

УДК 536.531

О. Кочан¹; Н. Васильків¹; В. Яскілка²

¹Науково-дослідний інститут Інтелектуальних комп'ютерних систем
Тернопільського національного економічного університету

²Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

СТЕНД ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З КЕРОВАНИМ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

У статті коротко описано конструкцію макетного взірця термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля, який дозволяє практично усунути вплив на результат вимірювання температури, набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності головної термопари. Сформульовано основні вимоги до стенду дослідження похибок такого термоелектричного перетворювача, описано реалізацію стенду. Також розроблено методуку і приведено результати експериментального дослідження впливу зовнішнього температурного поля на профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари пропонованого термоелектричного перетворювача.

Ключові слова: термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля, термоелектрична неоднорідність, термопари.

O. Kochan, N. Vasykiv, V. Yaskilka

THE STAND FOR TESTING THE THERMOCOUPLES WITH A CONTROLLED PROFILE OF TEMPERATURE FIELD

The prototype's structure of thermocouple with controlled profile of temperature field is considered in this paper. Such thermocouple allows removing influence on temperature measurement result of the heterogeneity of own electrodes acquired during long-term operation. The basic requirements to the stand for testing errors of such thermocouple are formulated also this prototype implementation is described. There is presented the methodology and results of an experimental testing of influence of an external temperature field on a profile of internal temperature field along the thermocouple electrodes.

Key words: thermocouple with controlled profile of temperature field, heterogeneity of own electrodes, thermocouples.

Умовні позначення

P_i – потужність i -того нагрівача;

T_i – температура i -тої зони ТЕП з КПТП;

T_i^A – температура i -тої зони ТЕП з КПТП при вимкнених усіх нагрівачах;

T_i^B – температура i -тої зони ТЕП з КПТП при ввімкнених усіх нагрівачах;

T_i^C – температура i -тої зони ТЕП з КПТП при ввімкнених усіх нагрівачах, крім одного.

Вступ

При застосуванні прецизійних засобів і систем вимірювання температури з допомогою термоелектричних перетворювачів (ТЕП) похибка вимірального каналу практично повністю визначається похибками останніх [1]. Це пов'язано з відносно великим початковим розкидом характеристик перетворення (ХП) термопар [2] та значним дрейфом цих ХП у процесі експлуатації ТЕП, пов'язаним з деградаційними процесами в термоелектродах під дією високих температур і часу експлуатації [3]. Дія цих факторів зумовлює зміну хімічного складу і кристалічної будови термоелектродів, що веде до зміни ХП термопар. При цьому питома термо-е.р.с. тих ділянок термопар, що знаходяться в зоні градієнта температури, стає залежною від їх індивідуальної

температури експлуатації – виникає набута термоелектрична неоднорідність електродів термопар. При зміні градієнта температурного поля вздовж термоелектродів ділянки змінюють генеровану термо-е.р.с. відповідно до індивідуальних відхилень ХП, тому вихідний сигнал термопар стає залежним не лише від різниці температур робочого та вільних кінців, але і від форми профілю температурного поля [4], що погіршує умови корекції похибок термопар [5]. Для протидії набутій неоднорідності розроблено ряд методів [1, 6...9], але деякі з них ефективні лише при стабільному температурному полі об'єкта вимірювання, інші вимагають розподілу визначеної похибки термопар між окремими ділянками згідно з невідомим критерієм [9], що знижує їх надійність.

Для радикального зменшення впливу неоднорідності на результат вимірювання в [10, 11] запропоновано новий вид ТЕП – ТЕП з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП). Такий ТЕП, завдяки наявності додаткових підсистем регулювання температури, при експлуатації та повірці створює власне температурне поле вздовж термоелектродів своєї головної термопар, тому похибка від їх неоднорідності не може себе проявити. Однак впровадження такого ТЕП вимагає ґрунтовних теоретичних і експериментальних досліджень. Метою статті є розробка спеціального стенду для експериментального дослідження макета, запропонованого в [10, 11] ТЕП з КПТП.

Макет ТЕП з КПТП

Конструктивна схема запропонованого ТЕП з КПТП описана в [10, 11], а на рис. 1 представлено узагальнену структуру системи вимірювання температури на базі такого ТЕП. Його основою є головна термопара ГТ, під'єднана до вимірювального каналу ВК засобу вимірювання температури ЗВТ. Профіль температурного поля вздовж електродів ГТ стабілізований з допомогою дев'яти додаткових підсистем регулювання температури, у склад яких входять додаткові термопари Т1...Т9, нагрівачі Н1...Н9 та власне регулятори, представлені на рис. 1 у вигляді входів РТх та виходів РТу одного багатоканального ЗВТ. Т1...Т9 і Н1...Н9 та розміщені вздовж ГТ таким чином, щоби повністю контролювати розподіл температури вздовж її термоелектродів, однак не впливати на температуру робочого кінця ГТ. Така структура забезпечує можливість цілеспрямованого керування профілем температурного поля вздовж електродів ГТ, зокрема, стабілізації профілю температурного поля вздовж термоелектродів ГТ (наприклад, відповідно до графіку А рис. 1). Зміна зовнішніх щодо запропонованого ТЕП з КПТП температурних полів у межах, які знаходяться між профілями В і С (рис. 1), не буде впливати на профіль температурного поля вздовж електродів ГТ. Фотографія макета представлена на рис. 2.

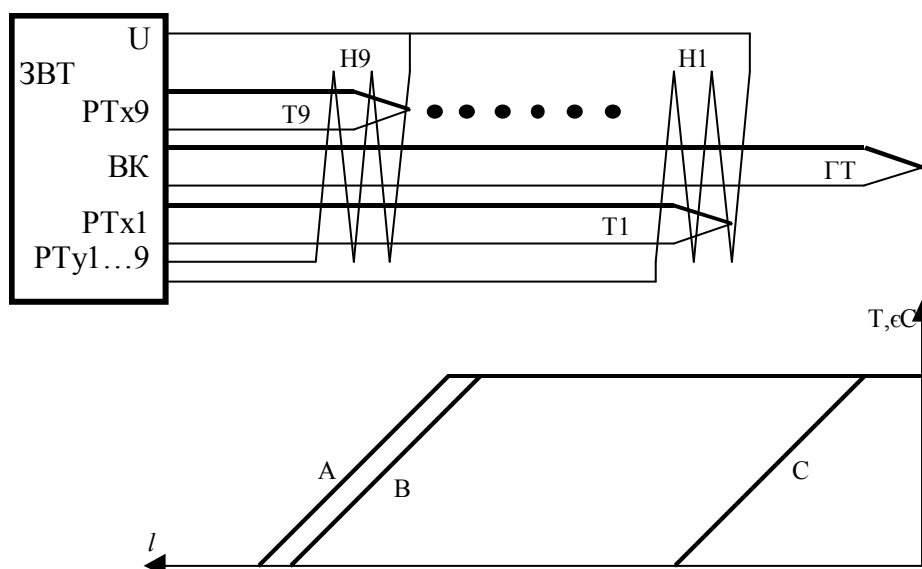


Рисунок 1 - Узагальнена структура системи вимірювання температури на базі ТЕП з КПТП

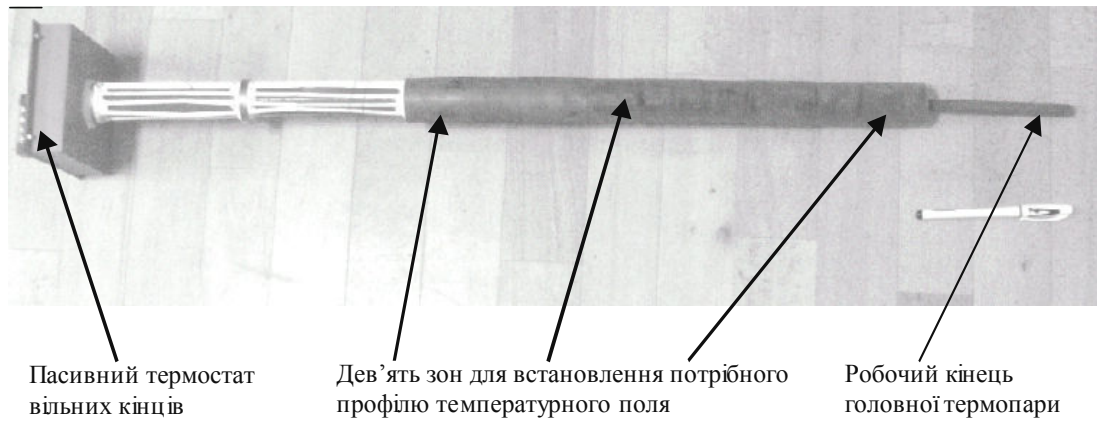


Рисунок 2 - Фотографія макета запропонованого ТЕП з КПТП

Вимоги до стенду

Основним завданням стенду є забезпечення роботи ТЕП з КПТП для проведення експериментальних досліджень специфічних похибок, які характерні для них.

Для підключення ТЕП з КПТП необхідна вимірювально-керуюча система, кількість каналів вимірювання напруги якої визначається:

1. Каналом головної термопар – один;
2. Каналами додаткових термопар – дев'ять;
3. Каналами установки нуля – один та калібрування – один;
4. Каналами вимірювання спаду напруги на опорному резисторі – один та термометрі опору – один (для забезпечення необхідної точності корекції температури вільних кінців термопар треба використати потенціометричну схему вимірювання опору з чотирьохпровідним підключенням термометра опору та опорного резистора).

У сумі отримуємо 14 каналів. Діапазон вимірюваної напруги визначається максимальною термо-е.р.с термопар (50...60 мВ) і повинен мати запас 20...30% для того, щоби не виникало явище обмеження завади нормального виду, яке приведе до різкого падіння завадостійкості вимірювального каналу.

Чутливість вимірювальних каналів визначається чутливістю термопар, які входять у склад ТЕП з КПТП. В макеті використано термопар типу хромель-алюмель (ХА), які мають чутливість приблизно 40 мкВ/°С. Для дослідження впливу різних зовнішніх факторів на ТЕП з КПТП необхідно мати значний запас за чутливістю. Тому в розробленому стенді вимірювальні канали мають чутливість 1 мкВ, що відповідає зміні температури приблизно на 0,025°С.

Допустима похибка вимірювальних каналів повинна була би бути меншою очікуваних змін термо-е.р.с. ТЕП під дією впливаючих величин, тобто співмірною з чутливістю системи. Однак тоді значення допустимої похибки складе 0,0015...0,002%, що дуже важко забезпечити, особливо з врахуванням необхідності розміщення вимірювального каналу безпосередньо біля печі, яка входить у склад стенду. Остання вимога диктується необхідністю максимального скорочення провідників, якими до вимірювального каналу під'єднуються термопар, через необхідність зменшення дії завад нормального виду – залишкові (не подавлені) завади різко збільшують власне випадкову складову похибки вимірювального каналу, яка найбільш небезпечна при дослідженні дії впливаючих величин. А розміщення вимірювального каналу біля печі веде до значних змін температури його експлуатації і, відповідно, до впливу додаткової температурної похибки на результат вимірювання. Тому при побудові вимірювальної системи необхідно вжити заходи для зменшення похибки вимірювального каналу – автоматичну корекцію адитивної та мультиплікативної похибки. Але і тоді важко виконати вимоги, що ставляться до джерела напруги калібрування вимірювального каналу. Тому запропоновано нормувати для вимірювального каналу два види похибок –

границю допустимої похибки в умовах експлуатації та границю допустимої нестабільності за час проведення окремого експерименту (за добу). В такому випадку можливі прецизійні дослідження змін термо-е.р.с. ТЕП під дією впливаючих величин, особливо, якщо методика експерименту базується на різницевих вимірюваннях. Крім того, запропоновано передбачити калібрування системи з допомогою зовнішнього джерела взірцевої напруги.

У зв'язку з використанням для нагрівання досліджуваного ТЕП з КПТП електропечі опору на нього можуть діяти завади як нормального, так і загального виду, а також міжканальні [12]. Тому вимірювальні канали мають мати достатньо високі коефіцієнти подавлення таких завад.

Основними похибками ТЕП з КПТП, які необхідно дослідити експериментально з допомогою розроблюваного стенда, є:

1. Похибка від неідеальності алгоритму роботи підсистем регулювання температури окремих зон, тобто “хвиля регулювання”.
2. Похибки від впливу теплового потоку останнього нагрівача N_n на температуру робочого кінця ГТ. Ця похибка є методичною для ТЕП такої конструкції.
3. Похибка від впливу змін профілю зовнішнього температурного поля на розподіл температур вздовж електродів головної термопари, тобто від неідеальності конструкції нагрівачів $N_1...N_n$ підсистем регулювання температури. Ця похибка зумовлює наявність залишкової похибки неоднорідності.

Перелічені похибки можна було б дослідити з допомогою печі з довільно керованим профілем температурного поля. Однак така піч повинна була б мати дуже складну конструкцію (декілька нагрівачів з тепловою ізоляцією між ними) і складну систему регулювання. Запропоновано методики дослідження перелічених похибок, які базуються на відносних вимірюваннях, тому виявилось можливим побудувати стенд дослідження ТЕП з КПТП на базі печі з одним нагрівачем. Основною вимогою до такої печі є підтримання заданої температури в печі дослідження ТЕП з КПТП в діапазоні температур 300...800°C. Те, що запропоновані методики дослідження базуються на відносних вимірюваннях, дозволяє встановити невисокі вимоги до похибки задання температури (не більше 3°C), однак вимагає відносно високої стабільності підтримання температури (амплітуда “хвилі регулювання” не повинна перевищувати 0,5°C).

Додатковими вимогами до стенда є дешевизна та ремонтпридатність (для чого необхідно в максимальній мірі використовувати широко розповсюджені компоненти), а також можливість взаємодії як вимірювально-керуючої системи, так і регулятора температури печі з персональним комп'ютером через популярний інтерфейс.

Опис стенду дослідження ТЕП з КПТП

Структура розробленого стенду представлена на рис.3. Основними вузлами стенду є сам ТЕП з КПТП, вимірювально-керуюча система ВКС, піч і персональний комп'ютер IBM PC. ТЕП з КПТП складається з головної термопари (гол. ТП), дев'ятьох зон стабілізації температури вздовж її термоелектродів (куди входять нагрівачі $N_1...N_9$ і термопари ТП1...ТП9) та схеми корекції температури вільних кінців ТВК. Піч складається основного нагрівача печі H і системи стабілізації заданої температури печі, яка, в свою чергу, складається з термопари ТП, другої схеми корекції температури вільних кінців ТВК2, аналого-цифрового перетворювача АЦП, мікроконтролера МК і тиристора Тир. Вимірювально-керуюча система ВКС складається з вхідного комутатора, джерела опорної напруги U_{ref} , мікроконвертора ADUC-834 [13], широтно-імпульсного модулятора ШІМ і силових ключів. У свою чергу, до складу ADUC-834 входять 24 розрядний сігма-дельта аналого-цифровий перетворювач і мікроконтролер, сумісний з серією i51. Всі вузли стенду об'єднані локальною мережею на базі модифікованого інтерфейсу RS-232 [14]. Керування всіма вузлами стенду здійснюється за допомогою персонального комп'ютера IBM PC, туди ж передаються результати вимірювань. Фотографія розробленого стенду представлена на рис. 4.

ВКС розробленого стенду аналогічна описаній в [11, 15]. Для виконання вимог, поставлених у попередньому розділі, комутатор ВКС виконано на геконових реле типу РГК-15 з додатковими термовирівнювачами для усунення впливу паразитних термо-е.р.с. [16]. Джерело опорної напруги Uref виконано на термокомпенсованому прецизійному стабілізаторі типу AD780 [17] з подільником на мікродротових резисторах МРХ і С5-61.

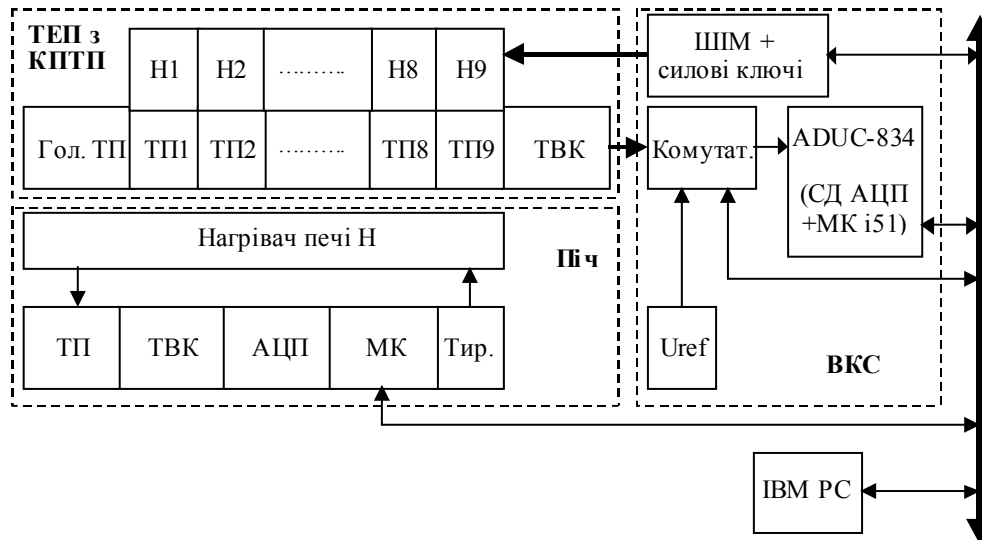


Рисунок 3 - Структура стенду дослідження ТЕП з КПТП

Для зменшення випадкової похибки мікроконтролер, що входить в склад ADUC-834, проводить цензурування та усереднення серії з п'яти результатів вимірювань. Для зменшення рівня завад нормального виду та імпульсних завад кабелі підключення термопар і нагрівачів виконані на базі "витої пари", яка використовується для мереж типу Ethernet. Експериментальні дослідження показали, що в комплекті з роз'ємними типу D9 такі кабелі забезпечують рівень паразитних термо-е.р.с. значно менше 1 мкВ навіть в умовах дії теплових потоків печі. Для зменшення впливу завад загального виду локальна мережа гальванічно розв'язана з вузлами, які входять у склад вимірювального каналу (комутатор і ADUC-834) з допомогою оптронів типу АОТ-128. При цьому, для зменшення кількості оптронів, комутатор має власну систему керування реле на базі мікроконтролера 89С51. Застосовані заходи дозволили забезпечити ВКС метрологічні параметри, подані в таблиці 1. Як видно з таблиці, вимоги до стенду виконано.

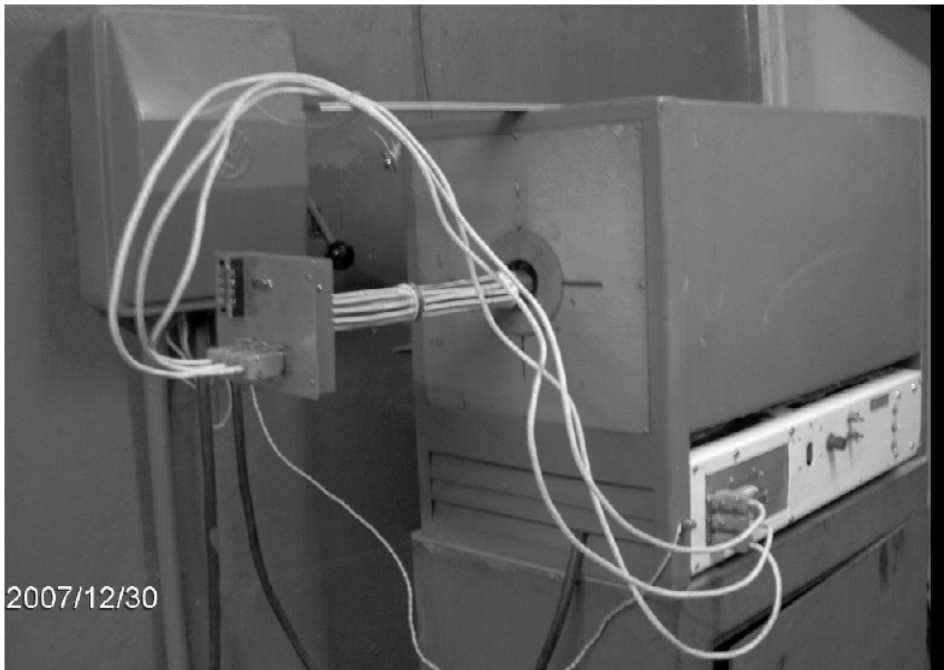


Рисунок 4 - Фотографія стенду дослідження ТЕП з КПТП

Керуюча частина ВКС включає ШІМ на базі мікроконтролера 89С2051 та силові ключі на транзисторах КТ829. Експериментальні дослідження показали, що достатньою є роздільна здатність ШІМ на рівні 8-ми двійкових розрядів.

Система стабілізації заданої температури печі базується на мікроконтролері 89С51 та перетворювачі напруга-частота на базі операційних підсилювачів 140УД12. Для забезпечення заданої в попередньому розділі точності підтримання температури в ній теж передбачено автоматичну установку нуля та калібрування. Комутатор системи стабілізації виконано аналогічним до описаного у ВКС, а джерело опорної напруги, в зв'язку з нижчими вимогами за точністю, на базі термокомпенсованого прецизійного стабілітрона типу КС191Ф і подільника на резисторах С5-5. Завдяки такому рішенню похибка встановлення температури в печі практично визначається дискретністю задання уставки регулювання (1°C), а її нестабільність – “хвилю регулювання”, яка залежить від точності визначення параметрів ПІД-закону регулювання.

Таблиця 1 - Технічні параметри ВКС

№ п/п	Параметр	Значення
1.	Кількість каналів	16
2.	Діапазон вимірювання	80 мВ
3.	Чутливість	1 мкВ
4.	Границя основної допустимої похибки	$\pm(0,05+0,005(X/X_{\max}-1)) \%$
5.	Нестабільність за один день	$\pm(0,0025+0,002(X/X_{\max}-1)) \%$
6.	Час вимірювання одного каналу	1,5 с
7.	Подавлення завад нормального виду	70 дБ
8.	Подавлення завад загального виду	140 дБ

Дослідження впливу змін зовнішнього температурного поля на розподіл температур вздовж електродів головної термопари

Розроблений стенд дозволяє провести експериментальні дослідження вище перелічених похибок ТЕП з КПТП. “Хвилю регулювання” можна дослідити просто спостерігаючи за значенням температури кожної зони нагрівання протягом кількох десятків хвилин або аналізуючи ці ж значення, записані у файл. При цьому похибка визначення “хвилі регулювання” визначається короткочасовою нестабільністю ВКС

(лінійка 5 таблиці 1), а також залишковими завадами, рівень яких, як показали експериментальні дослідження стенду, не перевищує 1 мкВ. Інші складові похибки ВКС – основна похибка, часова та температурна нестабільність і т.д., на визначення розмаху (подвійної амплітуди) “хвилі регулювання” практично не впливають.

Дослідження похибки від впливу теплового потоку нагрівача Н1 – найближчого до робочого кінця головної термопари – на температуру її робочого кінця, тобто методичної похибки пропонованого виду ТЕП, вимагає спеціальної методики, тому буде розглянуто в окремій статті.

Розглянемо вплив зовнішнього температурного поля на розподіл температур вздовж електродів головної термопари. В загальному можливі три варіанти роботи кожної підсистеми регулювання температури:

1. Підсистема не може достатньо нагріти ТЕП через недостатню потужність нагрівача N_i . У такому випадку потужність цього нагрівача $P_i = 100\%$ тривалий час, а температура зони залишається нижчою заданої – $T_i < T_{izad}$.
2. Підсистема працює в нормальному режимі. У такому випадку потужність цього нагрівача $0 < P_i < 100\%$ тривалий час, а температура зони залишається близькою до заданої – $T_i \approx T_{izad}$.
3. Підсистема не може знизити температуру зони. В такому випадку потужність цього нагрівача $P_i = 0$ тривалий час, а температура зони залишається вищою заданої – $T_i > T_{izad}$.

Перший і третій варіанти свідчать про неможливість стабілізації профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари засобами, доступними підсистемам регулювання температури. Такі стани для ТЕП з КПТП є ненормальними, вони повинні визначатися програмою роботи підсистем регулювання. Останні повинні повідомляти про виникнення таких станів оператора або вищий ієрархічний рівень системи. У цих випадках похибка неоднорідності електродів головної термопари буде себе проявляти, хоча в меншій мірі, ніж при відсутності підсистем регулювання температури (тобто при використанні звичайного ТЕП). В даній статті похибка вимірювання температури в таких станах не розглядається.

Однак навіть при нормальній роботі всіх підсистем регулювання температури зміни профілю зовнішнього температурного поля можуть дещо впливати на профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари. Цей вплив пов'язаний з неідеальною конструкцією нагрівачів, власне, він визначає залишкові прояви похибки від неоднорідності електродів головної термопари. Тому необхідна оцінка цього впливу. Основна трудність такої оцінки полягає в тому, що температури всіх зон, при нормальній роботі підсистем регулювання, відповідають заданим, тому результати вимірювання температури термопарами ТП1...ТП9 не несуть інформації про вплив зовнішнього температурного поля – цей вплив максимальний в зоні між нагрівачами, де відсутні датчики температури. Навіть з допомогою печі, яка має регульований профіль температурного поля та систему вимірювання профілю зовнішнього температурного поля, дослідити цей вплив неможливо. Однак слід відзначити, що нам не обов'язково знати конкретну залежність профілю внутрішнього температурного поля від зовнішнього. Вплив зовнішнього температурного поля на внутрішнє зумовлює лише залишкову похибку неоднорідності. Тому нам потрібно лише оцінити максимальне відхилення внутрішнього температурного поля від заданого профілю при деяких, відносно великих змінах зовнішнього температурного поля. Очевидно, що малі зміни зовнішнього температурного поля викликають також малі зміни внутрішнього температурного поля, які мало впливають на залишкову похибку неоднорідності.

Пропонується зміну зовнішнього температурного поля оцінити штучно, через вимкнення одного з нагрівачів. Створена різниця температур викличе тепловий потік, який “проникає” до електродів головної термопари, а в центрі області максимального

“проникнення” є давач температури – термопара зони з вимкненим нагрівачем. Різниця між результатами вимірювання температур при ввімкненому і при вимкненому нагрівачі буде відповідати імітованому впливу зовнішньої температури на внутрішню. В результаті можна буде приблизно оцінити “коефіцієнт проникнення” зовнішнього температурного поля через “щілину”, яка відповідає ширині одного нагрівача.

Методика такого експерименту полягає в наступному:

1. Встановлюємо задану температуру в печі та витримуємо ТЕП з КПТП із вимкненими нагрівачами до закінчення перехідного процесу нагрівання.
2. Вимірюємо температуру T_i^A всіх зон ТЕП з КПТП термопарами ТП1...ТП9.
3. Вмикаємо на повну потужність всі нагрівачі зон ТЕП з КПТП і чекаємо закінчення перехідного процесу нагріву.
4. Вимірюємо температуру T_i^B всіх зон ТЕП з КПТП термопарами ТП1...ТП9.
5. Вимикаємо один з нагрівачів зони ТЕП з КПТП і чекаємо закінчення перехідного процесу нагріву. Попередні дослідження представленого на рис. 2 макета показали доцільність вимкнення сьомого нагрівача. Через несиметричність створюваного нагрівачами температурного поля власне сьомий нагрівач дає максимальну зміну температури.
6. Вимірюємо температуру T_i^C всіх зон ТЕП з КПТП термопарами ТП1...ТП9.

Максимальне додаткове нагрівання ΔT_i^B від ввімкнених на повну потужність всіх нагрівачів зон ТЕП з КПТП можна знайти як $\Delta T_i^B = T_i^B - T_i^A$. Графік залежності ΔT_i^B від номера зони представлено на рис. 5 (найвища крива). Додаткове нагрівання ΔT_i^C від ввімкнених на повну потужність всіх нагрівачів зон без сьомої зони можна знайти як $\Delta T_i^C = T_i^C - T_i^A$. Графік залежності ΔT_i^C від номера зони також представлено на рис. 5 (середня крива). Ці дві криві характеризують “проникнення” зовнішньої температури до електродів головної термопари через “щілину”, яка відповідає ширині сьомого нагрівача. Їх різниця (найнижча крива рис. 5) відповідає імітованому впливу зовнішньої температури на внутрішню. Значення “коефіцієнта проникнення” зовнішнього температурного поля можна оцінити як відношення максимального значення кривої різниці до максимального значення зміни температурного поля, яку імітує ΔT_i^B . В нашому випадку приблизне значення визначеного експериментально “коефіцієнта проникнення” K_{EXP} становить $K_{EXP} = 5^\circ\text{C} / 28^\circ\text{C} \approx 0,2$. Слід відзначити, що отримане значення K_{EXP} відповідає “щілині”, ширина якої рівна ширині одного нагрівача. В макеті, представленому на рис. 2, ширина “щілини” (тобто відстань між кінцем попереднього і початком наступного нагрівача) приблизно в 5 разів менша, ніж ширина нагрівача. Хоча залежність зміни температури від ширини “щілини” нелінійна, для оцінки залишкової похибки неоднорідності можна вважати, що “коефіцієнт проникнення” пропорційний ширині “щілини”. Тому при реальній експлуатації значення “коефіцієнта проникнення” слід вважати принаймні в 5 разів меншим – $K_{REAL} \leq 0,04$. Таке значення є цілком прийнятним для того, щоби зменшити вплив похибки неоднорідності головної термопари в 10...20 разів.

Висновки

Стенд дослідження ТЕП з КПТП, описаний у даній статті, задовольняє всі висунуті до нього вимоги. Він дозволяє експериментально дослідити ті специфічні похибки, які характерні для пропонованих ТЕП з КПТП. Результати дослідження впливу змін зовнішнього температурного поля на розподіл температур вздовж електродів головної термопари показав, що цей вплив є незначним і дозволяє суттєво зменшити вплив на результат вимірювання температури, набутої в процесі тривалої експлуатації неоднорідності електродів головної термопари.

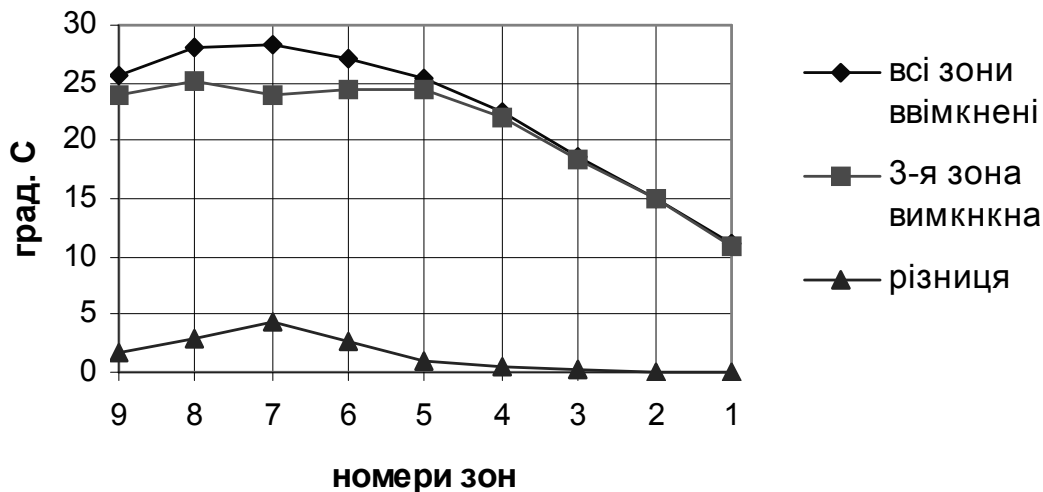


Рисунок 5 - Результати дослідження впливу змін зовнішнього температурного на розподіл температур поля вздовж електродів головної термопары

Література

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.- 278с.
2. ГОСТ 3044-84. Преобразователи термоэлектрические. Номинальные статистические характеристики преобразования, - М.: Изд-во стандартов, 1984.- 56 с.
3. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В.Самсонов, А.И.Киц, О.А.Кюздени и др.- Киев.: Наукова думка, 1972.- 223 с.
4. О. Кочан, Н. Васильків, Р. Кочан, В. Яскілка. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - №1 2007. - С.122-129.
5. Киренков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности // Исследование в области температурных измерений: Сб. тр.- М.: ВНИИМ.-1976.-С.11-15.
6. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 96 с.
7. Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из благородных металлов. Автореферат дис... к.т.н.: 05.11.15 - М., ВНИИФТРИ, 1984. - 25с.
8. 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.
9. М.І.Чирка, Н.М.Васильків, Р.В.Кочан. Метод підвищення точності прогнозування нестабільності характеристик перетворення термоелектричних перетворювачів. // Вісник ТАНГ. Економіко-математичне моделювання. – 1999. – №6. – С.37-42.
10. О.В.Кочан, Р.В.Кочан. Термоелектричний перетворювач. Заявка на патент України № 200701855, Заявл. 22.02.2007.
11. О.В.Кочан. Термоелектричний перетворювач з корекцією похибки неоднорідності. Вимірювальна техніка та метрологія, випуск 68, 2008. - С. 144-152.
12. Кочан Р.В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. по спеціальності 05.11.16. Львів, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАНУ, 2005. - 16с.
13. www.analog.com/en/analog-microcontrollers/aduc834/products/products.html.
14. Патент 25609А України, МКІ G06F 15/00. Двопровідна локальна обчислювальна мережа, повторювач сигналу та інвертор для використання в ній / В.В.Кочан, В.О.Тимчишин (Україна); Заявл. 30.10.97 № 97105295; Видано 30.10.98.
15. О.В. Кочан, Р.В. Кочан. Оцінка похибки вимірювання температури з допомогою термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля //Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, №2, том 1, технічні науки, 2007. - С.237-241.
16. Пат. 200610833 Україна, МПК Н01. Комутатор сигналів низького рівня: Р.В. Кочан, О.В. Кочан, В.В. Кочан, Г.І. Барило. Заявл. 13.10.2006.
17. www.analog.com/en/other/militaryaerospace/ad780/products.html.

Одержано 03.02.2009 р.