

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

ГРОМ'ЯК Андрій Володимирович

Нейромережева модель процесу регулювання  
температури у багатозонній печі / Neural Network  
Model of the Process 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  
А.В. Гром'як

---

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  
ГРОМ'ЯКУ Андрію Володимировичу  
\_\_\_\_\_ (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Нейромережева модель процесу регулювання температури у багатозонній печі / Neural Network Model of the Process 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 методів і засобів реалізації заданого профілю темп поля у багатозонній трубчатій печі та вибрати напрямки подальших досліджень;
- провести аналіз реалізації ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі.
- розробити методику використання математичної моделі багато-зонної трубчатої печі для навчання нейронної мережі.
- розробити методику проведення досліджень нейромережевого методу керування профілем температурного поля;
- підготувати імітаційні дослідження збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля;
- підготувати імітаційні дослідження впливу амплітуди відхилень на кількість ітерацій.

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 багато-зонній трубчатій печі	12.2021 р. – 03.2022 р.	
2	Підготовлення імітаційних досліджень ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля	03.2022 р. – 05.2022 р.	
3	Методика досліджень ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля	05.2022 р. – 11.2022 р.	
4	Повне завершення та представлення кваліфікаційної роботи на кафедрі	16.11.2022 р.	

Студент \_\_\_\_\_ А.В. Гром'як  
підписКерівник роботи \_\_\_\_\_ к.т.н., професор, В. В. Кочан  
підпис

## РЕЗЮМЕ

Дипломна робота магістра "Моделювання процесу регулювання температури у багатозонній печі на базі нейронних мереж". 90 с., 14 рис., 1 табл., 4 додатки, 59 джерел.

**Метою** даної дипломної роботи магістра є дослідження реакції на відхилення профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, призначеній для реалізації термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, при ітераційному нейромережевому керуванні профілем температурного поля.

**Об'єктом дослідження** є процес керування профілем температурного поля у багато-зонних об'єктах. **Предметом дослідження** є ітераційний нейромережевий метод керування профілем температурного поля у багато-зонних об'єктах, придатний для реалізації за допомогою мікроконтролера з обмеженими обчислювальними ресурсами.

**Наукова новизна.** Отримали подальший розвиток дослідження методом імітаційного моделювання ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, призначеній для реалізації термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля шляхом використання математичної моделі багато-зонної трубчатої печі для навчання нейронної мережі, що дасть можливість дослідити збіжність ітераційного нейромережевого методу керування та залежність кількості ітерацій, необхідної для досягнення заданих допустимих відхилень температурного поля від амплітуди відхилень.

Ключові слова: ТЕРМОПАРА, НАБУТА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНА НЕОДНОРІДНІСТЬ, ПРОФІЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ, КЕРУВАННЯ БАГАТОЗОННИМИ ТЕПЛОВИМИ ОБ'ЄКТАМИ, ЗБІЖНІСТЬ КЕРУВАННЯ.

## RESUME

Master thesis "Modeling the process of temperature control in a multi-zone furnace based on a system of linear equations". 90 pages, 14 figures, 1 table, 4 appendices, 59 references.

The goal of this master thesis is to study the reaction to the disturbance of the temperature field in a multi-zone tubular furnace, intended for the implementation of the thermocouple with controlled temperature field, when controlling the temperature field by the iterative method based on the neural network.

The object of the study is the process of control of the temperature field in multi-zone objects. The subject of the study is the iterative method of control of temperature field in multi-zone objects, based on the neural network, suitable for implementation using a microcontroller with limited computational resources.

Scientific novelty. There was further developed the modelling study of the iterative neural network method of control of temperature field in a multi-zone tubular furnace , intended for the implementation for the thermocouple with controlled temperature field using a mathematical model of a multi-zone tubular furnace for training a neural network, which allows investigating the convergence of the iterative neural network control method and the dependence of the number of iterations required to achieve the given permissible deviations of the temperature field on the amplitude of the deviations.

Keywords: THERMOCOUPLE, ACQUIRED THERMOELECTRIC INHOMOGENITY, TEMPERATURE FIELD, CONTROL OF MULTI-ZONE THERMAL OBJECTS, CONTROL CONVERGENCE.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАДАНОГО ПРОФІЛЮ ТЕМПІ ПОЛЯ У БАГАТОЗОННІЙ ТРУБЧАТІЙ ПЕЧІ .....	13
1.1 Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля .....	13
1.2 Аналіз похибок термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля .....	22
1.3 Відомі методи керування профілем температурного поля .....	28
1.4 Напрямки подальших досліджень.....	39
Висновки до першого розділу .....	45
2 ПІДГОТОВЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ .....	46
2.1 Ітераційний нейромережвий метод керування профілем температурного поля .....	46
2.2 Методика навчання нейронної мережі регулятора .....	53
2.3 Використання математичної моделі багато-зонної трубчатої печі для навчання нейронної мережі .....	58
2.4 Методика формування навчальної вибірки для навчання нейронної мережі, яка входить у склад нейромережевого регулятора температури....	62
Висновки до другого розділу.....	64
3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ІТЕРАЦІЙНОГО НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ.....	65
3.1 Методика проведення досліджень ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля .....	65
3.2 Алгоритм дослідження збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля .....	70

3.3 Алгоритм дослідження впливу амплітуди відхилень від заданого профілю температурного поля на необхідну кількість ітерацій.....	73
Висновки до третього розділу .....	76
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79
ДОДАТОК А ПРИКЛАДИ ВЕКТОРІВ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ .....	84
ДОДАТОК Б АПРОБАЦІЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ .....	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ  
І ТЕРМІНІВ

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



## ВСТУП

**Актуальність роботи.** У світі, серед загального числа вимірювань, температура займає четверте місце (безпосередньо після вимірювань часу, маси та лінійних розмірів), а у промисловості частота прямих та посередніх вимірювань температури є ще вищою (на об'єктах енергетики – до 70% вимірювань) [1, 2]. Від точності та метрологічної надійності температурних вимірювань дуже часто залежать економічна ефективність технологічних процесів, коефіцієнт їх корисної дії, а також якість продукції та безпека дуже різноманітних технологічних об'єктів [1 - 3]. Тому невпинно зростають вимоги до цих параметрів. Діапазон вимірюваних температур лише промислових термоагрегатів досить широкий – від мінус 200°C до 2000°C [1, 2]. Така ситуація привела до появи дуже великої номенклатури сенсорів (давачів, первинних вимірювальних перетворювачів) температури (при їх проектуванні задіяні майже всі фізичні ефекти), а також їх конкретних конструкцій [4, 5] і приладів [6 - 9].

Нещодавно були розроблені лазерні методи вимірювання температури [1, 2]. Їх похибки, згідно з [2], сягають 5 – 15% від виміряного значення, а лише у спеціальних умовах – до 1%. Акустичні методи вимірювання температури [1, 2, 10] дають змогу визначити розподіл температури газу у деякому об'ємі. Похибки цих методів визначають як флуктуації локальної температури газу і нестабільність його складу, а також дія сторонніх шумів. Відповідно до [2], похибка акустичних методів сягає 4% (тобто до 40°C при вимірюваній температурі 1000°C), що у багатьох випадках неприйнятно.

Таким чином, як показав аналіз похибок вимірювання температури безконтактними методами у промислових умовах, вони мають суттєві недоліки, а їх похибка визначається в основному з методичними похибками. Таким чином, незважаючи на переваги безконтактних методів вимірювання температури, на сьогодні підвищені температури частіше вимірюють

контактними методами.

Для вирішення задачі керування профілем температурного поля у термоелектричних перетворювачах з керованим профілем температурного поля [42] за допомогою мікроконтролерів, у [43, 44] запропоновано два ітераційних методи, які характеризуються відносно малою обчислювальною складністю. Для уникнення схильності до самозбудження ці методи використовують розімкнуті структури системи керування профілем температурного поля. Керуюча дія у цих системах формується із затримкою на дві-три постійні часу об'єкта керування, тобто після практичного закінчення перехідних процесів теплового характеру. Таким чином, нова сформована керуюча дія є незалежною від попередньої, причини до самозбудження немає. Крім того, процес керування профілем температурного поля у методах [43, 44] є ітераційним, тобто відхилення профілю температурного поля усуваються поступово, за декілька послідовних циклів уточнення керуючої дії всіх нагрівачів. Це дало змогу цілеспрямовано дещо зменшувати розраховану керуючу дію у кожному ітераційному циклі. Тоді процес зменшення відхилення профілю температурного поля буде плавним, без «перерегулювання».

Перший з запропонованих у [43] методів базується на рішенні системи лінійних рівнянь, а другий – використовує попередньо навчену нейронну мережу [44]. При цьому нейронна мережа навчається при попередньому налаштуванні системи керування профілем температурного поля за допомогою комп'ютера, який має достатні обчислювальні ресурси. Мікроконтролер, який безпосередньо керує профілем температурного поля термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, лише використовує вже навчену нейронну мережу, що, відповідно до [30] вимагає у 10000 разів менших обчислювальних ресурсів.

Але слід відзначити, що методи керування профілем температурного поля, запропоновані у [43, 44], 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 відхилення профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, призначеній для реалізації термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, при ітераційному нейромережевому керуванні профілем температурного поля.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1) Провести аналіз методів і засобів реалізації заданого профілю темп поля у багатозонній трубчатій печі та вибрати напрямки подальших досліджень;

2) Провести аналіз реалізації ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі та необхідного навчання нейронної мережі.

3) Розробити методику використання математичної моделі багато-зонної трубчатої печі для навчання нейронної мережі ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля.

4) Розробити методику проведення досліджень нейромережевого методу керування профілем температурного поля;

5) Підготувати імітаційні дослідження збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля;

6) Підготувати імітаційні дослідження впливу амплітуди відхилень на кількість ітерацій для ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля.

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

**Предмет дослідження** – ітераційний нейромережевий метод керування профілем температурного поля у багато-зонних об'єктах придатний для реалізації за допомогою мікроконтролера з обмеженими обчислювальними ресурсами.

**Методи досліджень** – імітаційне моделювання.

**Наукова новизна.** Отримали подальший розвиток дослідження методом імітаційного моделювання ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, призначеній для реалізації термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля шляхом використання математичної моделі багато-зонної трубчатої печі для навчання нейронної мережі, що дасть можливість дослідити збіжність ітераційного нейромережевого методу керування та залежність кількості ітерацій, необхідної для досягнення заданих допустимих відхилень температурного поля від амплітуди відхилень.

**Практичне значення одержаних результатів:**

- 1) Адаптовано математичну модель багато-зонної трубчатої печі для дослідження ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля;
- 2) Розроблено методику дослідження методом імітаційного моделювання збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у трубчатій багато-зонній печі, що входить до складу ТЕП з КПТП;
- 3) Розроблено методику дослідження методом імітаційного моделювання впливу амплітуди відхилень на кількість ітерацій для ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у трубчатій багато-зонній печі, що входить до складу ТЕП з КПТП.

**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 90 сторінок тексту, 14 рисунків, 1 таблиця, 4 додатки, список посилань містить 59 позицій.

## 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАДАНОГО ПРОФІЛЮ ТЕМП ПОЛЯ У БАГАТОЗОННІЙ ТРУБЧАТІЙ ПЕЧІ

### 1.1 Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля

Якщо розглядати похибку спричинену набутою термоелектричною неоднорідністю електродів термопар з точки зору метрології, то вона є реакцією неідеального елемента вимірювального каналу на дію впливаючої величини. У цьому випадку впливаючою величиною є зміна профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури під час експлуатації. Якщо зміни профілю температурного поля відсутні похибка від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар себе не може проявити. Виходячи з [45], сформулюємо відомі підходи до зменшення дії впливаючих величин:

1) Вимірювання впливаючої величини та наступна корекція результату вимірювання (формування поправки аналоговим або числовим методом) і внесення цієї поправки в результат вимірювання [45]. Наприклад, дію зміни температури вільних кінців термопар на результат вимірювання температури можна зменшити вимірюванням цієї температури, обчисленням коригуючої поправки і додаванням її до вимірюваної термо-е.р.с. термопари. Але цей метод корекції практично не годиться для зменшення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар – він виходить надто складним.

2) Протиставлення дії впливаючої величини на результат вимірювання протилежною дією іншої, штучно створеної впливаючої величини. Наприклад, компенсація дії магнітного поля деяких елементів засобу вимірювання на чутливий елемент з допомогою спеціально створеного магнітного поля. Але цей метод корекції також практично не годиться для

зменшення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар – він також виходить надто складним.

3) Зменшення дії на чутливі елементи впливаючої величини. Наприклад, екранування всієї схеми або деяких елементів для зменшення дії електромагнітних завад. Щодо похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар таке зменшення практично неможливе, адже, згідно із законом Зеебека [46], саме профіль температурного поля об'єкта вимірювання створює термо-е.р.с. термопар та його зменшувати не можна.

4) Зменшення дії на чутливий елемент схеми змін впливаючої величини, тобто стабілізація дії впливаючої величини. Наприклад, зменшення похибок від дії змін температури оточуючого середовища на прецизійні засоби вимірювання або їх елементи досягають шляхом їх розміщення в термостаті, де впливаюча величина (температура) незмінна. Тоді дія впливаючої величини враховується при калібруванні засобу вимірювання. А дія змін впливаючої величини на результат вимірювання суттєво зменшується. При експлуатації термопар відомі так звані нуль-термостати для вільних кінців термопар.

Четвертий підхід перспективний для зменшення похибки від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар. Для реалізації цього підходу необхідна стабілізація профілю температурного поля [43] вздовж електродів термопари, яка має неоднорідні електроди. Через те, що профіль температурного поля об'єкта вимірювання змінюється випадково, похибка від набутої термоелектричної неоднорідності термопар теж буде випадковою. При стабілізації профілю температурного поля ця випадкова похибка переводиться в систематичну похибку. А це дає змогу використовувати для її корекції відповідні методи [28 - 30].

Дрейф функції перетворення кожної ділянки кожного електрода термопари, як це показано у [33], є функцією трьох змінних – часу експлуатації  $\tau$ , температури постійної експлуатації даної ділянки  $t_e$ , та

температури  $t_d$ , у яку дана ділянка термопары потрапила при зміні профілю температурного поля вздовж її електродів. Згідно [2, 33, 43] можна записати

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

Якщо градієнт профілю температурного поля  $\frac{\partial t}{\partial l}$  буде однаковим як при експлуатації, так і при метрологічній перевірці, то температура експлуатації  $t_e$  для кожної ділянки термопары буде сталою протягом часу експлуатації  $\tau$

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

Повернімося шляхом заміни змінних до інтегрування за температурою

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

У такому разі (1.1), з врахуванням (1.2) і (1.3), можна буде переписати як

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

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

Тобто, при стабілізації профілю температурного поля вздовж електродів термопары, кожна ділянка буде експлуатуватись завжди за однакової температури. Тоді похибка ділянок  $\Delta e_k$  та сумарна похибка електроду термопары  $\Delta E_{\Sigma}$  будуть залежати лише від часу експлуатації  $\tau$ ,

тобто похибка термопарі буде проявлятися як часовий дрейф її функції перетворення. Тоді генеровану електродом термо-е.р.с.  $E_{\Sigma}$  можна записати як суму часового дрейфу функції перетворення  $\Delta E_{\Sigma\tau}$  та номінальної функції перетворення  $E_{\Sigma N}$

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

У той же час для корекції похибки термопар від часового дрейфу функції перетворення розроблено достатньо надійні методи [28 - 30].

Стабілізувати профіль температурного поля вздовж електродів термопарі, що безпосередньо вимірює температуру об'єкта (головної термопарі) можна розміщенням вздовж її електродів, у зоні градієнту температури об'єкта вимірювання, декількох підсистем регулювання температури [42, 43], які зміщені вздовж осі цієї головної термопарі. Кожна з підсистем регулювання температури повинна складатися з додаткової термопарі (давача температури), відповідного до неї нагрівника та регулятора, який підтримує на своїй ділянці задану температуру. Такий набір підсистем регулювання температури створює вздовж електродів головної термопарі власне температурне поле. Його профіль не залежить від профілю зовнішнього температурного поля об'єкта вимірювання температури. Таким чином, деградаційні процеси в електродах термопарі 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 [28 - 30]. При умові стабілізації профілю температурного поля електродів термопарі характер та тривалість змін профілю температурного поля об'єкта на процедуру корекції не впливають.

Таким чином, реалізувати пропонований метод стабілізації профілю температурного поля експлуатації термопарі можна за допомогою



додаткових підсистем регулювання температури [42, 43]. Кожна з цих підсистем повинна мати власні сенсор температури, регулятор і нагрівник. Як сенсор температури доцільно використати термопари, аналогічні до головної термопари. Найбільш широко вживаними сенсорами температури є термопари типу хромель-алюмель. Нагрівники кожної зони доцільно виготовити з ніхрому. Ніхром є сплавом на основі нікелю, як і термопари типу хромель-алюмель.

Структура пропонованого сенсора температури подана на рисунку 1.1. Основним засобом вимірювання температури об'єкта є головна термопара ГТП, підключена до вимірювального каналу ВК, що входить у багатоканальний регулятор температури БРТ. Профіль температурного поля вздовж електродів ГТП стабілізований з допомогою підсистем регулювання температури. У їх склад входять додаткові термопари  $T_1 \dots T_n$ , нагрівники  $H_1 \dots H_n$  та саме регулятори, представлені на рисунку 1.1 як входи РТх і виходи РТу одного багатоканального БРТ. Нагрівники  $H_1 \dots H_n$  та відповідні їм додаткові термопари  $T_1 \dots T_n$  зміщені відносно осі ГТП таким чином, щоби створювати суцільне покриття електродів ГТП. Пропонований сенсор було названо термоелектричним перетворювачем з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП) [42, 43].

Подана на рисунку 1.1 структура ТЕП з КПТП дає можливість цілеспрямованого керування профілем температурного поля вздовж електродів ГТП. Тоді створюється можливість стабілізації наперед заданого профілю температурного поля вздовж електродів ГТП (наприклад, згідно із графіком А, поданим на рисунку 1.1). При зміні зовнішніх щодо описаного ТЕП з КПТП температур у допустимих межах, які знаходяться між лініями В і С (див. рисунок 1.1) вони не будуть впливати на профіль температурного поля вздовж електродів ГТ.

Якщо стабілізація профілю температурного поля вздовж електродів ГТП буде діяти як під час експлуатації давача, так і при його метрологічній перевірці [45], то можлива різниця профілів температурних полів

експлуатації та печі метрологічної перевірки не веде до змін внутрішнього профілю температурного поля ТЕП з КПТП. Тобто похибка від набутої термоелектричної неоднорідності ГТП себе проявити не може. При стабілізації профілю температурного поля ТЕП з КПТП його головна термопара ГТП стає інваріантною до змін температурного поля об'єкта вимірювання.

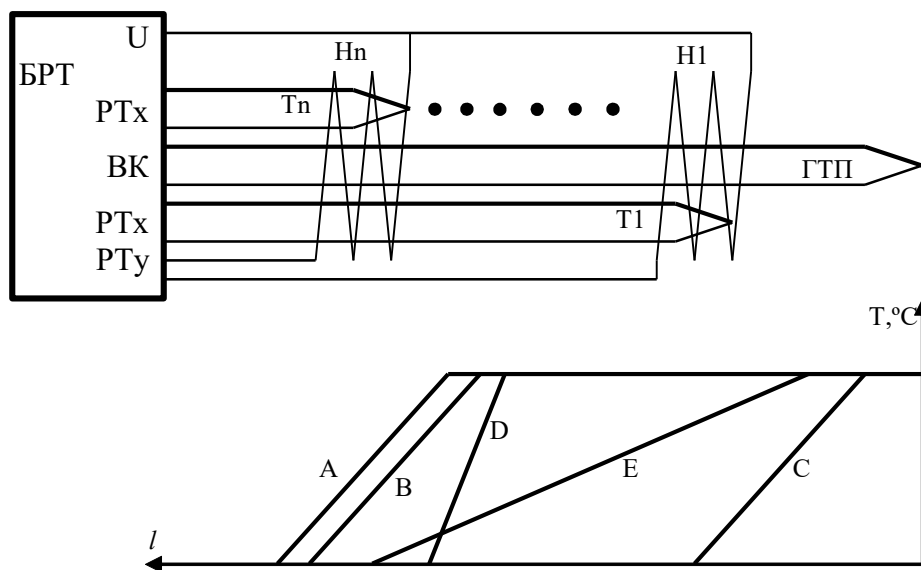


Рисунок 1.1 – Узагальнена структура ТЕП з КПТП

Такі зміни можуть бути періодичними (наприклад, добовими або сезонними) або стрибкоподібними (наприклад, при зміні режимів термообробки) або плавними (наприклад, при зміні умов теплообміну об'єкта із зовнішнім середовищем). Тоді, відповідно до (1.5), термо-е.р.с. ГТП та її похибка не будуть залежати від профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури. Таким чином, стабілізація профілю температурного поля ГТП дає змогу нехтувати змінами зовнішнього профілю. Однак, якщо таку стабілізацію реалізувати засобами об'єкта вимірювання температури, то метрологічну перевірку цього сенсора, для отримання високої точності корекції похибок ГТП слід проводити лише на місці його експлуатації (коли діє система стабілізації профілю

температурного поля). Це суттєво обмежує можливості такого сенсора. Для того, щоби можна було традиційним методом проводити його метрологічну перевірку в лабораторних умовах необхідно, щоби профіль температурного поля печі метрологічної перевірки достатньо точно відповідав профілю об'єкта вимірювання температури. Відповідно до викладеного, значно кращим рішенням буде оснащення самого сенсора засобами стабілізації власного профілю температурного поля. Адже вони будуть діяти однаково як при метрологічній перевірці, так і при експлуатації. Тобто профілі температурних полів в обох випадках будуть однакові.

Зокрема, профіль температурного поля ГТП залишиться відповідним до А як при метрологічній перевірці (коли профіль температурного поля лабораторної печі відповідає, наприклад, D), так і при експлуатації (коли профіль температурного поля об'єкта вимірювання температури відповідатиме, наприклад, E). Тоді профілі температурних полів як лабораторної печі (D), так і об'єкта, де експлуатується ТЕП (E), не впливають на профіль температурного поля вздовж електродів ГТП (A). А тому похибка від термоелектричної неоднорідності електродів ГТП, згідно із (1.2), проявити себе не може.

На рисунку 1.2 подана конструктивна схема розробленого у [42, 43] ТЕП з КПТП. Її основою є традиційний термоелектричний перетворювач, що складається з електродів 1 і 2 головної термопари ГТП, ізольованих керамічними бусами 3 і захисного чохла 4. З метою стабілізації профілю температурного поля у зоні градієнту об'єкта вимірювання температури розміщено робочі кінці додаткових термопар 5 і нагрівники 6, які ізольовані керамічними втулками 7, причому нагрівники 6 захищені додатковим чохлам 8. З метою стабілізації профілю температурного поля електродів 1 і 2 головної термопари ГТП робочі кінці термопар 5 і відповідні їм нагрівники 6 розміщені вздовж ГТП так, щоби повністю керувати розподілом температури вздовж її електродів. Але нагрівники 6 не повинні впливати на температуру робочого кінця ГТП.

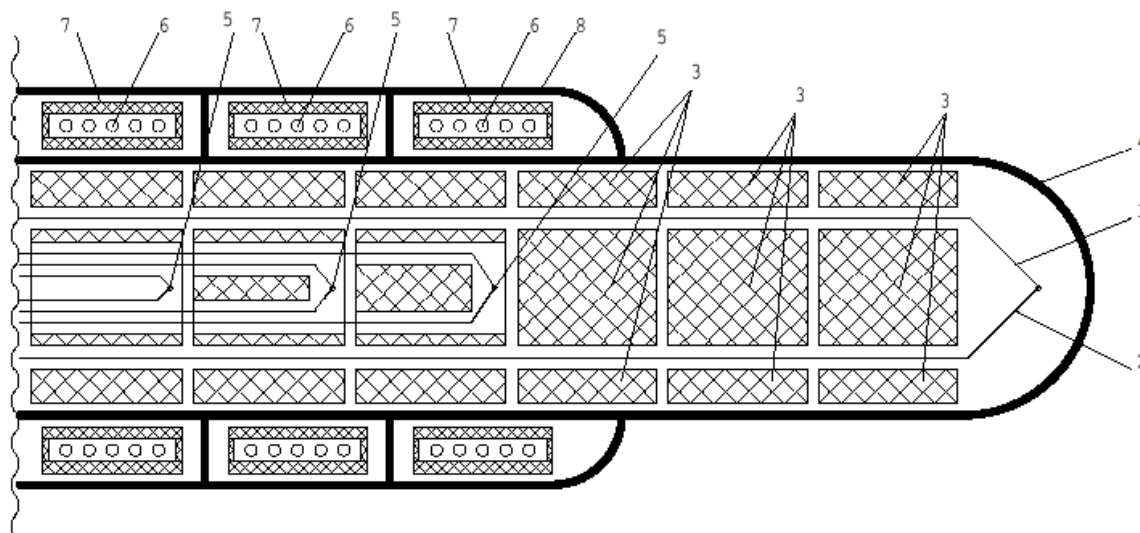


Рисунок 1.2 - Конструктивна схема ТЕП з КІТТ

Розміщення ТЕП з КІТТ в стінці об'єкта вимірювання температури подано на рисунку 1.3. В нижній половині рисунку 1.3 умовно показано можливі профілі температурного поля об'єкта. Товстою лінією показано профіль температурного поля, яке задають додаткові підсистеми регулювання температури. Таким чином, заданий профіль температурного поля ТЕП з КІТТ “накриває” можливі профілі температурного поля об'єкта, що не дозволяє зовнішньому температурному полю змінювати температуру ділянок ГТП та викликати появу похибки від набуті термоелектричної неоднорідності її електродів. Вплив змін температури вільних кінців на профіль температурного поля відчутний лише на ділянках, які завжди знаходяться при низькій температурі. Вони практично не деградують, тобто не мають набуті термоелектричної неоднорідності.

Слід відзначити, що усунення впливу термоелектричної неоднорідності електродів термопар на результат вимірювання безпосередньо не дає підвищення точності вимірювання температури. Але у ТЕП з КІТТ можна застосувати всі відомі методи підвищення точності вимірювання, зокрема корекції дрейфу функції перетворення ГТП [28 - 30] з достатньою

метрологічною надійністю навіть при змінах профілю температурного поля об'єкта вимірювання, хоча в [22] прямо заборонено застосовувати методи підвищення точності вимірювання температури, що базуються на корекції похибок термопар, в умовах, де проявляється термоелектрична неоднорідність електродів термопар.

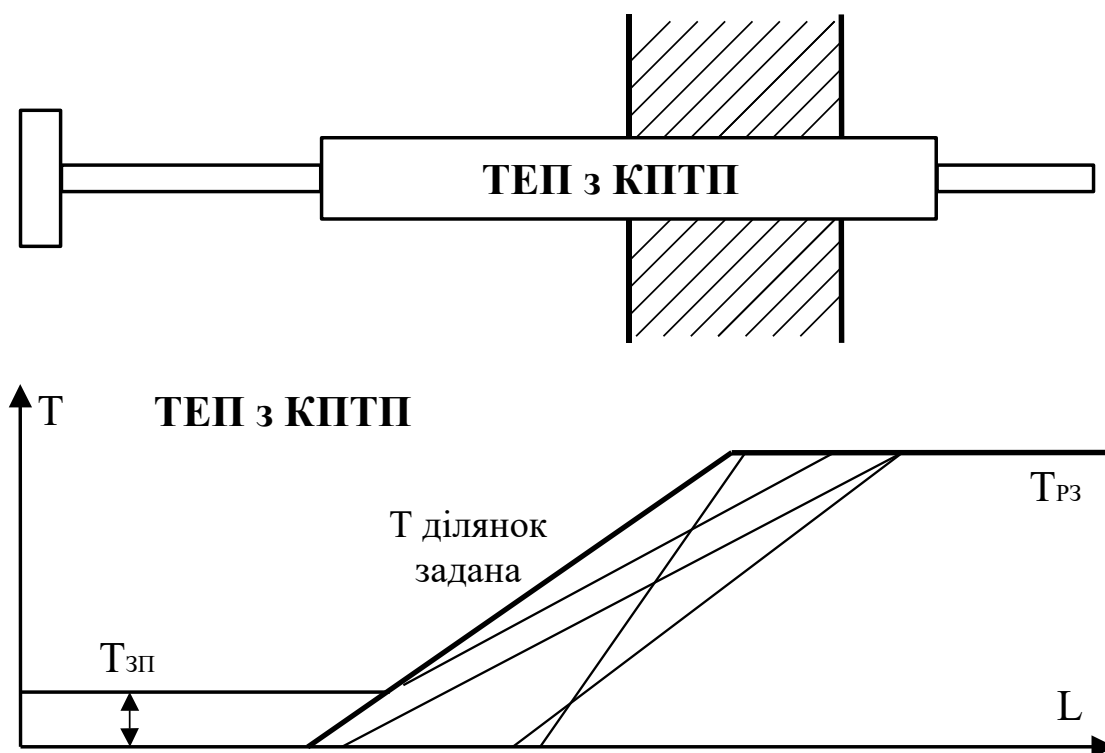


Рисунок 1.3 - Розподіл температур вздовж електродів головної термопарі ТЕП з КПТП, який встановлений в стінці печі

У даному параграфі, на основі аналізу відомих методів боротьби з дією впливаючих величин на результат вимірювання, запропоновано структуру ТЕП з КПТП, у якому похибка від набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів головної термопарі, що вимірює температуру об'єкта, не може себе проявити.

## 1.2 Аналіз похибок термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля

Для оцінки похибок вимірювання температури системою, що використовує запропонований у [42] ТЕП з КПТП, доцільно скласти рівняння вимірювання [43]. Таке рівняння повинно відображати процедури підвищення точності при використанні ТЕП з КПТП. Усунення впливу термоелектричної неоднорідності електродів термопар на результат вимірювання само по собі забезпечує підвищення точності вимірювання температури [43]. Але це не забезпечує відсутність похибки від другого прояву деградації електродів термопар – дрейфу їх функції перетворення [4, 5, 18]. Однак, якщо похибка від термоелектричної неоднорідності електродів термопар відсутня, то можна застосувати відомі методи корекції похибки від дрейфу функції перетворення термопар, розроблені у [28 - 30]. Але через те можливе підвищення точності вимірювання температури з достатньою метрологічною надійністю навіть в умовах зміни профілю температурного поля об'єкта вимірювання. Хоча у [22] підкреслено, що корекція похибок термопар, які експлуатувалися (тобто їх електроди деградували), недопустима. Тому необхідно провести відповідний аналіз похибок.

Для цього складемо рівняння вимірювання вимірювального каналу [43], який працює з ТЕП з КПТП. При цьому передбачено використання одного з відомих методів корекції похибки термопар – калібрування за допомогою температурного калібратора [31, 32]. При цьому необхідно розглянути два режими роботи системи вимірювання температури – режим саме калібрування та режим вимірювання поточної температури [43]. Для кожного режимів складемо окреме рівняння, що відображає вимірювальні перетворення, які відбуваються у каналі вимірювання температури у кожному режимі.

При калібруванні температуру робочого кінця головної термопари фіксує калібратор, у якому проходить фазовий перехід (плавлення або

кристалізація) реперного матеріалу – чистого металу або сплаву з наперед точно відомою температурою фазового переходу  $T_{FP}$ . Термо-е.р.с. головної термопари при цьому залишається постійною, а результат вимірювання системою температури порівнюється із значенням  $T_{FP}$ . В результаті порівняння отримуємо значення похибки  $\Delta_{TFP}$  в точці калібрування. Процес отримання значення поправки може бути описаний рівнянням [43]

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

де  $E_{RK}(T_{FP})$  – термо-е.р.с. робочого кінця головної термопари під час калібрування (відповідно до температури фазового переходу  $T_{FP}$ );

$E_{NEOD}(T_{FP})$  – термо-е.р.с. неоднорідності електродів головної термопари під час калібрування (відповідно до профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари під час фазового переходу з врахуванням дії підсистеми стабілізації цього профілю);

$E_{VK}(T_{VKFP})$  – термо-е.р.с. вільних кінців головної термопари під час калібрування;

$K_{VYM}(T_{FP})$  – функція перетворення каналу вимірювання термо-е.р.с. в точці діапазону, що відповідає температурі фазового переходу  $T_{FP}$  ;

$N_{FP}$  – паспортне значення (з врахуванням можливих поправок) температури фазового переходу калібратора  $T_{FP}$  ;

$\Delta_{TFP}$  – значення похибки вимірювання температури каліброваним вимірювальним каналом в точці діапазону, що відповідає температурі фазового переходу  $T_{FP}$  ;

$\rho_{TFP}$  – значення поправки для корекції похибки вимірювального каналу температури в точці діапазону, що відповідає температурі фазового переходу  $T_{FP}$  .

При вимірюванні температури, для зменшення похибки, проводиться корекція похибки головної термопари за допомогою поправки  $\rho_{TFP}$ , отриманої під час калібрування. Однак тоді температура робочого кінця головної термопари  $T_X$ , профіль температурного поля вздовж ТЕП з КПТП (зовнішній) 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 в цьому випадку описується рівнянням [43]

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

де  $E_{RK}(T_X)$  – термо-е.р.с. робочого кінця головної термопари під час вимірювання температури об'єкта  $T_X$ ;

$E_{NEOD}(T_X)$  – термо-е.р.с. неоднорідності електродів головної термопари під час вимірювання температури об'єкта (відповідно до профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари в цей час);

$E_{VK}(T_{XVK})$  – термо-е.р.с. вільних кінців головної термопари, що відповідає температурі  $T_{XVK}$  під час вимірювання температури об'єкта  $T_X$ ;

$K_{VYM}(T_X)$  – функція перетворення каналу вимірювання термо-е.р.с. в точці діапазону, що відповідає температурі об'єкта вимірювання;

$N_{TX}$  – скоригований результат вимірювання температури об'єкта  $T_X$ .

Якщо порівняти (1.6) і (1.7), то видно, що члени рівнянь у обох випадках хоча і відповідають один одному за змістом, повністю не співпадають. Таким чином повна корекція похибок вимірювального каналу при калібруванні не відбувається. Але можливі сильні кореляційні зв'язки між відповідними членами рівнянь. А це створює умови для зменшення впливу різних складових похибки вимірювального каналу на сумарну похибку вимірювання температури.



Якщо температури калібрування  $T_{FP}$  і вимірювання  $T_X$  мають близьке значення, то виникають сильні кореляційні зв'язки між термо-е.р.с. робочого кінця головної термопари при калібруванні  $E_{RK}(T_{FP})$  і при вимірюванні  $E_{RK}(T_X)$ . Адже похибка термопари має гладку функцію без розривів та стрибків. Тому, якщо температури калібрування  $T_{FP}$  і вимірювання  $T_X$  близькі, то і похибки при цих температурах мають майже однакове значення. Однак температури  $T_{FP}$  і  $T_X$  не рівні, тому виникає похибка  $\Delta_{FP-X}$ , яка в першому приближенні є функцією різниці температур  $\Delta_T = T_{FP} - T_X$ . Оцінка похибки  $\Delta_{FP-X}$ , за даними [43], не перевищує декількох десятих градуса.

Аналогічно до попереднього, якщо температури калібрування  $T_{FP}$  і вимірювання  $T_X$  близькі, то сильні кореляційні зв'язки мають термо-е.р.с. неоднорідності електродів головної термопари під час калібрування  $E_{NEOD}(T_{FP})$  і під час вимірювання  $E_{NEOD}(T_X)$ . Тому, згідно із [33], неоднорідність електродів термопар мало впливає на похибку вимірювання. Однак це твердження справедливе лише для об'єктів, що мають стійкий профіль температурного поля. Саме для створення дуже сильного кореляційного зв'язку між  $E_{NEOD}(T_{FP})$  та  $E_{NEOD}(T_X)$  стабілізовано профіль температурного поля в ТЕП з КПТП. Але така стабілізація не ідеальна. У загальному похибка стабілізації профілю температурного поля  $\Delta_{NS}$  у ТЕП з КПТП визначається такими складовими:

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

Перша складова –  $\Delta_{REG}$ , в свою чергу, визначається наступними складовими похибки:

- Нестабільністю (дрейфом)  $\Delta_{TCD}$  функцій перетворення термопар, що входять в склад підсистем регулювання температури (хоча сама похибка цих сенсорів усувається під час калібрування);
- Нестабільністю  $\Delta_{ETC}$  каналу вимірювання термо-е.р.с. термопар, що входять в склад підсистем регулювання температури (хоча сама похибка каналу вимірювання термо-е.р.с. термопар усувається під час калібрування);
- Похибкою  $\Delta_C$  регулювання (стабілізації) температури, яка виникає через те, що необхідні закони керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП достовірно не визначені.

Оцінити похибки  $\Delta_{TCD}$  і  $\Delta_{ETC}$  можна за даними, представленими в [4, 5] і [43] відповідно. Похибку  $\Delta_C$  складно оцінити теоретично через те, що всі зони трубчатої печі через тісні теплові зв'язки є взаємно залежними. Ця залежність визначається конструкцією ТЕП з КПТП (див. рисунок 1.2). Тому, для впровадження ТЕП з КПТП, необхідне розроблення та експериментальне дослідження відповідного методу регулювання температури.

Ще одна складова – похибка екранування  $\Delta_E$  визначається самою конструктивною схемою ТЕП з КПТП (див. рисунок 1.2), розмірами і використаними матеріалами. Її теоретична оцінка – складна задача через потребу створення моделі, яка враховує дію всіх теплових потоків у трубчатій печі. Тому простіше і доцільніше провести її експериментальну оцінку на відповідному макеті ТЕП з КПТП.

ТЕП з КПТП призначений для вимірювання температури технологічних об'єктів з відносно малими змінами температурних режимів – топки та котли електростанцій, металургійні печі, печі термообробки металевих виробів, тощо. Тому, якщо вдало вибрати температуру фазового переходу реперного матеріалу температурного калібратора, різниця температур  $\Delta_T = T_{FP} - T_X$  може бути невеликою і мало вплине на профіль температурного поля ТЕП з КПТП. Однак похибка  $\Delta_{\Delta T}$  від цієї різниці

температур не може бути чітко визначена наперед. Приблизно її можна оцінити за результатами досліджень [43].

Слід відзначити, що похибка стабілізації профілю температурного поля  $\Delta_{NS}$  безпосередньо в похибку вимірювання температури об'єкта не входить. Вона визначає лише залишкову похибку від набутої у процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності головної термопари.

Крім того, похибка  $\Delta_{REG}$  є причиною виникнення специфічної методичної похибки  $\Delta_M$ , пов'язаної з впливом теплового потоку від нагрівників трубчатої багато-зонної печі на температуру робочого кінця головної термопари. Оцінка цієї похибки проведена у [43].

Наступною парою членів рівнянь вимірювання (1.6) і (1.7), що теоретично не мають кореляційних зв'язків, є термо-е.р.с. вільних кінців головної термопари при калібруванні  $E_{VK}(T_{VKFP})$  та вимірювання  $E_{VK}(T_{XVK})$ . Тому, при розробленні вимірювальних каналів на базі ТЕП з КПТП, слід використати високоточні схеми корекції впливу температури вільних кінців термопар. Тоді, як це показано у [43], ця похибка може бути зведена до значень якими можна буде нехтувати.

Аналогічно кореляційні зв'язки між більшістю складових похибки функції перетворення каналу вимірювання термо-е.р.с. при калібруванні  $K_{VYM}(T_{FP})$  та вимірюванні  $K_{VYM}(T_X)$  є слабкими. Через малу чутливість термопар у вимірювальному каналі домінують адитивні та шумові похибки, а також залишкові похибки від дії завад нормального та загального виду. Тому можна вважати, що похибки  $K_{VYM}(T_{FP})$  та  $K_{VYM}(T_X)$  повністю входить в результат вимірювання температури. Це вимагає використання високоякісних каналів вимірювання термо-е.р.с. головної термопари.

Похибка лінеаризації функції перетворення термопар теж входить в похибку невідповідності  $K_{VYM}(T_{FP})$  і  $K_{VYM}(T_X)$ . Через те, що різниця температур  $\Delta_T = T_{FP} - T_X$  наперед не відома, різниця похибок лінеаризації буде сильно залежати від методу апроксимації функції перетворення термопар.

Однак мікроконтролери можуть забезпечити значення цієї похибки яким можна нехтувати.

Похибка паспортного значення температури фазового переходу калібратора  $N_{FR}$  повністю входить в похибку вимірювання температури об'єкта. Однак її ця похибка не відноситься до ТЕП з КППП, тому її дослідження є самостійною задачею.

Таким чином, наявність в складі ТЕП з КППП додаткових підсистем регулювання температури дає змогу йому створити свій, незалежний від профілів зовнішніх температурних полів, профіль температурного поля вздовж термоелектродів головної термопари і постійно витримувати його, тобто досягнути інваріантності головної термопари щодо профілів зовнішніх температурних полів. Це дає можливість використовувати термопари зі значною набутою в процесі експлуатації термоелектричною неоднорідністю електродів без небезпеки виникнення значної похибки від їх неоднорідності [43, 44].

У даному параграфі проведено достатньо детальний аналіз похибок, які виникають в процесі експлуатації ТЕП з КППП, що дало змогу виявити найменш досліджену складову похибки – метод керування профілем температурного поля трубчатої печі, що входить у склад ТЕП з КППП.

### 1.3 Відомі методи керування профілем температурного поля

Як було показано у попередньому параграфі, одним із недостатньо вивчених компонентів вимірювального каналу до якого підключений ТЕП з КППП, є метод керування профілем температурного поля який і стабілізує профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари, що безпосередньо вимірює температуру об'єкта. Однак для створення заданого профілю температурного поля вздовж довгих електродів ГТП необхідно використати, як це описано у попередньому параграфі, керувати профілем

температурного поля у трубчатій багато-зонній печі, яка входить у склад ТЕП з КПТП.

Слід відзначити, що керування профілем температурного поля у трубчатій багато-зонній печі є відомою, хоча доволі складною, задачею, яка розглянута у багатьох публікаціях. Найбільш повно це питання розглянуто у [30]. Тому необхідний аналіз проведемо на основі [30]. У [30] детально описано багато методів керування профілями температурного поля. Далі розглянуто два найпростіші з точки зору необхідних обчислювальних ресурсів методи.

*1) Метод кінцевих елементів*

Рівняння нестационарної теплопровідності, відповідно до [30], має вид

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q = c\rho \frac{dT}{dt}, \quad (1.8)$$

де  $T$ -температура ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t$  - час (сек);

$\lambda$  - Коефіцієнт теплопровідності ( $\text{Вт/м } ^{\circ}\text{C}$ );

$c$  - питома теплоємності ( $\text{Дж/кг } ^{\circ}\text{C}$ );

$\rho$  - питома щільність ( $\text{кг/м}^3$ );

$q$  - питома продуктивність внутрішніх джерел ( $\text{Вт/м}^3$ ).

Параметри  $\lambda, q, c, \rho$  процесу керування, у свою чергу, є функціями просторових координат. У загальному випадку такі функції можуть мати довільний вид. Але на практиці, у більшості випадків, вони є дискретними, оскільки конструкція досліджуваного об'єкта, як правило, є сукупністю обмеженого числа елементів із заданими теплофізичними властивостями. У такому випадку процес керування, що описується рівнянням (1.8), може бути замінений дискретною моделлю за просторовими координатами, що істотно спрощує аналіз.

Для простоти будемо вважати, що в даному процесі керування температура є функцією лише однієї координати –  $x$ . За іншими координатами профіль температурного поля однорідний. Відповідно до [30] це означає, що градієнт температури має тільки одну координату, спрямовану вздовж осі  $Ox$ .

Конструкція [30] містить сукупність однорідних елементів з різними параметрами, що може бути задано векторами

$$\begin{aligned} \Lambda &= (\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n), \\ C &= (c_1 c_2 \dots c_n), \\ R &= (r_1 r_2 \dots r_n), \\ Q &= (q_1 q_2 \dots q_n), \end{aligned} \quad (1.9)$$

Висота і ширина кожного з елементів конструкції становить відповідно  $H$  і  $B$ , а довжини їх різні та задаються вектором

$$(l_1 l_2 \dots l_n). \quad (1.10)$$

Сказане ілюструє рисунок 1.4, де у прямокутній системі координат зображено фрагмент, що складається з трьох однорідних елементів. Параметри цих елементів, а також пов'язані з ними характеристики процесу керування зображені з індексами  $i-1$ ,  $i$ ,  $i+1$ .

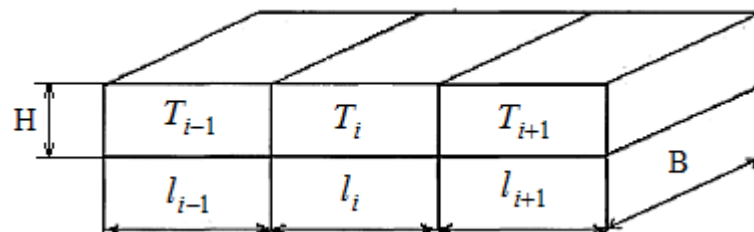


Рисунок 1.4 – Лінійна конструкція

Розглянемо довільну  $i$ -ту область, яка представляє собою паралелепіпед зі сторонами  $l_i, B_i, H_i$  та обмежену простором  $V_i$ . При цьому  $x \in l_i \Leftrightarrow x \in [x_{i-1}, x_i]$ .

Скористаємося формулою Остроградського для інтегрування (1.8) за область  $V_i$ . В результаті отримаємо [30]

$$\lambda_i \int_{S_i} \text{grad} T d\vec{\sigma} \int_{V_i} dv = c_i p_i \frac{d}{dt} \int_{V_i} T dv. \quad (1.11)$$

Параметри процесу керування  $\lambda_i, q_i, c_i$  і  $p_i$  винесені за знак інтегрування, оскільки у розглянутій області ці параметри не залежать від координат і є константами.

Розглянемо кожен із елементів (1.11). Почнемо з правої частини (1.11). Оскільки операції інтегрування та диференціювання лінійні, отримаємо

$$c_i p_i \int_{V_i} \frac{dT}{dt} dv = c_i p_i \frac{d}{dt} \int_{V_i} T dv. \quad (1.12)$$

Визначимо середню температуру  $T_i$  для  $i$ -ої області як

$$T_i = \frac{1}{v_i} \int_{V_i} T dv, \quad (1.13)$$

де  $v_i = \int_{V_i} dv$ .

Із (1.13) отримуємо

$$\int_{V_i} T dv = T_i v_i. \quad (1.14)$$

Після підстановки (1.14) в (1.12) отримаємо [30]

$$c_i p_i \int_{V_i} \frac{dT}{dt} dv = c_i m_i \frac{d}{dt} \frac{dT_i}{dt}, \quad (2.35)$$

де через  $m_i$  позначена маса матеріалу  $i$ -ої області, тобто  $m_i = p_i v_i$ .

При цьому температура всередині  $i$ -ої області вважається однаковою (рівномірно розподіленою).

При перетворенні лівої частини (1.11) згадаємо, що, для розглянутої моделі теплового процесу, градієнт температури має лише одну компоненту, яка спрямована вздовж осі  $Ox$ . Відповідно до цього для лівої частини запишемо

$$\lambda_i \int_{S_i} \text{grad} T d\vec{\sigma} = \int_{\sigma_i} \lambda_i \text{grad} T(x) d\vec{\sigma} + \int_{\sigma_{i-1}} \lambda_i \text{grad} T(x_{i-1}) d\vec{\sigma}, \quad (1.16)$$

де  $\sigma_i$  і  $\sigma_{i-1}$  – грані паралелепіпеда  $V_i$ , які задані відповідно рівняннями  $x = x_i$  і  $x = x_{i-1}$ .

Для підінтегрального виразу в (1.16) можна записати

$$\begin{aligned} \lambda_i \text{grad} T(x_i) &= \lambda_{i+1} \frac{T_{i+1} - T_i}{l_{i+1}}, \\ \lambda_i \text{grad} T(x_{i-1}) &= \lambda_{i-1} \frac{T_{i-1} - T_i}{l_{i-1}}. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Наслідком із (1.16) та (1.17) буде

$$\lambda_i \int_{S_i} \text{grad} T d\vec{\sigma} = \left[ \lambda_{i+1} \frac{T_{i+1} - T_i}{l_{i+1}} + \lambda_{i-1} \frac{T_{i-1} - T_i}{l_{i-1}} \right] BH. \quad (1.18)$$

Введемо позначення, яке відповідає провідності тепла



$$\gamma_{i-1} = \frac{\lambda_{i-1} BH}{l_{i-1}}, \quad \gamma_{i+1} = \frac{\lambda_{i+1} BH}{l_{i+1}}. \quad (1.19)$$

З урахуванням (1.19) і (1.18) отримаємо

$$\lambda_i \int_{S_i} \text{grad} T d\vec{\sigma} = \gamma_{i+1} (T_{i+1} - T_i) + \gamma_{i-1} (T_{i-1} - T_i). \quad (1.20)$$

Другий доданок у правій частині (1.20) представляє собою повну потужність, що у даний момент часу виділяється в області  $V_i$  внутрішніми джерелами. Введемо позначення

$$\int_{V_i} q_i dv = p_i. \quad (1.21)$$

На підставі (1.14), (1.20) і (1.21) представимо (1.11) у наступному виді [30]

$$c_i m_i \frac{dT_i}{dt} = \gamma_{i+1} (T_{i+1} - T_i) + \gamma_{i-1} (T_{i-1} - T_i). \quad (1.22)$$

На основі (1.22) можливі узагальнення. У випадку двомірного теплового процесу, коли температура є функцією двох координат, має місце мережева плоска модель, для  $ij$ -го елемента якої маємо

$$\begin{aligned} c_{i,j} m_{i,j} \frac{dT_{i,j}}{dt} = & \gamma_{i+1,j} (T_{i+1,j} - T_{i,j}) + \gamma_{i-1,j} (T_{i-1,j} - T_{i,j}) + \\ & + \gamma_{i+1,j} (T_{i+1,j} - T_{i,j}) + \gamma_{i-1,j} (T_{i-1,j} - T_{i,j}) + p_{i,j}. \end{aligned} \quad (1.23)$$

Для теплового процесу, коли температура є функцією трьох координат, має місце просторова мережева модель. Тоді для  $ijk$ -го елемента такої моделі маємо [30]

$$\begin{aligned} c_{i,j,k} m_{i,j,k} \frac{dT_{i,j,k}}{dt} = & \gamma_{i+1,j,k} (T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k}) + \gamma_{i-1,j,k} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) + \\ & + \gamma_{i+1,j,k} (T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k}) + \gamma_{i-1,j,k} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) + \\ & + \gamma_{i+1,j,k} (T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k}) + \gamma_{i-1,j,k} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) + p_{i,j}. \end{aligned} \quad (1.24)$$

Іншим узагальненням рівняння (1.22) є дискретна модель багато-зонної печі [30], яка складається із  $n$  однорідних елементів. Для такої моделі отримаємо

$$c_i m_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{l=1}^n \gamma_{i,l} (T_l - T_i) + p_i, \quad (1.25)$$

де  $\gamma_{ij} = \gamma_{i,j}$ , і при цьому елементи типу  $\gamma_{i,i}$ , введені для симетрії моделі, на процес не впливають.

Введемо позначення

$$\Gamma = \text{diag} \left( \sum_{i=1}^n \gamma_{1,i}, \sum_{i=1}^n \gamma_{2,i}, \dots, \sum_{i=1}^n \gamma_{n,i} \right). \quad (1.29)$$

З урахуванням (1.29) і прийнятих раніше змінних представимо

$$CM \frac{dT}{dt} + \Gamma T - \gamma T = P. \quad (1.30)$$

Переходячи в (1.30) до зображень за Лапласом, отримаємо

$$pCM + \Gamma - \gamma = P. \quad (1.31)$$

Для однозонного об'єкта керування, відповідно до (1.22), отримаємо

$$cm \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^n \gamma_{i0} (T_0 - T) + P, \quad (1.32)$$

де  $T_0$  – температура навколишнього середовища;

$\gamma_{i0}$  – теплопровідності відносно цього навколишнього середовища.

Слід зауважити, що температура, яка розрахована згідно із (1.30), при постійній підведеній потужності буде рости до безкінечності. Тому, для підвищення адекватності опису об'єкта керування, введемо в (1.30) матрицю

$$\Gamma_0 = \text{diag}(\gamma_{1,0}, \gamma_{2,0}, \dots, \gamma_{n,0}), \quad (1.33)$$

що містить теплопровідності, які визначено у (1.32).

Тоді (1.30) можна представити у вигляді

$$CM \frac{dT}{dt} + (\Gamma + \Gamma_0 - \gamma)T = P. \quad (1.34)$$

Відповідно до [30], (1.34) може служити основою для обчислення приростів потужності у зонах трубчатої печі, необхідних для ліквідації відхилень профілю температурного поля, які можуть виникнути під час експлуатації ТЕП з КІТТП.

## 2) Метод гармонійного балансу

Як було показано у (1.34), керувати профілем температурного поля ТЕП з КІТТП можна відповідно до моделі теплопровідності. Розглянемо

режим періодичного впливу профіль температурного поля ТЕП з КПТП. Для потужності в кожній із зон трубчатої печі можна записати

$$P(t) = \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ \dots\dots\dots \\ P_m(t) \end{bmatrix}, \quad (1.35).$$

де  $m$  – кількість нагрівачів.

Позначимо період регулювання профілю температурного поля  $T_R$ . Відповідно до цього вектор потужності розкладемо у комплексний ряд Фур'є [30]

$$P(t) = \begin{bmatrix} \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_{1n} e^{jn\frac{2n}{T_R}t} \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_{2n} e^{jn\frac{2n}{T_R}t} \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_{mn} e^{jn\frac{2n}{T_R}t} \end{bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} P_{1n} \\ P_{2n} \\ \dots\dots\dots \\ P_{mn} \end{bmatrix} e^{jn\frac{2n}{T_R}t}, \quad (1.36)$$

де

$$P_{in} = \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} P_i(t) e^{-jn\frac{2n}{T_R}t} dt, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1.37)$$

це комплексна амплітуда  $n$ -ої гармоніки потужності в  $i$  - тій зоні трубчатої печі, що входить у ТЕП з КПТП.

При періодичному впливі нагрівачів зміна температури в зонах трубчатої печі також буде періодичною. При цьому, як було прийнято, період зміни потужності дорівнює  $T_R$ .

Для аналізу зміни температури в кожній із зон трубчатої печі  $T_1(t), T_2(t), \dots, T_q(t)$  також розкладемо її в комплексний ряд Фур'є. При цьому, для вектора температури, яка встановиться у зонах трубчатої печі, отримаємо [30]

$$T(t) \sum_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} T_{1k} \\ T_{2k} \\ \dots \\ T_{qk} \end{bmatrix} e^{jk\omega \frac{2n}{T_R} t}, \quad (1.38)$$

де

$$T_{jk} = \frac{1}{T_R} \int_0^{T_R} T_j(t) e^{-jk\omega \frac{2n}{T_R} t} dt, \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (1.39)$$

це комплексна амплітуда  $k$ -ої гармоніки температури в  $j$ -тої зони трубчатої печі, що входить у ТЕП з КПТП. Аналогічно до вектора  $n$ -ої гармоніки потужності введемо окреме позначення також для вектора  $k$ -ої гармоніки температури

$$P_n = \begin{bmatrix} P_{1n} \\ P_{2n} \\ \dots \\ P_{mn} \end{bmatrix}. \quad (1.40)$$

$$T_k = \begin{bmatrix} T_{1k} \\ T_{2k} \\ \dots \\ T_{mk} \end{bmatrix}. \quad (1.41)$$

З врахуванням (1.40) та (1.41) представимо (1.36) і (1.38) у виді

$$P(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} P_n e^{jn \frac{2n}{T_k} t}, \quad (1.42)$$

$$T(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} T_k e^{jn \frac{2n}{T_k} t}, \quad (1.43)$$

Введемо позначення

$$CM = A, \Gamma + \Gamma_0 - 0 = G. \quad (1.44)$$

З врахуванням (1.44) вихідна система (1.34) прийме вигляд

$$A \frac{dT}{dt} + GT = P. \quad (1.45)$$

Рівняння (1.45) з точки зору керування профілем температурного поля трубчатою піччю, що входить у ТЕП з КППП, аналогічне (1.34). Відповідно до [30], (1.45) також може служити основою для обчислення приростів потужності у зонах трубчатої печі, необхідних для ліквідації відхилень профілю температурного поля, які можуть виникнути під час експлуатації ТЕП з КППП.

Як видно з викладеного, теоретично строго доведені методи керування профілем температурного поля (як метод кінцевих елементів, так і метод гармонійного балансу) мають велику обчислювальну складність. Для їх

використання, як це видно із (1.34) та (1.45), необхідно використовувати доволі складне програмне забезпечення, наприклад, MATLAB. Тому не може бути мови про їх використання у системах вимірювання температури на базі мікропроцесорів або мікроконверторів.

У даному параграфі проведено аналіз класичних, строго теоретично доказаних методів керування профілем температурного поля багато-зонних теплових об'єктів. Показано, що ці методи мають настільки велику обчислювальну складність, що не можуть бути використані для керування профілем температурного поля багато-зонної трубчатой печі, що входить у склад ТЕП з КПТП.

#### 1.4 Напрямки подальших досліджень

Аналіз рівнянь (1.34) та (1.45) дозволяє оцінити обчислювальні ресурси, потрібні для формування керуючої дії в зонах багато-зонного об'єкта керування. Зокрема, для керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП. Як видно з цих рівнянь обчислювальні ресурси простих 8-мі бітних мікроконтролерів і мікроконверторів є явно недостатні для стабілізації ними профілю температурного поля ТЕП з КПТП з використанням розглянутих у параграфі 1.3 відомих методів керування багато-зонними об'єктами. Тобто, апаратне забезпечення вимірювального каналу на базі ТЕП з КПТП, яке, згідно із [43], базується на мікроконверторі ADuC-834 [47] фірми Analog Devices [48], вступає у суперечність з обчислювальною складністю традиційних, строго доведених методів керування профілем температурного поля.

У [43, 44] для керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП були запропоновані два спрощені методи. Перший з них базується на рішенні системи лінійних рівнянь, яка дає змогу обчислити необхідні керуючі дії для ліквідації відхилень профілю температурного поля у трубчатій печі, що

входить у ТЕП з КПТП. Обчислювальна складність цього першого методу майже на три порядки, менша за обчислювальну складність методів, які базувалися на системах рівнянь виду (1.34) та (1.45). Мала обчислювальна складність пропонованого у [43] першого методу керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП проявляє себе при рішенні згаданої системи лінійних рівнянь методом Гауса [48]. У такому випадку необхідний обсяг пам'яті для рішення згаданої системи лінійних рівнянь визначається обсягом пам'яті, потрібним для зберігання коефіцієнтів та результатів вимірювання самої системи лінійних рівнянь. Для рішення системи лінійних рівнянь додатково до обсягу пам'яті коефіцієнтів та результатів вимірювання температури потрібно лише чотири комірки оперативної пам'яті.

Але слід зауважити, що в основу запропонованого у [43] методу керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП, що базується на рішенні системи лінійних рівнянь, було покладено емпірично сформульовані правила, які чітко суперечать законам термодинаміки [50]. Саме тому отримана за цими правилами система рівнянь є лінійною. Хоча, як показано у [43], при невеликих відхиленнях профілю температурного поля, метод працює (може успішно ліквідувати за декілька послідовних циклів керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП невеликі відхилення цього поля від заданого профілю).

Однак запропонований у [43] метод керування профілем температурного поля трубчатої печі, що входить у ТЕП з КПТП, має, як це видно із [43], доволі малу збіжність. Це проявляється у тому, що ліквідація відхилень профілю температурного поля від заданого, як це показано у [43], відбувається за досить велику кількість ітераційних циклів навіть при малих початкових відхиленнях профілю температурного поля. Аналіз процесу ліквідації відхилень профілю температурного поля від заданого показав, що основною причиною малої збіжності методу керування профілем температурного поля, який базується на рішенні системи лінійних рівнянь, є мала точність формування керуючої дії. Тобто рішення системи лінійних



рівнянь не достатньо добре «вгадують» значення приростів потужності нагрівачів, які повинні ліквідувати відхилення поточного профілю температурного поля від заданого.

Мала збіжність метод керування профілем температурного поля трубчатої печі, що входить у ТЕП з КПТП, при умові повільних змін профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури (сезонні зміни температури оточення), незначно зменшує стабільність профілю температурного поля ТЕП з КПТП. Це означає, що корекція похибки від набутої термоелектричної неоднорідності головної термопари, що входить у склад ТЕП з КПТП буде ефективною [43]. Але при великій інерційності об'єкта вимірювання температури кожен ітераційний цикл керування буде мати доволі велику тривалість. Тоді, при достатньо швидкій зміні профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури (погодні або навіть добові зміни температури оточення), метод керування профілем температурного поля трубчатої печі, що входить у ТЕП з КПТП і базується на рішенні системи лінійних рівнянь може не встигати ліквідувати відхилення профілю температурного поля від заданого до того, коли зміни профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури стануть суттєвими з точки зору ефективності зменшення впливу похибки від набутої термоелектричної неоднорідності головної термопари, що входить у склад ТЕП з КПТП.

Тому у [44] запропоновано ітераційний нейромережевий метод керування профілем температурного поля трубчатої печі, що входить у ТЕП з КПТП. Основною ідеєю цього методу є припущення, що відповідно навчена нейронна мережа зможе краще «вгадувати» значення приростів потужності нагрівачів, які повинні ліквідувати відхилення поточного профілю температурного поля від заданого.

Однак зрозуміло, що запропонований [44] ітераційний нейромережевий метод керування профілем температурного поля також, як і метод, що передбачає рішення системи лінійних рівнянь, є емпіричним і базується на

правилах, які чітко суперечать законам термодинаміки [50]. Просто навчена нейронна мережа може краще відбивати закономірності, які пов'язують закономірності зміни температури окремих зон трубчатої печі, що входить у ТЕП з КПТП, із змінами потужності нагрівачів зон.

Тому, для обґрунтування можливості використання запропонованого у [44] ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у ТЕП з КПТП, його треба детально дослідити. При цьому необхідно, по-перше, доказати, що процес керування профілем температурного поля зон трубчатої печі за допомогою цього методу є збіжним. Це означає, що при різних комбінаціях відхилень поточного профілю температурного поля у зонах трубчатої печі від заданого сформовані навченою нейронною мережею зміни потужності нагрівачів будуть краще адекватні до насправді потрібних. Таким чином, необхідна для ліквідації відхилень профілю температурного поля від заданого кількість ітераційних циклів буде меншою, тобто процес керування профілем температурного поля трубчатої печі, що входить у ТЕП з КПТП, буде вимагати меншого часу. А це підвищить достовірність та метрологічну надійність корекції похибки від набутої термоелектричної неоднорідності головної термопари, що входить у склад ТЕП з КПТП.

Наступним кроком у дослідженні запропонованого у [44] ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у зонах трубчатої печі, що входить у ТЕП з КПТП, є визначення параметрів збіжності цього методу керування. Зокрема, дуже важливою є приблизна оцінка залежності кількості ітерацій, необхідної для досягнення заданого профілю температурного поля від параметрів відхилень поточного профілю температурного поля у зонах трубчатої печі від заданого.

Як показано у [51], подібні дослідження можна проводити теоретично, експериментально та за допомогою імітаційного моделювання. Теоретичні дослідження є найбільш повними. Але одночасно вони є найбільш складними у проведенні через трудомісткість розроблення математичних описів

фізичних процесів та об'єктів та високу кваліфікацію спеціалістів, потрібну для їх проведення. Одночасно математичні описи фізичних процесів та об'єктів, на яких базуються теоретичні дослідження, не завжди повністю адекватні цим процесам. Таким чином, використання теоретичних досліджень для досягнення мети даної роботи не можна вважати доцільним і прийнятним.

Найвищу достовірність досліджень забезпечують експериментальні дослідження. Але такі дослідження мають найвищу трудомісткість. Також такі дослідження обмежені доступним експериментальним обладнанням. У загальному, через доступні можливості технології далеко не завжди можна фізично провести дослідження всіх варіантів можливих комбінацій умов, що можуть виникнути на практиці. А потреба виготовлення багатьох різних варіантів технологічного обладнання для проведення дослідження можливих аспектів поведінки досліджуваного пристрою або методу, зазвичай, дуже трудомістке або взагалі неможлива через відсутність матеріалів із потрібними властивостями. Таким чином, експериментальні дослідження всіх властивостей даного методу не можна вважати недоцільними.

Оптимальне поєднання трудомісткості, обсягу досліджень, гнучкості та достовірності найкраще забезпечують методи моделювання. Їх відносно малу трудомісткість забезпечує відносно мала трудомісткість побудови математичних моделей окремих елементів ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у багато-зонній печі, яка входить у склад ТЕП з КПТП. При цьому можливий максимальний обсяг досліджень методу через те, що можливе майже довільне задання властивостей та параметрів елементів, які моделюють досліджувані властивості методу. Таким чином імітаційні дослідження забезпечують також гнучкість проведення досліджень. Адаже можна вивчити особливості поведінки досліджуваного методу для умов, які не вдається отримати на практиці.

Достатньо високу достовірність досліджень можна забезпечити за рахунок відносної простоти математичних моделей окремих елементів, що входять у досліджувану систему керування профілем температурного поля трубчатої печі. При цьому математичні моделі повинні мати можливості легкої та достовірної перевірки. Ці математичні моделі повинні забезпечити можливість вивчити особливості поведінки досліджуваного методу для умов, які не вдається отримати на практиці. Це забезпечує визначення граничних можливостей досліджуваного методу.

Розглянуті особливості різних методів дають можливість вибрати оптимальний метод дослідження – метод імітаційного моделювання. Тепер можна сформулювати мету даної дипломної роботи магістра.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної дипломної роботи магістра є дослідження реакції на відхилення профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, призначеній для реалізації термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, при ітераційному нейромережевому керуванні профілем температурного поля.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- 1) Провести аналіз методів і засобів реалізації заданого профілю темп поля у багатозонній трубчатій печі та вибрати напрямки подальших досліджень;
- 2) Провести аналіз реалізації ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі та необхідного навчання нейронної мережі.
- 3) Розробити методику використання математичної моделі багато-зонної трубчатої печі для навчання нейронної мережі ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля.
- 4) Розробити методику проведення досліджень нейромережевого методу керування профілем температурного поля;
- 5) Підготувати імітаційні дослідження збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля;

б) Підготувати імітаційні дослідження впливу амплітуди відхилень на кількість ітерацій для ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля.

У даному параграфі, на базі аналізу відомих методів керування профілем температурного поля визначено напрями подальших досліджень ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у зонах трубчатої печі, що входить у ТЕП з КППП.

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 вимагають додаткового дослідження.

2) на основі аналізу відомих загальних методів керування профілем температурного поля сформовано співвідношення, яке може бути використано для керування профілем температурного поля.

3) на основі аналізу відомих методів керування профілем температурного поля розроблено напрями подальших досліджень процесу регулювання температури у багато-зонній печі, що входить у склад ТЕП з КППП, а також сформульовано мету та задачі цих досліджень.

## 2 ПІДГОТОВЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

### 2.1 Ітераційний нейромережевий метод керування профілем температурного поля

Як було показано у попередньому розділі процес стабілізації профілю температурного поля вздовж головної термопари за допомогою багато-зонної трубчатої печі, що входить у склад ТЕП з КППП, вимагає відповідного методу керування профілем температурного поля у згаданій багато-зонній трубчатій печі. У [43] було запропоновано простий ітераційний метод керування профілем температурного поля, який базувався на рішенні системи лінійних рівнянь.

Суттєвою перевагою ітераційного методу керування профілем температурного поля, який базувався на рішенні системи лінійних рівнянь, є розімкнена структура системи регулювання, у ній відсутній від'ємний зворотний зв'язок у реальному часі, який, разом з інерційністю процесів теплопередачі, є причиною схильності до самозбудження традиційних систем регулювання. Тому процес керування профілем температурного поля при використанні даного методу є циклічним. У кожному наступному циклі спочатку вимірюють температуру всіх зон багато-зонної трубчатої печі, обчислюють необхідну керуючу дію та реалізують її. Наступний цикл починається тільки після закінчення перехідного процесу встановлення температури зон печі.

Недоліком дослідженого у [43] методу є невисока точність обчислення необхідних змін потужності нагрівачів тому, що результат рішення системи лінійних рівнянь, через те, що вона була складена на основі припущень, які суперечать основам термодинаміки (хоча ітераційний характер процесу керування профілем температурного поля згладжує згадану суперечність) не

достатньо відповідає необхідним змінам потужності нагрівачів. Хоча для стабілізації профілю температурного поля вздовж головної термопари при невеликих відхиленнях профілю температурного поля вздовж головної термопари ітераційний метод керування профілем температурного поля, який базувався на рішенні системи лінійних рівнянь, як це показано у [43], працює достатньо добре.

Однак при великих змінах температури зон багато-зонної трубчатої печі, що входить у склад ТЕП з КПТП (а саме великих змін температури зон потребують розроблені у [44] оперативні методи визначення похибки ТП і діагностування стану її електродів) ітераційний метод керування профілем температурного поля, який базувався на рішенні системи лінійних рівнянь працює погано. Хоча збіжність цього методу зберігається, тобто наступні ітерації ведуть до зменшення відхилень профілю температурного поля вздовж головної термопари за допомогою багато-зонної трубчатої печі від заданого профілю температурного поля, кількість ітерацій для входження цього профілю температурного поля у зону допустимих відхилень стає настільки великою (декілька десятків), що, наприклад, процес діагностування стану електродів головної термопари втрачає зміст. При цьому цей недолік ітераційного методу керування профілем температурного поля, який базувався на рішенні системи лінійних рівнянь принциповий, він виникає з прийнятих припущень, які суперечать законам термодинаміки. При великих змінах температури ці припущення викликають великі похибки розрахунку керуючої дії. Тому, навіть якщо ітераційний процес сходиться, його сходження вимагає багатьох циклів.

Таким чином, для вдосконалення дослідженого у [43] методу ітераційного методу керування профілем температурного поля, який базувався на рішенні системи лінійних рівнянь (і збереження перелічених вище його переваг), необхідно лише значно підвищити точність обчислення необхідних змін потужності нагрівачів, особливо при великих змінах температури зон багато-зонної трубчатої печі. На сьогодні кращі відомі

методи регулювання фізичних величин використовують нейронні мережі [52]. За рахунок фази навчання нейронних мереж адаптується до умов роботи, тому вона забезпечує кращу якість процесу регулювання. Як недолік нейронним мережам приписують високі вимоги до необхідних обчислювальних ресурсів.

Але високі вимоги до необхідних обчислювальних ресурсів, як це показано у [30], потрібні лише під час навчання нейронної мережі. А при її використанні необхідні обчислювальні ресурси, як це показано у [30], приблизно у 10000 разів менші. Тому нейронні мережі можуть бути застосовані у мікроконтролерних системах, зокрема, у системі керування профілем температурного поля. Тому вимірювальний канал, який використовує ТЕР з КППП, повинен мати ієрархічну структуру – на верхньому ієрархічному рівні системи потрібні нейронні мережі навчаються, а на нижньому – використовуються. Крім того, на нижньому ієрархічному рівні повинні бути передбачені апаратні засоби, які забезпечать формування навчальної вибірки для нейронних мереж, які мають навчатися на верхньому рівні.

Слід відзначити, що розглянуті у [52] методи нейромережевого керування вимагають для навчання нейронної мережі достатньо точних математичних моделей об'єкта керування. Інший варіант, розглянутий у [52], передбачає навчання нейронної мережі безпосередньо на об'єкті керування, який оснащений високоточним регулятором. Тоді нейронна мережа навчається імітувати такий високоточний регулятор. Для ТЕР з КППП на базі розробленої багато-зонної трубчатої печі, через наявність багатьох зон нагріву та значний тепловий зв'язок між цими зонами, ідентифікація параметрів математичної моделі з високою точністю є дуже складною задачею [51] і вимагає відносно дуже великого об'єму експериментальних досліджень безпосередньо на об'єкті вимірювання температури.

Розроблений у [44] ітераційний нейромережевий метод керування профілем температурного поля багато-зонної трубчатої печі



характеризується такими особливостями:

1. На нейронну мережу подають не тільки відхилення температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі від заданого профілю температурного поля (як це робиться у звичайному і нейромережевому регуляторі [44]), а додатково значення температури всіх зон. Так нейронна мережа зможе врахувати залежність теплоємності та теплопровідності матеріалів багато-зонної трубчатої печі. Саме такі залежності формують нелінійні властивості багато-зонної трубчатої печі. Власне таким чином вдається забезпечити переваги пропонованого у [44] ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля над методом, що базується на рішенні системи лінійних рівнянь [43]. Ітераційний нейромережевий метод керування профілем температурного поля буде краще «вгадувати» потрібні зміни потужності нагрівачів багато-зонної трубчатої печі, необхідні для ліквідації відхилення температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі від заданого профілю температурного поля.
2. Для навчання нейронної мережі не створюють спеціальну математичну модель багато-зонної трубчатої печі, яка буде мати свої похибки, а проводять навчання безпосередньо на об'єкті вимірювання температури. У такому випадку математична модель багато-зонної трубчатої печі не потрібна (а це значно зменшує трудомісткість використання ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля багато-зонної трубчатої печі та виключає вплив на навчання нейронної мережі похибок, викликаних неповною адекватністю математичної моделі об'єкта вимірювання і керування).

Структура нейромережевого регулятора температури зон ТЕП з КПТП, що реалізує розроблений у [44] ітераційний нейромережевий метод керування профілем температурного поля багато-зонної трубчатої печі

подана на рисунку 2.1. У цю структуру входять нагрівачі Н всіх зон багато-зонної трубчатої печі, що входить у ТЕП з КПТП, сенсори Д цих зон (термопари), підключені до відповідних входів багато-точкової вимірювальної підсистеми БВП. З підсистеми БВП результати вимірювання температури всіх зон поступають як на входи нейронної мережі НМ, так і на входи блоків віднімання БВ. Виходи нейронної мережі НМ поступають на входи багатоканального блока керування потужністю БК. Виходи каналів БК підключені до нагрівачів Н відповідних зон багато-зонної трубчатої печі. Температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі (її нагрівачів Н) задаються блоком задання температури БЗt°. Виходи блоку задання температури БЗt° підключені до відповідних входів блоку віднімання БВ. Отримані на виході блоку віднімання БВ відхилення температури окремих зон багато-зонної трубчатої печі від заданого профілю температурного поля поступають на входи нейронної мережі НМ.

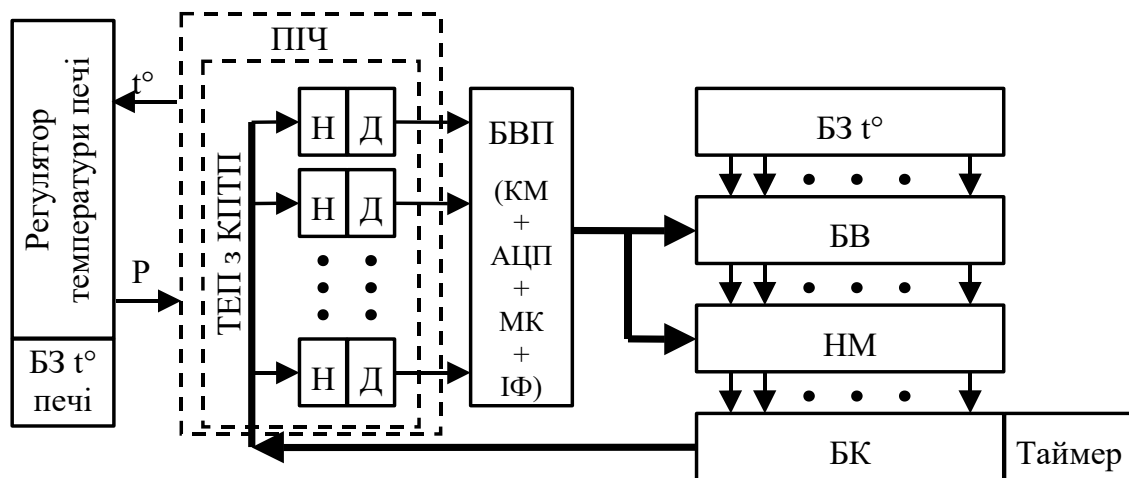


Рисунок 2.1 - Структурна схема нейромережевого регулятора в режимі підтримання профілю температурного поля ТЕП з КПТП

У склад багато-точкової вимірювальної підсистеми БВП входять комутатор КМ сигналів ТП кожної зони багато-зонної трубчатої печі, аналого-цифровий перетворювач АЦП, мікроконтролер опрацювання

поточних результатів аналого-цифрового перетворення МК та інтерфейсний модуль ІФ. Для синхронізації роботи блоків керування БК, які реалізуються як широтно-імпульсні модулятори та формування затримки між циклами керування для завершення перехідних процесів від зміни потужності нагрівачів Н у структуру нейромережевого регулятора температури введено також Таймер. А сам ТЕП з КПТП розміщується на об'єкті вимірювання температури, який на рисунку 2.1 позначений як ПЧ. Об'єкт ПЧ оснащений своїми (штатними) Регулятором температури і блоком задання температури  $B3t^\circ$ .

Нейромережевий регулятор температури зон ТЕП з КПТП, що реалізує розроблений у [44] ітераційний нейромережевий метод керування профілем температурного поля багато-зонної трубчатої печі працює циклічно. На початку циклу БВП вимірює поточну температуру кожної зони ТЕП з КПТП. На входи НМ поступають значення поточної температури кожної зони із БВП та її відхилення від заданої із БВ. На другий вхід БВ поступають значення температур кожної зони, які задають потрібний профіль температурного поля багато-зонної трубчатої печі. Ці значення зберігаються у блоці задання температури  $B3t^\circ$ .

Нейронна мережа НМ обчислює необхідні зміни потужності нагрівачів кожної зони багато-зонної трубчатої печі, а блоки керування БК змінюють шпаруватість імпульсів, що поступають на нагрівачі Н всіх зон цієї печі. Потім ця шпаруватість не змінюється на протязі часу, потрібного для завершення теплових перехідних процесів у всіх зонах ТЕП з КПТП (трьох постійних часу).

Особливістю описаного нейромережевого регулятора температури зон багато-зонної трубчатої печі є відсутність до самозбудження. Ця властивість викликана тим, що він реалізує розімкнуту систему автоматичного регулювання. У таких системах відсутній від'ємний зворотний зв'язок у реальному часі. Справа у тому, що, через тривалі перехідні процеси теплового характеру від'ємний зворотний зв'язок у реальному часі може

перетворюватися у додатний зворотний зв'язок. У описаному нейромережевому регуляторі температури введено спеціальну затримку на закінчення перехідних процесів теплового характеру. Тому перетворення від'ємного зворотного зв'язку у додатний зворотний зв'язок через залишкові впливи теплового перехідного процесу неможливі, тому описаний нейромережевий регулятор температури має високу стійкість (не має схильності до самозбудження).

Через те, що кількість зон багато-зонної трубчатого печі, для створення заданого профілю температурного поля багато-зонної трубчатого печі з достатньою для значного зменшення впливу похибки від набутої термоелектричної неоднорідності повинна бути доволі великою (не менше восьми зон для зони градієнту профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури протяжністю 1...1,5 метра), кількість виходів нейронної мережі повинна бути рівна кількості нагрівачів  $N$  зон, тобто кількості зон багато-зонної трубчатого печі.

Як нейронну мережу НМ у складі нейромережевого регулятора можна використати широко відомий тришаровий персептрон [53]. Його структура подана на рисунку 2.2. Він повинен мати вдвічі більше входів, ніж кількість зон у складі багато-зонної трубчатого печі, що входить у ТЕП з КПТП, а виходів повинен мати стільки ж, скільки зон цієї печі.

Основним завданням нейронної мережі НМ є формування такої керуючої дії (шпаруватості імпульсів, що поступають на нагрівачі  $N$ ), щоби час переходу від поточного профілю температурного поля вздовж електродів головної ТП (всіх зон багато-зонної трубчатого печі) до заданого був мінімальний. Для цього НМ має бути відповідно навчена. Тому процедура навчання нейронної мережі НМ є важливою для отримання високої якості керування профілем температурного поля багато-зонної трубчатого печі, що входить у ТЕП з КПТП.

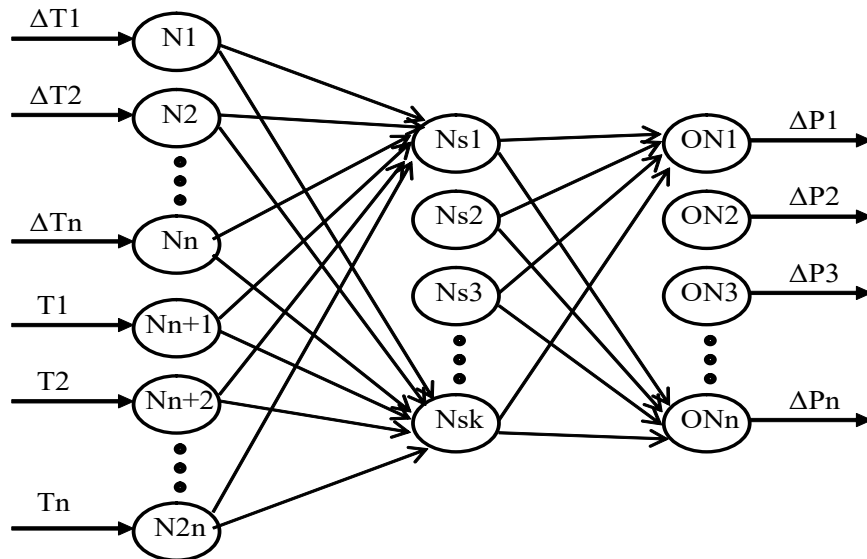


Рисунок 2.2 -. Структура НМ, що використовується для формування керуючої дії

У даному параграфі розроблено не схильний до самозбудження ітераційний нейромережвий метод керування профілем температурного поля, який може бути реалізованим за допомогою дешевих 8-ми бітних мікроконтролерів, і забезпечує значно швидшу за аналогічні відомі методи ліквідацію відхилень поточного профілю температурного поля багато-зонної трубчатої печі від заданого.

## 2.2 Методика навчання нейронної мережі регулятора

Для навчання нейронної мережі НМ, що входить у склад описаного у попередньому параграфі нейромережевого регулятора (див. рисунки 2.1 і 2.2) необхідно створити навчальну вибірку [53], де заданим відхиленням температури кожної зони багато-зонної трубчатої печі, що входить у ТЕП з КПТП (що поступають на вхід НМ), будуть відповідати прирости потужності, здатні привести до заданого профілю температурного поля багато-зонну трубчатую піч у цілому (тому, що зони мають значний тепловий зв'язок і зміна потужності нагрівача однієї зони впливає на зміну

температури всіх зон). Ці прирости потужності апіорі невідомі.

Як було сказано вище для навчання нейронної мережі НМ не доцільно створювати спеціальну математичну модель багато-зонної трубчатої печі, яка буде мати похибки, що визначаються похибками вимірювання температури всіх зон та відповідної потужності їх нагрівачів у багато-зонній трубчатій печі при багатьох профілях температурного поля (потрібних для створення адекватної математичної моделі), а також апроксимації отриманих результатів вимірювання. Пропонується проводити навчання нейронної мережі НМ безпосередньо на об'єкті вимірювання температури. У такому випадку математична модель багато-зонної трубчатої печі не потрібна (а це додатково значно зменшує трудомісткість використання ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля багато-зонної трубчатої печі та виключає вплив на навчання нейронної мережі похибок, викликаних неповною адекватністю математичної моделі об'єкта вимірювання і керування).

Тому розроблено відповідний метод навчання нейронної мережі НМ безпосередньо на печі. Для цього на час навчання нейронної мережі НМ структуру нейромережевого регулятора (див. рисунок 2.1) необхідно змінити так, як це показано на рисунку 2.3. Під час навчання нейронної мережі НМ блок задання потужності БЗП випадковим чином задає прирости потужності нагрівачів  $H$  кожної зони (як додатні, так і від'ємні) багато-зонної трубчатої печі, які реалізує блок керування БК. Після закінчення перехідного процесу БВП визначає реальні температури кожної зони багато-зонної трубчатої печі і подає їх на блок віднімання БВ і нейронну мережу НМ. Блок задання температури зон  $B3t^\circ$  в момент задання приростів потужності нагрівачів  $H$  отримує від БЗП команду запам'ятати температури, які були до змін потужності нагрівачів  $H$  (які  $B3t^\circ$  подає на БВ). Таким чином, на входах нейронної мережі НМ маємо значення температур всіх зон багато-зонної трубчатої печі та їх змін під дією заданих приростів потужності, тобто ми маємо набір даних, потрібний для формування одного навчального вектора

для навчання нейронної мережі НМ.

Обчислення потрібних змін коефіцієнтів передачі та зміщень нейронів мережі НМ виконує блок навчання БН. Слід відзначити, що навчання нейронної мережі НМ повинно відбуватися на верхньому ієрархічному рівні системи вимірювання температури. Тому блок навчання БН нейронної мережі показаний на рисунку 2.3 лише умовно, для спрощення пояснення роботи схеми.

Метою навчання нейронної мережі є стан, коли НМ, за результатами вимірювання температури всіх зон, з достатньою точністю визначає необхідні зміни потужності нагрівачів Н за допомогою БК, які мали б повернути профіль температурного поля багато-зонної трубчатої печі у початковий стан. Ці необхідні зміни потужності повинні бути рівні (і протилежні за знаком) тим змінам потужності, які випадковим чином задав на початку циклу навчання блок задання потужності БЗП і які реалізували блоки керування БК.

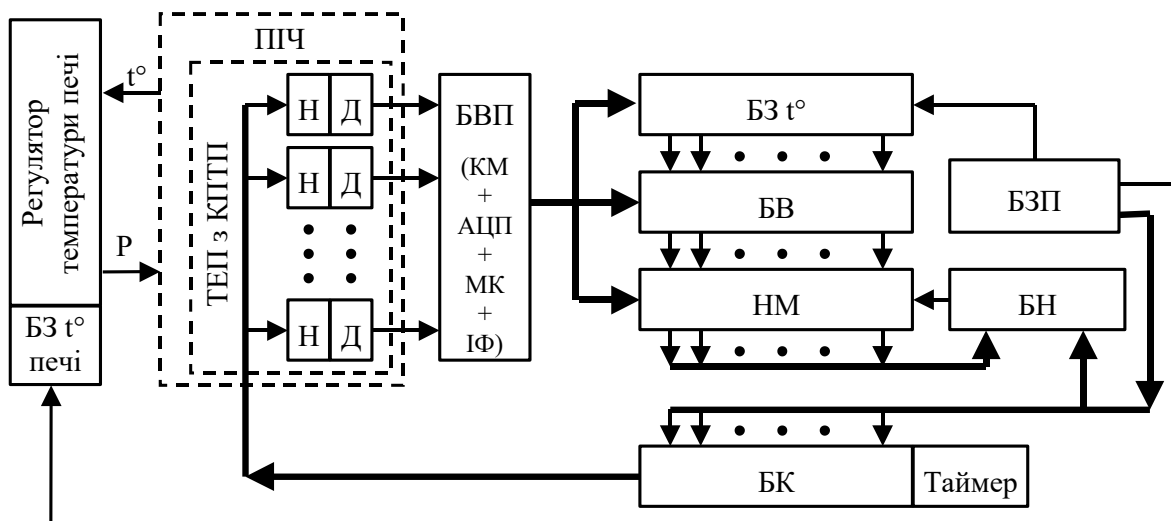


Рисунок 2.3 - Структурна схема пристрою вимірювання температури в режимі навчання НМ

Для того, щоби врахувати при навчанні нейронної мережі НМ зміну теплових параметрів багато-зонної трубчатої печі від температури [54] слід

не тільки змінювати прирости потужності нагрівачів  $H_1...H_n$ , а також змінювати температуру в печі, де розміщений ТЕП з КПТП. Для цього на структурній схемі рисунка 2.3 передбачено відповідний зв'язок між блоком задання потужності БЗП і блоком  $B3t^\circ$  печі. Порядок формування навчальних вибірок для навчання нейронної мережі НМ ілюструє рисунок 2.4, де по осі абсцис відкладений час, а по осі ординат – температуру однієї із зон поблизу робочого кінця головної ТП. На рисунку 2.4 подано температури  $t_1^o$ ,  $t_2^o$ ,  $t_3^o$ , що визначаються піччю, і зміни профілю температурного поля  $\Delta t_1^o$ ,  $\Delta t_2^o$ ,  $\Delta t_3^o$ , які створює блок задання потужності БЗП шляхом зміни вхідних даних блока керування БК.

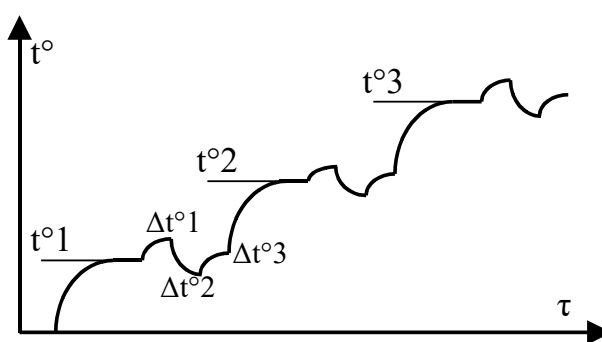


Рисунок 2.4 - Зміни температури однієї із зон ТЕП з КПТП під час формування навчальної вибірки

Достатня для навчання тришарового персептрона з високою точністю навчальна вибірка має складатися з 20 – 30 векторів навчання нейронної мережі НМ [44], які відповідають реальним змінам температури нагрівачів багато-зонної трубчатої печі під дією БЗП, БК і  $B3t^\circ$  печі. Далі нейронну мережу НМ навчають на цих векторах без необхідності використання багато-зонної трубчатої печі.

Навчання нейронної мережі НМ закінчується, коли формовані нею прирости потужності нагрівачів всіх зон багато-зонної трубчатої печі будуть задовольняти умову



$$|\Delta P_i - \Delta P_i^{NN}| \leq \varepsilon, \quad (2.1)$$

де  $\Delta P_i$  – заданий приріст потужності  $i$  – тої зони;

$\Delta P_i^{NN}$  – обчислений НМ приріст потужності  $i$  – тої зони;

$\varepsilon$  – допустима похибка оцінки потрібної зміни потужності, яка може бути приблизно оцінена за формулою

$$\varepsilon = \Delta T_i^{DOP} \frac{\Delta P_i}{\Delta T_i}, \quad (2.2)$$

де  $\Delta T_i^{DOP}$  – допустиме відхилення профілю температурного поля для  $i$  – тої зони;

$\Delta T_i$  – значення зміни температури для  $i$  – тої зони, отримане при дії приросту  $\Delta P_i$  потужності  $i$  – тої зони.

Залежності (2.1) і (2.2) нескладні, тому контролювати закінчення процесу навчання НМ може навіть мікроконтролер, який буде обчислювати керуючу дію для блока керування БК. При цьому значення  $\Delta T_i^{DOP}$  визначаються допустимою залишковою (невиключеною) похибкою від набутої термоелектричної неоднорідності електродів головної термопари ГТП. Через те, що ця залишкова (невиключена) похибка встановлення потужності нагрівачів багато-зонної трубчатої печі по відношенню є до результату вимірювання температури головною термопарою ГТП величиною другого порядку малості, значення  $\Delta T_i^{DOP}$  може бути досить великим – декілька градусів [43, 44].

Але доцільно задати  $\Delta T_i^{DOP}$  в межах 1 - 2°С, щоби мати запас для змін профілю температурного поля багато-зонної трубчатої печі від впливу зовнішнього температурного поля за час циклу регулювання. Цей вплив пов'язаний з неідеальною теплоізоляцією печі, власне він визначає

залишкову (невиключену) похибку від неоднорідності головної ГТП. Аналітичні методи оцінки цього впливу на температуру зон багато-зонної трубчатої печі складні та вимагають доволі точного знання індивідуальних теплових параметрів печі та розміщеного у ній стандартизованого термоелектричного перетворювача. Також необхідно знати зміни цих теплових параметрів під дією температури. Тому слід провести експериментальні дослідження відповідних змін профілю температурного поля ТЕП з КПТП.

У даному параграфі розроблено методику формування навчальної вибірки для нейронної мережі, яка входить у склад нейромережевого регулятора температури, безпосередньо на об'єкті вимірювання температури.

### 2.3 Використання математичної моделі багато-зонної трубчатої печі для навчання нейронної мережі

Для дослідження властивостей ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля багато-зонної трубчатої печі методом імітаційного моделювання немає необхідності навчання нейронної мережі НМ на конкретному об'єкті вимірювання температури. Для цього можна використати математичну модель деякої гіпотетичної багато-зонної трубчатої печі, параметри якої можна легко змінювати. Якщо досліджуваний ітераційний нейромережевий метод керування профілем температурного поля багато-зонної трубчатої печі буде забезпечувати збіжність процесу керування профілем температурного поля для різних варіантів параметрів багато-зонної трубчатої печі (зрозуміло, після навчання нейронної мережі на кожному варіанті печі), то у реальних умовах експлуатації цей метод також забезпечить стабілізацію профілю температурного поля за рахунок адаптаційних властивостей навченої нейронної мережі.

Тому для дослідження властивостей ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля багато-зонної трубчатої печі використаємо розроблену у [43] математичну модель багато-зонної трубчатої печі, яка створена на основі ітераційного методу керування профілем температурного поля шляхом рішення системи лінійних рівнянь. Перевагою цієї математичної моделі є можливість, за рахунок зміни коефіцієнтів у системі лінійних рівнянь міняти параметри імітованої багато-зонної трубчатої печі у широких межах.

Розроблена у [43] математична модель має наступний вид

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

де  $\Delta T_0 \dots \Delta T_{K-1}$  – приріст температури кожної зони багато-зонної трубчатої печі;

$\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$  – приріст потужності нагрівачів кожної зони багато-зонної трубчатої печі;

$k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  – коефіцієнти системи лінійних рівнянь.

За результатами дослідження макету ТЕП з КПТП [43] у [43] було створено математичну модель багато-зонної трубчатої печі. При цьому прийнято, що всі зони нагріву багато-зонної трубчатої печі однакові, тобто всі нагрівачі, які входять у зони цієї печі мають однакову конструкцію (умови тепловіддачі для всіх однакові) та максимальна потужність всіх нагрівачів рівна. Для таких умов профілі температурного поля, які формують всі нагрівачі багато-зонної трубчатої печі, однакові. Профіль температурного поля, яке формує крайній нагрівач, подано на рисунку 2.5. Відповідно до цього профілю було сформовано профілі температурного поля всіх нагрівачів

багато-зонної трубчатої печі при їх індивідуальному ввімкненні на повну потужність. Ці профілі показані на рисунку 2.6.

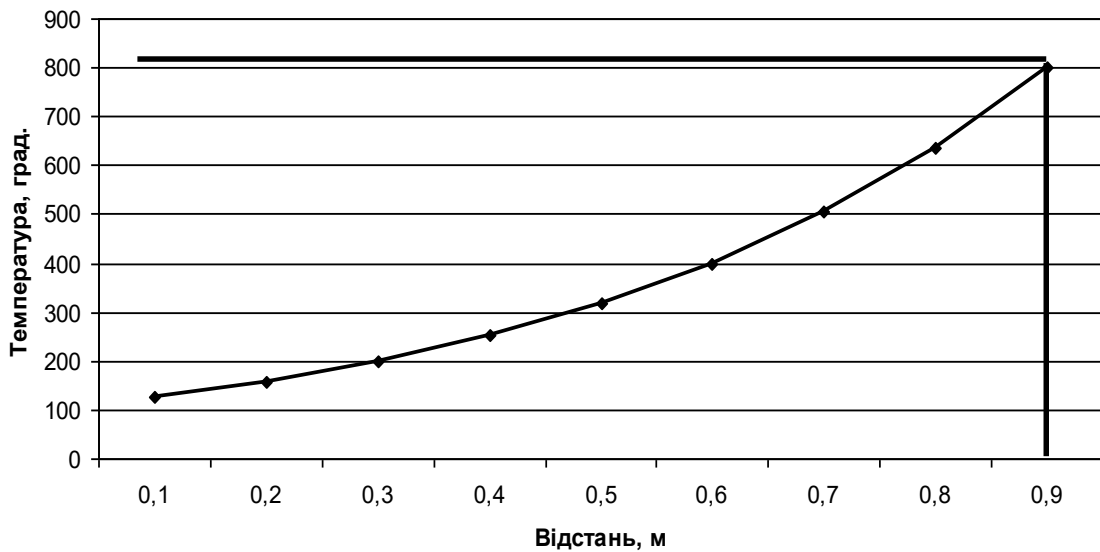


Рисунок 2.5 - Профіль температурного поля, яке формує крайній нагрівач багато-зонної трубчатої печі

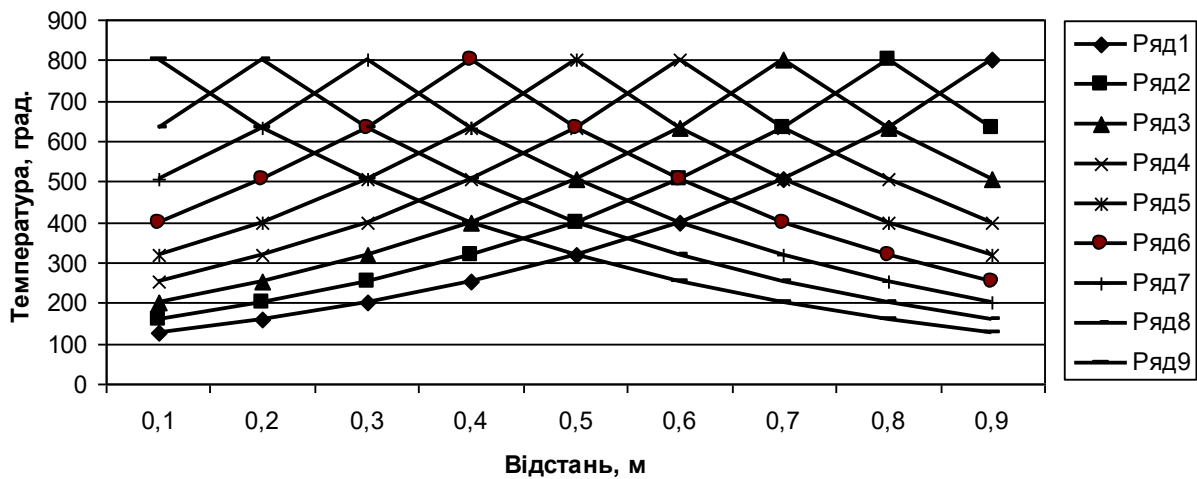


Рисунок 2.6 - Профілі температурного поля, яке формують всі нагрівачі багато-зонної трубчатої печі при індивідуальному ввімкненні на повну потужність

На основі даних, які подані у вигляду графіків на рисунку 2.6 у [43] було розроблено математичну модель виду (2.3), яка стала основою для

навчання нейронної мережі. У таблиці 2.1 подані нормалізовані коефіцієнти  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  математичної моделі багато-зонної трубчатой печі [43].

Таблиця 2.1. Нормалізовані коефіцієнти  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$  математичної моделі багато-зонної трубчатой печі

	$k_{01}$	$k_{02}$	$k_{03}$	$k_{04}$	$k_{05}$	$k_{06}$	$k_{07}$	$k_{08}$	$k_{09}$
$k_{10}$	0,157	0,198	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,000
$k_{20}$	0,198	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,000	0,794
$k_{30}$	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,000	0,794	0,630
$k_{40}$	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,000	0,794	0,630	0,500
$k_{50}$	0,397	0,500	0,630	0,794	1,000	0,794	0,630	0,500	0,397
$k_{60}$	0,500	0,630	0,794	1,000	0,794	0,630	0,500	0,397	0,315
$k_{70}$	0,630	0,794	1,000	0,794	0,630	0,500	0,397	0,315	0,250
$k_{80}$	0,794	1,000	0,794	0,630	0,500	0,397	0,315	0,250	0,198
$k_{90}$	1,000	0,794	0,630	0,500	0,397	0,315	0,250	0,198	0,157

На основі розробленої у [43] математичної моделі багато-зонної трубчатой печі необхідно сформулювати навчальну вибірку для навчання нейронної мережі. Кожен вектор навчальної вибірки мусить містити інформацію про вхідні величини нейронної мережі, тобто поточні значення температур всіх зон багато-зонної трубчатой печі та їх відхилення від заданої у всіх цих зонах температури. Також вектор навчальної вибірки мусить містити інформацію про вихідні величини нейронної мережі – відхилення потужності нагрівачів всіх зон від попередньо заданих значень (які привели до отриманих відхилень профілю температурного поля). Під час навчання коефіцієнти і зміщення нейронів нейронної мережі [53] адаптуються до вимірних значень відхилень температури всіх зон багато-зонної трубчатой печі, спричинених випадковими відхиленнями потужності. На виході нейронної мережі маємо отримати прирости потужності, задані блоком задання потужності БЗП (див. рисунок 2.3). Якщо виходи нейронної мережі не відтворюють заданих блоком задання потужності БЗП змін потужності

нагрівачів, то блок навчання БН (див. рисунок 2.3) змінює коефіцієнти і зміщення нейронів нейронної мережі таким чином, щоби наблизити отримані на виході нейронної мережі НМ прирости потужності мали незначні відхилення від приростів заданих блоком задання потужності БЗП (див. рисунок 2.3).

Однак, слід відзначити, що задані блоком задання потужності БЗП (див. рисунок 2.3) змінюють профіль температурного поля багато-зонної трубчатої печі у деякому напрямі (цілком не обов'язково у тому, що зменшує відхилення профілю температурного поля від заданого). Мало того, блок задання потужності БЗП формує відхилення обох напрямів.

Тому зроблено припущення (яке знову ж таки суперечить термодинаміці), що, при невеликих змінах температури, зміни температури зон багато-зонної трубчатої печі від зміни потужності нагрівачів є симетричними (теплофізичні властивості матеріалів, що входять у піч, при малих змінах температури, змінюються настільки мало, що цими змінами можна нехтувати). Тому при експлуатації системи вимірювання температури пропонується просто інвертувати отримані на виході нейронної мережі значення приростів потужності.

У даному параграфі розроблено методику використання математичної моделі багато-зонної трубчатої печі у процесі навчання нейронної мережі, яка входить у склад нейромережевого регулятора температури.

#### 2.4 Методика формування навчальної вибірки для навчання нейронної мережі, яка входить у склад нейромережевого регулятора температури

Як було показано на рисунку 2.2, нейронна мережа, яка входить у склад нейромережевого регулятора температури, має вдвічі більше входів від числа зон багато-зонної трубчатої печі. Це пов'язано з тим, що на одні входи поступають виміряні значення температури всіх зон, а на інші – відхилення

цих температур від заданого профілю температурного поля. А число виходів цієї нейронної мережі рівне числу зон багато-зонної трубчатої печі. У розробленій у [43] моделі багато-зонної трубчатої печі дев'ять зон. Тому нейронна мережа, яка входить у склад нейромережевого регулятора температури, повинна мати 18 входів і 9 виходів. Відповідною мусить бути і навчальна вибірка.

Кожен вектор навчальної вибірки повинен мати вид, поданий на рисунку 2.7. Вхідними значеннями є температури зон багато-зонної трубчатої печі  $T_0 \dots T_8$  та їх відхилення від заданого профілю температурного поля  $\Delta T_0 \dots \Delta T_8$ . Вихідними значеннями є прирости потужності  $\Delta P_0 \dots \Delta P_8$  нагрівачів відповідних зон багато-зонної трубчатої печі.

$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$
$\Delta T_0$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_3$	$\Delta T_4$	$\Delta T_5$	$\Delta T_6$	$\Delta T_7$	$\Delta T_8$
$\Delta P_0$	$\Delta P_1$	$\Delta P_2$	$\Delta P_3$	$\Delta P_4$	$\Delta P_5$	$\Delta P_6$	$\Delta P_7$	$\Delta P_8$

Рисунок 2.7 – Структура вектора навчальної вибірки нейронної мережі

Для дослідження збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля та впливу амплітуди відхилень поточного профілю температурного поля від заданого на кількість необхідних ітерацій для ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у різних умовах (для різних багато-зонних трубчатих печей) кожен раз необхідно розробляти свою математичну модель печі відповідно до методики, розробленої у [33].

Розроблена для прикладу відповідно до рисунка 2.7 навчальна вибірка подана у Додатку 1. Вона складається з 30 векторів.

Навчання нейронної мережі планується проводити у середовищі MatLab2009 за методом Левенберга-Маркуарта [53]. Максимальна допустима

середньоквадратична похибка навчання була задана 0,000001. Як було вказано, обсяг навчальної вибірки становитиме 25 векторів, а тестової – 30 векторів. 5 вибраних випадково векторів тестової вибірки не співпадало з навчальною вибіркою.

У даному параграфі розроблено методику формування навчальної вибірки для навчання нейронної мережі, яка входить у склад нейромережевого регулятора температури, і дає змогу дослідити збіжність ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля та вплив амплітуди відхилень поточного профілю температурного поля від заданого на кількість необхідних ітерацій для цього методу.

#### Висновки до другого розділу

- 1) Розроблений не схильний до самозбудження ітераційний нейромережевий метод керування профілем температурного поля може бути реалізований 8-ми бітними мікроконтролерами і забезпечує швидке усунення відхилень поточного профілю температурного поля багато-зонної трубчатої печі від заданого.
- 2) Для підвищення точності навчання нейронної мережі розроблено методику формування навчальної вибірки для неї безпосередньо на об'єкті вимірювання температури.
- 3) Для дослідження збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля та впливу амплітуди відхилень поточного профілю температурного поля від заданого на кількість необхідних ітерацій розроблено методику використання математичної моделі багато-зонної трубчатої печі у процесі навчання нейронної мережі.



### 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ІТЕРАЦІЙНОГО НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

#### 3.1 Методика проведення досліджень ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля

Для проведення досліджень ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля необхідно розробити відповідну методику. Згідно із технічним завданням така методика повинна забезпечити дослідження збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля та визначення кількості ітерацій, потрібних для відновлення із необхідною точністю заданого профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, що ходять у ТЕП з КПТП.

Дослідження ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля доцільно провести методом імітаційного моделювання [51]. У загальному методика експериментальних досліджень за допомогою методу імітаційного моделювання полягає у проведенні обчислювального експерименту, коли відповідні математичні моделі повинні взаємодіяти між собою аналогічно до фізичних об'єктів. Такий обчислювальний експеримент забезпечує значно меншу трудомісткість та вимагає значно менше часу на його проведення.

Узагальнена методика експериментальних досліджень має імітувати процес експлуатації ТЕП з КПТП у якому профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари ТЕП з КПТП підтримується стабільним і відповідним до заданого профілю. Така імітація буде полягати у заданні набору профілів температурного поля багато-зонних трубчатих печей, створенні їх математичних моделей, внесенні у ці профілі температурного поля певних випадкових відхилень та ліквідацію цих відхилень за допомогою досліджуваного методу. Процес ліквідації полягатиме у тому, що за

допомогою досліджуваного методу керування профілем температурного поля будуть сформовані керуючі дії у ряді наступних ітераційних циклів керування. У подальшому спостереження за змінами профілю температурного поля багато-зонних трубчатих печей, викликаних керуючими діями дадуть змогу оцінити збіжність ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля та вплив амплітуди відхилень поточного профілю температурного поля від заданого на кількість необхідних ітерацій для цього методу.

Для реалізації цієї узагальненої методики розроблена детальна методика проведення імітаційних досліджень ітераційного нейромережевого методу керування багато-зонними термічними об'єктами. Необхідною умовою для застосування цієї методики є попередня побудова достатньої кількості математичних моделей багато-зонних трубчатих печей проведена відповідно до викладеної у [43] та параграфах 2.3 і 2.4 методики.

Розроблена детальна методика передбачає вимагає виконання наступних операцій:

- 1) Задання початкового профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі (її математичній моделі). Для цього у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі (2.3) задамо початкові значення потужності нагрівачів зон  $P_0 \dots P_{K-1}$  замість приростів потужності  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$ . Слід задати 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 необхідно запам'ятати.
- 2) Задання початкового відхилення профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі (її математичній моделі). Для цього задамо відповідні прирости потужності  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$  у всіх зонах у математичної моделі (2.3) багато-зонної трубчатої печі.
- 3) Визначення поточної температури у всіх зонах багато-зонної трубчатої печі. У працюючій системі вимірювання температури це відповідає

вимірюванню температури всіх зон, а при імітаційному моделюванні це відповідає зчитуванню з пам'яті та додаванні температур заданих при виконанні п. 1 початкового профілю температурного поля та заданих при виконанні п. 2 температур початкових відхилень профілю температурного поля у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі.

4) Обчисленні відхилень поточного профілю температурного поля від заданого у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі. Для цього слід обчислити різницю температур між отриманими поточними температурами зон (див. п. 3) та температурами цих зон, що формують заданий профіль температурного поля. у математичній моделі багато-зонної трубчатої печі. Цим різницям температур присвоюють значення  $\Delta T_0^P \dots \Delta T_{K-1}^P$ .

5) Рішні систему рівнянь (2.3), де відомими слід вважати отримані при виконанні п. 4 різниці температур  $\Delta T_0^P \dots \Delta T_{K-1}^P$  та та коефіцієнти  $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ , отримані при попередній побудові математичної моделі відповідного варіанту багато-зонної трубчатої печі. А невідомими слід вважати прирости потужності  $\Delta P_0^P \dots \Delta P_{K-1}^P$  (з врахуванням знаків) у всіх зонах математичної моделі багато-зонної трубчатої печі.

6) Визначення дійсних змінених потужностей нагрівачів у зонах математичної моделі багато-зонної трубчатої печі. Для цього додаємо (з врахуванням знаку) минулі значення потужності нагрівачів зон у всіх зонах  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$  та визначені при виконанні п. 5 потрібні прирости потужності  $\Delta P_0^P \dots \Delta P_{K-1}^P$  всіх зон математичної моделі багато-зонної трубчатої печі. Отриманим значенням змінених потужностей нагрівачів присвоюємо значення  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$ .

7) Підстановки нових значень потужностей нагрівачів  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$  у математичну модель (2.3). Отримані значення температури зон багато-зонної трубчатої печі  $\Delta T_0^N \dots \Delta T_{K-1}^N$  будуть відповідати профілю температурного

поля, що відповідає наступному ітераційному циклу. Знайти відхилення температур всіх зон математичної моделі багато-зонної трубчатої печі  $\Delta T_0^V \dots \Delta T_{K-1}^V$  від заданого профілю температурного поля як різницю  $\Delta T_0^N \dots \Delta T_{K-1}^N$  і  $\Delta T_0^{PROF} \dots \Delta T_{K-1}^{PROF}$ . Отримані значення  $\Delta T_0^V \dots \Delta T_{K-1}^V$  записують у вихідний файл.

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

За результатами виконання цієї методики при виконанні п. 7 у файл записуються отримані у кожній наступній ітерації чергові значення поточних відхилень профілю температурного поля від заданого  $\Delta T_0^V \dots \Delta T_{K-1}^V$ . Вони є наслідком чергових нових значень приростів потужності нагрівачів  $\Delta P_0 \dots \Delta P_{K-1}$ . Їх аналіз дозволяє визначити властивості досліджуваного ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля.

Збіжність ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля можна оцінити порівнюючи у наступних ітераційних циклах відхилення поточних профілів температурного поля від заданих. Слід відзначити, що досліджувана збіжність методу керування профілем температурного поля відноситься, відповідно до [55], відноситься до інтегральних характеристик процесу, методу, тощо. А оцінка інтегральних характеристик за відхиленнями температури однієї зони не відбиває властивостей методу. Відповідно до [55], у такій оцінці повинні брати участь відхилення температур всіх зон багато-зонної трубчатої печі. Але сума відхилення температури всіх зон не може служити коректною оцінкою збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля через можливість взаємної компенсації відхилень з різною полярністю. Більш коректною оцінкою збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля,

відповідно до [55], може служити сума абсолютних значень (по модулю) відхилень від заданого профілю температурного поля.

Якщо суми абсолютних значень відхилень від заданого профілю температурного поля спадають при виконанні наступних ітераційних циклів, то процес збіжний. Тоді великі відхилення профілю температурного поля від заданого поступово знижуються. Якщо суми абсолютних значень відхилень від заданого профілю температурного поля зростають, то процес не збіжний. При цьому сума абсолютних значень відхилень від заданого профілю температурного поля ніколи не стане рівною нулю.

Дослідити вплив амплітуди відхилень профілю температурного поля від заданого на кількість необхідних ітераційних циклів для ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля також можна за зміною сум абсолютних значень відхилень від заданого профілю температурного поля. Самі дослідження можуть бути проведені шляхом аналізу змін профілю температурного поля від заданого  $\Delta T_0^V \dots \Delta T_{K-1}^V$  у часі (кількості ітерацій), отриманих у наступних запусках ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля при послідовному нарощенні амплітуди відхилень. Дослідження проводять шляхом визначення кількості необхідних ітерацій для входження суми абсолютних значень відхилень від заданої температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі у цілому у зону їх допустимих значень. При цьому для кожної амплітуди різних за формою відхилень профілю температурного поля проводять багатократні дослідження для зменшення впливу випадкових відхилень процесу керування від середнього перебігу.

Слід зауважити, що досліджувати вплив амплітуди відхилень на кількість необхідних ітерацій доцільно лише тоді, коли процес керування профілем температурного поля збіжний.

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 Алгоритм дослідження збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля

Алгоритм дослідження збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля було розроблено відповідно до розробленої у попередньому параграфі методики. Він розбитий на дві частини – алгоритм збору даних для проведення оцінки збіжності методу керування профілем температурного поля трубчатої багато-зонної печі ТЕП з КПТП та алгоритм опрацювання масиву даних, отриманих за результатами імітаційних досліджень.

Перший з цих алгоритмів (який забезпечує збір даних для оцінки збіжності) дає змогу отримати файл, куди записаний впорядкований масив значень температур  $\Delta T_0 \dots \Delta T_{K-1}$  у зонах трубчатої печі відповідних до послідовних ітераційних циклах усунення заданих відхилень профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, що входить у ТЕП з КПТП. Цей алгоритм показано на рисунку 3.1.

Другий з цих алгоритмів, поданий на рисунку 3.2, передбачає опрацювання результатів проведених при застосуванні першого алгоритму досліджень. Тобто вхідними даними для другого алгоритму є масив значень температур  $\Delta T_0 \dots \Delta T_{K-1}$  у зонах трубчатої печі, отриманих при виконанні ітераційних циклів усунення відхилень профілю температурного поля трубчатої багато-зонної печі. У результаті виконання цього алгоритму отримуємо графіки зміни у часі суми абсолютних значень відхилень від заданої температури у всіх зонах багато-зонної трубчатої печі. Оцінити збіжність пропонованого ітераційного нейромережевого методу керування

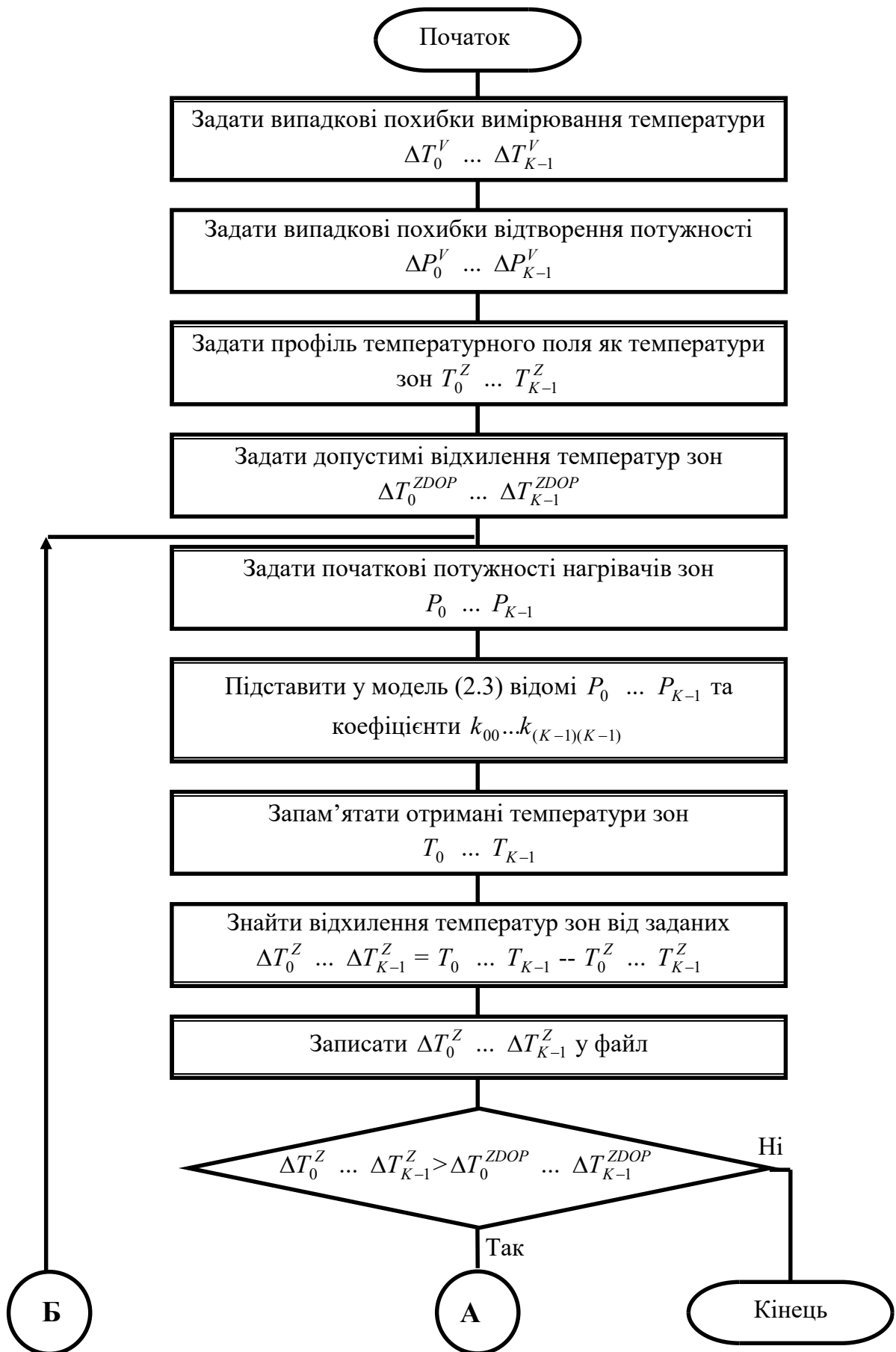


Рисунок 3.1а - Алгоритм збору даних для оцінки збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля

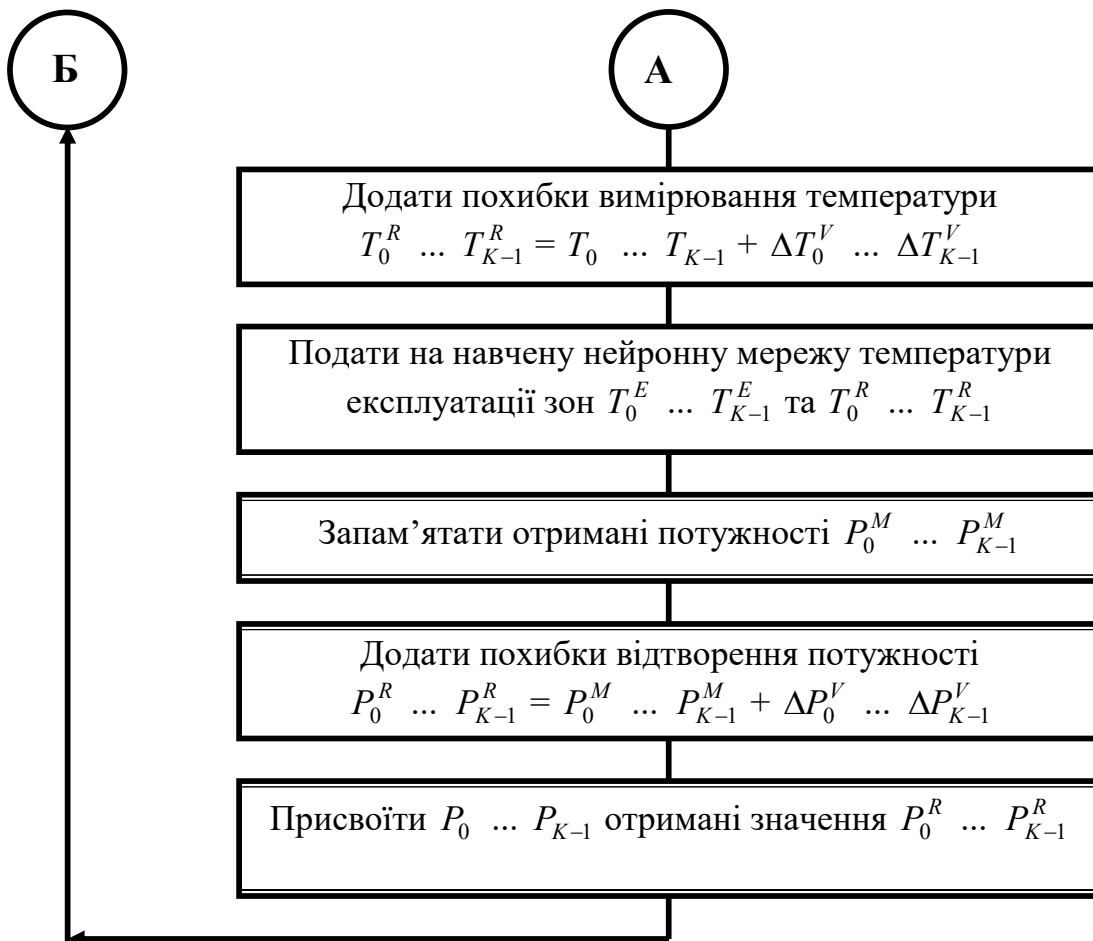


Рисунок 3.1б - Алгоритм збору даних для оцінки збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля

профілем температурного поля можна шляхом аналізу отриманих графіків послідовної зміни суми абсолютних значень відхилень від заданої температури всіх зон багато-зонної трубчатої печі.

Якщо суми абсолютних значень відхилень від заданого профілю температурного поля спадають при виконанні наступних ітераційних циклів, то процес збіжний. Якщо ці суми залишаються сталими, то оцінка залежить від їх амплітуди. Якщо ці суми не перевищують допустимі відхилення профілю температурного поля від заданого, то метод придатний для використання. Якщо ці суми більші за допустимі відхилення профілю температурного поля від заданого, то метод не придатний для використання. Аналогічно метод не придатний для використання коли суми абсолютних



значень відхилень від заданого профілю температурного поля зростають – процес керування не збіжний.

Слід зауважити, що сума абсолютних значень відхилень від заданого профілю температурного поля, через вплив похибок результатів вимірювання, ніколи не стане рівною нулю.

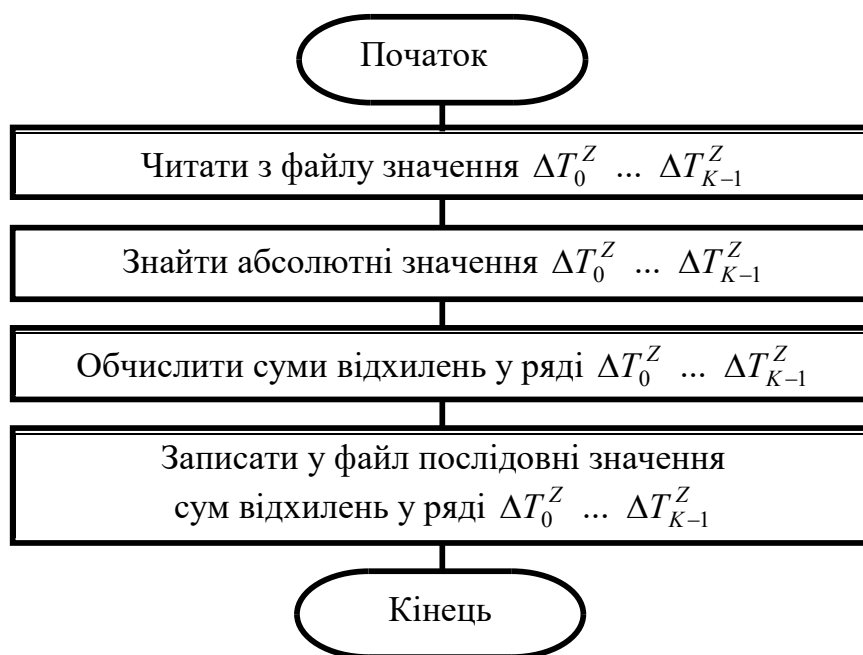


Рисунок 3.2 – Алгоритм опрацювання масиву даних, отриманих за результатами імітаційних досліджень збіжності методу керування профілем температурного поля трубочатої печі ТЕП з КПТП

У даному параграфі розроблено алгоритми проведення досліджень збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля.

### 3.3 Алгоритм дослідження впливу амплітуди відхилень від заданого профілю температурного поля на необхідну кількість ітерацій

Алгоритм дослідження впливу амплітуди відхилень від заданого профілю температурного поля на необхідну кількість ітерацій було

розроблено відповідно до розробленої у параграфі 3.1 методики дослідження ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля.

Розроблений алгоритм поданий на рисунку 3.3. Він базується на результатах багатократного виконання розробленого у попереднього параграфі першого алгоритму (див. рисунок 3.1) при послідовному нарощенні амплітуди відхилень від заданого профілю температурного поля.

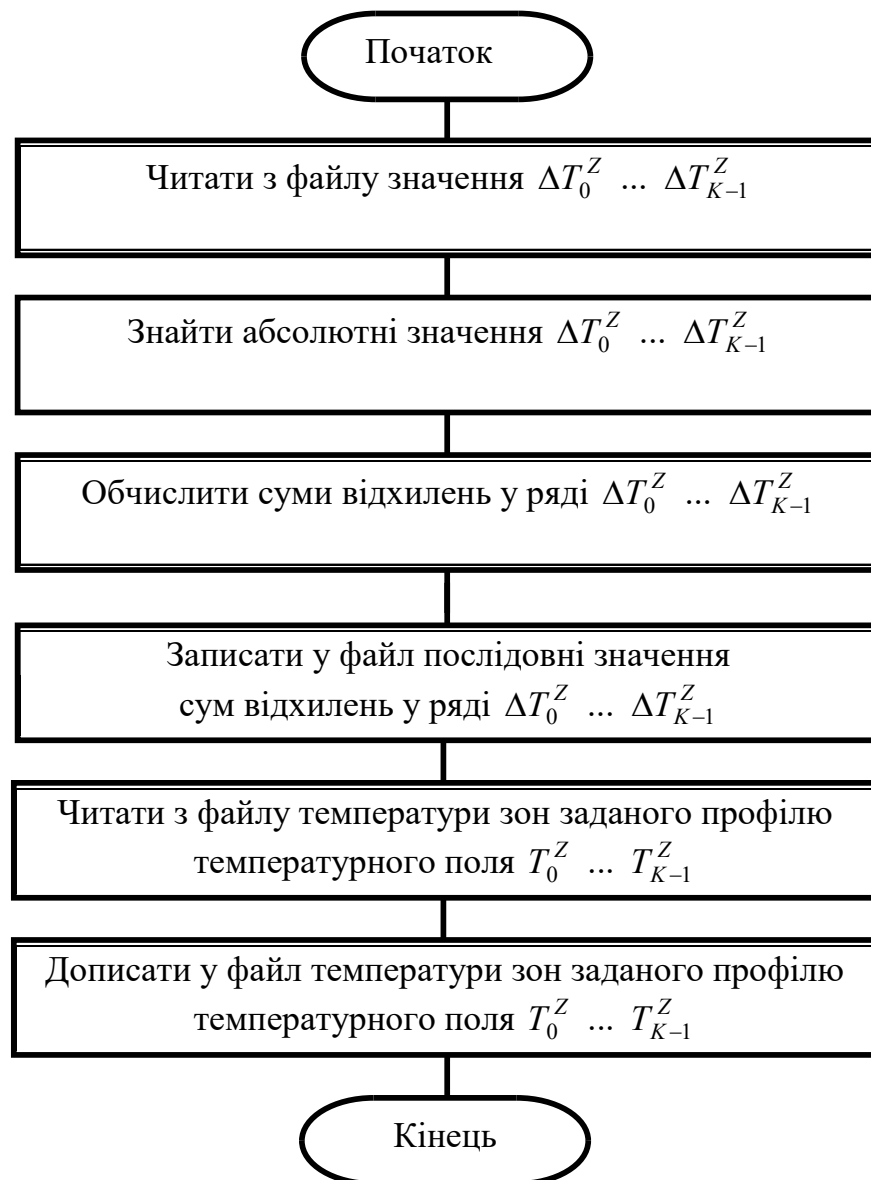


Рисунок 3.3 – Алгоритм опрацювання масиву даних, отриманих за результатами імітаційних досліджень збіжності методу керування профілем температурного поля трубчатої печі ТЕП з КПТП

Опрацювання отриманих при виконанні алгоритму, показаного на рисунку 3.1, результатів дослідження проводиться аналогічно до дослідження збіжності ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля. різниця полягає у тому, що у алгоритмі, показаному на рисунку 3.3, попередньо проводиться сортування отриманих при виконанні алгоритму, показаному на рисунку 3.1, масиву значень температур  $\Delta T_0 \dots \Delta T_{K-1}$  у зонах трубчатої печі у послідовних ітераційних циклах усунення відхилень профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі, що входить у ТЕП з КПТП. При цьому на отриманих графіках будуть зображені залежності суми абсолютних значень відхилень від заданого профілю температурного поля при виконанні послідовних ітераційних циклів при усуненні відхилень профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі. На кожному графіку показані декілька залежностей сум абсолютних значень відхилень від заданого профілю температурного поля, отриманих при окремих виконаннях алгоритму, показаному на рисунку 3.1, для різного характеру початкових відхилень однакової амплітуди.

Критерієм, за яким визначається кількість потрібних ітераційних циклів, є входження суми абсолютних значень відхилень від заданого профілю температурного поля у допустиму зону цих відхилень. Сама допустима зона визначається допустимим значенням похибки головної термопарі ТЕП з КПТП від набутої термоелектричної неоднорідності.

Розроблені алгоритми дозволяють за рахунок імітаційного моделювання властивостей ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля проводити аналіз ефективності використання ТЕП з КПТП при оцінці його поточної похибки у процесі експлуатації та тестування стану електродів його головної термопарі [56, 57].

У даному параграфі розроблено алгоритми проведення досліджень впливу амплітуди збурень профілю температурного поля трубчатої печі ТЕП

з КППП на необхідну кількість ітерацій при використанні ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля.

### Висновки до третього розділу

1) Розроблена методика дослідження ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі ТЕП з КППП, що дозволяє оцінити збіжність процесу керування та вплив амплітуди збурень профілю температурного поля у багато-зонній трубчатій печі на необхідну кількість ітерацій для усунення відхилень профілю температурного поля від заданого.

2) Розроблені згідно із цією методикою алгоритми (збору даних про процес керування профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі та опрацювання цих даних) дозволяють оцінити збіжність ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля.

3) Розроблений згідно із цією методикою алгоритм опрацювання зібраних даних про процес керування профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі дозволяє оцінити вплив амплітуди збурень профілю температурного поля у цій печі на необхідну кількість ітерацій при використанні ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля.

## ВИСНОВКИ

Відповідно до рекомендацій [58, 59] сформулюємо висновки до кваліфікаційної дипломної роботи магістра:

- 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 вимагають додаткового дослідження.
- 2) На основі аналізу відомих загальних методів керування профілем температурного поля сформовано співвідношення, яке може бути використане для керування профілем температурного поля та розроблено напрями подальших досліджень процесу регулювання температури у багато-зонній печі.
- 3) Проведено аналіз не схильного до самозбудження ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля, що може бути реалізований 8-ми бітними мікроконтролерами і забезпечує швидке усунення відхилень поточного профілю температурного поля багато-зонної трубчатої печі від заданого.
- 4) Для підвищення точності навчання нейронної мережі розроблено методику формування навчальної вибірки для неї безпосередньо на об'єкті вимірювання температури.
- 5) Для дослідження властивостей ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля розроблено методику використання математичної моделі багато-зонної трубчатої печі у процесі навчання нейронної мережі(формування навчальної вибірки).
- 6) Розроблена методика дослідження ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі ТЕП з КПТП, що дозволяє оцінити збіжність процесу керування та вплив

амплітуди збурень профілю температурного поля на необхідну кількість ітерацій для усунення відхилень профілю температурного поля від заданого.

7) Розроблені згідно із цією методикою алгоритми (збору даних про процес керування профілем температурного поля у багато-зонній трубчатій печі та опрацювання цих даних) дозволять оцінити збіжність ітераційного нейромережевого методу керування профілем температурного поля та вплив амплітуди відхилень профілю температурного поля у цій печі на необхідну кількість ітерацій для усунення відхилень профілю температурного поля від заданого.

## 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) Микийчук М. (2012). Метрологічне забезпечення якості продукції на стадії виготовлення автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. (Докторська дисертація). Львів.
- 4) Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В.Самсонов, А.И.Киц, О.А.Кюздени и др. – Киев.:Наукова думка, 1972. – 223 с.
- 5) Бычковский Р.В. Контактные датчики температуры / Р.В. Бычковский – Москва: Металлургия, 1978. – 240 с
- 6) Термометр медицинский Medicare стеклянный ртутный. [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).
- 7) Цифровой термометр UNI-T UT325. <https://masteram.com.ua/uk/digital-thermometer-uni-t-ut325/>.
- 8) NI-9214 Measurement System. Retrieved from <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/209889>.
- 9) High accuracy tester-calibrator PJ 6301. Retrieved from <http://www.thermo-electra.com/userfiles/thermo-electra.com/instruments/aoip/pj6301gb.pdf>.
- 10) Гордов А.Н. Основы пирометрии / Гордов А.Н. – Москва: Металлургия, 1971.- 447 с.
- 11) Элементарный учебник физики под редакцией академика Г.С.Ландсберга. Том 1. Москва «Наука» 1985.

- 12) Дутчак Я.Й. Молекулярна фізика / Я.Й. Дутчак , П.М. Якібчук. - Київ: НМК ВО, 1991. – 256 с.
- 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) [www.euramet.org](http://www.euramet.org)
- 20) Wojtkovski, J., Fischer, J., Machin, G., Pavese, F., Peruzzi, A., Renaot, E., & Tegeler, E. (2009). A roadmap for thermal metrology. *International Journal of Thermophysics*, 30(1), 1-8.
- 21) Machin, G., Wojtkovski, J., del Campo, D., Dogan, et al. (2014). A European roadmap for thermometry. *International Journal of Thermophysics*, 35(3-4), 385-394.
- 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) Саченко, А. (1978). *Повышение точности измерения электрическими методами высоких температур в промышленных условиях* (Кандидатська дисертація). Львов.
- 28) Саченко, А. А. (1988). *Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий* (Докторская диссертация). Ленинград.
- 29) Турченко, В. (2001). *Нейромережеві методи і засоби підвищення ефективності дистрибутивних мереж збору та обробки сенсорних даних* (Кандидатська дисертація). Національний університет «Львівська політехніка». Львів.
- 30) Hundves, A., & Henz, G. B. *Self calibrating temperature sensing probe and probe-indicator combination-United State Patent 3.499. 340. 73-1. G01-15/00.*
- 31) Саченко, А. А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. (1986). *Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами*. Москва: Энергоатомиздат.
- 32) Мильченко, Ю. (1984). *Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов* (Кандидатська дисертація). Москва.
- 33) 1906 року White, W. P. (1906). The constancy of thermoelements. *Physical Review (Series I)*, 23(6), 449.
- 34) Васильків, Н. (2010). *Підвищення точності вимірювання температури термонарами в процесі експлуатації*. (Кандидатська дисертація). Львів.
- 35) Brailov, É. S., Skripnik, Y. A., & Yurchik, G. V. (1986). Errors in temperature measurement with built-in thermoelectric thermometers. *Measurement Techniques*, 29(5), 403-405.
- 36) Столярчук, В. (2012). *Ідентифікація статичних та динамічних характеристик термоперетворювачів*. (Кандидатська дисертація). Львів.

- 37) Пат. а200701855 Україна, МПК G01K 15/00. Термоелектричний перетворювач / Кочан О.В., Кочан Р.В. - заявл. 22.02.2007.
- 38) Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан, В. Піч з керованим профілем температурного поля Пат. Україна 105700. G01K 7/02.
- 39) Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М., Наука, 2002
- 40) Соболев, А. (2004). Повышение точности регулирования температурного поля путем совершенствования алгоритма управления многозонным термическим объектом: (Кандидатська дисертація). Рыбинск.
- 41) Кочан, О., & Кочан, Р. *Термоелектричний перетворювач. Пат. України 97464. G01K 15/00.*
- 42) Кочан, О. (2011). Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля. (Кандидатська дисертація). Львів.
- 43) 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.
- 44) Поліщук, Є. С. (2003). *Метрологія та вимірювальна техніка*. Львів: Бескід Біт.
- 45) Кухлинг, Х. (1982). *Справочник по физике*. Мир.
- 46) ADuC834: Details, datasheet, quote on part number. Retrieved from <http://www.chipdig.com/datasheets/parts/datasheet/041/ADUC834.php>
- 47) Analog Devices. Retrieved from <http://www.analog.com/en/index.html>
- 48) Polyinin, A. D., & Manzhirov, A. V. (2006). *Handbook of mathematics for engineers and scientists*. Chapman and Hall/CRC.
- 49) Воловик, П. (2005). *Фізика для університетів*. Київ; Ірпінь: Перун.
- 50) Robinson, S. (2004). *Simulation: the practice of model development and use*. Chichester: Wiley.
- 51) Omatu, S., Khalid, M. B., & Yusof, R. (1996). *Neuro-control and its applications*. Springer Science & Business Media.

- 52) Головка, В. А., & Краснопрошин, В. В. (2017). Нейросетевые технологии обработки данных.
- 53) Кочан, О., Кочан, Р. & Кочан, В. *Піч з керованим профілем температурного поля Пат. Україна 105700. G01K 7/02.*
- 54) Bakshi, U. A., & Bakshi, M. V. (2020). *Modern control theory*. Technical Publications.
- 55) Кочан, О., Раюк, О., Богатирчук, В., Гром'як, А., Кочан, В. (2022). Моделювання процесу тестування стану електродів термоелектричних перетворювачів під час експлуатації. Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної Конференції «Інформаційно-вимірювальні технології», 9-10 листопада 2022, Львів, Україна, С. 31-32.
- 56) Кочан, О., Раюк, О., Богатирчук, В., Гром'як, А., Кочан, В. (2022). Моделювання процесу визначення поточної похибки термоелектричних перетворювачів під час експлуатації. Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної Конференції «Інформаційно-вимірювальні технології», 9-10 листопада 2022, Львів, Україна, С. 33-34.
- 57) 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.
- 58) 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  
ПРИКЛАДИ ВЕКТОРІВ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ

0,000	50,000	110,000	180,000	250,000	300,000	300,000	300,000	300,000
0,000	-1,300	-6,029	2,098	1,643	9,123	-3,178	1,470	5,780
0,000	0,146	0,165	0,193	0,292	0,287	0,274	0,184	0,059

0,000	50,000	100,000	160,000	240,000	280,000	300,000	310,000	300,000
0,000	3,777	1,897	2,319	5,050	11,756	8,000	5,885	3,045
0,000	0,167	0,141	0,177	0,298	0,188	0,166	0,157	0,127

0,000	45,000	115,000	190,000	255,000	295,000	310,000	290,000	390,000
0,000	5,793	-8,641	0,485	10,948	-0,687	5,997	11,652	8,816
0,000	0,473	0,628	0,568	0,865	0,675	0,280	0,669	0,687

”””

0,000	100,000	200,000	300,000	400,000	500,000	600,000	700,000	700,000
0,000	-1,000	-3,000	-1,000	2,000	6,000	7,000	-2,000	5,000
0,000	0,227	0,380	0,765	0,799	0,790	0,952	0,824	0,110

## ДОДАТОК Б

## 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 B...B2), 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 C ... C2 (вони не деградують бо експлуатуються при температурі вільних кінців).

За результатами вимірювань можна скласти систему рівнянь

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

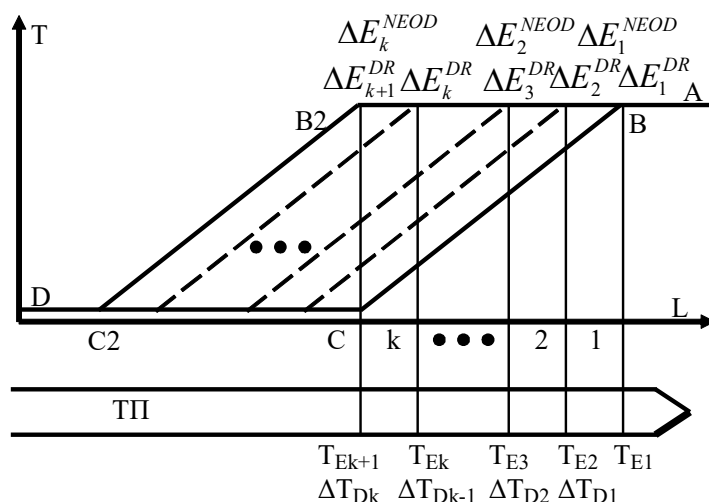


Рис.1. Зміни профілю температурного поля при діагностуванні стану електродів ТП

де  $E_i^{POCH}$ ,  $\Delta E_i^{DR}$  – початкова термо-е.р.с. і дрейф  $i$ -тої ділянки ТП;  $E_1^{VYM} \dots \Delta E_k^{VYM}$  – 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.  $0 \dots 20 \mu V$ .

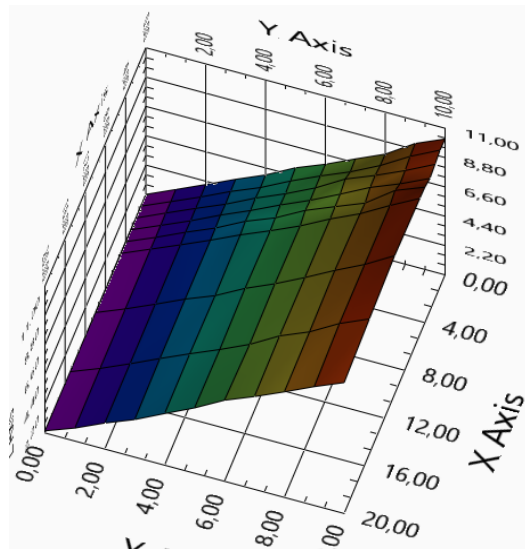


Рис. 2. Залежності дисперсії похибки визначення питомої термо-е.р.с.

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 термопары /

- 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.

## 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 сталої 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 КПТП) [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  $\approx 11^\circ\text{C}$  [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.

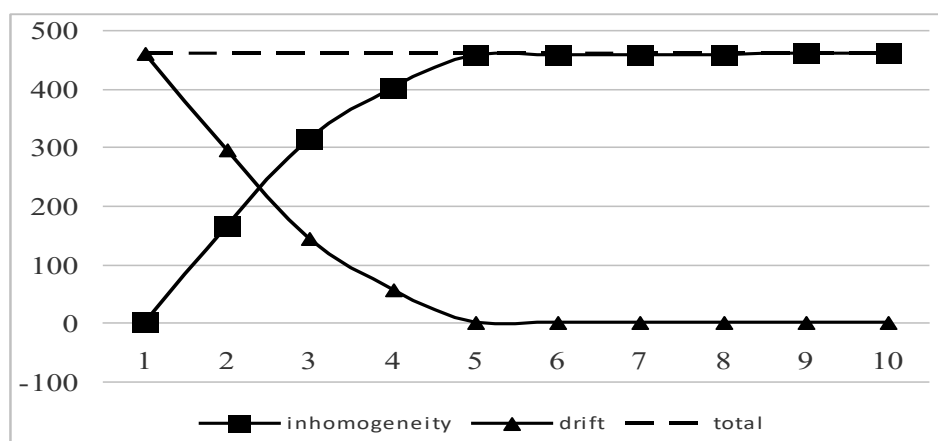


Рис. 1. Зміни похибок від набутої термоелектричної неоднорідності та від дрейфу ФП ТП для кожного профілю температурного поля у виді сигмоїд та у виді відрізків прямих

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.

1. Park, R.M. (ed.) (1993). Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement. ASTM International.

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.