

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Західноукраїнський національний університет  
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра інформаційно-обчислювальних систем і управління

БОГАТИРЧУК Владислав Олександрович

Лінеаризована модель процесу регулювання  
температури у багатозонній печі / Linearized Model  
of Temperature Control in a Multizone Furnace

спеціальність: 122 - Комп'ютерні науки  
освітньо-професійна програма - Комп'ютерні науки

Кваліфікаційна робота

Виконала студентка групи  
КНм-21  
В.О. Богатирчук

---

Науковий керівник:  
к.т.н., професор, В. В.  
Кочан

---

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту:  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ М.П. Комар

ТЕРНОПІЛЬ – 2022

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
 Кафедра інформаційно-обчислювальних систем і управління  
 Освітній ступінь «магістр»  
 спеціальність: 122 – Комп'ютерні науки  
 освітньо-професійна програма – Комп'ютерні науки

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Завідувач кафедри  
 \_\_\_\_\_ М.П. Комар  
 « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ЗАВДАННЯ  
 НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ  
 БОГАТИРЧУКУ Владиславу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Лінеаризована модель процесу регулювання температури у багатозонній печі  
 / Linearized Model of Temperature Control in a Multizone Furnace  
 керівник роботи к.т.н., професор В. В. Кочан  
 затверджені наказом по університету від 31 грудня 2021 р. №606.

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи 16 листопада 2022 року.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: завдання на кваліфікаційну роботу студента, наукові статті, технічна література.

4. Основні питання, які потрібно розробити

- Провести аналіз конструктивних особливостей термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля.
- Виділити не достатньо досліджені похибки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля.
- Провести огляд відомих методів керування профілем температурного поля багато-зонних об'єктів та їх придатність для реалізації.
- Провести аналіз ітераційного методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.
- Розробити методикау дослідження методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.
- Розробити алгоритми дослідження збіжності методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

- Алгоритм збору даних для оцінки збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля.

## 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

## 7. Дата видачі завдання 11 жовтня 2021 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Аналіз методів і засобів реалізації заданого профілю темп поля у багатозонній трубчатій печі	12.2021 р. – 03.2022 р.	
2	Підготовлення імітаційних досліджень методу керування профілем температурного поля	03.2022 р. – 05.2022 р.	
3	Методика досліджень методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь	05.2022 р. – 11.2022 р.	
4	Повне завершення та представлення кваліфікаційної роботи на кафедрі	16.11.2022 р.	

Студент \_\_\_\_\_ В.О. Богатирчук  
підпис

Керівник роботи \_\_\_\_\_ к.т.н., професор, В. В. Кочан  
підпис

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	6
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАДАНОГО ПРОФІЛЮ ТЕМПІ ПОЛЯ У БАГАТО-ЗОННІЙ ТРУБЧАТІЙ ПЕЧІ .....	12
1.1 Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля .....	12
1.2 Відомі методи керування профілем температурного поля .....	27
1.3 Напрямки подальших досліджень.....	38
Висновки до першого розділу .....	42
2 ПІДГОТОВЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ.....	44
2.1 Ітераційний метод керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь .....	44
2.2 Концепція математичної моделі багато-зонної трубчатої печі, придатної для дослідження методів керування профілем температурного поля.....	57
2.3 Розроблення математичної моделі трубчатої печі .....	63
Висновки до другого розділу.....	66
3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА БАЗІ СИСТЕМИ ЛІНІЙНИХ РІВНЯНЬ ..	67
3.1 Методика проведення досліджень методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.....	67
3.2 Алгоритми проведення досліджень збіжності методу керування профілем температурного поля .....	73
3.3 Алгоритм проведення досліджень впливу амплітуди збурень на необхідну кількість ітерацій .....	74
Висновки до третього розділу .....	75
ВИСНОВКИ.....	77

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79
ДОДАТОК А Апробація отриманих результатів.....	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ  
І ТЕРМІНІВ

ГТ –	– головна термopapa:
ТЕП	– термоелектричний перетворювач;
ТЕП з КПТП	– термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля;
термо-е.р.с.	– термоелектрична рушійна сила.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Температура грає дуже важливу роль як у повсякденному житті, так і у промисловості, транспорті, наукових дослідженнях тощо. Як вказано у [1], “Статистичні дані свідчать, що на температурні вимірювання припадає до 40% усіх вимірювань у промисловості. У деяких галузях ця частка може бути значно більшою, зокрема в енергетиці вона сягає 70%”. Відповідно до [2], вимірювання температури як фізичної величини займає четверте місце після вимірювань часу, маси і лінійних розмірів. При цьому засоби вимірювання температури, відповідно до вирішуваної задачі, бувають дуже різної конструкції [3 - 6].

Однією з основних вимог до температурних вимірювань є їх точність. Зокрема, відповідно до [1], “Точність дотримання температурного режиму у більшості сучасних технологічних процесів визначає як якість кінцевого продукту, так і економічні показники технологічного процесу його виготовлення”. Тому підвищення точності вимірювання температури є актуальною та важливою науковою і практичною задачею. Вирішення цієї задачі дає також значний економічний ефект. Як показує проведена на базі [7 - 11] теоретична оцінка, зниження необхідного запасу безпеки на 1°C (ризик користувача, [12]) на Бурштинській тепловій електростанції шляхом підвищення точності вимірювання температури дасть змогу додатково виробити електроенергії на 3,4 млн. гривень (у цінах 2019 року) за кожен рік без додаткових затрат палива.

Слід відзначити, що сучасне високопродуктивне та економічно вигідне обладнання у більшості випадків вимагає високої точності контролю параметрів технологічних процесів. Аналіз показує, що точність вторинних приладів у каналах вимірювання температури невпинно росте [13 – 15]. У той же час кінцева похибка вимірювання температури зменшується доволі мало.

Такий стан можна пояснити тим, що у вимірювальних каналах температури уже давно домінує похибка первинних перетворювачів (давачів, сенсорів) [16, 17], а похибка вторинних приладів у цих каналах є значно нижчою. А точність давачів температури, незважаючи на цілий ряд науково-дослідних робіт з їх вдосконалення, за останні десятиріччя істотно не зростає [16, 17]. Таким чином подальше підвищення точності вторинних приладів у каналах вимірювання температури має обмежену актуальність.

Для створення можливості керованим профілем температурного поля у термоелектричних перетворювачах за [27, 28] за допомогою мікроконтролерів, у [31] та [32] розроблено два ітераційних методи, які мають відносно малу обчислювальну складність. Ці методи, по-перше, використовують розімкнуту систему автоматичного регулювання, частота корекції керуючої дії проводиться не частіше ніж з періодом, у 2,5...3 рази більшим за постійну часу перехідних процесів теплового характеру у термоелектричному перетворювачі з керованим профілем температурного поля [26] або у трубчатій багато-зонній печі [27]. Таким чином, формування поправки на керуючу дію розімкнуту систему автоматичного регулювання проводиться практично після закінчення перехідних процесів у термоелектричному перетворювачі з керованим профілем температурного поля [26] або у трубчатій багато-зонній печі [27]. Тобто згадані перехідні процеси теплового характеру не будуть впливати на отримані значення корекції керуючої дії – вони будуть незалежними від змін теплових впливів однієї зони на іншу через відсутність змін температури окремих зон під час формування поправки на керуючу дію. За рахунок такої структури системи керування профілем температурного поля у пропонованих у [26] або у [27] варіантах термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля зникає схильність до самозбудження. По-друге, запропоновано цілеспрямовано зменшувати відхилення профілю температурного поля при формуванні корекції керуючої дії – це зумовить більш плавний перехід до заданого профілю температурного поля і



відсутність «перерегулювання». Тобто відхилення сформованої корекції керуючої дії будуть дещо меншими за потрібні, більш точна корекція профілю температурного поля буде проведена у наступному ітераційному циклі формування корекції керуючої дії. Через те, що у наступному циклі формування корекції керуючої дії абсолютні поточні відхилення профілю температурного поля від заданого будуть менші, вплив відхилень сформованої корекції керуючої дії від ідеальної також буде меншим. Це зумовить безумовну збіжність процесу керування профілем температурного поля у запропонованих у [31] та [32] методах.

Перший з запропонованих у [31] та [32] методів базується на рішенні системи лінійних рівнянь, а другий – використовує нейронну мережу. Однак ці методи не були достатньо досліджені для визначення їх властивостей та особливостей їх використання. Тому задача їх детального дослідження та порівняння їх властивостей є актуальною задачею.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної дипломної роботи магістра є дослідження реакції на збурення профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, призначеній для реалізації термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, при керуванні профілем температурного поля ітераційним методом на базі системи лінійних рівнянь.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- 1) Провести аналіз конструктивних особливостей термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля та аналіз його похибок.
- 2) Виділити не достатньо досліджені похибки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля.
- 3) Провести огляд відомих методів керування профілем температурного поля багато-зонних об'єктів та їх придатність для реалізації за допомогою простих і дешевих восьми-бітних мікроконтролерів.

- 4) Визначити напрями подальших досліджень у даній дипломній роботі магістра.
- 5) Провести аналіз ітераційного методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.
- 6) Розробити математичну модель багато-зонної трубчастої печі, придатної для дослідження ітераційних методів керування профілем температурного поля термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля.
- 7) Розробити методику дослідження методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.
- 8) Розробити алгоритми дослідження збіжності методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.
- 9) Розробити алгоритми дослідження впливу амплітуди збурень на кількість ітерацій для методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.

**Об'єкт дослідження** – процес керування профілем температурного поля у багато-зонних об'єктах.

**Предмет дослідження** – спрощений метод керування профілем температурного поля у багато-зонних об'єктах, що базується на рішенні системи лінійних рівнянь, придатний для реалізації за допомогою мікроконтролера з обмеженими обчислювальними ресурсами.

**Методи досліджень** – імітаційне моделювання.

**Наукова новизна.** Отримав подальший розвиток ітераційний метод керування профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, призначеній для реалізації термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, який базується на рішенні системи лінійних рівнянь, за рахунок розроблення математичної моделі багато-зонної трубчастої печі та підготовці методики дослідження збіжності процесу керування та оцінки залежності кількості ітерацій, необхідної для досягнення

заданих допустимих відхилень температурного поля від амплітуди збурень, що дало змогу підготувати такі дослідження.

**Практичне значення одержаних результатів:**

- 1) Розроблено математичну модель багато-зонної трубчатої печі, придатну для дослідження методів керування профілем температурного поля;
- 2) Розроблено методику дослідження методом імітаційного моделювання збіжності методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь;
- 3) Розроблено методику дослідження методом імітаційного моделювання впливу амплітуди збурень на кількість ітерацій для методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь;

**Публікації.** За результатами проведених досліджень опубліковано двоє тез доповідей на конференції.

**Структура та обсяг роботи.**

Дана кваліфікаційна робота складається із змісту, вступу, трьох розділів, висновків, списку посилань і додатків та містить 87 сторінок тексту, 13 рисунків, 3 таблиці, 3 додатки, список посилань містить 51 позицію.

# 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАДАНОГО ПРОФІЛЮ ТЕМП ПОЛЯ У БАГАТО-ЗОННІЙ ТРУБЧАТІЙ ПЕЧІ

## 1.1 Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля

Якщо розглядати похибку від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар з точки зору загальної метрології [33], то це реакція неідеального елемента вимірювального кола на впливаючу величину. У цьому випадку впливаючою величиною виступає відхилення профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури від деякого усталеного значення, тобто зміна профілю температурного поля. Тобто, при відсутності зміни профілю температурного поля похибка від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар себе не може проявити. Виходячи з [2, 33], можна сформулювати наступні загальні підходи до вирішення задачі зменшення дії впливаючих величин:

- 1) Корекція результату вимірювання за рахунок вимірювання значення впливаючої величини, обчислення відповідної поправки (вручну або автоматично) і внесення цієї поправки в результат вимірювання [33]. Наприклад, саме таким шляхом зменшується вплив зміни температури вільних кінців термопар на результат вимірювання температури. Щодо корекції похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар власне до цього загального методу зводяться всі методи перерахунку похибки термопар, що відповідає одному профілю температурного поля, в похибку, що відповідає іншому профілю температурного поля [34, 35]. Однак математична залежність, за якою

необхідно обчислювати поправку, з достатньою точністю відома не у всіх випадках. Тому як основа для корекції впливу довільних змін профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури на результат вимірювання температури з допомогою неоднорідних термопар з високою точністю та метрологічною надійністю такий метод не годиться.

- 2) Протиставлення дії на результат вимірювання однієї впливаючої величини протилежної дії іншої, штучно створеної впливаючої величини. Наприклад, зустрічається компенсація дії магнітного поля на один з елементів вимірювального кола [2] спеціально створеним магнітним полем. Однак для реалізації цього методу необхідна підсистема керування штучно створеною впливаючою величиною з метою підтримання рівності нулю сумарної дії впливаючих величин. Що стосується похибки від термоелектричної неоднорідності електродів термопар необхідною була би підсистема, яка шляхом нагріву або охолодження ділянок електродів термопари компенсувала би поточні зміни профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури. Такий метод явно неприйнятний через складність його реалізації, особливо охолодження.
- 3) Зменшення інтенсивності дії на чутливі елементи вимірювального кола впливаючої величини. Наприклад, екранування вимірювальної схеми або деяких її елементів для зменшення дії електромагнітних завад [2, 33]. Щодо похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар таке зменшення неможливе, адже, за законом Зеебека [2, 18, 33] саме профіль температурного поля об'єкта вимірювання є для термопар не лише впливаючою величиною, а і величиною яка саме створює термо-е.р.с. ділянок термопари, тобто його можна в деякій мірі назвати вимірюваною величиною.
- 4) Зменшення дії на елемент вимірювального кола змін впливаючої величини, інакше кажучи стабілізація дії впливаючої величини [2, 33]. Наприклад, широко розповсюджене зменшення додаткових похибок від впливу температури оточуючого середовища на прецизійні засоби

вимірювання або їх елементи за рахунок розміщення їх у термостаті, де дія впливаючої величини, температури, незмінна. У цьому випадку дія впливаючої величини враховується у процесі калібрування засобу вимірювання (тобто його первинної метрологічної перевірки), а зміни впливаючої величини суттєво зменшуються і менше впливають на результат вимірювання. Щодо термопар, такий метод реалізується, наприклад, шляхом термостатування їх вільних кінців. При цьому відомі два підходи – термостатування вільних кінців при 0°C (нуль-термостат) і термостатування при температурі, вищій за можливу найвищу температуру оточуючого середовища.

Останній підхід перспективний щодо зменшення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар. Для його реалізації необхідна стабілізація профілю температурного поля [27, 31, 32] вздовж електродів неоднорідної термопари. При цьому похибка від набутої термоелектричної неоднорідності термопар, яка при випадковій зміні градієнту профілю температурного поля носить випадковий характер, переводиться в систематичну похибку, що дає змогу використовувати для її корекції відповідні методи [2, 33].

Як показано у [27, 31, 32], дрейф функція перетворення кожної ділянки кожного електрода термопари є функцією трьох змінних – температури постійної експлуатації даної ділянки  $t_e$ , часу експлуатації  $\tau$ , та температури  $t_d$ , в яку дана ділянка потрапила в результаті зміни профілю температурного поля вздовж електродів термопари. Згідно [2, 27, 33] можна записати

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_0^l \Delta e_k(t_e, t_d, \tau) \frac{\partial t}{\partial l} dl \quad . \quad (1.1)$$

Коли градієнт температури  $\frac{\partial t}{\partial l}$  буде однаковим як при експлуатації, так і при метрологічній перевірці, то температура експлуатації кожної ділянки  $t_e$  буде сталою протягом часу експлуатації

$$t_e = t_d = const \quad . \quad (1.2)$$

Повернемося до інтегрування за температурою шляхом заміни змінних

$$dt = \frac{\partial t}{\partial l} dl \quad . \quad (1.3)$$

Тоді (1.1), з врахуванням (1.2) і (1.3), можна переписати як

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_0^t \Delta e_k(\tau) dt = \Delta E_{\Sigma\tau} \quad , \quad (1.4)$$

де  $\Delta E_{\Sigma\tau}$  – сумарний часовий дрейф функції перетворення кожного електрода термопар.

Отже, за умови стабілізації профілю температурного поля вздовж електродів термопар, кожна їх ділянка буде експлуатуватись завжди за однакової температури, і похибка його ділянок  $\Delta e_k$ , а отже і сумарна похибка електроду термопар  $\Delta E_{\Sigma}$  буде залежати лише від часу експлуатації, тобто буде проявлятися як часовий дрейф функції перетворення. Тоді генерований електродом сигнал  $E_{\Sigma}$  можна записати як суму номінальної функції перетворення  $E_{\Sigma N}$  і часового дрейфу функції перетворення  $\Delta E_{\Sigma\tau}$

$$E_{\Sigma} = E_{\Sigma N} + \Delta E_{\Sigma\tau} \quad . \quad (1.5).$$

А для корекції часового дрейфу функції перетворення термопар розроблено достатньо надійні методи корекції [36 - 38].

Стабілізацію профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари (що безпосередньо вимірює температуру об'єкта) можна досягнути розміщенням вздовж них (в зоні градієнту температури об'єкта) декількох підсистем регулювання температури [27, 31], зміщених по осі головної термопари. Кожна з них повинна складатися з датчика температури (наприклад, додаткової термопари), відповідного нагрівника і регулятора, який підтримує задану температуру на своїй ділянці. В результаті такий датчик створює вздовж електродів головної термопари власне температурне поле. Профіль цього температурного поля не залежить від профілю зовнішнього температурного поля. Таким чином, деградаційні процеси в електродах термопари не можуть себе проявити як похибка від набутої термоелектричної неоднорідності. Вони можуть проявити себе лише як часовий дрейф (перший член підінтегрального виразу в (1.8)), який коригується відомими методами [36 - 38]. При умові стабілізації профілю температурного поля електродів термопари характер та тривалість змін профілю температурного поля об'єкта на процедуру корекції не впливають.

Стабілізація профілю температурного поля повинна діяти як під час експлуатації датчика, так і при його метрологічній перевірці [27, 31], тоді різниця профілів температурних полів експлуатації та печі метрологічної перевірки не веде до прояву похибки від термоелектричної неоднорідності термопари. При стабілізації профілю температурного поля головна термопара стає інваріантною до темпу змін температурного поля об'єкта вимірювання. Ці зміни можуть бути стрибкоподібними (наприклад, при зміні режимів термообробки), плавними (наприклад, при зміні умов теплообміну об'єкта із зовнішнім середовищем) або періодичними (наприклад, добовими або сезонними). Тоді, відповідно до (1.8), термо-е.р.с. термопари і її похибка не буде залежати від профілю температурного поля об'єкта вимірювання. Таким чином, стабілізація профілю температурного поля термопари дає



змогу нехтувати змінами цього профілю. Але якщо таку стабілізацію досягнути засобами об'єкта вимірювання, то метрологічну перевірку цього датчика, для високої точності корекції його похибок слід проводити тільки на місці його експлуатації (коли система стабілізації профілю температурного поля діє). Це суттєво обмежує можливості такого датчика. Щоби можна було проводити його метрологічну перевірку в лабораторних умовах (традиційним методом) необхідно, щоби профіль температурного поля в печі метрологічної перевірки досить точно відповідав об'єкту вимірювання. Кращим рішенням буде оснащення самого датчика засобами стабілізації власного профілю температурного поля, які будуть однаково діяти як при експлуатації, так і при метрологічній перевірці. Тоді профілі температурних полів будуть однакові.

Пропонований метод стабілізації профілю температурного поля експлуатації термопари можна реалізувати з допомогою додаткових підсистем регулювання температури [27, 31]. Кожна з цих підсистем повинна мати власні нагрівник, датчик температури і регулятор. Як датчик температури доцільно використати термопару, аналогічну до головної термопари. Найбільш вживаними є термопари типу хромель-алюмель. Нагрівники доцільно виконати з ніхрому, який є також сплавом на основі нікелю, як і термопари типу хромель-алюмель.

Структура пропонованого ТЕП подана на рисунку 1.1. Основним засобом вимірювання температури об'єкта є головна термопара ГТ, підключена до вимірювального каналу ВК засобу вимірювання і регулювання температури ЗВРТ. Профіль температурного поля вздовж ГТ стабілізований з допомогою підсистем регулювання температури, в склад яких входять додаткові термопари  $T_1...T_n$ , нагрівники  $H_1...H_n$  та власні регулятори, представлені на рисунку 1.1 у вигляді входів РТх і виходів РТу одного багатоканального ЗВРТ. Додаткові термопари  $T_1...T_n$  та відповідні їм нагрівники  $H_1...H_n$  зміщені відносно осі ГТ по її осі таким чином, щоби створювати їй суцільне покриття. Пропонований датчик можна назвати

термоелектричним перетворювачем з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП) [27, 31].

Подана на рисунку 1.1 структура ТЕП з КПТП забезпечує можливість цілеспрямованого керування профілем температурного поля вздовж електродів ГТ. Таким чином створюється можливість стабілізації заданого профілю температурного поля вздовж електродів ГТ (наприклад, відповідно до графіку А, поданого на рисунку 1.1). Зміна зовнішніх щодо пропонованого ТЕП з КПТП профілів температурних полів у межах, які знаходяться між лініями В і С (див. рисунок 1.1) не буде впливати на профіль температурного поля вздовж електродів ГТ.

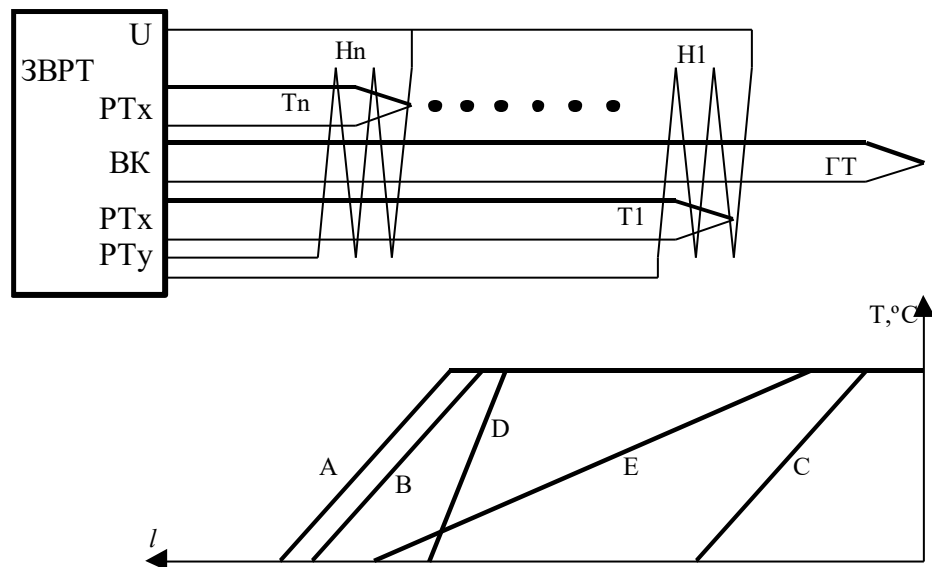


Рисунок 1.1 – Узагальнена структура ТЕП з КПТП

Зокрема, профіль температурного поля залишиться відповідним А як при метрологічній перевірці (при профілі температурного поля печі, який відповідає, наприклад, D), так і під час експлуатації (при профілі температурного поля об'єкта вимірювання температури, який відповідає, наприклад, E). В такому випадку профілі температурних полів як печі (D), так і об'єкта, де експлуатується ТЕП (E), не впливають на профіль температурного поля вздовж термоелектродів головної термопари (A), тому

похибка від неоднорідності її термоелектродів, згідно (1.2) проявити себе не може.

На рисунку 1.2 подана конструктивна схема пропонованого у [27, 31] ТЕП з КПТП. Її основою є традиційний термоелектричний перетворювач температурного поля, який складається з термоелектродів 1 і 2 головної термопари ГТ, ізолюваних керамічними бусами 3 і захисного чохла 4. Для стабілізації профілю температурного поля на деякій віддалі від робочого кінця ГТ розміщено робочі кінці додаткових термопар 5 і нагрівники 6, ізолювані керамічними втулками 7. Нагрівники 6 захищені додатковим чохлам 8. Для керування профілем температурного поля термопари 5 і відповідні їм нагрівники 6 повинні бути розміщені вздовж ГТ таким чином, щоб повністю керувати розподілом температури вздовж її електродів, але не впливати на температуру робочого кінця ГТ.

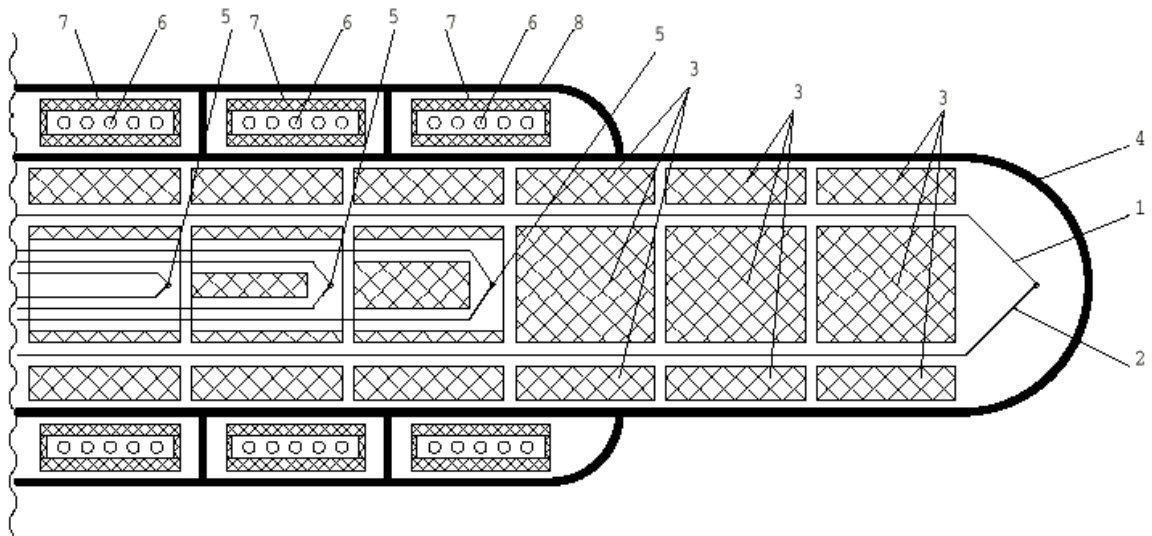


Рисунок 1.2 - Конструктивна схема ТЕП з КПТП

Розміщення ТЕП з КПТП в стінці печі представлено на рисунку 1.3. В нижній половині рисунку 1.3 тонкими лініями умовно показано можливі профілі температурного поля печі. Товстою лінією показано профіль температурного поля, яке задають додаткові підсистеми регулювання температури ТЕП з КПТП. Як видно з рисунка 1.3, заданий профіль

температурного поля ТЕП з КПТП “накриває” можливі профілі температурного поля печі, що не дасть змогу зовнішньому температурному полю змінити температуру ділянок ГТ та викликати появу похибки від набутої неоднорідності її електродів. Вплив зміни температури вільних кінців впливає на профіль температурного поля тільки на ділянках, які завжди знаходяться при низькій температурі, тобто не мають набутої термоелектричної неоднорідності. А на температуру ділянок, які мають значну набуту термоелектричну неоднорідність, зміни температури кінців порівняння не впливають.

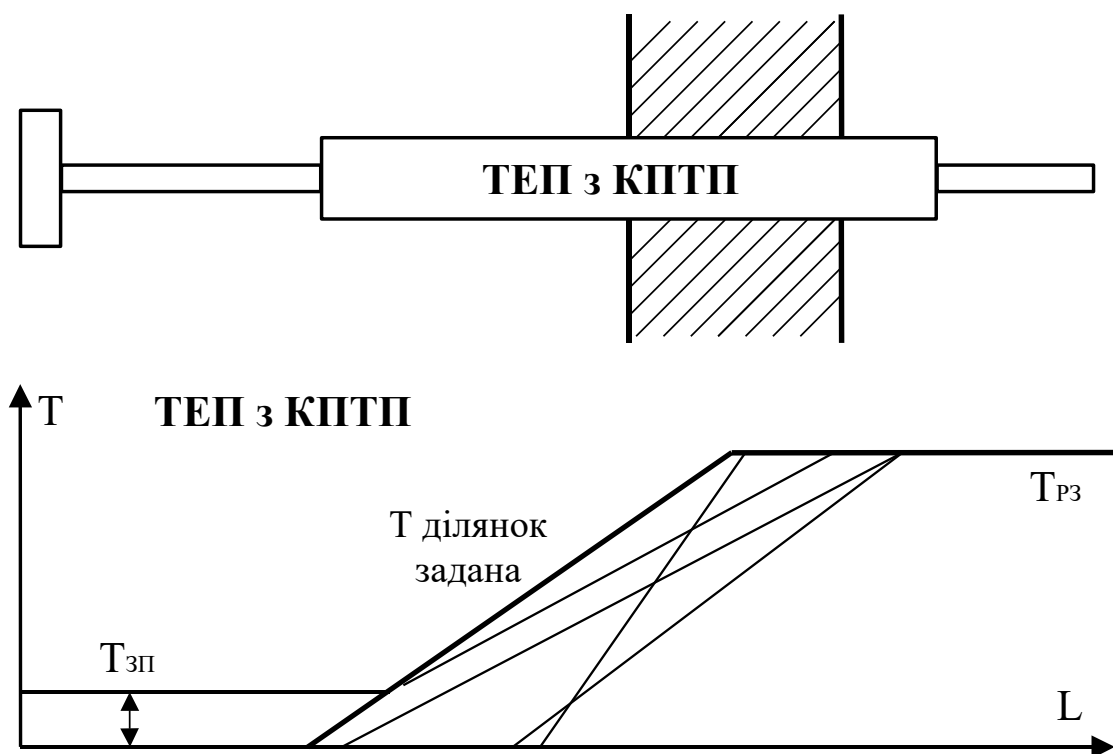


Рисунок 1.3 - Розподіл температур вздовж електродів головної термопарі ТЕП з КПТП, який встановлений в стінці печі

Слід відзначити, що компенсація впливу неоднорідності електродів термопар безпосередньо не дає підвищення точності виміру температури. Але стабілізація профілю температурного поля ГТ дає можливість застосувати всі відомі методи підвищення точності вимірювання [34 - 38] з достатньою метрологічною надійністю навіть в умовах зміни профілю температурного поля об'єкта вимірювання, хоча в [22] підкреслено, що в умовах, де

проявляється неоднорідність електродів термопар, не можна застосовувати методи підвищення точності вимірювання температури, що базуються на корекції їх похибок термопар,. Тому необхідно провести відповідний аналіз похибок.

Для проведення такого аналізу складемо рівняння вимірювання для вимірювального каналу на базі ТЕП з КППП при використанні одного з відомих методів корекції похибки термопар – калібрування за допомогою температурного калібратора [39, 40]. При калібруванні рівняння вимірювання виходить доволі простим за рахунок того, що в склад вимірювального каналу калібратор температури не входить – входить тільки значення формованої ним температури робочого кінця ГТ. Але цього рівняння цілком досить, щоби провести аналіз похибки вимірювання температури за допомогою ТЕП з КППП.

При калібруванні каналу вимірювання температури за допомогою температурного калібратора каналу вимірювання температури необхідно розглянути два режими роботи – режим саме калібрування та режим поточного вимірювання температури [27]. Кожен з цих режимів описується окремим рівнянням вимірювання, що відображає всі вимірювальні перетворення, які відбуваються у вимірювальному каналі під час роботи системи в цьому режимі.

Під час калібрування температура робочого кінця ГТ фіксується калібратором, де відбувається фазовий перехід (плавлення або кристалізація) реперного матеріалу – чистого металу або сплаву з наперед точно відомою температурою фазового переходу  $T_{FP}$  ( знайденою в результаті метрологічної перевірки калібратора згідно із [41]). Термо-е.р.с. ГТ залишається при цьому постійною, а результат вимірювання температури калібратора порівнюється із значенням  $T_{FP}$ . В результаті порівняння отримуємо значення похибки  $\Delta_{TFP}$  вимірювання температури в точці калібрування. Процес визначення поправки може бути описаний рівнянням [27]

$$(E_{RK}(T_{FP}) + E_{NEOD}(T_{FP}) + E_{VK}(T_{VKFP})) \cdot K_{VYM}(T_{FP}) - N_{FP} = \Delta_{TFP} = -\rho_{TFP}, \quad (1.6)$$

де  $E_{RK}(T_{FP})$  – термо-е.р.с. робочого кінця ГТ під час калібрування (відповідно до температури фазового переходу  $T_{FP}$ );  $E_{NEOD}(T_{FP})$  – термо-е.р.с. неоднорідності електродів ГТ під час калібрування (відповідно до профілю температурного поля вздовж електродів ГТ під час фазового переходу з врахуванням дії похибок підсистем стабілізації цього профілю);  $E_{VK}(T_{VKFP})$  – термо-е.р.с. вільних кінців ГТ під час калібрування;  $K_{VYM}(T_{FP})$  – коефіцієнт перетворення каналу вимірювання термо-е.р.с. при температурі фазового переходу  $T_{FP}$ ;  $N_{FP}$  – паспортне значення (з врахуванням всіх можливих поправок) температури фазового переходу калібратора  $T_{FP}$ ;  $\Delta_{TFP}$  – похибка вимірювання температури вимірювальним каналом, який калібрують, у точці діапазону, що відповідає температурі фазового переходу  $T_{FP}$ ;  $\rho_{TFP}$  – значення поправки для корекції похибки вимірювального каналу температури в точці діапазону, яка відповідає температурі  $T_{FP}$ .

Для підвищення точності вимірювання температури під час вимірювання проводиться корекція похибки ГТ за допомогою поправки  $\rho_{TFP}$ , визначеної при проведенні калібрування. Але тоді температура  $T_X$  робочого кінця ГТ, зовнішній профіль температурного поля вздовж ТЕП з КПТП і температура вільних кінців  $T_{XVK}$  відповідають температурі об'єкта вимірювання, його профілю температурного поля та температурі вільних кінців об'єкта вимірювання. Процес вимірювання температури у такому випадку описує рівнянням [27]

$$(E_{RK}(T_X) + E_{NEOD}(T_X) + E_{VK}(T_{VKX})) \cdot K_{VYM}(T_X) + \rho_{TFP} = N_{TX}, \quad (1.7)$$

де  $E_{RK}(T_X)$  – термо-е.р.с. робочого кінця ГТ під час вимірювання температури об'єкта  $T_X$ ;  $E_{NEOD}(T_X)$  – термо-е.р.с. неоднорідності електродів ГТ під час вимірювання температури об'єкта, яка відповідає профілю температурного поля вздовж електродів ГТ в цей час;  $E_{VK}(T_{XVK})$  – термо-е.р.с. вільних кінців ГТ, що відповідає температурі  $T_{XVK}$  під час вимірювання температури об'єкта  $T_X$ ;  $K_{VYM}(T_X)$  – коефіцієнт перетворення каналу вимірювання термо-е.р.с. у точці діапазону, що відповідає температурі об'єкта вимірювання;  $N_{TX}$  – результат вимірювання температури об'єкта  $T_X$  після корекції.

Якщо порівняти (1.6) і (1.7), то видно, що члени рівнянь вимірювання при експлуатації та при калібруванні вимірювального каналу хоча і відповідають (за змістом) один одному, повністю не співпадають. Це означає, що повна корекція похибок вимірювального каналу при калібруванні не проходить. Однак, при виконанні ряду умов, можна створити сильні кореляційні зв'язки між відповідними членами рівнянь. А це дає змогу створити умови для зменшення впливу окремих складових похибки вимірювального каналу на сумарну похибку вимірювання температури. Тому, для виявлення цих умов, проведемо аналіз всіх складових похибки вимірювального каналу, що входять у (1.6) і (1.7).

Якщо температури вимірювання  $T_X$  і калібрування  $T_{FP}$  близькі, то термо-е.р.с. робочого кінця головної термопари під час калібрування  $E_{RK}(T_{FP})$  і під час вимірювання  $E_{RK}(T_X)$  мають сильні кореляційні зв'язки. Через те, що деградаційні процеси в електродах термопар є повільними, функція похибки від дрейфу ГТ є гладкою, вона не має розривів і стрибків [42] (хоча має досить значну випадкову складову, яка буде визначати інтервал між калібруваннями). Власне на цій властивості базується можливість корекції дрейфу функції перетворення ГТ. Але температури  $T_{FP}$  і  $T_X$  не завжди рівні, тому виникає відповідна похибка  $\Delta_{FP-X}$ , яка в першому

приближенні є функцією різниці температур  $\Delta_T = T_{FP} - T_X$ . Похибку  $\Delta_{FP-X}$  можна оцінити за даними її досліджень, приведеними в [18], а також за результатами досліджень дрейфу термопар, поданими у [42].

Аналогічно до пари  $E_{RK}(T_{FP})$  і  $E_{RK}(T_X)$ , якщо температури калібрування  $T_{FP}$  і вимірювання  $T_X$  близькі, то сильні кореляційні зв'язки мають термо-е.р.с. неоднорідності електродів ГТ під час калібрування  $E_{NEOD}(T_{FP})$  і під час вимірювання  $E_{NEOD}(T_X)$ . На цьому власне ґрунтується твердження [34 - 36], що при калібруванні або при метрологічній перевірці на місці експлуатації термоелектрична неоднорідність електродів термопар мало впливає на похибку вимірювання. Але це твердження справедливе тільки для об'єктів, профіль температурного поля яких стійкий. Саме для створення сильного кореляційного зв'язку між  $E_{NEOD}(T_{FP})$  та  $E_{NEOD}(T_X)$  профіль температурного поля у ТЕП з КПТП стабілізовано. Але стабілізація профілю температурного поля не може бути ідеальною. В загальному випадку похибка стабілізації профілю температурного поля  $\Delta_{NS}$  мати наступні складові:

- 1) Похибки  $\Delta_{REG}$  підсистем регулювання температури, які створюють заданий профіль температурного поля у ТЕП з КПТП;
- 2) Похибку від змін температурного поля об'єкта вимірювання на профіль температурного поля у ТЕП з КПТП – похибкою екранування  $\Delta_E$  ;
- 3) Похибкою  $\Delta_{\Delta T}$  від нерівності температур  $T_{FP}$  і  $T_X$  .

Перша складова – похибки  $\Delta_{REG}$  підсистем регулювання температури, у свою чергу, визначається своїми складовими:

- 1) Нестабільністю  $\Delta_{TCD}$  функції перетворення додаткових термопар, що входять в склад підсистем регулювання температури (впливає лише нестабільність, похибка цих термопар усувається під час калібрування);



- 2) Нестабільністю і випадковою похибкою  $\Delta_{ETC}$  каналу вимірювання термо-е.р.с. термопар, що входять в склад підсистем регулювання температури (систематична похибка каналу вимірювання термо-е.р.с. термопар усувається під час калібрування);
- 3) Похибкою  $\Delta_C$  стабілізації (регулювання) температури, викликану тим, що закон регулювання температури достовірно не відомий, а тому налаштування регуляторів неідеальне.

Оцінити похибки  $\Delta_{TCD}$  і  $\Delta_{ETC}$  можна за даними, представленими у [18, 42]. Похибку  $\Delta_C$  теоретичним шляхом дуже складно оцінити через те, що всі підсистеми регулювання температури у ТЕП з КППП взаємно залежні. Ця залежність визначається хорошим тепловим зв'язком між всіма зонами, розміщеними, відповідно до конструкції ТЕП з КППП (див. рисунок 1.2), одна за одною, вздовж осі ГТ. Така конструкція ТЕП з КППП, з однієї сторони, визначена необхідністю створення суцільного профілю власного температурного поля ТЕП з КПП, а тому вона не може бути суттєво змінена. З іншої сторони, така конструкція ТЕП з КППП є причиною схильності підсистем регулювання до самозбудження (автогенерації). Тому, для впровадження ТЕП з КППП, необхідною є розробка, а також теоретичне та експериментальне дослідження відповідного методу регулювання температури.

Друга складова похибки стабілізації профілю температурного поля  $\Delta_{NS}$ , похибка екранування  $\Delta_E$  визначається конструктивною схемою ТЕП з КППП і використаними матеріалами. Її теоретична оцінка – складна задача через те, що необхідно створити модель, яка враховує дію всіх теплових потоків (як радіальних, так і осьових складових теплового потоку від всіх нагрівників підсистем регулювання температури, а також як радіальних, так і осьових складових зовнішніх теплових потоків).

ТЕП з КППП призначений для використання у системах вимірювання температури технологічних об'єктів з відносно малими змінами

температурних режимів – топки та котли електростанцій, металургійні печі, і печі термообробки металевих виробів тощо. Тому, при відповідному виборі температури фазового переходу калібратора температури, різниця температур  $\Delta_T = T_{FP} - T_X$  буде невеликою. Тобто ця різниця температур буде мало впливати на профіль температурного поля ТЕП з КПТП. Однак похибку  $\Delta_{\Delta T}$  від цієї різниці температур не можна наперед чітко визначити. Приблизно вона може бути оцінена за результатами досліджень [67].

Слід відзначити, що похибка  $\Delta_{NS}$  від неідеальної стабілізації профілю температурного поля ТЕП з КПТП у похибку вимірювання температури об'єкта безпосередньо не входить. Її значення, разом із ступінню набутої неоднорідності електродів ГТ, служить як основа для оцінки похибки вимірювання температури, що виникає при зміні профілю температурного поля об'єкта.

Крім того,  $\Delta_{REG}$  є також причиною виникнення специфічної методичної похибки  $\Delta_M$ , яка пов'язана з впливом на температуру робочого кінця ГТ теплового потоку від нагрівників ТЕП з КПТП. Його можна мінімізувати за рахунок налаштування підсистеми регулювання температури найближчої до робочого кінця ГТ зони рівною температурі робочого кінця ГТ. Однак  $\Delta_{REG}$  не дозволяє звести цей тепловий потік до нуля. Ця складова похибки вимірювання температури об'єкта, по-перше, не входить в рівняння вимірювання (1.6) і (1.7) і, по-друге, визначається конструкцією ТЕП з КПТП (див. рисунок 1.2). тому цю похибку можна визначити лише експериментально.

Наступною парою членів (1.6) і (1.7), що мають кореляційні зв'язки, є термо-е.р.с. вільних кінців ГТ під час калібрування  $E_{VK}(T_{VKFP})$  та вимірювання  $E_{VK}(T_{XVK})$ . Однак умови експлуатації перелічених великогабаритних термічних об'єктів, які, як правило, не знаходяться в опалюваних приміщеннях, міняються у дуже широких межах, тому кореляційним зв'язком між  $E_{VK}(T_{VKFP})$  та  $E_{VK}(T_{XVK})$  можна нехтувати. Тому,

для досягнення високої точності вимірювання температури, при використанні ТЕП з КПТП, необхідно використовувати високоякісні схеми корекції впливу температури вільних кінців ГТ.

Аналогічно слабкі кореляційні зв'язки під час фазового переходу реперного матеріалу калібратора і під час вимірювання температури об'єкта мають коефіцієнти перетворення каналу вимірювання термо-е.р.с.  $K_{VYM}(T_{FP})$  і  $K_{VYM}(T_X)$ . Тому, для досягнення високої точності вимірювання температури, при використанні ТЕП з КПТП, необхідно використовувати високоякісні вимірювальні канали.

Похибка використаного при калібруванні значення температури фазового переходу калібратора  $N_{FP}$  повністю входить в похибку вимірювання температури об'єкта. Її дослідження є самостійною складною задачею.

Таким чином, в даному параграфі, на основі аналізу загальних методів боротьби з дією впливаючих величин на результат вимірювання та аналізу структури ТЕП з КПТП проведено аналіз складових похибок вимірювального каналу, що використовує ТЕП з КПТП, і зроблено висновок про те, що деякі складові вимагають додаткового дослідження.

## 1.2 Відомі методи керування профілем температурного поля

Внаслідок взаємного впливу каналів багатоканального регулятора при виробленні керуючої дії у ТЕП з КПТП обчислення її тільки за одним каналом може привести до перерегулювання у якому-небудь іншому каналі. Тобто, при виробленні керуючої дії необхідно враховувати величини розбіжності також за іншими каналами. У загальному випадку, необхідно враховувати вплив на профіль температурного поля усіх зон регулювання температури. Але можливі окремі випадки. Наприклад, можна розглядати

ТЕП з КППП як такий об'єкт регулювання, що складається з послідовності зон, пов'язаних з сусідніми.

Досить детально питання аналізу і синтезу багатоканальних систем розглянуті в [30]. Зокрема, розглянуті питання синтезу регуляторів для багато-зонної печі. При цьому як регульовану змінну вони використовують відносну зміну температури за окремими каналами одну відносно іншої та середню температуру. За рахунок вибору таких змінних стану досягається узгоджене управління багато-зонними об'єктами. Це забезпечує, в даному випадку, рівномірний профіль температурного поля. Синтез регулятора проводиться з урахуванням заданих показників як якості так і стійкості процесу регулювання. При цьому використовується неперервне апаратне регулювання. Зворотне завдання регулювання, тобто знаходження потрібної у даний момент керуючої дії, у [30] вирішується шляхом складання відповідного диференційного рівняння, а рішення рівняння з використанням алгебри Ріккати. Слід зазначити, що розглянуті у [30] об'єкти регулювання керовані повністю, а регулятори можна синтезувати за допомогою типових блоків систем автоматичного регулювання.

В той же час розглянуті у [30] методи аналізу і синтезу не повною мірою придатні для застосування до багато-зонних термічних установок. Така їх особливість пов'язана, передусім, з частковою керованістю таких об'єктів (у них можливо тільки виділення тепла, тобто нагрів) і незворотністю фізичних процесів, що проходить в них.

Рішення задачі врахування взаємного впливу каналів регулювання один на одного може йти двома основними шляхами: з використанням алгоритмічних або неалгоритмічних методів [30]. Для алгоритмічного методу характерна побудова системи керування, яка, разом з об'єктом регулювання, може бути описана звичайними диференціальними рівняннями [43].

Алгоритмічний метод керування може бути реалізований системою із зворотними обчислювальними ланками або обчислювальною системою відповідно. А неалгоритмічний метод може бути реалізований на основі

еквівалентних зворотних моделей ланок системи або зворотної моделі всієї системи. Системау керування профілем температурного поля для ТЕП з КПТП повинна опиратися на мікроконтролер, який забезпечує невеликі обчислювальні ресурси. Тому розглянемо можливість реалізації ним алгоритмічного методу врахування взаємного впливу каналів регулювання один на одного.

Для кожної з керованих контрольованих точок температурного поля можуть бути запропоновані різні варіанти критеріїв регулювання, що дозволяють порівняти процес регулювання за їх однорідністю в просторі. Природно, що ідеальним є такий регулятор, який буде забезпечувати ідентичні характеристики в усіх точках простору керування. Проте відомі регулятори, зазвичай, не забезпечують такої якості керування. Тому при їх розробці виникає завдання порівняння різних варіантів і вибору кращих рішень.

Для характеристики режимів у [30] пропонуються наступні локальні критерії:

верхнє граничне значення в зоні

$$\theta_{i\max} = \max\{\theta_i(t)\}, t \in [0, T]; \quad (1.8)$$

нижнє граничне значення в зоні

$$\theta_{i\min} = \min\{\theta_i(t)\}, t \in [0, T]; \quad (1.9)$$

ширина діапазону в зоні

$$D_i = \theta_{i\max} - \theta_{i\min}, \quad (1.10)$$

Для термічного процесу ці критерії мають принципове значення. Так, при виробництві феритових виробів відхилення температурного режиму від

технологічних норм як у бік збільшення [30], так і у бік зменшення в деякій точці простору печі призводить до різкого зростання вірогідності браку серед осердь.

Задамо також відносну ширину діапазону [30]

$$d_i = \frac{D_i}{\bar{\theta}_i}, \quad (1.11)$$

де  $\bar{\theta}_i$  - середнє значення температури всіх зон на інтервалі спостереження  $[0, T]$ . У свою чергу  $\bar{\theta}_i$  визначається за співвідношенням

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{T} \int_0^T \theta_i(t) dt, \quad (1.12)$$

На відміну від розглянутих критеріїв  $\theta_{i_{\max}}, \theta_{i_{\min}}$  і  $D_i$ , що мають технологічний зміст, критерій  $d_i$  більш зручніший для технічного аналізу і теоретичних досліджень.

Розглянуті критерії враховують граничні відхилення температурного поля незалежно від тривалості їхньої дії. Вони можуть бути застосовані для регуляторів, що не допускають навіть короткочасних порушень температурного режиму об'єкта керування.

Для тих випадків, коли короткочасні температурні відхилення від заданих умов технологічного режиму є допустимими, доцільне використання середньоквадратичного відхилення (СКВ). СКВ, попри самі величини відхилень, враховує також імовірнісний характер їх появи. У такому випадку СКВ від середнього значення температури на заданому інтервалі буде становити [30]

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\theta_i - \theta_{i0})^2 d\theta_i}, \quad (1.13)$$

а СКВ від номінального значення температури  $\theta_{in}$ , передбаченого параметрами технологічного режиму

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\theta_i - \theta_{in})^2 d\theta_i}, \quad (1.14)$$

Розглянуті критерії на базі СКВ не враховують впливу міри відхилення температури на кінцеву результативність виробничого процесу. Більш ефективний критерій може бути запропонований, якщо відома залежність рівня втрат, які виникають при порушенні технологічних норм за температурним режимом.

Вважатимемо, що відома функція  $q_i(\theta_i)$  встановлює зв'язок рівня виробничих втрат з фактичною температурою в  $i$ -ній зоні. В цьому випадку можливе використання критерії, що характеризує середній рівень втрат [30]

$$z_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\theta_i - \theta_{in})^2 q_i^2(\theta_i) d\theta_i}. \quad (1.15)$$

Для аналізу цілком природно припустити, що при температурі номінального режиму, додаткові втрати відсутні, тобто

$$q_i(\theta_i - \theta_{in}) = 0, \quad (1.16)$$

а також функція втрат зростає із збільшенням відхилення від номінальної температури. Таким чином, відповідно до цього, функцію втрат можна представити поліномом  $i$ -того порядку від різниці  $\theta_i - \theta_{in}$  тобто

$$q_i(\theta_{ij}) = \sum_{k=1}^r b_k (\theta_{ij} - \theta_{in})^k, \quad (1.17)$$

де  $b_k$  - коефіцієнти полінома.

З урахуванням зробленого в [30] такого припущення для середнього рівня втрат отримаємо

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^r b_k (\theta_i - \theta_{in})^{k+2} d\theta_i} = \sqrt{\sum_{k=1}^r b_k \mu_{k+2}}, \quad (1.18)$$

де  $\mu_{k+2}$  - центральний момент  $k+2$  – го порядку.

У реальних технічних системах контроль температури в окремих зонах здійснюють в дискретні моменти часу. Тому при проектуванні регуляторів від інтегралів слід перейти до сум.

Задамо, що контроль профілю температурного поля об'єкта здійснюється за рівні проміжки часу тривалістю  $\Delta t = T/M$ , де  $M$  число проміжків на інтервалі  $[0, T]$ . Тоді вираз для керуючої дії матиме вигляд [30]

$$z_i = \sqrt{\sum_{j=0}^M \sum_{i=1}^N b_k (\theta_{ij} - \theta_{in})^{k+2}}. \quad (1.19)$$

Вирази для розглянутих критеріїв наберуть вигляду

- верхнє граничне значення

$$\theta_{i_{\max}} = \max\{\theta_{ij}\}, j = 0, 1, \dots, M; \quad (1.20)$$

- нижнє граничне значення



$$\theta_{i \min} = \min\{\theta_{ij}\}, j = 0, 1, \dots, M; \quad . \quad (1.21)$$

- ширина діапазону

$$D_i = \max\{\theta_{ij}\} - \min(\theta_{ij}), j = 0, 1, \dots, M; \quad . \quad (1.22)$$

- середнє значення температури

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{M+1} \sum_{j=0}^M \theta_{ij}; \quad . \quad (1.23)$$

- СКВ від середнього значення температури

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{M+1} \sum_{j=0}^M (\theta_{ij} - \bar{\theta}_i)^2}, \quad . \quad (1.24)$$

- СКВ від номінального значення температури

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{M+1} \sum_{j=0}^M (\theta_{ij} - \bar{\theta}_{in})^2}, \quad . \quad (1.25)$$

В цьому випадку функція втрат при поліноміальному представленні має вид

$$q_i(\theta_{ij}) = \sum_{k=1}^r b_k (\theta_{ij} - \theta_{in})^k \quad . \quad (1.26)$$

При цьому для середнього рівня втрат будемо мати [30]

$$z_i = \sqrt{\frac{1}{M+1} \sum_{j=0}^M \sum_{k=1}^r b_k (\theta_{ij} - \bar{\theta}_{in})^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^r b_k \mu_k} \quad . \quad (1.27)$$

У цьому випадку, коли визначення температури здійснюється дискретні моменти часу,  $t_j (j = 0, 1, \dots, M+1)$  вирази для обчислення інтегральних значень керуючої дії набирають вигляду:

- верхнє граничне значення температури

$$\theta_{\max} = \max(\max\{\theta_{ij}\}); \quad . \quad (1.28)$$

- нижнє граничне значення температури

$$\theta_{\min} = \min(\min\{\theta_{ij}\}); \quad . \quad (1.29)$$

- ширина температурного поля

$$D = \max(\max\{\theta_{ij}\}) - \min(\min\{\theta_{ij}\}); \quad . \quad (1.30)$$

- середня температура поля

$$\bar{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{1}{M+1} \sum_{j=1}^{M+1} \theta_{ij} \right] = \frac{1}{M+1} \sum_{j=1}^N \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{ij} \right] = \frac{1}{M+1} \sum_{j=1}^{M+1} \theta(t_j), \quad (1.31)$$

де  $\theta(t_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{ij}$  - середня температура поля у момент часу  $t_j$ .

Цю задачу слід вирішувати з використанням рівнянь математичної фізики для поширення тепла [30]. Дослідження причин нерівномірності

розподілу профілю температурного поля по поверхні будемо проводити на трубчатій моделі процесу.

Початковим є рівняння теплопровідності для поширення тепла [30] (постановка задачі Коші)

$$a^2 \left( \frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} \right) = \frac{du}{dt}, \quad u(x, y, 0) = \varphi(x, y) = \delta(x - x_0, y - y_0), \quad (1.32)$$

де  $u(x, y, t)$  – розподіл поточної температури  $(x, y)$  в поточний момент часу

Крім того

$$a = \frac{\lambda}{cp}, \quad (1.33)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності тіла;  $p$  - його питома густина;  $c$  - його теплоємність.

Фундаментальне рішення рівняння теплопровідності (1.19) для простої двомірної задачі подамо у функції Гріна

$$G(M, M_0, t) \left( \frac{1}{\sqrt{4\pi a^2 t}} \right)^2 \exp \left[ - \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{4a^2 t} \right]. \quad (1.34)$$

Функцію (1.34) називають також функцією впливу миттєвого точкового джерела тепла. Вона виражає температуру у деякій довільній точці  $M$ , якщо в початковий момент часу  $t=0$  у точці  $M_0$  миттєво спрацювало джерело тепла ( $x, y$  - координати цієї довільної точки,  $x_0, y_0$  - координати миттєвого джерела тепла,  $t>0$  - поточний час процесу).

Формула (1.34) дійсна для довільного миттєвого імпульсного джерела тепла. Якщо ж джерело тепла впливає протягом часу  $\tau$  (тривалість дії імпульсу), то температуру в будь-якій точці можна визначити як

$$u(x, y, t) = g(\tau)G = \begin{cases} \frac{gt}{4a^2t\pi} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{4a^2t}\right], & 0 < t < \theta; \\ \frac{g\theta}{4a^2t\pi} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{4a^2t}\right], & 0 < t < \infty, \end{cases} \quad (1.35)$$

де  $g$  – значення потужності джерела тепла.

Рішення рівняння теплопровідності плоского тіла інтегральним методом виглядає таким чином

$$T(x, y, z) = \frac{1}{4\pi a^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^t g(\xi, \eta, \tau) e^{-\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{4a^2(t-\tau)}} d\tau d\xi d\eta. \quad (1.36)$$

Будемо вважати, що всі джерела зовнішньої теплової дії точкові. Крім того, вони впливають дуже короткі інтервали часу. Позначимо кількість точкових джерел  $n$ . Їх дії включають координати  $\xi$  і  $\eta$  час дії  $\tau$  і потужність джерел  $g$ .

З урахуванням зроблених припущень представимо керуючу дію у виді суми одиничних дій

$$g(\xi, \eta, \tau) = \sum_{i=1}^n q_i \delta(\xi - \xi_i, \eta - \eta_i, \tau - \tau_i), \quad (1.37)$$

де  $\delta(\xi, \eta, \tau)$  - трьох мірна дельта-функція ( $0 < \tau_i < t$ )

Графічно інтерпретувати рівність (1.37) можна як сукупність  $n$  точок в просторі  $(0\xi\eta\tau)$ . Проекцією цих точок на площину  $(0\xi\eta)$  є необхідна сукупність точок нагріву. Кожній точці нагріву відповідає час і потужність підведеної теплової енергії. Для будь-якої безперервної функції  $f(\xi, \eta, \tau)$  справедливе співвідношення

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^t f(\xi, \eta, \tau) \delta(\xi - \xi_i, \eta - \eta_i, \tau - \tau_i) d\tau d\eta d\xi = f(\xi, \eta, \tau). \quad (1.38)$$

Врахувавши (1.34) і (1.38) отримуємо

$$T(x, y, z) = \frac{1}{4\pi a^2} \sum_{i=1}^n g_i \frac{e^{-\frac{(x - \xi_i)^2 + (y - \eta_i)^2}{4a^2(t - \tau_i)}}}{t - \tau_i}, \quad (1.39)$$

як параметр часу передачі теплової енергії.

Для характеристики джерел теплової енергії корисно визначити функцію густини енергії

$$\gamma(\tau) = \frac{dg}{d\tau}. \quad (1.40)$$

Із врахуванням (1.40) перетворимо (1.39) до виду

$$T(x, y, z) = \frac{1}{4\pi a^2} \int_0^t \gamma(\tau) \frac{e^{-\frac{(x - \xi(\tau))^2 + (y - \eta(\tau))^2}{4a^2(t - \tau)}}}{t - \tau} d\tau \quad (1.41)$$

Залежність (1.41) можна використати для безпосереднього формування керуючої дії регулятором.

Таким чином, в даному параграфі, на основі аналізу відомих загальних методів керування профілем температурного поля сформовано співвідношення, яке може бути використано для проектування системи керування профілем температурного поля у термоелектричному перетворювачі з керованим профілем температурного поля.

### 1.3 Напрямки подальших досліджень

Аналіз рівняння (1.41) дає змогу оцінити обчислювальні ресурси, необхідні для формування керуючої дії в кожній зоні багатозонного об'єкта керування, зокрема, для керування профілем температурного поля у термоелектричному перетворювачі з керованим профілем температурного поля. Як видно з (1.41) обчислювальні ресурси простих 8-ми бітних мікроконтролерів є значно недостатні для керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП з використанням відомих методів керування багато-зонними об'єктами. Таким чином виникає суперечність між доцільним та економічно вигідним апаратним забезпеченням вимірювального каналу на базі ТЕП з КПТП (сумісний з I8051 мікроконтролер, що входить у мікроконвертор ADuC-834) і необхідними для реалізації алгоритму керування таким багато-зонним об'єктом обчислювальними ресурсами.

У [31, 44] для керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП було запропоновано спрощений метод, що базується на рішенні системи лінійних рівнянь. Обчислювальна складність цього методу значно, майже на два порядки, менша за обчислювальну складність методу, який базувався би на системі рівнянь виду (1.41). Особливо виразно відзначається мала обчислювальна складність запропонованого у [31, 44] методу керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП при рішенні згаданої системи лінійних рівнянь методом Гауса. При використанні методу Гауса для рішенні

згаданої системи лінійних рівнянь необхідний обсяг пам'яті визначається потрібним обсягом пам'яті коефіцієнтів та операндів самої системи лінійних рівнянь. Для запропонованого у [31, 44] рішення додатково до обсягу пам'яті коефіцієнтів та операндів потрібно лише декілька комірок оперативної пам'яті.

Однак необхідно зауважити, що в основу запропонованого у [31, 44] методу керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП було покладено емпірично сформовані правила, які суперечать законам термодинаміки [45]. Саме тому отримана система рівнянь є лінійною. У [31, 44] показано та підтверджено, що, при невеликих збуреннях профілю температурного поля, ці збурення можна успішно ліквідувати за декілька послідовних циклів керування профілем температурного поля навіть у випадку не дуже точного формування керуючої дії у кожному послідовному циклі керування.

Однак зрозуміло, що для обґрунтування можливості використання запропонованого у [31, 44] ітераційного методу керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП, метод треба детально дослідити. При цьому необхідно доказати, що, по-перше, процес керування профілем температурного поля за допомогою цього методу є збіжним. Тобто при різних комбінаціях відхилення дійсного профілю температурного поля ТЕП з КПТП від заданого сформовані шляхом рішення системи лінійних рівнянь (тобто при застосуванні методу керування профілем температурного поля, запропонованого у [31, 44]) керуючі впливи будуть безумовно вести до зменшення цього відхилення у всіх зонах керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП.

Наступним кроком у дослідженні запропонованого у [31, 44] методу керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП є визначення параметрів збіжності цього методу керування. Зокрема, дуже важливою є хоча би приблизна оцінка кількості ітерацій, необхідної для досягнення заданого профілю температурного поля, а також оцінка залежності цієї

кількості ітерацій, необхідної для досягнення заданого профілю температурного поля, від параметрів збурення. Зокрема, залежності кількості ітерацій, необхідної для повернення заданого профілю температурного поля ТЕП з КПТП, від амплітуди збурень.

Відповідно до [46], подібні дослідження можуть проводитися теоретично, експериментально та шляхом імітаційного моделювання. Теоретичні дослідження є найбільш повним видом досліджень, але вони базуються на математичних моделях фізичних об'єктів. Створення таких математичних моделей є доволі трудомісткою нетривіальною задачею. Крім того, існує значний ризик того, що розроблені математичні моделі будуть не повністю адекватними до фізичних об'єктів. Це знижує надійність теоретичних досліджень та довіру до отриманих результатів. Таким чином, використання теоретичних досліджень для вирішення поставлених задач не можна вважати оптимальним шляхом.

Найвищу достовірність забезпечують експериментальні дослідження. Однак такі дослідження мають найвищу трудомісткість. Крім того, експериментальні дослідження обмежені наявним експериментальним обладнанням. Через технологічні обмеження далеко не завжди можна фізично виготовити обладнання, яке дасть змогу забезпечити можливість дослідження всіх варіантів можливих комбінацій, які можуть виникнути на практиці. А необхідність виготовлення різних варіантів технологічного обладнання для дослідження всіх можливих аспектів поведінки досліджуваного методу або дуже трудомістке, або взагалі неможлива через відсутність матеріалів із потрібними властивостями. Тому експериментальні дослідження всіх властивостей самого методу недоцільні.

Щодо поєднання трудомісткості, обсягу досліджень, гнучкості та достовірності найкращими є методи моделювання. Мала трудомісткість цих методів забезпечується відносно малою трудомісткістю побудови математичних моделей окремих елементів методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь у багато-зонній печі,



яка є основним елементом ТЕП з КПТП. При цьому можливий великий обсяг досліджень цього методу через можливість майже довільного задання властивостей та параметрів тих елементів, які моделюють досліджувані процеси. Таким чином забезпечується також гнучкість досліджень – можна вивчити особливості поведінки методу для умов, які не вдається отримати на практиці.

Достатньо висока достовірність досліджень забезпечується відносною простотою моделей окремих елементів, які входять у досліджувану систему керування профілем температурного поля. Адекватність таких моделей практично завжди можна відносно легко перевірити. А можливість вивчити особливості поведінки методу для умов, які не вдається отримати на практиці, забезпечує змогу визначити граничні можливості досліджуваного методу.

Розглянуті вище особливості різних методів дослідження дає змогу вибрати оптимальне рішення – метод імітаційного моделювання, а також сформулювати мету даної дипломної роботи магістра та необхідні задачі дослідження.

Метою даної дипломної роботи магістра є дослідження реакції на збурення профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, призначеній для реалізації термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, при керуванні профілем температурного поля ітераційним методом на базі системи лінійних рівнянь.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- 1) Провести аналіз конструктивних особливостей термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля та аналіз його похибок.
- 2) Виділити не достатньо досліджені похибки термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля.

- 3) Провести огляд відомих методів керування профілем температурного поля багато-зонних об'єктів та їх придатність для реалізації за допомогою простих і дешевих восьми-бітних мікроконтролерів.
- 4) Визначити напрями подальших досліджень у даній дипломній роботі магістра.
- 5) Провести аналіз ітераційного методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.
- 6) Розробити математичну модель багато-зонної трубчастої печі, придатної для дослідження ітераційних методів керування профілем температурного поля термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля.
- 7) Розробити методику дослідження методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.
- 8) Розробити алгоритми дослідження збіжності методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.
- 9) Розробити алгоритми дослідження впливу амплітуди збурень на кількість ітерацій для методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.

Таким чином, в даному параграфі, на основі аналізу відомих методів керування профілем температурного поля розроблено напрями подальших досліджень процесу регулювання температури у багато-зонній печі на базі системи лінійних рівнянь, а також сформульовано мету та задачі цих досліджень.

#### Висновки до першого розділу

- 1) На основі аналізу загальних методів боротьби з дією впливаючих величин на результат вимірювання та аналізу структури термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля проведено аналіз

складових похибок його вимірювального каналу і зроблено висновок про те, що деякі складові, зокрема, метод керування профілем температурного поля, вимагають додаткового дослідження.

2) Аналіз відомих традиційних методів керування профілем температурного поля показав, що, при використанні для стабілізації профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, вони мають високу обчислювальну складність і не можуть бути реалізовані простими і дешевими мікроконтролерами.

3) Розроблено напрями подальших досліджень процесу регулювання температури у багато-зонній печі, а також сформульовано мету та задачі цих досліджень.

## 2 ПІДГОТОВЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

### 2.1 Ітераційний метод керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь

Конструктивна схема нагрівників трубчатої печі для ТЕП з КПТП представлена на рисунку 1.4 [27]. На чохлах ТЕП намотані секції нагрівників зон  $H_{1...N...K}$ . В середині чохла розміщені електроди головної термопари ГТ, а також термопари підсистем регулювання температури окремих зон  $ТС_1...ТС_N...ТС_K$ . Останні ізольовані керамічними втулками (бусами). Робочі кінці цих термопар розміщені напроти центрів відповідних нагрівників зон  $H_{1...K}$ . Зверху нагрівники  $H_{1...K}$  закриті шаром теплоізоляції. Така конструкція трубчатої печі дає змогу утримати вздовж електродів головної термопари ГТ заданий профіль температурного поля, що перевищує (покриває) можливі зміни зовнішнього профілю температурного поля. Сам профіль задається відповідними уставками підсистем регулювання температури зон і утримується як під час експлуатації, так і під час метрологічної перевірки головної термопари ГТ. Таким чином, деградація електродів головної термопари ГТ, відповідно до висновків [27], може проявити себе виключно як часовий дрейф її функції перетворення і не може проявити себе як похибка термоелектричної неоднорідності.

Однак подана на рисунку 2.1 конструктивна схема створює проблеми при регулюванні температури окремих зон. З рисунка 1.4 видно, що кожен нагрівник  $H_{1...K}$  створює чотири теплові потоки [48]:

- Потік  $q_1$ , спрямований до центра чохла. У цьому випадку потік  $q_1$  є корисним, він створює заданий профіль температурного поля вздовж

електродів ГТ. Слід відзначити, що потік  $q_1$  є малим, через те, що температура по осі нагрітого циліндра прямує до заданої температури, отже різниця температур, яка спричиняє  $q_1$ , прямує до нуля;

- Потік  $q_3$ , протилежний до потоку  $q_1$ , спрямований назовні ТЕП з КПТП. Потік  $q_3$  визначає теплові втрати, тому його інтенсивність зменшена за допомогою теплоізоляції (див. рисунок 1.2);
- Потік  $q_2$ , спрямований до наступної зони нагрівника;
- Потік  $q_4$ , спрямований до попередньої зони нагрівника.

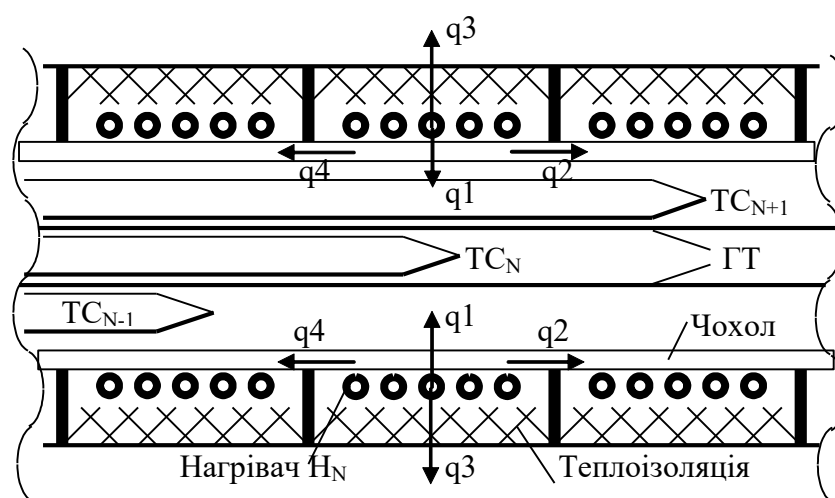


Рисунок 2.1 - Конструктивна схема нагрівників ТЕП з КПТП.

Саме наявність теплових потоків  $q_2$  і  $q_4$ , а також їх відносно висока інтенсивність (зумовлена тим, що вони ідуть вздовж металічного чохла ТЕП), створює хороший тепловий зв'язок між зонами, тобто взаємну залежність температур, створюваних окремими нагрівниками в сумі. Тому саме теплові потоки  $q_2$  та  $q_4$  створюють небезпеку автогенерації (втрати стійкості) для багатоканальних систем регулювання температури у складі ТЕП з КПТП, які мають утримувати заданий профіль температурного поля вздовж термоелектродів ГТ.

Теплові потоки  $q_1...q_4$  можуть бути розраховані за формулою [48]

$$q = \frac{\lambda \Delta T S_N}{L}, \quad (2.1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплоізоляції;  $\Delta T$  – різниця температур, яка викликає відповідний тепловий потік;  $S_N$  – площа поверхні, через яку передається відповідний тепловий потік;  $L$  – відстань між нагрівником і ділянкою, через яку проходить відповідний тепловий потік, що нас цікавить.

В загальному теплові процеси, що проходять в зонах нагрівників, можуть бути описані диференціальним рівнянням згідно закону охолодження Ньютона [48]

$$q dt = c V \rho dT + \alpha S (T - T_s) dt, \quad (2.2)$$

де  $q$  – тепловий потік, який викликає різниця температур;  $c$  – теплоємність матеріалу, через який теплопередача проходить;  $V$  – об'єм цього матеріалу;  $\rho$  – його густина цього матеріалу;  $S$  – відповідна площа тепловіддачі;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі.

Відповідно до [48], до теплових потоків можна використовувати принцип суперпозиції, тобто результуюча температура даної зони буде визначатися сумарним тепловим потоком, який створюють всі інші зони, незалежно одна від одної. У свою чергу, теплові потоки  $q_1 \dots q_4$ , що їх створює кожен нагрівник, в визначаються їх поточними потужностями. Тому, згідно [27, 48], потрібний для даного моменту часу керуючий вплив можна визначити шляхом рішення системи рівнянь виду (1.9). при цьому кожне з них описує процес теплопередачі в межах одного нагрівника, але з врахуванням теплових потоків усіх інших нагрівників. Однак тоді обчислювальні ресурси необхідні для постійного рішення у реальному часі

системи з 5...10 диференціальних рівнянь виду (1.9), дуже значно перевищують обчислювальні ресурси, що мають широко вживані та недорогі 8-ми бітні мікроконтролери [49]. Тому доцільно розробити спеціальний метод керування профілем температурного поля вздовж електродів головної термопари ГТ у складі ТЕП з КПТП. Цей метод не повинен мати невисоку обчислювальну складність та малі вимоги до обсягу потрібної для роботи пам'яті.

Щоби розробити бажаний метод керування необхідно розробити спрощену математичну модель теплових процесів у нагрівниках ТЕП з КПТП. Основою для потрібного спрощення може служити приблизна оцінка необхідної точності підтримування профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари ГТ. Як показано в [27], похибка підтримки профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари ГТ у приблизно  $5^{\circ}\text{C}$  викликає некомпенсовану (залишкову) похибку термоелектричної неоднорідності менше  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Таке значення похибки, при похибці вірцевого засобу, який використовується для метрологічної перевірки або калібрування головної термопари ГТ ( $0,5...1^{\circ}\text{C}$ ), є цілком прийнятним. Таким чином, допустима похибка встановлення заданого профілю температурного поля не повинна перевищувати  $5^{\circ}\text{C}$ . А це допускає використання відповідно спрощеної моделі.

Пропоноване у [27] спрощення моделі полягає у прийнятті наступних двох правил:

- 1) Залежність приростів температури зон від приростів потужності нагрівачів є лінійною та не залежить від температури;
- 2) При обчисленні приростів потужності сумують не теплові потоки, а безпосередньо температури.

Слід відзначити, що сформовані правила прямо суперечать законам термодинаміки (див., наприклад, [48]). Але при малих змінах температури

відхилення реальних теплових процесів від тих, які описуються за допомогою сформованих правил, також малі.

При цьому, якщо забезпечити ітераційний процес керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП, при якому потрібні зміни потужності нагрівників мають проходити одночасно у момент, коли закінчилися перехідні процеси зміни профілю температурного поля, які викликані попередньою зміною потужності нагрівників. Остання вимога означає, що часові інтервали між обчисленими змінами приростів потужності нагрівників повинні бути не меншими від потрібної постійної часу нагрівників.

Як показали експериментальні дослідження [27], ці правила можуть забезпечити визначення необхідних приростів (з відповідним знаком) потужності нагрівників для загального зменшення відхилень температури до допустимих значень для окремих секцій нагрівників.

Відповідно до сформульованих правил можна записати систему лінійних рівнянь, які визначають приріст температури кожної зони  $\Delta T_i$  як сумарну дію приростів потужності  $\Delta P_i$  окремих нагрівників

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_0 = k_{00} \times \Delta P_0 + k_{01} \times \Delta P_1 + \dots + k_{0(K-1)} \times \Delta P_{(K-1)} \\ \Delta T_1 = k_{10} \times \Delta P_0 + k_{11} \times \Delta P_1 + \dots + k_{1(K-1)} \times \Delta P_{(K-1)} \\ \dots \\ \Delta T_{K-1} = k_{(K-1)0} \times \Delta P_0 + k_{(K-1)1} \times \Delta P_1 + \dots + k_{(K-1)(K-1)} \times \Delta P_{(K-1)} \end{array} \right. , \quad (2.3)$$

Таким чином, згідно запропонованого у [27] методу, для встановлення заданого профілю температурного поля вздовж електродів ГТ, за результатами вимірювання температури окремих зон, обчислюємо необхідні для досягнення заданого профілю температурного поля прирости температури кожної зони  $\Delta T_i$ . Далі, за результатами рішення системи рівнянь (2.3), знаходимо необхідні прирости потужності  $\Delta P_i$  для окремих нагрівників. Ці зміни повинна реалізувати підсистема регулювання



температури відповідних зон. Очевидно, що через спрощені правила, за якими побудована математична модель (2.3), значення реальних потрібних приростів температури окремих зон не будуть співпадати з обчисленими за (2.3).

На відхилення отриманих за (2.3) приростів потужності від потрібних також діють похибки вимірювання температури кожної зони  $\Delta T_i$  та реалізації приростів потужності  $\Delta P_i$ , а також похибки визначення коефіцієнтів моделі  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  та неповної еквівалентності умов визначення коефіцієнтів моделі  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ . Тому запропонований у [27] метод керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП передбачає його циклічне ітераційне наближення до заданого профілю температурного поля.

Але, не дивлячись на меншу обчислювальну складність розв'язку систем лінійних алгебраїчних рівнянь порівняно з еквівалентною системою диференціальних рівнянь, вирішення такої задачі для простих 8-ми бітних мікроконтролерів є також складною задачею. Це пов'язане, перш за все, з обмеженими обчислювальними ресурсами та малою пам'яттю. Тому для розв'язку системи рівнянь виду (2.3) пропонується використати метод Гауса [50] у матричній формі. При його реалізації всі обчислення можна проводити безпосередньо над елементами матриць коефіцієнтів і векторів приростів температури та потужності. Тоді систему рівнянь (2.3) можна представити у вигляді

$$k \cdot \overline{\Delta P} = \overline{\Delta T} \quad , \quad (2.4)$$

де  $k$  – “квадратна” матриця коефіцієнтів математичної моделі (2.3);  $\overline{\Delta P}$  – вектор приростів потужності окремих нагрівачів зон;  $\overline{\Delta T}$  – вектор приростів температур зон.

Тоді метод Гауса зводиться до двохходового алгоритму, при виконанні якого виконують:

- 1) На прямому ході, шляхом елементарних перетворень рядків, тобто додавань одного рядка до іншого, помноженого на відповідний коефіцієнт приведення рядків до однакових коефіцієнтів при одному (першому) члені матриці, а також відповідних перестановок рядків, матриця (2.4) приводиться до верхньо-трикутного вигляду [50];
- 2) На зворотному ході, починаючи з останнього рівняння перетвореної відповідно до п. 1 матриці (2.4), послідовно визначають елемент вектора невідомих, а потім підставляють його у попередні рівняння верхньо-трикутної матриці (2.4).

При виконанні прямого ходу рішення ключовими є дві операції:

- 1) множення всіх елементів матриці коефіцієнтів (2.4) та одного елементу вектора результату на константу таким чином, щоби при відніманні двох рядків матриці (2.4) результат у визначених позиціях був нульовим;
- 2) власне віднімання.

При виконанні першого етапу першої операції алгоритму (множення елементів матриці коефіцієнтів і вектора приростів потужності) обчислення необхідно виконувати згідно формул

$$\begin{aligned}
 k_{jl} &= \frac{k_{jl}}{k_{ji}}, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i, K-1}, l = \overline{i, K-1} \\
 \Delta T_j &= \frac{\Delta T_j}{k_{ji}}, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i, K-1}
 \end{aligned} \quad . \quad (2.5)$$

При виконанні другого етапу першої операції (віднімання рядків матриці) обчислення необхідно виконувати згідно формул

$$\begin{aligned}
 k_{jl} &= k_{il} - k_{jl}, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i+1, K-1}, l = \overline{i, K-1} \\
 \Delta T_j &= \Delta T_i - \Delta T_j, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i, K-1}
 \end{aligned} \quad . \quad (2.6)$$

При виконанні (2.5) і (2.6) отримаємо матрицю  $k_{00\dots k_{(K-1)(K-1)}}$  коефіцієнтів з нульовими коефіцієнтами  $k_{ij} = 0, i = \overline{1, K-1}, j = \overline{0, i-1}$ .

Для знаходження вектора приростів потужностей  $\Delta P_i$  треба виконати наступні обчислення

$$\begin{aligned} \Delta T_i &= \Delta T_i - \Delta P_i \times k_{ji}, i = \overline{K-1, 0}, j = \overline{0, i-1} \\ \Delta P_i &= \frac{\Delta T_i}{k_{ii}}, i = \overline{K-1, 0} \end{aligned} \quad (2.7)$$

В результаті елементи вектора  $\overline{\Delta P}$  є приростами потужності, які треба подати на нагрівники.

При такій реалізації методу Гауса всі результати обчислень зберігаються безпосередньо в елементах масивів і векторів. Необхідно задіяти лише три змінні для індексації елементів масивів. Це дає змогу реалізувати метод з допомогою простих обчислювальних засобів, які мають мінімальні ресурси, зокрема, з використанням дешевих 8-ми бітних мікроконтролерів.

Треба відзначити, що визначення коефіцієнтів моделі  $k_{00\dots k_{(K-1)(K-1)}}$ , які входять в систему (2.3), шляхом експериментальних досліджень є теж трудомісткою і непростою задачею, яка вимагає раціонального підходу. У загальному ці коефіцієнти можна визначити шляхом вимірювання змін температури кожної зони  $\Delta T_i$  під дією поданих на неї відомих приростів потужності  $\Delta P_i$ . Але така методика вимагає складення системи  $K \times K$  рівнянь (відповідно до кількості невідомих коефіцієнтів математичної моделі (2.3)), а потім рішення цієї системи. Хоча рішення системи рівнянь виду (2.3), з використанням персонального комп'ютера та спеціалізованих програмних засобів (наприклад, MATLAB), принципових труднощів не викликає, воно вимагає проведення  $K \times K$  експериментів, що є практично

неприйнятним. Раціональний підхід [27] у цьому випадку полягає у експериментальному знаходженні зміни температури  $\Delta T_i$  кожної зони під час окремої дії відомих приростів потужності  $\Delta P_i$  кожної зони (у цей час потужність інших зон повинна бути рівною нулю). У такому випадку, для кожного з  $K$  необхідних експериментів, система рівнянь (2.3) перетворюється (вироджується) в систему  $K$  рівнянь виду

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_1 = k_{1i} \times \Delta P_i \\ \Delta T_2 = k_{2i} \times \Delta P_i \\ \dots \\ \Delta T_{K-1} = k_{(K-1)i} \times \Delta P_i \\ \Delta T_K = k_{Ki} \times \Delta P_i \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Таким чином, на основі всього  $K$  експериментів можна записати  $K \times K$  фактично незалежних елементарних рівнянь виду

$$k_{ij} = \frac{\Delta T_j}{\Delta P_i}, \quad (2.9)$$

Рівняння (2.9) дають змогу визначити окремо всі коефіцієнти  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  безпосередньо з кожного рівняння. Таким чином, для знаходження всіх коефіцієнтів  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  математичної моделі (2.3) необхідно і достатньо провести всього  $K$  експериментів, що можна вважати більш прийнятним.

У такому випадку методика експериментальних досліджень полягає у наступному:

- 1) Виключенні нагріву нагрівників всіх зон;

- 2) Вимірюванні значень температури зон до закінчення перехідного процесу їх охолодження з на практиці достатньою точністю (достатньою є швидкість зміни температури не більше  $0,2 \dots 0,5^\circ\text{C}$  за годину);
- 3) Встановленні максимальної потужності одного з нагрівників при виключених всіх інших нагрівниках (це робиться для отримання максимальної зміни температури всіх зон і мінімізації впливу адитивної складової похибки системи вимірювання температури всіх зон);
- 4) Вимірюванні значень температури до закінчення перехідного процесу нагріву або охолодження всіх зон з достатньою точністю (на практиці достатньою малою є швидкість зміни температури не більше  $0,2 \dots 0,5^\circ\text{C}$  за годину);
- 5) Знаходженні зміни температури кожної зони  $\Delta T_i$  під дією даного нагрівника (як різниці результатів вимірювання по п. 4 і п. 2 для даної зони);
- 6) Повторенні операцій пп. 1...5 окремо для всіх інших нагрівників. Слід пам'ятати, що значні похибки визначення коефіцієнтів  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  виникають при їх надто швидкому визначенні (при надто швидкому переході до вимірювання змін температури  $\Delta T_i$  від наступного нагрівника, без повного завершення змін температури від попереднього нагрівника (повного охолодження всіх зон);
- 7) Складанні системи із  $K^2$  рівнянь виду (2.3) та її рішення. При цьому як значення  $\Delta P_i$  не мусять обов'язково виступати саме потужності кожної зони. Можлива також підстановка деякого параметра, яким характеризується керуючий вплив на профіль температурного поля. Наприклад, якщо для керування потужностями зон використовують широтно-імпульсний модулятор, замість  $\Delta P_i$  може виступати її відносне значення. Це значення, яке характеризує зміни шпарності вихідних імпульсів широтно-імпульсного модулятора, безпосередньо заноситься у відповідний канал широтно-імпульсного модулятора.

Слід відзначити, що різниці у проходженні процесу теплопередачі в сторону робочого кінця головної терморпарі ГТ і в сторону її вільних кінців приведуть до того, що коефіцієнти  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  при експериментальному дослідженні окремих зон будуть несиметричні відносно нагрівника даної зони. Приклад розподілу температури для макетного взірця ТЕП з КПТП [27] представлено на рисунку 1.5. На цьому рисунку вказано відносно до максимального нагріву значення ввімкненої зони значення.

Додаткову перевірку правильності проведення експерименту при визначенні коефіцієнтів  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  можна провести на основі формули (2.2) – при фіксованих (для кожного конкретного взірця ТЕП з КПТП) значеннях  $\lambda$ ,  $\Delta T$  і  $S_N$  відносна зміна температури в межах середніх зон буде пропорційна  $1/L$  (тобто обернено пропорційна відносній відстані зони, яку ми аналізуємо, від зони, нагрівник якої ввімкнений). Цю залежність досить добре ілюструють подані на рисунку 2.2 результати експериментальних досліджень макету ТЕП з КПТП – розподіл температур зон відносно центральної приблизно відповідає гіперболічному закону.

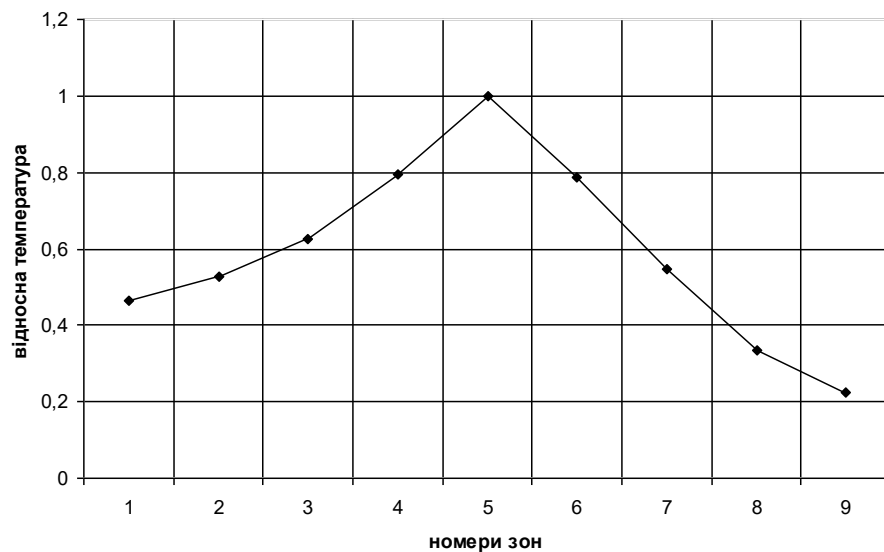


Рисунок 2.2 - Розподіл температури відносно до максимального нагріву центральної п'ятої зони.

Сам алгоритм керування профілем температурного поля на базі пропонованого методу подано на рисунку 2.3. У процесі його виконання обчислений керуючий вплив (потужність для кожної зони, визначена згідно результатів рішення системи рівнянь (2.3)) реалізується виконавчими пристроями кожної зони (широотно-імпульсними модуляторами). Очевидно, що похибки визначення коефіцієнтів  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  та інші похибки системи керування профілем температурного поля не дають змогу одразу отримати потрібні температури кожної зони. Тому через деякий час (не менше потрібної постійної часу перехідного процесу нагрівників), на основі результатів нових вимірювань поточної температури зон, повинен бути сформований новий, уточнений, керуючий вплив, який краще наблизить температури всіх зон до заданих значень. Через те, що відхилення температур у зонах в наступних циклах керування будуть меншими, то вплив похибки визначення коефіцієнтів  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  та інших похибок системи керування профілем температурного поля на наближення температури зон до заданої буде спадати.

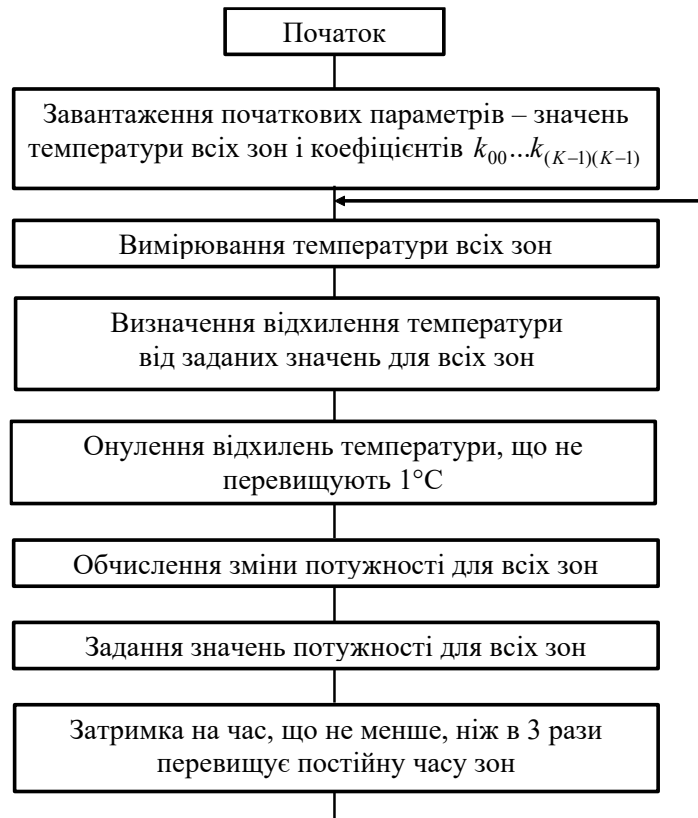


Рисунок 2.3 – Узагальнений алгоритм керування профілем температурного поля шляхом рішення системи лінійних рівнянь

Як було відзначено, системи керування профілем температурного поля мають схильність до самозбудження (автогенерації) через тепловий зв'язок між зонами нагріву та інерційність теплових процесів. Саме тому сформовані у наступних ітераційних циклах регулювання керуючі впливи, для уникнення збудження систем регулювання, повинні залишатися незмінними протягом проміжку часу, що суттєво, не менше, ніж у три рази, перевищує тривалість (постійну часу) перехідного процесу встановлення температури у зонах ТЕП з КПТП. Значення постійної часу перехідного процесу нагріву/охолодження зон можна знайти під час експериментального визначення коефіцієнтів  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ .

Слід відзначити, що причиною автогенерації невеликої амплітуди (систематичного коливання температур окремих зон відносно середнього



значення з періодом декілька годин) може бути похибка визначення коефіцієнтів  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ . Якщо обчислені згідно (2.5)...(2.9) зміни потужності зон  $\Delta P_i$  будуть відчутно вищими від необхідних для досягнення заданої температури зони, то в кожному циклі керування температура буде “проскакувати” задане значення, що приведе до коливань температури. Для уникнення цього явища пропонується при обчисленні значень змін потужності згідно (2.3) штучно зменшити ці зміни на 3%. Крім того, для уникнення “розхитування” системи регулювання через дію на результат вимірювання випадкової похибки, яка зумовлена шумом вимірювального каналу та дією залишкових завад нормального і загального виду, доцільно ввести в канал керування гістерезис. Для цього недоцільно змінювати потужність нагрівників при малих відхиленнях температур зон від заданих – згідно [27] відхилення, що не перевищують 1°C, викликають такі малі некомпенсований залишок похибки неоднорідності, що ними можна нехтувати.

У даному параграфі проведено аналіз методу керування багато-зонними термічними об’єктами, що має малу обчислювальну складність і може бути використаний для керування профілем температурного поля ТЕП з КППП. Необхідно відзначити, що аналізований метод керування профілем температурного поля належить до евристичних методів, які не можуть бути з достатньою повнотою теоретично обґрунтовані та досліджені. Тому необхідні його додаткові дослідження для підтвердження того, що похибка керування достатньо мала.

## 2.2 Концепція математичної моделі багато-зонної трубчатої печі, придатної для дослідження методів керування профілем температурного поля

Для дослідження властивостей методу керування профілем температурного поля у трубчатій печі, яка входить до складу ТЕП з КПТП, немає необхідності створення математичної моделі, яка точно моделює деяку конкретну трубчатую піч. Цілком достатньо приблизно змоделювати деяку гіпотетичну піч, яка реагує на керуючі впливи приблизно аналогічно до реальної трубчатої печі. Тому, згідно такої концепції, основою для побудови математичної моделі трубчатої печі можуть служити отримані у [27] результати експериментальних досліджень ТЕП з КПТП, які приведені на рисунку 2.2.

Можна припустити, що розподіл температури у нагрівачах математичної моделі трубчатої печі відбувається, як і більшість теплових розподілів по експоненті [48]. У такому випадку розподіл температури відносно до зони максимального нагріву при визначенні коефіцієнтів  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ , як це було показано у параграфі 2.1, можна описати рівнянням

$$T_{Zi}^{ID} = T_{MAX}^{ID} - T_{EXP}^{ID}, \quad (2.10)$$

де  $T_{Zi}^{ID}$  – обчислена ідеальна (без врахування похибки) температура  $i$  – тої зони;

$T_{MAX}^{ID}$  – максимальна температура, яку може забезпечити нагрівач  $i$  – тої зони;

$T_{EXP}^{ID}$  – експоненціальне зниження температури сусідніх зон.

У свою чергу експоненціальне зниження температури сусідніх зон  $T_{EXP}^{ID}$  буде мати вид, поданий на рисунку 2.4. На цьому рисунку враховано, що  $T_{EXP}^{ID}$  віднімається від  $T_{MAX}^{ID}$ , тобто  $T_{EXP}^{ID}$  повернуто відносно графіка, поданого на рисунку 1.5.  $T_{EXP}^{ID}$  може бути обчислене як [48]

$$T_{EXPi}^{ID} = Ae^{BL_i}, \quad (2.11)$$

де  $A$ ,  $B$  – параметри експоненти.

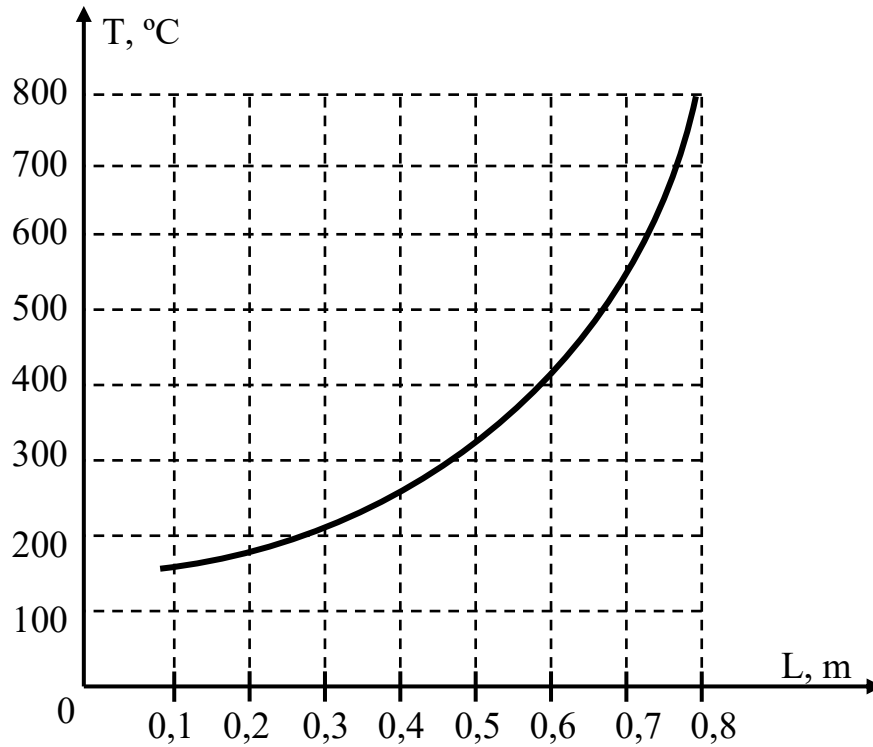


Рисунок 2.4 - Експоненціальне зниження температури сусідніх зон при реалізації (2.10)

Для розрахунку  $A$  і  $B$  логарифмуємо (2.11)

$$\ln(T_{EXPi}^{ID}) = \ln(A) + BL_i, \quad (2.12)$$

Тепер запишемо систему двох рівнянь з невідомими  $A$  і  $B$

$$\begin{cases} \ln(T_{EXP2}^{ID}) = \ln(A) + BL_2 \\ \ln(T_{EXP1}^{ID}) = \ln(A) + BL_1 \end{cases}, \quad (2.13)$$

де  $L1$  і  $L2$  – координати відстані від початку печі;

$T_{EXP1}^{ID}$  і  $T_{EXP2}^{ID}$  – відповідні цим координатам температури у печі.

При цьому ані координати відстані від початку печі  $L1$  і  $L2$ , ані відповідні цим координатам температури у печі  $T_{EXP1}^{ID}$  і  $T_{EXP2}^{ID}$  не можуть бути рівними нулю.

Відповідно до викладеної концепції для проведення дослідження методу керування профілем температурного поля необхідно розробити конкретну математичну модель трубчатої печі, яка дасть змогу провести такі дослідження. Основою для конкретизації можуть служити дані експериментальних досліджень макету ТЕП з КПТП, проведених у [27].

Відповідно до [27], отримані експериментальні дані задають значення  $L1 = 0,3$  метра,  $L2 = 0,9$  метра, при цьому  $T_{EXP1}^{ID} = 200^{\circ}C$ ,  $T_{EXP2}^{ID} = 800^{\circ}C$ . Внаслідок рішення системи рівнянь (2.13) отримуємо значення  $A = 100$  і  $B = 2,079442$ .

Далі розраховуємо криву (експоненту), яка відображає профіль температурного поля, яку створює крайній нагрівач для того, щоби отримати найповніше представлення про характер температурного поля у трубчатій печі. Графік такого температурного поля, розрахованого у Excel за (2.11), подано на рисунку 2.5.

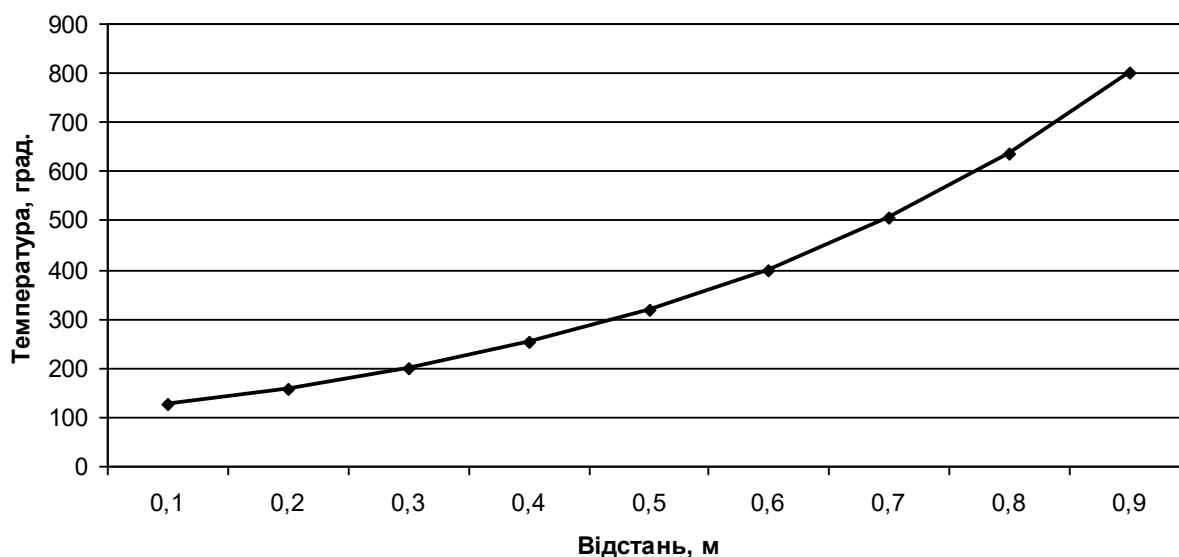


Рисунок 2.5 - Графік такого температурного поля у трубчатій печі при нагріві одним крайнім нагрівачем

Слід відзначити, що макет ТЕП з КПТП, досліджений у [27], створювався, щонайперше, для перевірки можливості реалізації ТЕП з КПТП, тому він мав надлишкову потужність нагрівачів. Для реальної трубчатої печі така потужність не потрібна. Оцінити можливі параметри більш економного та наближеного до реальних умов варіанту можна за сформованими вище правилами. Хоча ці правила не відображають дійсні температури у печі, але їх розподіл для всіх нагрівачів буде мати однакові спотворення. Тому для побудови математичної моделі, у якій нагрівачі не потребують надлишкової потужності, знайдемо сумарну температуру у центральній зоні печі (для прийнятих  $L1$  і  $L2$  це буде п'ята зона). Для цього за допомогою Excel, відповідно до (2.11) розрахуємо температури у всіх зонах печі. Результати цих розрахунків подано у таблиці 2.1. Сумарна температура всіх зон подана у таблиці 2.2. Як видно з таблиці 2.2, сумарна температура у печі при дії всіх нагрівачів завищена.

Таблиця 2.1 – Температури, які створюють нагрівники від 1 до 9, у всіх зонах трубчатої печі до зменшення потужності нагрівачів

Координата L	Нагрівник 1	Нагрівник 2	Нагрівник 3	Нагрівник 4	Нагрівник 5	Нагрівник 6	Нагрівник 7	Нагрівник 8	Нагрівник 9
0,1	126,0	158,7	200,0	252,0	317,5	400,0	504,0	635,0	800,0
0,2	158,7	200,0	252,0	317,5	400,0	504,0	635,0	800,0	635,0
0,3	200,0	252,0	317,5	400,0	504,0	635,0	800,0	635,0	504,0
0,4	252,0	317,5	400,0	504,0	635,0	800,0	635,0	504,0	400,0
0,5	317,5	400,0	504,0	635,0	800,0	635,0	504,0	400,0	317,5
0,6	400,0	504,0	635,0	800,0	635,0	504,0	400,0	317,5	252,0
0,7	504,0	635,0	800,0	635,0	504,0	400,0	317,5	252,0	200,0
0,8	635,0	800,0	635,0	504,0	400,0	317,5	252,0	200,0	158,7
0,9	800,0	635,0	504,0	400,0	317,5	252,0	200,0	158,7	126,0

Таблиця 2.2 – Сумарна температура всіх зон

Координата L	Сумарна температура
0,1	3393,125
0,2	3902,094
0,3	4247,322
0,4	4447,322
0,5	4512,818
0,6	4447,322
0,7	4247,322
0,8	3902,094
0,9	3393,125

Відповідний розподіл температури у трубчатій печі при дії кожного нагрівача зокрема подано на рисунку 2.6.

Як видно з таблиці 2.2, сумарна температура всіх зон значно надлишкова. Тому зменшуємо її приблизно у 4,5 разів за рахунок того, що приймаємо  $A = 22$ . У такому випадку максимальна сумарна температура у зоні 0,5 буде приблизно  $1000^{\circ}\text{C}$ , що повністю перекриє приблизний характер прийнятих раніше правил. Сумарна температура всіх зон при максимальній дії всіх нагрівачів, обчислена відповідно до визначених раніше правил подана на рисунку 2.7.

У даному параграфі розроблено концепцію побудови математичної моделі багато-зонної трубчатої печі, придатної для дослідження методів керування профілем температурного поля, та визначено розподіли температури, викликані дією нагрівачів печі.

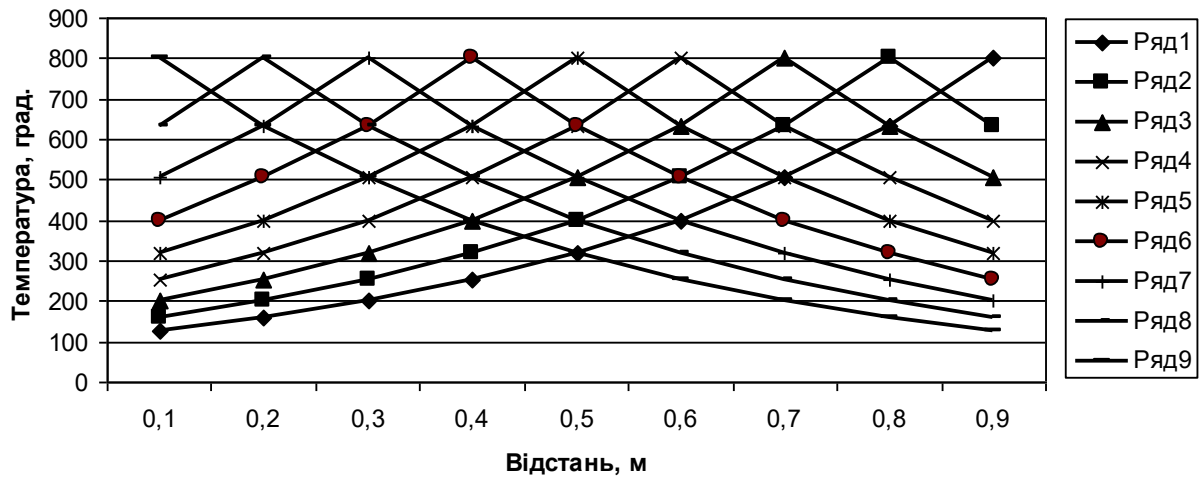


Рисунок 2.6 - Розподіл температури по зонах для всіх нагрівачів

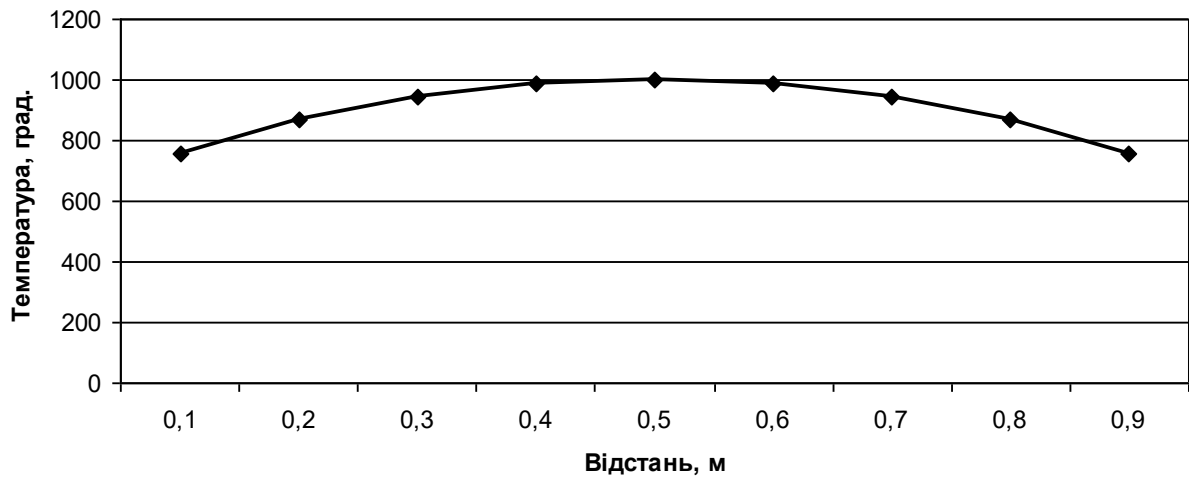


Рисунок 2.7 – Сумарна температура всіх зон при максимальній дії всіх нагрівачів

### 2.3 Розроблення математичної моделі трубчатої печі

Для розроблення математичної моделі трубчатої печі відповідно до сформульованої у попереднім параграфі концепції необхідно визначити всі коефіцієнти  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ , які входять у систему лінійних рівнянь (2.3). Коефіцієнти  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  можна визначити за розподілом температури по зонах для всіх нагрівачів для зменшеної, як це вказано у попередньому параграфі, потужності нагрівачів зон. Відповідний розподіл приведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Температури, які створюють нагрівники від 1 до 9, у всіх зонах трубчатої печі після зменшення потужності нагрівачів

Коорди- ната L	Нагрів- ник 1	Нагрів- ник 2	Нагрів- ник 3	Нагрів- ник 4	Нагрів- ник 5	Нагрів- ник 6	Нагрів- ник 7	Нагрів- ник 8	Нагрів- ник 9
0,1	28,0	35,3	44,4	56,0	70,6	88,9	112,0	141,1	177,8
0,2	35,3	44,4	56,0	70,6	88,9	112,0	141,1	177,8	141,1
0,3	44,4	56,0	70,6	88,9	112,0	141,1	177,8	141,1	112,0
0,4	56,0	70,6	88,9	112,0	141,1	177,8	141,1	112,0	88,9
0,5	70,6	88,9	112,0	141,1	177,8	141,1	112,0	88,9	70,6
0,6	88,9	112,0	141,1	177,8	141,1	112,0	88,9	70,6	56,0
0,7	112,0	141,1	177,8	141,1	112,0	88,9	70,6	56,0	44,4
0,8	141,1	177,8	141,1	112,0	88,9	70,6	56,0	44,4	35,3
0,9	177,8	141,1	112,0	88,9	70,6	56,0	44,4	35,3	28,0

Для визначення коефіцієнтів  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  необхідно рішення системи рівнянь 2.8, у якій елементи  $\Delta T_i$  беруть із таблиці 2.3, приріст потужності  $\Delta P_i$  кожного нагрівача відповідає максимальному значенню, а невідомими є коефіцієнти  $k_{1i} \dots k_{Ki}$ . При цьому, для проведення досліджень властивостей методу керування профілем температурного поля, приріст потужності  $\Delta P_i$  кожного нагрівача не мусить бути виражений у абсолютних одиницях (у Вт). Цілком адекватним буде вираження приростів потужності  $\Delta P_i$  нагрівачів у відносних одиницях, наприклад у відсотках від максимальної потужності кожного нагрівача. Для спрощення можна прийняти, що максимальна потужність кожного нагрівача однакова та рівна 100%. Прийняті вище допущення не можуть вплинути на збіжність процесу керування профілем



температурного поля або на необхідну кількість ітерацій при ліквідації збурення.

При формуванні системи рівнянь (2.8) приймемо, що індекс  $i$  у рівняннях (2.8) пов'язаний з координатою  $L$  (див. таблицю 2.3) співвідношенням

$$i = 10 \cdot L, \quad (2.14)$$

а індекс  $K$  пов'язаний з індексом  $i$  співвідношенням

$$K = i_{MAX}. \quad (2.15)$$

Рішення системи рівнянь (2.8) було проведено за допомогою табличного процесора Excel. Значення отриманих коефіцієнтів  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  подані у таблиці 2.4. Ці значення коефіцієнтів дали змогу побудувати математичну модель виду (2.3), яка використовує знайдені коефіцієнти  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ . Вона визначена для всіх зон всіх нагрівачів. Тому така модель придатна для дослідження методів керування профілем температурного поля. За її допомогою можна дослідити збіжність методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь при різних видах збурень (відхилень поточного профілю температурного поля від заданого профілю), а також дослідити вплив амплітуди збурень на кількість ітерацій, необхідних для відновлення заданого профілю температурного поля із заданою точністю.

У даному параграфі розроблено математичну модель трубчатої печі, яка дає змогу дослідити збіжність методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь та визначити кількість

ітерацій, необхідних для відновлення заданого профілю температурного поля із заданою точністю.

### Висновки до другого розділу

- 1) Проведений аналіз методу керування багато-зонними термічними об'єктами на базі рішення системи лінійних рівнянь показав, що він має малу обчислювальну складність і може бути використаний для керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП.
- 2) Цей метод належить до евристичних методів, які не можуть бути з достатньою повнотою теоретично обґрунтовані та досліджені. Тому необхідні його додаткові дослідження для підтвердження того, що похибка керування достатньо мала.
- 3) Для проведення такого аналізу розроблено концепцію побудови математичної моделі багато-зонної трубчатої печі, яка придатна для дослідження методів керування профілем температурного поля.
- 4) За результатами експериментальних досліджень макета ТЕП з КПТП встановлено розподіли температури, викликані дією нагрівачів трубчатої печі, що дало змогу, на основі розробленої концепції, побудувати математичну модель цієї трубчатої печі.
- 5) Побудована математична модель трубчатої печі дає змогу дослідити збіжність методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь та визначити кількість ітерацій, необхідних для відновлення заданого профілю температурного поля із заданою точністю.

### 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА БАЗІ СИСТЕМИ ЛІНІЙНИХ РІВНЯНЬ

#### 3.1 Методика проведення досліджень методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь

Для проведення досліджень методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь необхідно розробити відповідну методику. Ця методика повинна, згідно завдання, забезпечити дослідження збіжності методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь та визначення кількості ітерацій, необхідних для відновлення заданого профілю температурного поля у ТЕП з КПТП із заданою точністю.

Як уже було вказано у параграфі 1.3, дослідження методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь доцільно провести методом імітаційного моделювання [47]. Саме для цього у параграфі 2.3 була розроблена математична модель трубчатої печі, яка формує і стабілізує заданий профіль температурного поля ТЕП з КПТП.

У загальному методика експериментальних досліджень методом імітаційного моделювання полягає у проведенні обчислювального експерименту, під час якого відповідні математичні моделі взаємодіють між собою аналогічно до фізичних об'єктів. При цьому такий обчислювальний експеримент має значно меншу трудомісткість та вимагає значно менше часу на його проведення.

Таким чином, узагальнена методика експериментальних досліджень повинна імітувати процес експлуатації ТЕП з КПТП щодо підтримки заданим і стабільним профілю температурного поля вздовж електродів головної

термопарі ТЕП з КПТП. Ця імітація буде полягати у заданні деякого профілю температурного поля у математичній моделі трубчатої печі, внесенні у цей профіль температурного поля деяких збурень та їх ліквідацію за допомогою досліджуваного методу. Процес ліквідації повинен полягати у тому, що за допомогою досліджуваного методу будуть сформовані керуючі дії (отримані відповідно до математичної моделі трубчатої печі (2.3) зміни потужності нагрівачів її зон). Далі необхідно буде спостерігати за зміною профілю температурного поля трубчатої печі, яка викликана керуючими діями та робити відповідні висновки. При цьому необхідно провести дослідження для різних варіантів параметрів трубчатих печей і різних видів та амплітуд збурення.

Відповідно до викладеного була розроблена наступна методика проведення імітаційних випробувань методу керування багато-зонними термічними об'єктами на базі рішення системи лінійних рівнянь. Необхідною умовою для застосування цієї методики є попередня побудова математичної моделі багато-зонної трубчатої печі проведена відповідно до викладеної у попередньому розділі методики.

Розроблена методика проведення імітаційного дослідження методу керування багато-зонними термічними об'єктами на базі рішення системи лінійних рівнянь вимагає виконання наступних операцій:

- 1) Задати початковий профіль температурного поля у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі. Для цього у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі (2.3) слід замість приростів потужності  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$  у всіх зонах задати початкові значення потужності нагрівачів зон  $P_0 \dots P_{K-1}$ . Доцільно підібрати такі значення потужності  $P_0 \dots P_{K-1}$ , щоби профіль температурного поля був близьким до показаного на рисунку 1.1. Цей початковий профіль температурного поля треба запам'ятати для подальшого використання.

- 2) Задати початкові збурення профілю температурного поля у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі. Для цього у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі (2.3) задати прирости потужності  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$  у всіх зонах. Доцільно підібрати такі значення приростів потужності  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$ , які б змінювали початковий профіль температурного поля не більше ніж на  $5 \dots 10^\circ\text{C}$ .
- 3) Визначити поточну температуру у всіх зонах багато-зонної трубчатої печі. У реальній системі вимірювання температури цей пункт відповідає процедурі вимірювання температури всіх зон відповідними вимірювальними каналами. При імітаційному моделюванні цей пункт відповідає зверненню за відповідними адресами та сумуванні отриманих при виконанні п. 1 температур, що формують початковий профіль температурного поля у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі, та отриманих при виконанні п. 2 температур, що формують початкові збурення профілю температурного поля у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі.
- 4) Визначити відхилення поточного профілю температурного поля у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі від заданого профілю температурного поля (адже початковий профіль температурного поля у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі може не співпадати із заданим). Для цього необхідно визначити різницю температур між отриманими при виконанні п. 3 поточними температурами зон у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі та температурами цих зон, які формують заданий профіль температурного поля. Цим відхиленням поточного профілю температурного поля у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі від заданого профілю присвоюють значення  $\Delta T_0^P \dots \Delta T_{K-1}^P$ .

- 5) Рішити систему рівнянь (2.3), у якій відомими виступають отримані при виконанні п. 4 значення відхилень поточного профілю температурного поля у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі  $\Delta T_0^P \dots \Delta T_{K-1}^P$  та коефіцієнти  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ , отримані при попередній побудові математичної моделі багато-зонної трубчатої печі відповідно до викладеної у попередньому розділі методики. А невідомими виступають прирости (з врахуванням знаку) потужності  $\Delta P_0^P \dots \Delta P_{K-1}^P$  у всіх зонах математичної моделі багато-зонної трубчатої печі.
- 6) Визначити дійсні значення змінених потужностей нагрівачів у всіх зонах математичної моделі багато-зонної трубчатої печі шляхом додавання (з врахуванням знаку) минулих значень потужності  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$  у всіх зонах математичної моделі багато-зонної трубчатої печі та визначених при виконанні п. 5 потрібними приростами потужності  $\Delta P_0^P \dots \Delta P_{K-1}^P$  всіх зон. Присвоїти отриманим таким чином значенням змінених потужностей нагрівачів у всіх зонах математичної моделі багато-зонної трубчатої печі значення  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$ .
- 7) Підставити отримані при виконанні п. 6 нові значення потужностей нагрівачів  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$  у всіх зонах математичної моделі багато-зонної трубчатої печі у математичну модель (2.3). Отримані значення температури зон  $\Delta T_0^N \dots \Delta T_{K-1}^N$  будуть відповідати новому профілю температурного поля. Знаходять відхилення  $\Delta T_0^V \dots \Delta T_{K-1}^V$  температур всіх зон математичної моделі багато-зонної трубчатої печі від заданого профілю температурного поля як різницю

$\Delta T_0^N \dots \Delta T_{K-1}^N$  і  $\Delta T_0^{PROF} \dots \Delta T_{K-1}^{PROF}$ . Значення  $\Delta T_0^V \dots \Delta T_{K-1}^V$  записують у файл.

- 8) Присвоюють значенням температури  $\Delta T_0^P \dots \Delta T_{K-1}^P$  значення  $\Delta T_0^N \dots \Delta T_{K-1}^N$  і повторюють виконання пп. 5...7.

У результаті виконання викладеної методики у файл при виконанні п. 7 записуються у файл чергові значення поточних відхилень профілю температурного поля від заданого  $\Delta T_0^V \dots \Delta T_{K-1}^V$ , які отримані у кожній наступній ітерації за рахунок формування чергових значень приростів потужності нагрівачів  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$ . Це дає змогу оцінити властивості пропонованого методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.

Оцінку збіжності методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь можна провести шляхом порівняння відхилень поточних профілів температурного поля від заданих у наступних ітераційних циклах (виконаннях пп. 5...7 викладеної вище методики). Однак необхідно дати оцінку не зміни температури окремих зон (хоча такі оцінки теж можна отримати) а оцінку змін (збіжності) всього профілю температурного поля для багато-зонної трубчатої печі у цілому. Показником для такої оцінки може служити сумарне відхилення від заданої температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі у цілому. Однак звичайна сума відхилень не може служити коректним критерієм оцінки збіжності пропонованого методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь. Адже тоді додатні та від'ємні значення відхилень профілю температурного поля компенсуються, хоча така компенсація не свідчить про високу якість керування [47] (не зменшує вплив профілю температурного поля на похибку від термоелектричної неоднорідності головної термопари ТЕП з КПТП). Тому, згідно із [47], пропонується за критерій оцінки збіжності пропонованого методу керування профілем температурного поля на базі

системи лінійних рівнянь взяти суму абсолютних значень відхилень від заданої температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі у цілому. У такому випадку додатні та від'ємні значення відхилень профілю температурного поля не компенсуються, а додаються. Тобто всі відхилення разом, спільно формують оцінку збіжності методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь і така оцінка збіжності методу буде коректною [47].

Оцінити, чи процес керування профілем температурного поля збіжний чи ні можна порівнюючи суми абсолютних значень відхилень від заданої температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі у цілому між собою. Якщо ці суми спадають при виконанні наступних ітераційних циклів то процес збіжний. При цьому окремі невеликі хаотичні зростання цих сум не свідчать про не збіжність процесу керування. Однак, якщо ці суми зростають, то процес керування не збіжний.

Щодо дослідження впливу амплітуди збурень на кількість ітерацій для методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь, то їх також можна провести за записаними у файл черговими значеннями поточних відхилень профілю температурного поля від заданого  $\Delta T_0^V \dots \Delta T_{K-1}^V$ , які отримані у кожній наступній ітерації за рахунок формування чергових значень приростів потужності нагрівачів  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$ . Аналогічно до оцінки збіжності процесу керування за методом керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь для такого дослідження будемо використовувати суми абсолютних значень відхилень від заданої температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі у цілому. При цьому дослідження проводять шляхом послідовного нарощування амплітуди збурень та визначення кількості необхідних ітерацій для входження сум абсолютних значень відхилень від заданої температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі у цілому у зону їх допустимих значень. Для зменшення впливу випадкових відхилень процесу керування від середнього перебігу для кожної



амплітуди збурень виконуємо по десять повторних досліджень. Очевидно, що коли процес керування профілем температурного поля не збіжний, то досліджувати вплив амплітуди збурень на кількість ітерацій для даного методу керування профілем температурного поля не має змісту.

У даному параграфі розроблено методику дослідження збіжності процесу керування профілем температурного поля у трубчатій печі ТЕП з КПТП методом, який базується на рішенні системи лінійних рівнянь та дослідження впливу амплітуди збурень профілю температурного поля у цій трубчатій печі на необхідну кількість ітерацій для цього методу керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП.

### 3.2 Алгоритми проведення досліджень збіжності методу керування профілем температурного поля

Відповідно до розробленої у попередньому параграфі методики дослідження збіжності методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь було розроблено алгоритми проведення таких досліджень.

Перший з алгоритмів забезпечує збір даних для проведення оцінки збіжності. При його виконанні отримуємо записаний у файл масив значень температур  $\Delta T_0 \dots \Delta T_{K-1}$  у зонах трубчатої печі у послідовних ітераційних циклах ліквідації збурень профілю температурного поля ТЕП з КПТП. Цей алгоритм подано на рисунку 3.1.

Другий алгоритм передбачає опрацювання отриманих при виконанні першого алгоритму результатів дослідження. Його вхідними даними є масив значень температур  $\Delta T_0 \dots \Delta T_{K-1}$  у зонах трубчатої печі у послідовних ітераційних циклах ліквідації збурень профілю температурного поля ТЕП з КПТП, а на виході отримуємо графіки, які показують процес зміни у часі сум

абсолютних значень відхилень від заданої температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі. Оцінку збіжності пропонованого методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь робить людина, аналізуючи отриманий графік послідовної зміни сум абсолютних значень відхилень від заданої температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі, за критеріями, сформульованими у попередньому параграфі.

У даному параграфі розроблено алгоритми проведення досліджень збіжності методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.

### 3.3 Алгоритм проведення досліджень впливу амплітуди збурень на необхідну кількість ітерацій

На основі розробленої у параграфі 3.1 методики дослідження збіжності методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь було розроблено алгоритм досліджень впливу амплітуди збурень на необхідну кількість ітерацій при використанні методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь. Дослідження проводиться на основі записаного у файл масиву значень температур  $\Delta T_0 \dots \Delta T_{K-1}$  у зонах трубчатої печі у послідовних ітераційних циклах ліквідації збурень профілю температурного поля ТЕП з КПТП. Цей алгоритм описаний у параграфі 3.2, його подано на рисунку 3.1.

Алгоритм досліджень впливу амплітуди збурень на необхідну кількість ітерацій передбачає опрацювання даних отриманих при виконанні алгоритму, поданого на рисунку 3.1. Аналогічно до описаного у попередньому параграфі алгоритму оцінки збіжності пропонованого методу керування профілем температурного поля, вхідними даними поданого на рисунку 3.3 алгоритму досліджень впливу амплітуди збурень на необхідну

кількість ітерацій при ліквідації збурень є масив значень температур  $\Delta T_0 \dots \Delta T_{K-1}$  у зонах трубчатої печі у послідовних ітераційних циклах ліквідації збурень профілю температурного поля ТЕП з КПТП. На виході цього алгоритму отримуємо графіки, які показують залежність кількості ітерацій від амплітуди збурень профілю температурного поля ТЕП з КПТП при використанні досліджуваного методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь. Оцінку впливу амплітуди збурень на необхідну кількість ітерацій досліджуваного методу керування робить людина, аналізуючи отриманий графік залежності кількості необхідних ітерацій від амплітуди збурень.

Розроблені алгоритми дають змогу шляхом моделювання властивостей методу керування профілем температурного поля за результатами його дослідження проводити аналіз ефективності використання ТЕП з КПТП під час визначення його поточної похибки у процесі експлуатації та тестування стану електродів його головної термопари [51, 52].

У даному параграфі розроблено алгоритми проведення досліджень впливу амплітуди збурень профілю температурного поля трубчатої печі ТЕП з КПТП на необхідну кількість ітерацій при використанні методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.

## Висновки до третього розділу

1) Розроблена методика дослідження методу керування профілем температурного поля у трубчатій печі ТЕП з КПТП, який базується на рішенні системи лінійних рівнянь, дає змогу оцінити збіжність процесу керування та оцінити вплив амплітуди збурень профілю температурного поля у трубчатій печі на необхідну кількість ітерацій для ліквідації збурень.

2) Розроблені відповідно до цієї методики два алгоритми (збору даних про процес керування профілем температурного поля та опрацювання цих даних) дають змогу оцінити збіжність методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.

3) Розроблений відповідно до цієї методики алгоритм опрацювання зібраних даних про процес керування профілем температурного поля дають змогу оцінити вплив амплітуди збурень профілю температурного поля трубчатої печі ТЕП з КПТП на необхідну кількість ітерацій при використанні методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.

## ВИСНОВКИ

- 1) Аналіз відомих традиційних методів керування профілем температурного поля показав, що, при використанні для стабілізації профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, ці мають високу обчислювальну складність і не можуть бути реалізовані простими і дешевими мікроконтролерами, а прості методи вимагають додаткового дослідження.
- 2) На основі проведеного аналізу сформовано задачі додаткового дослідження простого ітераційного методу керування профілем температурного поля на базі рішення системи лінійних рівнянь – дослідження його збіжності при керуванні профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, яку використовує термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля, та дослідження кількості ітерацій, необхідних для відновлення заданого профілю температурного поля із необхідною точністю.
- 3) Для проведення таких досліджень розроблено концепцію побудови математичної моделі багато-зонної трубчатої печі, яку використовує термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля, яка дасть змогу дослідити властивості методів керування профілем температурного поля та розроблено таку математичну модель.
- 4) Розроблена методика дослідження методу керування профілем температурного поля у трубчатій печі термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, який базується на рішенні системи лінійних рівнянь, дає змогу оцінити збіжність процесу керування та оцінити вплив амплітуди збурень профілю температурного поля у трубчатій печі на необхідну кількість ітерацій для ліквідації збурень.
- 5) Розроблені відповідно до цієї методики два алгоритми (збору даних про процес керування профілем температурного поля та опрацювання цих даних)

дають змогу оцінити збіжність методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь.

б) Розроблений відповідно до цієї методики алгоритм опрацювання зібраних даних про процес керування профілем температурного поля дають змогу оцінити вплив амплітуди збурень профілю температурного поля трубчатої печі ТЕП з КПТП на необхідну кількість ітерацій при використанні методу керування профілем температурного поля на базі системи лінійних рівнянь

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Вимірювання температури: теорія та практика / Луцик Я. Т., Гук О. П., Лах О. І, Стадник Б. І. – Львів: “Бескид Біт”, 2006. – 560 с.
- 2) Webster, J. G. (1998). The measurement, instrumentation and sensors handbook. CRC press.
- 3) Термометр медичинський Medicare скляний ртутний.  
[https://apteka.rozetka.com.ua/335490529/p335490529/?gclid=Cj0KCQjwwfiaBhC7ARIsAGvcPe6Kx-IYcA--Xw9HtIRKiF8Bdu-d48nqysIbC1mOU6SSN0pha4\\_YK4QaAnPLEALw\\_wcB](https://apteka.rozetka.com.ua/335490529/p335490529/?gclid=Cj0KCQjwwfiaBhC7ARIsAGvcPe6Kx-IYcA--Xw9HtIRKiF8Bdu-d48nqysIbC1mOU6SSN0pha4_YK4QaAnPLEALw_wcB).
- 4) Цифровий термометр UNI-T UT325. <https://masteram.com.ua/uk/digital-thermometer-uni-t-ut325/>.
- 5) NI-9214 Measurement System. Retrieved from <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/209889>.
- 6) High accuracy tester-calibrator PJ 6301. Retrieved from <http://www.thermo-electra.com/userfiles/thermo-electra.com/instruments/aoip/pj6301gb.pdf>.
- 7) Элементарный учебник физики под редакцией академика Г.С.Ландсберга. Том 1. Москва «Наука» 1985.
- 8) Дутчак Я.Й. Молекулярна фізика / Я.Й. Дутчак , П.М. Якібчук. - Київ: НМК ВО, 1991. – 256 с.
- 9) Бурштинська ТЕС. – [електронний ресурс]. – режим доступу: [uk.wikipedia.org/wiki/Бурштинська\\_ТЕС](http://uk.wikipedia.org/wiki/Бурштинська_ТЕС)
- 10) Дзеркало тижня .– [електронний ресурс]. – режим доступу: <http://www.dt.ua/2000/2229/65840/>
- 11) Національна комісія з регулювання електроенергії .– [електронний ресурс]. – режим доступу: [http://www.nerc.gov.ua/control/uk/publish/article/main?art\\_id=83403&cat\\_id=34446](http://www.nerc.gov.ua/control/uk/publish/article/main?art_id=83403&cat_id=34446).

- 12) Микийчук М. (2012). Метрологічне забезпечення якості продукції на стадії виготовлення автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. (Докторська дисертація). Львів.
- 13) Data Acquisition Units [електронний ресурс]. – режим доступу : <http://www.fluke-test.com.au/netdaq.htm>
- 14) Panel indicators. - [електронний ресурс]. – режим доступу : <http://www.thermo-electra.com/en/Products/Instruments>
- 15) Fluke and Philips Catalog. 2006.
- 16) International standard Thermocouples : IEC 584-2. – Geneve, 1982 ( Міжнародний стандарт)
- 17) Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення : ДСТУ 2837-94 . - [Чинний від 1986-04-01 ] – К.: Держстандарт України, 1994. – (Національний стандарт України)
- 18) Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis / Kortvelyessy L. – Vulkan-Verlag, Essen, 1981. S. – 498.
- 19) Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В.Самсонов, А.И.Киц, О.А.Кюздени и др. – Киев.:Наукова думка, 1972. – 223 с.
- 20) Бычковский Р.В. Контактные датчики температуры / Р.В. Бычковский – Москва: Металлургия, 1978. – 240 с.
- 21) Гордов А.Н. Основы пирометрии / Гордов А.Н. – Москва: Металлургия, 1971.- 447 с.
- 22) Киренков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности/ И.И. Киренков // Исследование в области температурных измерений: Сб.тр. – Москва: ВНИИМ. – 1976. – С. 11-15.
- 23) Павлов Б.П. Термоэлектрическая неоднородность электродов термопар / Павлов Б.П. – Москва: Изд-во стандартов, 1979. – 109 с.
- 24) Southworth D.J. Temperature Calibration with Isotech Block Baths / Southworth D.J. – Handbook of Isothermal Corporation Limited 1999.



- 25) White, W. P. (1906). The constancy of thermoelements. *Physical Review (Series I)*, 23(6), 449.
- 26) Sloneker, K. C. (2009). Thermocouple inhomogeneity. *Ceramic industry*, 159(4), 13-18.
- 27) Пат. а200701855 Україна, МПК G01K 15/00. Термоелектричний перетворювач / Кочан О.В., Кочан Р.В. - заявл. 22.02.2007.
- 28) Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан, В. Піч з керованим профілем температурного поля Пат. Україна 105700. G01K 7/02.
- 29) Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М., Наука, 2002
- 30) Соболев, А. (2004). Повышение точности регулирования температурного поля путем совершенствования алгоритма управления многозонным термическим объектом: (Кандидатська дисертація). Рыбинск.
- 31) Кочан, О. (2011). Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля. (Кандидатська дисертація). Львів.
- 32) Кочан, О. В. (2020). Методи і засоби підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами з неоднорідними термопарами. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Львів.
- 33) Загальні рекомендації з підготовки, оформлення, захисту та оцінювання випускних кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти першого «бакалаврського» і другого «магістерського» рівнів / За ред. доц. М.І. Шинкарика. Тернопіль: ТНЕУ, 2018. 67 с.
- 34) Комар М.П., Саченко А.О., Васильків Н.М. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи з освітньо-професійної програми «Комп'ютерні науки» спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» за другим (магістерським) рівнем вищої освіти. Тернопіль: ЗУНУ, 2021. 32 с.

## ДОДАТОК А

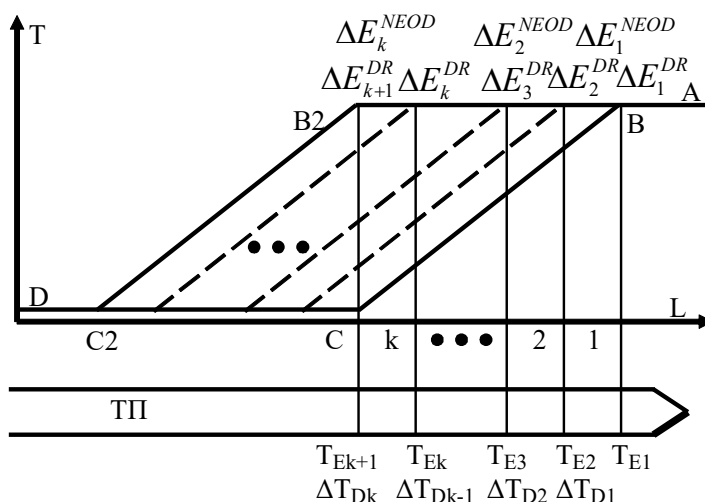
## Апробація отриманих результатів

УДК 536.532

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕСТУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРОДІВ  
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ© Орест Кочан<sup>1</sup>, Олена Раюк<sup>2</sup>, Владислав Богатирчук<sup>2</sup>, Андрій Гром'як<sup>2</sup>, Володимир Кочан<sup>3</sup>, 2022<sup>1</sup>Національний університет „Львівська політехніка” (Львів, Україна), професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, д.т.н., професор, orest.v.kochan@lpnu.ua<sup>2</sup>Західноукраїнський національний університет (Тернопіль, Україна), студенти кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління<sup>3</sup>Західноукраїнський національний університет (Тернопіль, Україна), професор кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління, к.т.н., професор, volodymyr/kochan@gmail.net

Поширені при вимірюванні температур 600-1100°C термоелектричні перетворювачі на базі термопар (ТП) [1] мають широкий діапазон вимірювання, простоту і міцність. Недоліки ТП – деградація при тривалій експлуатації при високих температурах проявляють себе як дві похибки [2]: а) від дрейфу функції перетворення (ФП); б) від набутої термоелектричної неоднорідності – зміни ФП ТП при зміні профілю температурного поля вздовж її електродів. Метод корекції поточної похибки ТП [3] підвищує точність і збільшує строк її експлуатації. Але зростає небезпека руйнування ТП (катастрофічної відмови). Через характер похибки ТП та вплив домішок на швидкість деградації похибка ТП у цілому погано відображає стан її електродів. Тому розроблено метод тестування електродів ТП під час експлуатації [4]. **Метою** роботи є моделювання процесу тестування стану електродів ТП під час експлуатації.

Метод [4] реалізується термоелектричним перетворювачем з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП) [5]. На рис. 1 подано зміщення профілю температурного поля, яке формує ТЕП з КПТП при діагностуванні стану електродів його головної ТП. Профіль температурного поля при діагностиці поступово змінюється від ABCD до AB2C2D, (проміжні температурні поля подані штриховими лініями). Кожній зміні профілю відповідає віртуальна ділянка електродів ТП (на рис. 1 позначені як 1, 2 - k) та її похибка від дрейфу її ФП  $\Delta E_1^{DR} \dots \Delta E_{k+1}^{DR}$ . При зміні профілю температурного поля ділянки 1, 2 ... (прилягають до В...В2), по одній виходять із зони градієнту (перестають, за законом Зеебека [1], генерувати термо-е.р.с., а тоді їх похибки  $\Delta E_1^{DR} \dots \Delta E_{k+1}^{DR}$



перестають впливати на термо-е.р.с. ТП). На місце ділянок, що вийшли із зони градієнту, у неї потрапляють ділянки, що прилягають до зон С ... С2 (вони не деградують бо експлуатуються при температурі вільних кінців).

За результатами вимірювань можна скласти систему рівнянь

Рис.1. Зміни профілю температурного поля при діагностуванні стану електродів ТП

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k (E_i^{POCH} + \Delta E_i^{DR}) = E_1^{VYM} \\ \dots \\ \sum_{i=k}^k (E_i^{POCH} + \Delta E_i^{DR}) = E_k^{VYM} \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $E_i^{POCH}$ ,  $\Delta E_i^{DR}$  – початкова термо-е.р.с. і дрейф  $i$ -тої ділянки ТП;  $E_1^{VYM}$  ...  $\Delta E_k^{VYM}$  – результати виміру термо-е.р.с. ТП при тестуванні у всіх  $k$  профілях температурного поля.

Рішення (1) дає змогу визначити  $\Delta E_i^{DR}$  ділянок ТП. Порівнявши їх із значеннями  $\Delta E_{DOSLi}^{DR}$ , отриманими при дослідженні однотипних ТП у аналогічних умовах експлуатації, можна виявити ділянки, які деградують швидше за інші. Коли  $\Delta E_i^{DR}$  ділянки ТП наближається до критичного значення, необхідна заміна ТП (імовірність катастрофічної відмови). При цьому сумарна похибка ТП, за рахунок меншого дрейфу інших ділянок, може не перевищувати значень, характерних для інших ТП.

Моделювання методу тестування електродів ТЕП з КПТП передбачає такі операції:

1. Ввести температури експлуатації і тестування кінців 8-ми зон головної ТП, обчислити їх середню температуру та її зміни під час тестування, а також згенерувати 1000 реалізацій матриці випадкових похибок  $\Delta E_{8x8}$  при вимірюванні температури цих зон.
2. Ввести номінальну питому термо-е.р.с.  $e_{N8x1}$  і закон її зміни від температури експлуатації  $\Delta e = f(T_{EXP})$ , за яким обчислити зміну питомої термо-е.р.с. ділянок  $\Delta e_{8x1}$  та дійсну питому термо-е.р.с. кожної ділянки  $e_{8x1} = (e_{N8x1} + \Delta e_{8x1})$ .
3. Розрахувати термо-е.р.с. у 8 полях за п.1 як  $E_{8x1} = \Delta T_{8x8} * e_{8x1}$ , а також Додати термо-е.р.с. ділянок  $E_{8x1}$  до похибок  $\Delta E_{8x8}$  їх вимірювання ( $E_{8x1} + \Delta E_{8x8}$ ).
4. Вирішити систему рівнянь  $(\Delta T_{8x8} + dT_{8x8}) \bar{e}_{8x1} = (E_{8x1} + \Delta E_{8x8})$ , де  $dT_{8x8}$  різниці температур зон, відносно питомих термо-е.р.с.  $\bar{e}_{8x1}$ , які отримуємо при діагностуванні для 1000 реалізацій  $\Delta E_{8x8}$  та різниць температур зон  $(\Delta T_{8x8} + dT_{8x8})$ .
5. Знайти похибки визначення питомої термо-е.р.с. ділянок  $\bar{e}_{8x1} - e_{8x1}$  для всіх значень  $\bar{e}_{8x1}$ .
6. Провести моделювання похибки ділянок для всіх комбінацій випадкової похибки вимірювання різниці температур зон  $0 \dots 10^\circ C$  та вимірювання термо-е.р.с.  $0 \dots 20 \mu V$ .

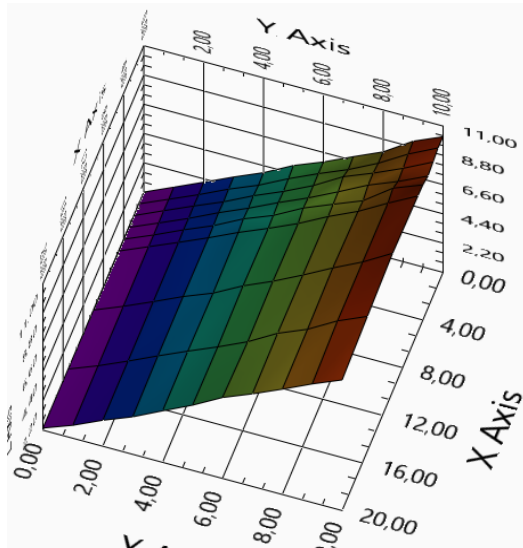


Рис. 2. Залежності дисперсії похибки визначення питомої термо-е.р.с.

В результаті моделювання побудовано поверхню (рис. 2) залежності дисперсії похибки визначення питомої термо-е.р.с. ділянок ТП (вісь Z, °C) від похибки вимірювання термо-е.р.с. (вісь X, 20 мкВ) та похибки вимірювання температури зон (вісь Y, 10°C). Відхилення середнього значення  $\bar{e}_{8x1} - e_{8x1}$  для 1000 реалізацій не перевищує 0,05 мкВ, тобто метод практично не має систематичної похибки.

Перевагою даного методу тестування стану електродів ТП є простота реалізації, можливість визначення та прогнозу стану ділянок електродів ТП при експлуатації, можливість прогнозу генерованої термо-е.р.с. в різних температурних полях, а також відсутність необхідності використання еталонного обладнання.

1. Webster, J. G. (1999). The Measurement, Instrumentation, and Sensors: Handbook. CRC Press.
2. Su Jun, O. Kochan. The Mechanism of the Occurrence of Acquired Thermoelectric Inhomogeneity of Thermocouples and its Effect on the Result of Temperature Measurement. Measurement Techniques. - 2015. - Volume 57. - Issue 10. – P. 1160-1166.
3. Пат. 102981 Україна, МПК G01K 7/02. Спосіб корекції похибки головної термопари / О.В.Кочан, Р.В.Кочан; власники заявники. - № а201213268; заявл. 21.11.2012; опублік. 10.08.13, Бюл. № 16.
4. Пат. 104952 Україна, МПК G01K 13/00. Спосіб самодіагностики термопар на місці експлуатації та пристрій для його реалізації / О.В.Кочан; власник заявник. № а201213269; заявл. 21.11.2012, опублік. 27.08.13, бюл. № 16 від 27.08.2013.
5. Пат. № 97464 Україна, МПК G01K 15/00. Термоелектричний перетворювач / Кочан О.В., Кочан Р.В. - заявл. 22.02.2007.

УДК 536.532

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОЧНОЇ ПОХИБКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Орест Кочан<sup>1</sup>, Олена Раюк<sup>2</sup>, Владислав Богатирчук<sup>2</sup>, Андрій Гром'як<sup>2</sup>, Володимир Кочан<sup>3</sup>, 2022

<sup>1</sup>Національний університет „Львівська політехніка” (Львів, Україна), професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, д.т.н., професор, orest.v.kochan@lpnu.ua

<sup>2</sup> Західноукраїнський національний університет (Тернопіль, Україна), студенти кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління

<sup>3</sup> Західноукраїнський національний університет (Тернопіль, Україна), професор кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління, к.т.н., професор, volodymyr/kochan@gmail.net

При вимірюванні температур 500 - 1100°C у промисловості найбільш розповсюджені термоелектричні перетворювачі (ТЕП) [1]. Їх недолік – деградація електродів при тривалій експлуатації, що проявляє себе як: а) дрейф функції перетворення (ФП) – для типу К до 6,5°C за 1000 годин при 800°C [2]; б) похибка від набутої термоелектричної неоднорідності [2] при зміні профілю температурного поля – до 11 °C за 1000 годин при 800°C [3].

Відомі методи корекції похибок ТЕП вимагають визначення поточної похибки на місці експлуатації [3] або у лабораторії [1]. У [4] запропоновано метод, що не вимагає еталонів, а лише сталі температури робочого кінця при калібруванні. Він: а) не дає змоги проявитися похибці від набутої неоднорідності; б) забезпечує визначення поточної похибки ТЕП при експлуатації. Метод реалізує ТЕП з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КППП) [5], що забезпечує зміну профілю температурного поля вздовж електродів термопар (ТП).

Дослідження методу [4] проведемо шляхом імітаційного моделювання у Excel. Слід:

1. Розбити електроди на  $i = 100$  ділянок – від 0°C (вільні кінці) до 800°C (робочий кінець).
2. Задати профілі температурних полів експлуатації ТП у вигляді сигмоїд і відрізків прямих.
3. Провести аналіз впливу на термо-е.р.с. ТП похибок від дрейфу ФП їх ділянок і від набутої термоелектричної неоднорідності при переміщенні профілю температурного поля при заданому законі зміни питомої термо-е.р.с. від температури експлуатації. Для цього:
  - 3.1 Розрахувати (у 10 профілях температурного поля) номінальні та дійсні термо-е.р.с., що генеруються кожною ділянкою електродів ТП та ТП у цілому. При цьому номінальна питома термо-е.р.с. ділянок  $e_i$ , а її зміну від дрейфу  $\Delta e_i$  приймаємо наступною

$$\Delta e_i = AT_{EKS_i} + BT_{EKS_i}^2, \quad (1)$$

де  $T_{EKS_i}$  – температура постійної експлуатації ділянки;  $A = 0,0025$ ,  $B = 2 \cdot 10^{-6}$  – коефіцієнти, підібрані так, щоби сумарна похибка ТП  $\approx 11^\circ C$  [2, 3];

- 3.2 Розрахувати похибки від дрейфу ділянок ТП як різниці між термо-е.р.с., що генерується ТП у кожному профілі температурного поля та її номінальною термо-е.р.с.

$$E_i^{NOM} = e \cdot (T_{i+1} - T_i), E_i^{REAL} = (e + \Delta e_i) \cdot (T_{i+1} - T_i), \quad (2)$$

де  $E_i^{NOM}$ ,  $E_i^{REAL}$  – номінальна та дійсна термо-е.р.с. ділянки при температурах  $T_{i+1}, T_i$ .

3.3 Розрахувати похибки від дрейфу ФП ТП  $\Delta E_j^{DR}$  як суми викликаних деградацією відхилень термо-е.р.с. від номінальної, що генерують ділянки ТП у поточному профілі температурного поля, профіль якого розміщений від  $i = i_p$  до  $i = i_k$

$$\Delta E_j^{DR} = \sum_{i=i_p}^{i_k} \Delta e_i . \quad (3)$$

3.4 Розрахувати похибки від набутої термоелектричної неоднорідності ТП  $\Delta E_j^{NEOD}$  як різниці між сумою викликаних деградацією відхилень термо-е.р.с. від номінальної, що генерують ділянки ТП у профілі температурного поля експлуатації, та сумою викликаних деградацією відхилень термо-е.р.с. від номінальної, що генерують ділянки ТП у поточному профілі температурного поля

$$\Delta E_j^{NEOD} = \sum_{i=0}^{100} \Delta e_i - \sum_{i=i_p}^{i_k} \Delta e_i . \quad (4)$$

3.5 Розрахувати для кожного профілю температурного поля суму абсолютних значень похибок від набутої неоднорідності (за п. 3.3) та від дрейфу ФП ТП (за п. 3.2).

Отримані у п. 3.5 значення похибок від набутої термоелектричної неоднорідності та від дрейфу ФП ТП для кожного профілю температурного поля у як виді сигмоїд, так і у виді відрізків прямих з різними параметрами, подані на рис. 1.

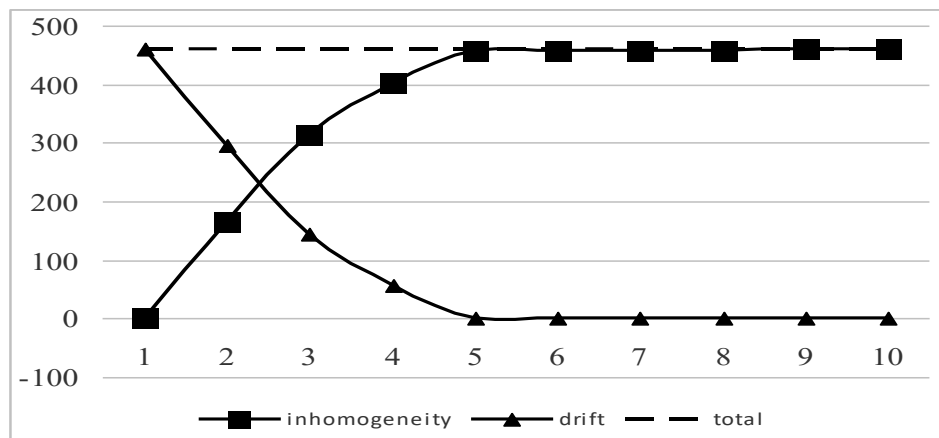


Рис. 1. Зміни похибок від набутої термоелектричної неоднорідності та від дрейфу ФП ТП для кожного профілю температурного поля у виді сигмоїд та у виді відрізків прямих

Проведені дослідження дають можливість зробити наступні висновки: а) при зміщенні зони градієнту температурного поля у бік вільних кінців, проходить поступове «витіснення» похибки від дрейфу ФП ТП (початок із 452 мкВ, рис. 1) похибкою від набутої неоднорідності (початок з нуля); б) сума абсолютних значень цих похибок залишається сталою (пунктирна лінія); в) максимальні абсолютні значення похибок від дрейфу і від неоднорідності рівні між собою; г) сума абсолютних значень цих похибок рівна їх максимальним значенням в будь-якому температурному полі; д) визначена методом [4] похибка ТП не залежить від форми профілю температурного поля в зоні опорної ділянки; е) результат визначення похибки ТП не залежить від виду функції похибки від температури; д) метод, запропонований у [4], правильно відображає тісний зв'язок між похибками від дрейфу ФП ТП та від набутої термоелектричної неоднорідності як проявів одного процесу деградації електродів ТП.

2. Su Jun, Kochan O. (2015). The mechanism of the occurrence of acquired thermoelectric inhomogeneity of thermocouples and its effect on the result of temperature measurement. *Measurement Techniques*, 57 (10), 1160-1166.

3. Васильків, Н. (2010). Підвищення точності вимірювання температури термопарами в процесі експлуатації. (Кандидатська дисертація). Львів.

4. Shu, C., Kochan, O. (2013). Method of thermocouples self verification on operation place. *Sensors & Transducers*, 160 (12), 55-61.

5. Jun, S., Kochan, O., Chunzhi, W., Kochan, R. (2015). Theoretical and experimental research of error of method of thermocouple with controlled profile of temperature field. *Measurement science review*, 15 (6), 304-312.