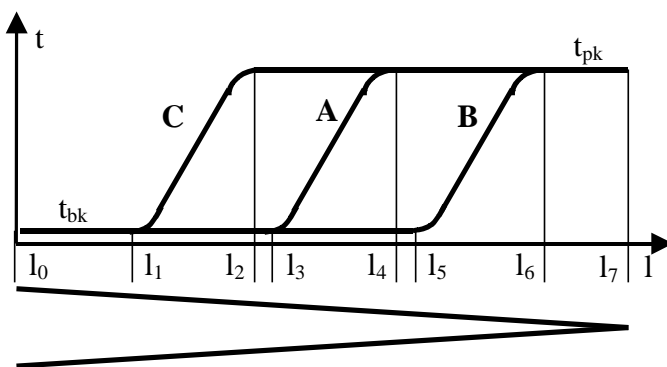


Рис. 2. Профілі температурного поля вздовж термоелектродів термопари

Для дослідження властивостей похибки від набутої неоднорідності оцінимо її при переході термоелектроду від лінійного профілю температурного поля  $t_e = kl$  до квадратичного  $t = k_1 l^2$  (нехай дрейф пропорційний кубу температури  $\Delta e_k(t) = a \cdot t_e^3$ ). Підставивши прийняті залежності в (3), отримаємо зміну термо-е.р.с електрода (похибку від неоднорідності)  $\Delta \Delta E_{\Sigma} = 0,15at_{rk}^4$ .

При зворотному переході (від квадратичного профілю до лінійного) отримаємо зміну термо-е.р.с термоелектрода (похибку від неоднорідності)  $\Delta \Delta E_{\Sigma} = -0,1at_{rk}^4$ . Різниця складе  $0,05at_{rk}^4$  (близько 30% похибки). Це означає, що похибка від набутої термоелектричної неоднорідності



електродів не має комутаційних властивостей.

Для дослідження похибки від набутої неоднорідності від змін  $\nabla t$  та виявлення небезпечних режимів експлуатації ТЕП розроблено модель дрейфу ФП термопар як функції температури експлуатації ділянки  $t_e$  і температури  $t$ , куди ділянка потрапила після зміни  $\nabla t$ , для часу експлуатації 1000 год. Для термопар ХА дрейф їх електродів при температурі експлуатації  $800^\circ\text{C}$  можна описати функціями

$$\Delta E_X^{1000} = 0,035\sqrt{t_e}(-4,6 \cdot 10^{-7} \cdot t_d^3 + 0,275 \cdot 10^{-3} \cdot t_d^2 + 0,213 \cdot t_d)\mu V, \quad (4)$$

$$\Delta E_A^{1000} = 0,035\sqrt{t_e}(-4 \cdot 10^{-9} \cdot t_d^4 + 0,71 \cdot 10^{-5} \cdot t_d^3 - 0,38 \cdot 10^{-2} \cdot t_d^2 + 0,715 \cdot t_d)\mu V. \quad (5)$$

Похибка апроксимації не перевищує 20 мкВ, тобто приблизно  $0,5^\circ\text{C}$ .

Для оцінки похибки від набутої неоднорідності термоелектродів розіб'ємо їх на 24 однакові ділянки та припустимо, що температура злутів порівняння (ділянки 1...8) рівна  $0^\circ\text{C}$ , температура робочого злуту (ділянки 17...24) рівна  $800^\circ\text{C}$ , температурне поле ділянок 9-16 рівномірно змінюється від  $0^\circ\text{C}$  до  $800^\circ\text{C}$  ( $\Delta t = t_i - t_{i-1} = 100^\circ\text{C}$ ), а похибкою від неоднорідності ділянки можна нехтувати. Обчислимо дрейф ФП для хромелевого  $\Delta E_X$  та алюмелевого  $\Delta E_A$  електродів до зміни профілю температурного поля, тобто при умові  $t_i = t_{ei}$  (температура ділянок незмінна)

$$\Delta E = \sum_{i=1}^{24} \Delta E_i = \sum_{i=1}^{24} \Delta e_i(t_{ei}, t_i) \cdot \Delta t_i. \quad (6)$$

Дрейф питомої термо-е.р.с.  $\Delta e_i(t_{ei}, t_i)$  визначимо диференціюванням (4), (5)

$$\Delta e_X^{1000} = 0,035\sqrt{t_e}(-13,8 \cdot 10^{-7} \cdot t_d^2 + 0,55 \cdot 10^{-3} \cdot t_d + 0,213)\mu V / ^\circ\text{C}, \quad (7)$$

$$\Delta e_A^{1000} = 0,035\sqrt{t_e}(-16 \cdot 10^{-9} \cdot t_d^3 + 2,73 \cdot 10^{-5} \cdot t_d^2 - 0,76 \cdot 10^{-2} \cdot t_d + 0,715)\mu V / ^\circ\text{C}. \quad (8)$$

Отримане згідно (6)-(8) значення дрейфу буде суттєво нижчим за результати досліджень, які служили для апроксимації (4), (5), бо, як вказувалося під час аналізу рис. 2, при дослідженні електродів термопар в профілі температурного поля А дрейф має проміжне значення  $0 < \Delta E_\Sigma < \max$ . Через те, що криві дрейфу подібні самі собі, введемо коефіцієнти пропорційності  $K_p$ , що перетворять (7), (8) у функції, які описують максимальний дрейф  $\Delta E_\Sigma = \max$  (який відповідає переміщенню термопар в профіль В рис. 2): для хромелю  $K_{PX}^{1000} = 2,11$ , а для алюмелю  $K_{PA}^{1000} = 1,39$ .

Аналіз показав, що можливі зміни профілю температурного поля в процесі експлуатації зводяться до трьох базових випадків:

- 1) проникнення в стінку об'єкта високої температури (рис. 3) викликає похибку, представлену на рис. 4, де по осі абсцис відкладені номери ділянок термопар, а по осі ординат – значення похибки від набутої неоднорідності. Як видно з рис. 4, максимальна похибка результату вимірювання від набутої неоднорідності електродів не перевищує  $2^\circ\text{C}$  і є меншою за допустиму похибку ТЕП;
- 2) проникнення в стінку температури оточуючого середовища (рис. 5) викликає похибку, представлену на рис. 6. Цей варіант зміни профілю температурного поля небезпечніший, максимальна похибка від набутої неоднорідності досягає  $5,5^\circ\text{C}$ .
- 3) зміна глибини занурення ТЕП (рис. 7) викликає похибку, представлену на рис. 8. Цей варіант зміни профілю температурного поля найбільш небезпечний,

максимальна похибка від набутої неоднорідності сягає  $11^{\circ}\text{C}$ . Перша похідна кривої рис. 8 має максимум біля перетину кривою похибки осі абсцис, тобто неоднорідний ТЕП найбільш чутливий саме до малих змін профілю температурного поля.

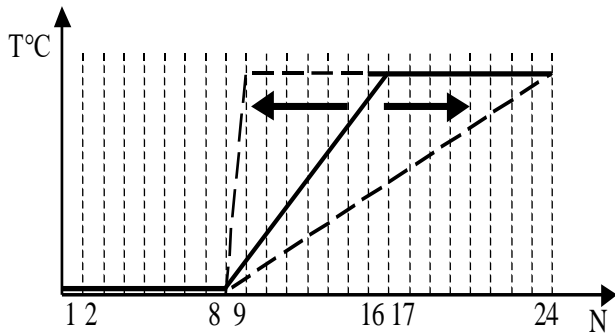


Рис. 3. Перший варіант зміни профілю температурного поля вздовж електродів термопар

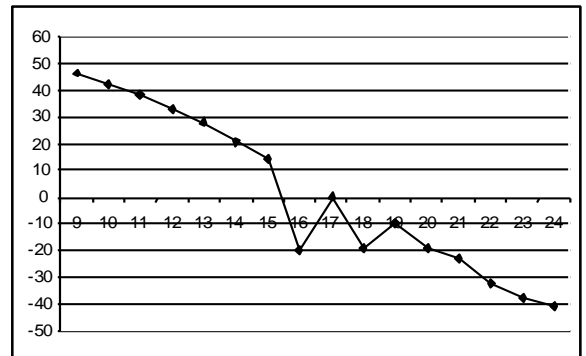


Рис. 4. Значення похибки (в мкВ) від впливу зміни профілю температурного поля для першого варіанту

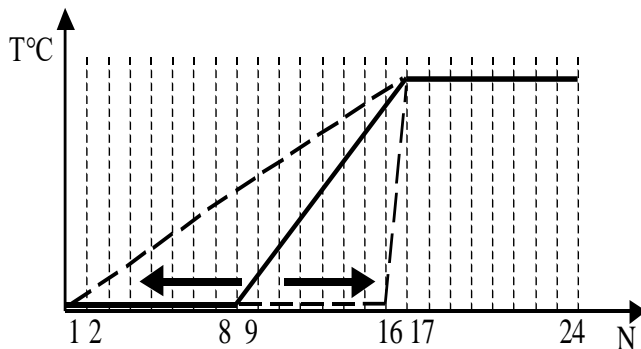


Рис. 5. Другий варіант зміни профілю температурного поля вздовж електродів термопар

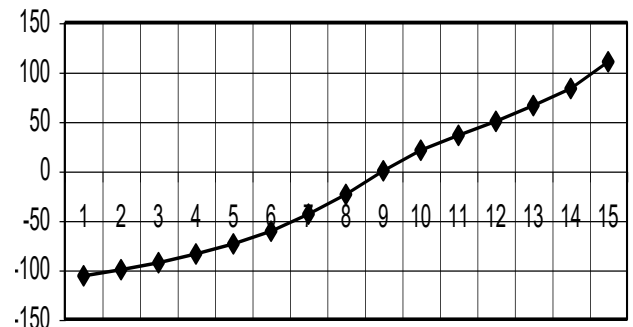


Рис. 6. Значення похибки (в мкВ) від впливу зміни профілю температурного поля для другого варіанту

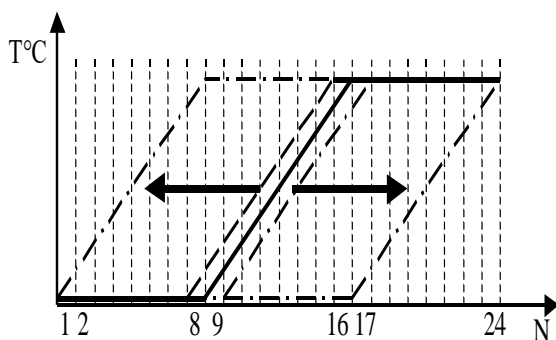


Рис. 7. Третій варіант зміни профілю температурного поля вздовж електродів термопар

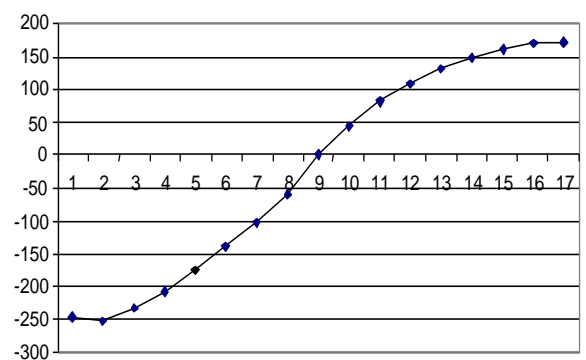


Рис. 8. Значення похибки (в мкВ) від впливу зміни профілю температурного поля для третього варіанту

Для класифікації методів корекції похибок дрейфу ФП електродів термопар з точки зору впливу набутої термоелектричної неоднорідності виділимо в градієнті температурного поля вздовж термоелектродів постійну і змінну частини

( $\nabla t = \nabla t_{CONS} + \nabla t_{VAR}$ ) і введемо в (3)

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t dl = \int_0^l \Delta e_k(t) (\nabla t_{CONS} + \nabla t_{VAR}) dl = \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t_{CONS} dl + \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t_{VAR} dl \quad (9)$$

Аналіз (9) дозволяє класифікувати методи корекції дрейфу ФП ТЕП за впливом набутої неоднорідності електродів термопар: 1) якщо  $\Delta e_k(t) \rightarrow 0$ , то  $\Delta E_{\Sigma} \rightarrow 0$  – коли немає деградаційних процесів, немає дрейфу і набутої неоднорідності, інтеграли (9) рівні нулю, ФП ТЕП незмінна (експлуатація при низьких температурах), похибка визначається малою початковою неоднорідністю; 2) якщо  $\nabla t_{VAR} \rightarrow 0$  (експлуатація ТЕП в стаціонарному температурному полі), то  $\Delta E_{\Sigma}$  визначається  $\Delta e_k(t)$  (першим інтегралом (9)), деградаційні процеси проявляються як часовий дрейф ФП ТЕП, можна використати відомі методи корекції дрейфу – МП на місці експлуатації, калібрування, прогноз; 3) якщо  $\Delta e_k \neq f(t)$  (деградація електродів не залежить від температури), то похибка від зміни профілю температурного поля відсутня, діє лише часовий дрейф; 4) якщо  $\nabla t_{VAR}$  мала, то  $\Delta E_{\Sigma}$  визначається в основному першим інтегралом (9), деградаційні процеси проявляються як часовий дрейф ФП ТЕП, але відомі методи його корекції мають вищу похибку через вплив набутої неоднорідності; 5) після МП на місці експлуатації або калібрування деякий час похибка ТЕП відома і стала –  $\Delta e_k(t) \rightarrow const$ , тоді деградаційні процеси проявляються як похибка неоднорідності (другий інтеграл (9)), а похибка ТЕП є функцією  $\nabla t_{VAR}$ . Цей варіант був базою недостатньо обґрунтованого висновку проф. І.І.Кіренкова про неможливість корекції похибок термопар. Методи ж перерахунку похибки з одного профілю температурного поля в похибку іншого дозволяють врахувати зміну  $\nabla t_{VAR}$ . Але для підвищення точності необхідне уточнення математичних моделей дрейфу окремих ділянок ТЕП за результатами калібрування або МП на місці експлуатації, однак тоді отримуємо сумарну похибку всіх ділянок, а емпіричні критерії її розподілу між ділянками не достовірні – корекція моделей ділянок не надійна; 6) якщо зміна  $\nabla t_{VAR}$  значна, то  $\Delta E_{\Sigma}$  визначається двома інтегралами (9), ТЕП експлуатується на об'єкті, де нехтувати впливом набутої неоднорідності не можна – відомі методи корекції дрейфу ФП ТЕП не забезпечують підвищення точності вимірювання. Згадані в 5) методи перерахунку не забезпечують надійну корекцію, бо розподіл згідно хибного критерію може збільшити похибку замість її зменшення. Можливі два рішення: а) стабілізація профілю температурного поля вздовж термоелектродів додатковими підсистемами регулювання температури, що дозволить повернутися до п. 2); б) визначення індивідуальних критеріїв розподілу отриманої в результаті МП похибки ТЕП між ділянками термопар – мірою їх достовірності буде вдалий прогноз похибки неоднорідності в різних профілях температурних полів, тобто слід забезпечити МП в різних профілях температурного поля.

У третьому розділі досліджено запропонований в пункті 6б приведеної вище класифікації метод корекції похибки від набутої під час експлуатації неоднорідності електродів термопар шляхом визначення індивідуальних критеріїв розподілу похибок, отриманих під час МП, між ділянками термоелектродів.

В результаті МП ТЕП в наборі температурних полів різного профілю отримаємо ряд значень його похибки. При її правильному розподілі між індивідуальними математичними моделями прогнозу дрейфу ФП ділянок подальший прогноз буде відкоригований. Якщо кількість профілів полів МП рівна кількості ділянок обох термоелектродів, то для розподілу розв'язують систему рівнянь. Але виникає протиріччя між якістю корекції (для її підвищення слід збільшити кількість ділянок) і трудомісткістю МП. Запропоновано розподіл проводити за допомогою нейронної мережі (рис. 9), яка при навчанні узагальнює результати МП. Під час навчання на вхідні розподільчі нейрони по чергово подаються значення температур ділянок  $T_{ДЛЛ1-1}$  ...  $T_{ДЛЛ1-n}$  термоелектродів, отримані під час МП в наборі температурних полів, а обчислені нейронною мережею значення похибки  $\Delta E_{ТСР}$  порівнюються з отриманими дійсними похибками ТЕП. При навчанні вагові коефіцієнти і зміщення нейронів схованого рівня адаптуються до прихованих індивідуальних законів дрейфу ФП ділянок термоелектродів і прогнозують похибку ТЕП в різних температурних

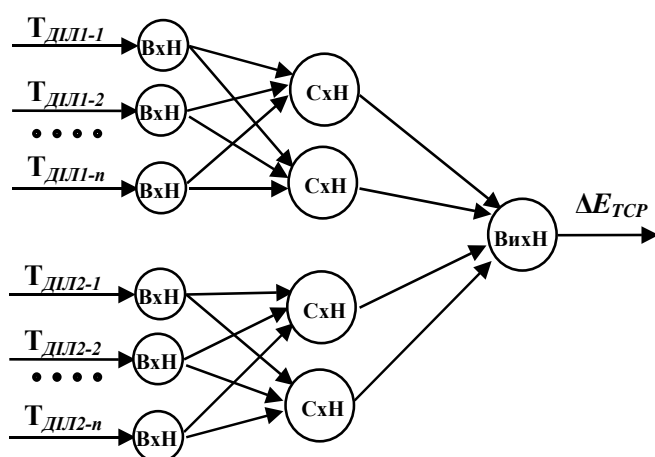


Рис. 9. Структура штучної нейронної мережі

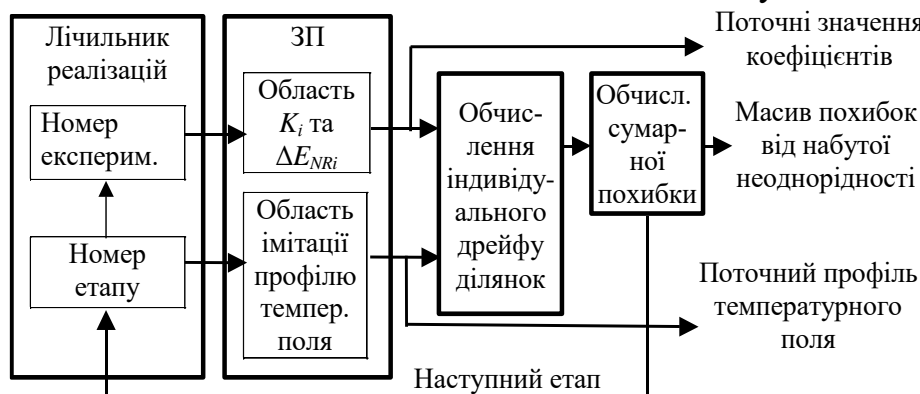


Рис. 10. Структура блоку Heterog, що входить в МПТ

полях з високою точністю та метрологічною надійністю.

Найкращим шляхом дослідження метрологічних характеристик пропонованого методу є імітаційне моделювання з використанням метрологічного програмного тесту (МПТ). МПТ готує набори кодів, що імітують похибки вузлів вимірювального каналу, подає їх на входи вимірювальної системи та опрацьовує результати тестування. У відомому МПТ імітація похибки від набутої неоднорідності термоелектродів передбачена блоком Heterog, але його реалізація та методика використання не описані.

Для вдосконалення та адаптації МПТ до вимог пропонованого методу розроблено структуру блоку Heterog (рис.10). Керують дослідженням лічильники

номеру експерименту (імітація чергового ТЕП) і номеру етапу (імітація чергового профілю температурного поля). У запам'ятовуючому пристрої ЗП створюється область формування індивідуальних моделей дрейфу ФП ділянок термоелектродів, що відрізняються від (7), (8) швидкістю та нерівномірністю дрейфу, імітованими випадковим чином. Крім того, в ЗП створюється область для запису параметрів імітованих профілів температурного поля. На основі даних ЗП обчислюються дійсні індивідуальні дрейфи ФП ділянок термоелектродів і сумарна похибка ТЕП. На кожному етапі тестування на вихід блоку Heterog поступають поточні характеристики профілю температурного поля та значення похибок від набутої неоднорідності термоелектродів. Завданням нейронної мережі є відтворення поточної похибки ТЕП (для її корекції) в даному профілі температурного поля. Для цього вона протягом перших етапів навчається, порівнюючи дійсну сумарну похибку ТЕП з результатами своїх обчислень та адаптуючи вагові коефіцієнти і зміщення нейронів схованого рівня до даного ТЕП. Потім отримані з блоку Heterog значення похибок використовують для оцінки похибки корекції.

Досліджено похибки корекції запропонованим методом при відхиленнях індивідуальної швидкості дрейфу ділянок від математичної моделі на 5%, 10%, 15% і 20%. При цьому вибірка навчання становила 28, 21, 14 і 7 результатів МП, а тестова вибірка завжди містила всі результати МП. Тестування показало, що середня похибка відтворення індивідуального дрейфу ФП ТЕП мало залежить від обсягу вибірки навчання і не перевищує 5%. Максимальна похибка зазвичай зростає при зменшенні тестової вибірки до 60%, але великі відхилення рідко зустрічаються. Частота їх появи зростає при зростанні відхилення швидкості дрейфу. Реалізації п'яти прогнозів при максимальному відхиленні швидкості дрейфу представлені на рис. 11, а гістограма цих відхилень – на рис. 12. Оцінка похибки методу, визначена як  $\pm 3\sigma$ , становить  $\pm 18$  мкВ або  $\pm 0,45^\circ\text{C}$ . Для довірчої імовірності  $P = 0,9$  похибка методу становить  $\pm 10$  мкВ або  $\pm 0,25^\circ\text{C}$ .

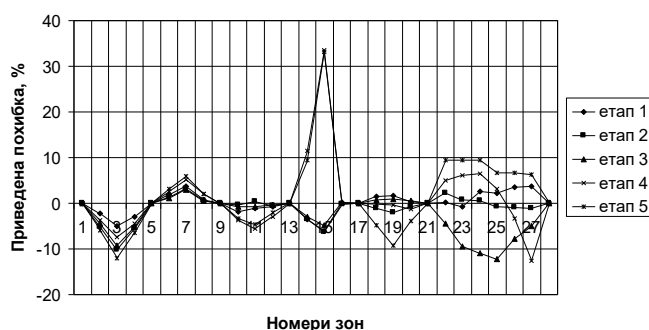


Рис. 11. Похибка корекції при відхиленні швидкості дрейфу до 20% для 7 профілів полів метрологічних перевірок (середня похибка 4,1%, максимальна 33%)

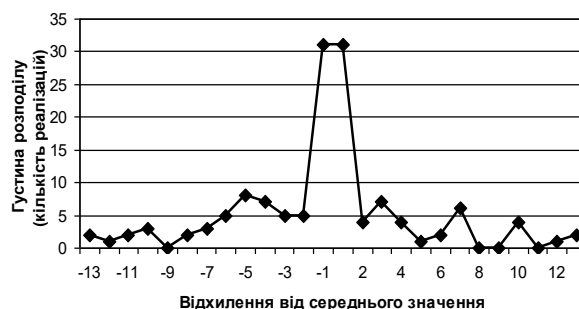


Рис. 12. Гістограма розподілу відхилення похибки корекції запропонованого методу від індивідуального відхилення швидкості дрейфу

Аналогічно були досліджені похибки корекції запропонованим методом при максимальній індивідуальній нерівномірності дрейфу ФП ділянок 5%, 10%, і 15%.

Вибірка навчання теж становила 28, 21, 14 і 7 результатів МП, а тестова вибірка завжди містила всі результати МП. Тестування показало, що середня похибка відтворення індивідуального дрейфу ФП ТЕП теж мало залежить від обсягу вибірки навчання і не перевищує 5%. Максимальна похибка зростає при зменшенні тестової вибірки до 80%, але великі відхилення рідко зустрічаються. Частота їх появи зростає при зростанні нерівномірності дрейфу. Реалізації п'яти прогнозів при максимальному відхиленні швидкості дрейфу представлені на рис. 13, а гістограма цих відхилень – на рис. 14. Оцінка похибки методу, визначена як  $\pm 3\sigma$ , становить  $\pm 19$  мкВ або  $\pm 0,46^\circ\text{C}$ . Для довірчої імовірності  $P = 0,9$  похибка методу становить  $\pm 12$  мкВ або  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ .

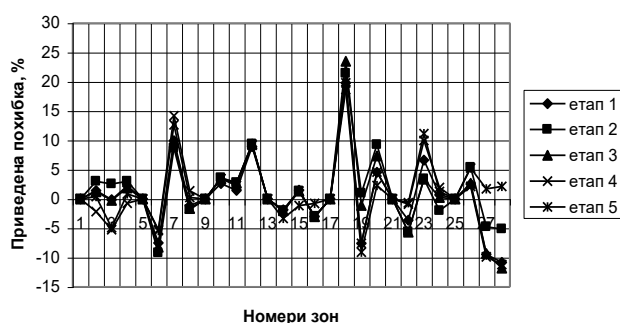


Рис. 13. Похибка корекції при максимальній нерівномірності дрейфу до 15% для 7 метрологічних перевірок (середня похибка 3,9%, максимальна 24%)



Рис. 14. Гістограма розподілу відхилення похибки корекції запропонованого методу від нерівномірності дрейфу

**Четвертий розділ** присвячено розробці структури прецизійної системи вимірювання температури, яка використовує запропонований метод корекції похибки від набутої неоднорідності термоелектродів, створенню стенду МП неоднорідних ТЕП і термопар і оцінці похибки вимірювання температури розробленою системою.

Структура розробленої системи (рис. 15) містить головний ТЕП (ГТЕП) вимірювання температури об'єкта, ТЕП контролю профілю температурного поля ГТЕП (ТЕП1...ТЕПn), термометр опору корекції температури злотов порівняння ТО ЗП, комутатор Км на реле РГК-15 з додатковими термовирівнювачами, 24-розрядний аналого-цифровий перетворювач АЦП і мікроконтролер МК (входять в

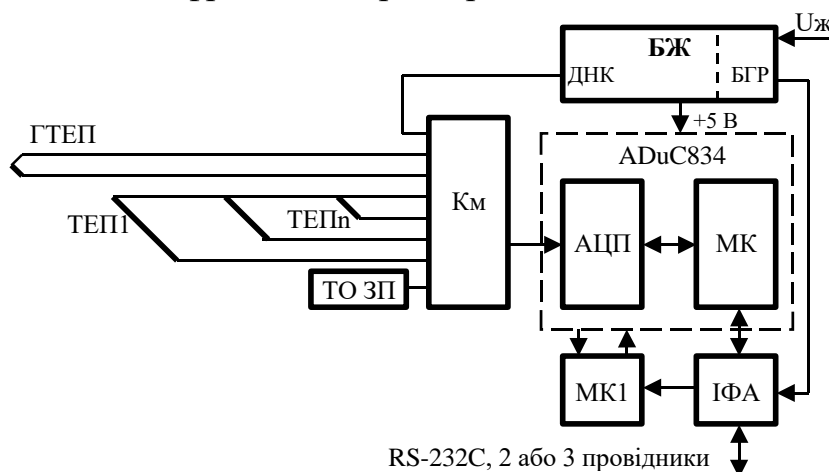


Рис. 15. Структура системи вимірювання температури

мікроконвертор ADuC-834), інтерфейсний адаптер ІФА та блок живлення БЖ з блоком гальванічної розв'язки БГР і джерелом напруги калібрування ДНК. Особливістю системи є можливість дистанційного перепрограмування МК додатковим мікроконтролером МК1 під час експлуатації

системи для заміни структури нейронної мережі корекції похибки від набутої неоднорідності термоелектродів. Оцінка похибки системи традиційним методом (без врахування похибок ТЕП) показала, що похибка вимірювання термо-е.р.с. ТЕП не перевищує 15 мкВ, що для термопар ХА відповідає 0,4°C.

Для проведення періодичної МП ТЕП або термопар з метою корекції похибки від набутої неоднорідності термоелектродів згідно запропонованого методу, розроблено спеціалізований стенд, куди входять піч із змінним профілем температурного поля і спеціалізована вимірювальна система.

На рис. 16 зображено структуру стенда МП ТЕП або термопар, куди входять головний ГНП і додатковий ДНП нагрівники печі, ТЕП регулятора температури ТЕПР1 і ТЕПР2 (типу ХА) для ГНП і ДНП відповідно. Корекція температури їх злутів порівняння виконана обчислювальним методом з допомогою датча ТЗП1 (термістор ММТ-1). В регулятор температури печі входять комутатор КМ1 на реле РГК-15 з додатковими термовирівнювачами, перетворювач напруга-частота на операційних підсилювачах 140УД12, мікроконтролер АТ89С52, реле керування тиристорами і тиристори ТС-50-7.

В печі розміщують взірцевий датч температури ВТЕП (взірцевий ТЕП) та ТЕП, який перевіряють (ТЕПх). В ТЕПх входить головна термопара ГТП вимірювання

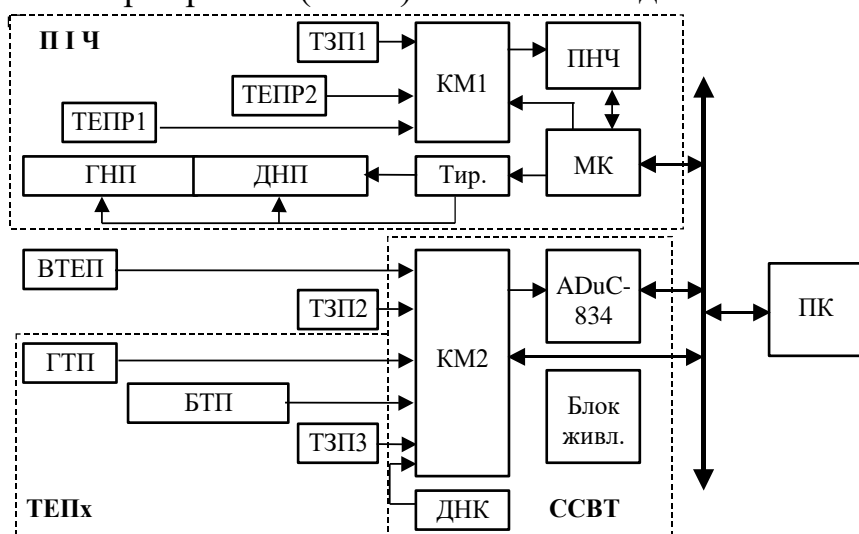


Рис. 16. Структура стенду дослідження термопар або термоелектричних перетворювачів

температури об'єкта і засіб контролю профілю температурного поля БТП (багатозонна термопара). Датчі температури злутів порівняння ВТЕП і ТЕПх – ТЗП2 і ТЗП3 відповідно (термометри опору 10М).

Зміна профілю температурного поля вздовж електродів ГТП досягається зміною глибини її занурення та зміною температури ДНП. Для розширення меж зміни температури ДНП відносно

ГНП між ними передбачена додаткова теплоізоляція, яка зменшує тепловий потік від ГНП до ДНП.

Для зменшення впливу на результати МП неоднорідності ВТЕП його розміщують з іншої сторони печі, ніж ДНП (профіль температурного поля вздовж електродів ВТЕП не змінюється).

Спеціалізована система вимірювання температури ССВТ аналогічна системі рис. 15. Керування всіма вузлами стенду здійснює персональний комп'ютер ІВМ РС через мережу на базі модифікованого інтерфейсу RS-232, туди ж передаються результати вимірювань для опрацювання.

Похибка МП складається з похибки взірцевого ТЕП, похибки вимірювання його термо-е.р.с. і похибки вимірювання термо-е.р.с. ТЕП, який перевіряють. Через те, що взірцевий ТЕП типу ПП має меншу чутливість ( $10 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ ), його вимірювальний канал має діапазон 20 мВ. Показано, що його мультиплікативна похибка практично не впливає на результат МП. Тому похибка вимірювання термо-е.р.с. ВТЕП, оцінена аналогічно як і для системи рис. 15, не перевищує  $6,5 \text{ мкВ}$ , а сумарна похибка МП не перевищує  $1,1^\circ\text{C}$ . Похибка вимірювання температури, крім похибки МП, буде включати похибки корекції неоднорідності термопар як від індивідуального відхилення швидкості дрейфу, так і від нерівномірності дрейфу, а також похибку прогнозу зміни коригованої неоднорідності термоелектродів за міжповірний інтервал. Перші дві складові можуть бути оцінені за приведеними в третьому розділі результатами досліджень (див. рис. 11 - 14). Останню складову приймемо рівною сумі перших двох складових. Через те, що похибки термопар контролю профілю температурного поля головної термопари впливають лише на похибку корекції неоднорідності термопар, тобто щодо похибки вимірювання температури є величиною другого порядку малості, їх впливом нехтуємо. В такому випадку сумарна похибка вимірювання температури не буде перевищувати  $1,4^\circ\text{C}$  при використанні, як нейронної мережі, широко вживаного трирівневого перцептрона.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу наукову задачу – розроблено методи підвищення точності вимірювання температури термоелектричними термометрами, термопари яких мають значну, набуту в процесі експлуатації, неоднорідність електродів. Вирішення цієї задачі дає змогу зробити наступні висновки:

1. Найбільш поширені давачі температури – термоелектричні перетворювачі, навіть при застосуванні відомих методів корекції їх похибок, не забезпечують високу точність вимірювання температури через похибку від набутої в процесі експлуатації при високих температурах термоелектричної неоднорідності їх чутливих елементів – термопар. В роботі показано, що ця похибка співмірна з іншими похибками термоелектричних перетворювачів, а відомі методи її корекції не забезпечують достатньої метрологічної надійності.
2. Розроблені модель і методика аналізу похибки від набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар, що базуються на результатах експериментальних досліджень часового дрейфу їх функції перетворення, дозволили вперше дослідити основні властивості цієї похибки та ідентифікувати найбільш небезпечні з огляду на проявлення похибки від набутої неоднорідності умови експлуатації термоелектричних перетворювачів.
3. Проведена класифікація методів корекції дрейфу функції перетворення термоелектричних перетворювачів з точки зору впливу похибки від набутої неоднорідності електродів термопар дала змогу запропонувати два нові методи зменшення впливу цієї похибки на результат вимірювання температури: метод корекції похибки від набутої під час експлуатації неоднорідності електродів



термопар і метод компенсації цієї похибки шляхом стабілізації температурного поля вздовж електродів термопар.

4. Запропонований метод корекції похибки від набутої під час експлуатації неоднорідності електродів термопар забезпечує надійну адекватну корекцію індивідуальних математичних моделей дрейфу ділянок термоелектродів за результатами періодичних метрологічних перевірок термоелектричних перетворювачів в різних профілях температурного поля. Побудовані математичні моделі дрейфу окремих ділянок термоелектродів базуються на дійсних похибках термоелектричного перетворювача та їх розподілі навченою за результатами цих перевірок нейронною мережею, що забезпечує високу точність і метрологічну надійність корекції.
5. Удосконалений метрологічний програмний тест каналу вимірювання температури термоелектричними перетворювачами дав змогу дослідити шляхом імітаційного моделювання запропонований метод корекції похибки від набутої неоднорідності електродів термопар.
6. Розроблена методика дала змогу провести метрологічні дослідження запропонованого методу корекції похибки від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар, які показали, що він дає можливість зменшення впливу цієї похибки на результат вимірювання температури в 3...6 разів.
7. Розроблений стенд метрологічної перевірки та дослідження термоелектричних перетворювачів і термопар забезпечує реалізацію запропонованого методу корекції похибки від набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термопар.
8. Розроблена структура прецизійної системи вимірювання температури забезпечує, за рахунок дистанційного перепрограмування мікроконтролера обробки даних та відібраних високоякісних технічних рішень, сумарну похибку вимірювання температури термоелектричними перетворювачами, термопари яких мають значну, набуту в процесі експлуатації, неоднорідність електродів, не більше  $1,4^{\circ}\text{C}$  при використанні запропонованого методу корекції похибки від набутої неоднорідності електродів термопар.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Березький О. Інтелектуалізація засобів вимірювань / О.Березький, Н.Васильків, М.Чирка. // Вісник Тернопільського технічного університету. Приладобудування. 1997. - Т.2. - № 2. - С. 71-77.
2. Васильків Н.М. Вдосконалення метрологічного програмного тесту в комп'ютерних системах вимірювання температури / Н.М. Васильків // Комп'ютинг. – 2010. – Том 9. – Вип.2 – С. 175-182.
3. Васильків Н.М. Метод корекції похибки вимірювання температури неоднорідними термопарами / Н.М. Васильків // Вісник Хмельницького університету. – 2010. – №2. – С. 168-173.

4. Васильків Н.М. Контролер з дистанційною реконфігурацією для адаптивної вимірювально-керуючої мережі / Н.М. Васильків, В.В. Кочан, А.О. Саченко, В.О. Тимчишин // Вісник ДУ «Львівська політехніка». Комп'ютерні системи та мережі.- 1998. - №350. - С. 14-18.
5. Васильків Н. Дослідження впливу змін профілю температурного поля на похибку вимірювання температури неоднорідними термопарами / Н. Васильків, О. Кочан // Вісник Тернопільського державного технічного університету. -2010. – Т.15. - №2. – С. 146-153.
6. Васильків Н. Дослідження похибки вимірювання температури від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар / Н.Васильків, О. Кочан, В. Кочан, А. Саченко // Вимірювальна техніка та метрологія – 2009. - №70. – С.110 – 117.
7. Кочан О. Дослідження зон максимального прояву похибки неоднорідності термопар / О.Кочан, Н.Васильків // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. - №2. - С. 108-113.
8. Кочан О. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар / О.Кочан , Н.Васильків, Р. Кочан, В. Яскілка // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2007. - №1. – С. 122-129.
9. Кочан О. Стенд дослідження термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля / О. Кочан, Н.Васильків, В. Яскілка. // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. - №1. – С. 122-130.
10. Чирка М.І. Моделювання підвищення точності прогнозування нестабільності характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів / М.І. Чирка, Н.М. Васильків, Р.В. Кочан // Вісник ТАНГ. Економіко-математичне моделювання. – 1999. - № 2(6). – С. 26-31.
11. Пат. 98031374 Україна, МКВ-G06f. Спосіб дистанційної реконфігурації модулів обчислювальної мережі та пристрій його реалізації / Кочан В.В., Тимчишин В.О., Васильків Н.М. – № 98031374/В ; завл. 18.03.1998, ріш. про вид. пат. № 9390 від 29.02.2000.
12. Пат. 92192 Україна, МПК G01K 7/02. Спосіб корекції похибки неоднорідності термопар / Васильків Н.М., Кочан О.В., Кочан В.В. - № a200805623; заявл. 29.04.2008; опубл. 10.11.09, Бюл. №21.
13. Васильків Н.М. Оцінка похибок каналу вимірювання температури в дифузійних печах / Н.М.Васильків, В.В.Кочан, М.І. Чирка // "Температура 2003": 8-ма міжнар. конф.: тези доп. -Львів, 2003. - С. 33.
14. Kochan R. Precision Data Acquisition (DAQ) Module with Remote Reprogramming / R.Kochan, O.Kochan, M.Chyrka, N.Vasykiv // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2005): Third IEEE Workshop, September 5-7, 2005.: Proc. - Sofia (Bulgaria), 2005. - P.279-282.
15. Mayikiv I. Remote Reprogrammable NCAPs: Issues and Approaches. / I. Mayikiv, A. Stepanenko, D. Wobschall, R. Kochan, V. Kochan, A. Sachenko, N.Vasykiv // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and

Applications (IDAACS'2007): IEEE International Workshop, 6-8 September 2007: Proc. - Dortmund (Germany), 2007. – P. 109-113.

16. Vasylykiv N. The Control System of the Profile of Temperature Field / N. Vasylykiv, O. Kochan, R. Kochan, M. Chyrka // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2009): 5-th IEEE International Workshop, 21-23 September, 2009: Proc. - Rende (Cosenza, Italy), 2009. – P. 201-206.

**Васильків Н.М.** Підвищення точності вимірювання температури термопарами в процесі експлуатації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.04 – Прилади та методи вимірювання теплових величин. – Національний університет „Львівська політехніка”, Львів, 2011.

Дисертація присвячена підвищенню точності вимірювання температури термопарами, які мають значну, набуто в процесі тривалої експлуатації при високих температурах термоелектричну неоднорідність електродів.

У роботі досліджено властивості похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар і розроблено математичні моделі дрейфу функції перетворення електродів термопар типу ХА від температури експлуатації та поточної температури ділянок електродів при фіксованих часах експлуатації. Це дало змогу ідентифікувати найбільш небезпечні умови експлуатації термоелектричних перетворювачів щодо похибки від набутої неоднорідності, класифікувати методи корекції дрейфу їх функцій перетворення з точки зору впливу цієї похибки, а також запропонувати новий метод її корекції. Досліджено властивості цього методу корекції, показано, що він зменшує вплив набутої неоднорідності на результат вимірювання в 3-6 разів. Розроблено структуру прецизійної системи вимірювання температури та стенд метрологічної перевірки термоелектричних перетворювачів із значною набутою термоелектричною неоднорідністю, придатні для реалізації запропонованого методу корекції.

**Ключові слова:** термоелектричний перетворювач, термопара, дрейф функцій перетворення, термоелектрична неоднорідність, корекція похибки.

**Vasylykiv N.M.** Rising of temperature measurement precision by thermocouples during the expluatation. – Manuscript.

Thesis for a Ph.D. degree by specialty 05.11.04 – Devices and methods of thermal values measurement. – National University “Lvivska Politechnika”, Lviv, 2011.

The dissertation is devoted to the rising of exactness of temperature measurement by thermocouples, which have considerable, purchased in the process of the continuous exploitation at high temperatures thermo-electric heterogeneity of electrodes.

The properties of error are probed the purchased thermo-electric heterogeneity of thermocouples are probed in our work and the mathematical model of electrodes

thermocouples of K-type drift are developed, that describes dependence of drift from their temperature of exploitation and current temperature of thermocouples areas at the fixed times of exploitation. It allowed to identify the most dangerous conditions of thermocouples exploitation from the point of view of error from the purchased heterogeneity, to classify the methods of correction of drift of thermocouples transformation functions from the point of view of error influence, and also to offer the new method of correction of this error. Properties of the offered method of correction are probed, it is shown that it allowed to decrease influence of the purchased heterogeneity on the result of measuring in 3-6 times. The structure of temperature measurement precision system and stand of metrological verification of thermocouples with the considerable purchased thermo-electric heterogeneity are developed, and they are suitable for realization of the offered method of correction.

**Keywords:** thermocouple, drift of transformation functions, thermo-electric heterogeneity, error correction.

**Василькив Н.М.** Повышение точности измерения температуры термопарами в процессе эксплуатации. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.04 – Приборы и методы измерения тепловых величин. – Национальный университет „Львовская политехника”, Львов, 2011.

Диссертация посвящена повышению точности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями, термопары которых имеют значительную, приобретенную в процессе длительной эксплуатации при высоких температурах, термоэлектрическую неоднородность электродов.

В работе исследованы свойства погрешности от приобретенной термоэлектрической неоднородности электродов термопар и разработана математическая модель дрейфа электродов термопар типа ХА, которая описывает зависимость дрейфа от их температуры эксплуатации и текущей температуры участков электродов термопар при фиксированном времени эксплуатации. Это позволило идентифицировать наиболее опасные условия эксплуатации термоэлектрических преобразователей с точки зрения проявления погрешности от приобретенной неоднородности электродов их термопар.

Проведена классификация методов коррекции дрейфа функций преобразования термоэлектрических преобразователей с точки зрения влияния погрешности от приобретенной неоднородности электродов. Это позволило предложить новые методы уменьшения влияния этой погрешности на результат измерения температуры: метод коррекции погрешности от приобретенной во время эксплуатации неоднородности электродов термопар и метод стабилизации температурного поля вдоль электродов термопар.

Исследован предложенный метод коррекции погрешности от приобретенной в процессе длительной эксплуатации неоднородности электродов термопар по результатам их периодических проверок в разных профилях температурного поля. Построенные согласно этому методу математические модели дрейфа отдельных

участков термоэлектродов базируются на действительных погрешностях термоэлектрического преобразователя и их распределении обученной по результатам этих поверок нейронной сетью, что повышает точность и метрологическую надежность коррекции.

Усовершенствован метрологический программный тест канала измерения температуры термоэлектрическими преобразователями, что позволило исследовать с его помощью предложенный метод коррекции погрешности от приобретенной неоднородности электродов термопар.

Исследованы свойства предложенного метода коррекции, показано, что он позволил уменьшить влияние приобретенной неоднородности на результат измерения в 3-6 раз. Разработана структура прецизионной системы измерения температуры, которая базируется на модуле сбора данных с дистанционным перепрограммированием, и стенд метрологической поверки термопар, пригодные для реализации предложенного метода коррекции.

**Ключевые слова:** термоэлектрический преобразователь, термопара, дрейф функции преобразования, термоэлектрическая неоднородность, коррекция погрешности.