

О.В. Кочан *, Р.В. Кочан **

* Тернопільський національний економічний університет,
НДІ Інтелектуальних комп'ютерних систем,** Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

МІКРОКОНТРОЛЕРНИЙ МЕТОД КЕРУВАННЯ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

© Кочан О.В., Кочан Р.В., 2008

Запропоновано метод керування нагрівачами термоелектричного перетворювача зі стабілізацією профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари. Через низькі вимоги до об'єму пам'яті та обчислювальних ресурсів метод придатний для 8-бітних мікроконтролерів.

There is proposed method of control which could be implemented for heaters situated across electrodes of the main thermocouple and provides stabilization profile of temperature field. The proposed method has small requirements to memory space and computing power so it could be implemented using 8-bit microcontrollers.

Вступ. Процеси регулювання температури є найпоширенішими технологічними процесами в промисловості. Часто точність цих процесів (наприклад, для металургії) визначає техніко-економічні показники промислової продукції. Тому підвищення точності вимірювання температури є одним з заходів покращання якості продукції.

Огляд літератури. Як було показано в [1, 2], однією з найнебезпечніших та мало вивчених похибок термопар є похибка від набутої неоднорідності їх термоелектродів, яка пов'язана з деградаційними процесами в них під дією температури та часу експлуатації. Два характерні прояви набутої неоднорідності [2] – як часового дрейфу характеристики перетворення (ХП) термопар та як залежності термо-ЕРС. термопари не тільки від різниці температур гарячого та холодного спаїв, а і профілю температурного поля між ними – значно утруднюють намагання зменшити вплив цієї похибки. У [3–5] запропоновано метод усунення прояву набутої неоднорідності термопар створенням вздовж електродів головної термопари термоелектричного перетворювача (ТЕП) власного профілю температурного поля, незалежного від зовнішнього профілю, за допомогою низки зміщених по осі ТЕП нагрівачів і давачів температури (додаткових термопар), що входять у додаткові підсистеми регулювання температури. У цьому разі похибка від набутої неоднорідності електродів термопар не може безпосередньо себе проявити. Однак запропонований метод вимагає ускладнення не тільки конструкції ТЕП, але і додаткового забезпечення його працездатності за рахунок роботи згаданих підсистем регулювання температури окремих зон, що створюють заданий профіль температурного поля вздовж електродів головної термопари. Основною трудностю для їх функціонування є залежність температури кожної зони від температури інших зон через наявність процесу передавання тепла вздовж ТЕП. Ця залежність зумовлює небезпеку збудження систем регулювання (через значну затримку передавання теплового впливу між зонами) та генерації теплових хвиль вздовж електродів головної термопари. Тому керуючі впливи кожної зони повинні формуватися в комплексі з іншими зонами [6, 7]. Отже, задача регулювання температури в ТЕП з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП) є доволі складною.

Постановка задачі дослідження. Метою статті є розробка методу керування профілем температурного поля вздовж електродів головної термопари ТЕП з КПТП, який дозволить забезпечити стійкість і необхідну точність встановлення заданого профілю без потреби складних теоретичних та експериментальних досліджень об'єкта регулювання та матиме невисоку обчислювальну складність, що дозволить його реалізувати в системах, що ґрунтуються на мікроконтролерах.

Опис запропонованого методу. Конструктивна схема нагрівачів макета ТЕП з КПТП показана на рис. 1. На трубчатому чохлі ТЕП намотані секції нагрівачів зон $H_{1...N...K}$. В середині чохла розміщені термоелектроди головної термопари МТС і термопари підсистем регулювання температури окремих зон $ТС_1...ТС_N...ТС_K$, ізольовані керамічними втулками (бусами). Їхні робочі кінці розміщені напроти центрів відповідних нагрівачів. Зверху нагрівачі $H_{1...K}$ закриті шаром теплоізоляції. Така конструкція дає змогу утримати вздовж електродів головної термопари МТС заданий профіль температурного поля, який покриває (перевищує) можливі зміни зовнішнього профілю температурного поля. Цей профіль задається уставками підсистем регулювання і утримується під час експлуатації та перевірки головної термопари. Отже, неоднорідність головної термопари може проявити себе винятково як дрейф її ХП.

Однак ця ж конструктивна схема створює проблеми під час регулювання (встановлення) температури зон. З рис. 1 очевидно, що кожен нагрівач створює чотири теплові потоки:

- q_1 , спрямований до центра чохла. У цьому випадку q_1 є корисним, якраз він створює заданий профіль температурного поля вздовж термоелектродів МТС;
- q_3 , протилежний до q_1 , спрямований назовні ТЕП. q_3 визначає теплові втрати, тому його інтенсивність зменшена за допомогою теплоізоляції (див. рис. 1);
- q_2 , спрямований до наступної зони нагрівача;
- q_4 , спрямований до попередньої зони нагрівача.

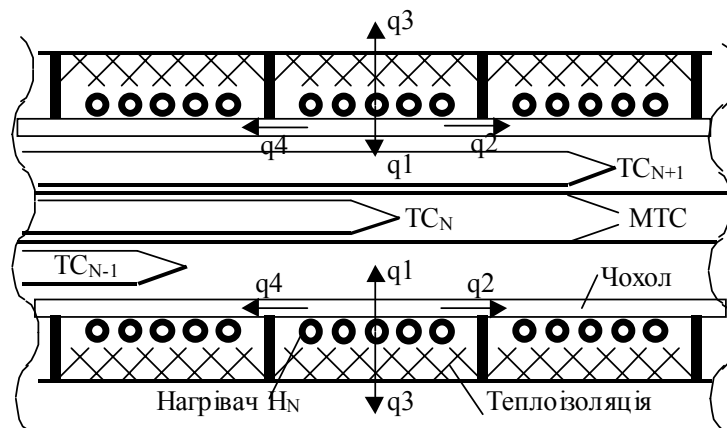


Рис. 1. Конструктивна схема нагрівачів ТЕП з КПТП

Власне наявність теплових потоків q_2 та q_4 (а також їхня порівняно висока інтенсивність, зумовлена тим, що вони проходять по металічному чохлі ТЕП) визначає наявність хорошого теплового зв'язку між зонами, тобто взаємну залежність температур, створюваних окремими нагрівачами. Тому власне теплові потоки q_2 та q_4 створюють небезпеку втрати стійкості (автогенерації) для підсистем регулювання температури, які мають утримувати заданий профіль температурного поля вздовж термоелектродів МТС.

Теплові потоки $q_1...q_4$ можуть бути розраховані за формулою [8, 9]

$$q = \frac{\lambda \Delta T S_N}{L}, \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності відповідного матеріалу; ΔT – різниця температур, яка спричиняє цей тепловий потік; S_N – площа поверхні, через яку передається тепловий потік; L – відстань між нагрівачем і ділянкою, через яку проходить цей тепловий потік.

У загальному теплові процеси, що відбуваються в зонах нагрівачів, можна описати диференціальними рівняннями згідно з законом охолодження Ньютона-Ріхмана [8]

$$qdt = cV\rho dT + \alpha S(T - T_S)dt, \quad (2)$$

де q – тепловий потік, спричинений різницею температур; c – теплоємність матеріалу, через який проходить теплопередача; V – об'єм цього матеріалу; ρ – густина цього матеріалу; S – площа тепловіддачі; α – коефіцієнт тепловіддачі.

У зв'язку з тим, що до теплових потоків можна використовувати принцип суперпозиції, результуюча температура кожної зони визначатиметься сумарним тепловим потоком, який створюють всі зони, незалежно одна від одної. А теплові потоки $q_1 \dots q_4$, що їх створює кожен нагрівач, своєю чергою, визначаються їх поточними потужностями. Тому, згідно з [6, 7], можна визначити потрібний для конкретного моменту часу керуючий вплив розв'язанням системи рівнянь вигляду (2), кожне з яких описує теплопередачу в межах одного нагрівача з врахуванням теплових потоків інших нагрівачів. Але необхідні для постійного розв'язання в реальному часі системи з 5–10 диференціальних рівнянь вигляду (2) обчислювальні ресурси значно перевищують обчислювальні ресурси широкоживаних і недорогих мікроконтролерів. Тому доцільною є розробка спеціального методу керування профілем температурного поля вздовж електродів головної термопари ТЕП з КПТП, який матиме невисоку обчислювальну складність.

Для розробки бажаного методу керування необхідно розробити спрощену модель теплових процесів у нагрівачах ТЕП з КПТП. Основою для спрощення може слугувати оцінка необхідної точності підтримки профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари. Як показано в [10, 11], похибка підтримки ≈ 5 °С спричиняє залишкову похибку неоднорідності менше 0,2 °С, що, за похибки взірцевого засобу, який використовується для калібрування або перевірки головної термопари, на рівні 0,5–1 °С, є цілком прийнятним. Отже, допустима похибка встановлення заданого профілю температурного поля може перевищувати 5 %, що допускає використання відповідно спрощеної моделі.

Пропоноване спрощення моделі полягає в лінеаризації залежності температури від потужності та переході від підсумовування теплових потоків до підсумовування створених цими тепловими потоками температур. У такому разі можна записати систему лінійних рівнянь, які визначають приріст температури кожної зони ΔT_i як сумарну дію приростів потужності ΔP_i окремих нагрівачів

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_0 = k_{00} \times \Delta P_0 + k_{01} \times \Delta P_1 + \dots + k_{0(K-1)} \times \Delta P_{(K-1)} \\ \Delta T_1 = k_{10} \times \Delta P_0 + k_{11} \times \Delta P_1 + \dots + k_{1(K-1)} \times \Delta P_{(K-1)} \\ \dots \\ \Delta T_{K-1} = k_{(K-1)0} \times \Delta P_0 + k_{(K-1)1} \times \Delta P_1 + \dots + k_{(K-1)(K-1)} \times \Delta P_{(K-1)} \end{array} \right. , \quad (3)$$

Отже, згідно з пропонованим методом, для встановлення заданого профілю температурного поля, обчислюємо за результатами вимірювання температури окремих зон, необхідні для досягнення заданого профілю температурного поля прирости температури кожної зони ΔT_i , далі, в результаті розв'язання системи рівнянь (3), отримуємо необхідні прирости потужності ΔP_i окремих нагрівачів, які реалізує підсистема регулювання. Очевидно, що в результаті спрощення прийнятої моделі, а також дії похибок вимірювання температури кожної зони ΔT_i , похибок визначення коефіцієнтів моделі $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$, неповної еквівалентності умов визначення коефіцієнтів моделі $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ та похибки задання приростів потужності ΔP_i , реальні прирости температури

окремих зон не збігатимуться з потрібними. Тому пропонується метод керування профілем температурного поля передбачає його циклічне ітераційне наближення до заданого профілю.

Реалізація пропонуваного методу. Незважаючи на значно меншу обчислювальну складність розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь порівняно з системою диференціальних рівнянь, розв'язання такої задачі для мікроконтролера є також складним завданням, насамперед, зважаючи на обмежені обчислювальні ресурси та пам'ять. Тому для розв'язання системи рівнянь (3) пропонується використати метод Гаусса [12], оскільки у ньому всі обчислення можна виконувати безпосередньо над елементами матриць коефіцієнтів і векторів приростів потужності та температури. Рівняння (3) можна подати у вигляді:

$$k \times \overline{\Delta P} = \overline{\Delta T}, \quad (4)$$

де k – „квадратна” матриця коефіцієнтів моделі; $\overline{\Delta P}$ – вектор приростів потужності; $\overline{\Delta T}$ – вектор приростів температур.

Метод Гаусса зводиться до двохходового алгоритму, під час виконання якого виконують:

1) прямий хід, при якому, шляхом елементарних перетворень рядків, тобто додавань одного рядка до іншого, помноженого на відповідний коефіцієнт, а також перестановок рядків, матрицю (4) приводять до верхньотрикутного вигляду;

2) зворотний хід, при якому, починаючи з останнього рівняння, послідовно визначають елемент вектора невідомих та підставляють його у попередні рівняння.

Під час виконання прямого ходу ключовими є дві операції:

1) множення всіх елементів матриці коефіцієнтів та одного елемента вектора результату на константу так, щоби у разі віднімання двох рядків результат у визначених позиціях був нульовим;

2) власне віднімання.

Для виконання першого етапу першої операції (множення елементів матриці коефіцієнтів і вектора приростів потужності) необхідно виконати обчислення згідно з формулами

$$k_{jl} = \frac{k_{jl}}{k_{ji}}, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i, K-1}, l = \overline{i, K-1}$$

$$\Delta T_j = \frac{\Delta T_j}{k_{ji}}, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i, K-1}$$
(5)

Для виконання другого етапу першої операції (віднімання рядків матриці) необхідно виконати обчислення згідно з формулами

$$k_{jl} = k_{il} - k_{jl}, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i+1, K-1}, l = \overline{i, K-1}$$

$$\Delta T_j = \Delta T_i - \Delta T_j, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i, K-1}$$
(6)

У результаті виконання (5) і (6) отримаємо матрицю коефіцієнтів $k_{00...k_{(K-1)(K-1)}}$ з нульовими значеннями коефіцієнтів $k_{ij} = 0, i = \overline{1, K-1}, j = \overline{0, i-1}$.

Для обчислення вектора приростів потужностей ΔP_i необхідно виконати

$$\Delta T_i = \Delta T_i - \Delta P_i \times k_{ji}, i = \overline{K-1, 0}, j = \overline{0, i-1}$$

$$\Delta P_i = \frac{\Delta T_i}{k_{ii}}, i = \overline{K-1, 0}$$
(7)

У результаті елементи вектора $\overline{\Delta P}$ є приростами потужності, які необхідно подати на нагрівачі. За такої реалізації методу Гаусса необхідно задіяти лише три змінні для індексації елементів масивів, а всі результати обчислень зберігаються безпосередньо в елементах масивів і векторів. Це дозволяє реалізувати метод за допомогою обчислювальних засобів, що мають мінімальні об'єми пам'яті. Що є актуальним саме для мікроконтролерів.

Варто відзначити, що визначення коефіцієнтів моделі $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$, які входять в систему рівнянь (3), за результатами експериментальних досліджень є також непростю задачею, яка вимагає раціонального підходу. У загальному випадку ці коефіцієнти можна визначити, вимірюючи зміни температури кожної зони ΔT_i під дією відомих приростів потужності ΔP_i . Але така методика вимагає складення системи $K \times K$ рівнянь (відповідно кількості невідомих коефіцієнтів), а потім її розв'язання. Хоча розв'язання такої системи рівнянь, з використанням спеціалізованих програмних засобів (наприклад, MATLAB), принципівих труднощів не становить, воно вимагає виконання $K \times K$ експериментів, що є практично неприйнятним. Раціональний підхід у цьому випадку полягає в експериментальному одержанні зміни температури кожної зони ΔT_i під дією відомих приростів потужності ΔP_i кожної зони окремо (коли потужність інших зон дорівнює нулю). В такому випадку, для кожного експерименту система рівнянь (3) вироджується в K рівнянь вигляду

$$\begin{cases} \Delta T_1 = k_{1i} \times \Delta P_i \\ \Delta T_2 = k_{2i} \times \Delta P_i \\ \dots \\ \Delta T_{K-1} = k_{(K-1)i} \times \Delta P_i \\ \Delta T_K = k_{Ki} \times \Delta P_i \end{cases}, \quad (8)$$

що дозволяють визначити коефіцієнти $k_{0i} \dots k_{(K-1)i}$ безпосередньо з кожного рівняння окремо. Отже, для одержання всіх коефіцієнтів $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ необхідно і достатньо виконати тільки K експериментів, що можна вважати прийнятним.

Методика експериментальних досліджень полягає ось у чому:

- 1) вимкненні нагрівання всіх нагрівачів;
- 2) вимірюванні значень температури до закінчення перехідного процесу охолодження зон з заданою точністю (на практиці достатньо $0,2 \dots 0,5^\circ\text{C}$ за годину);
- 3) встановленні максимальної потужності одного нагрівача при вимкнених всіх інших нагрівачах (для отримання максимальної зміни температури всіх зон i , відповідно, мінімізації впливу адитивної складової похибки результату вимірювання температури);
- 4) вимірюванні значень температури до закінчення перехідного процесу охолодження зон з заданою точністю (на практиці достатньо $0,2-0,5^\circ\text{C}$ за годину);
- 5) знаходженні зміни температури кожної зони ΔT_i як різниці результатів вимірювання за п. 4 і п. 2;
- 6) повторенні операцій пп. 1-5 для всіх інших нагрівачів окремо. Потрібно відзначити, що значні похибки коефіцієнтів $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ виникають під час їх визначення швидким переходом до вимірювання змін температури ΔT_i від наступного нагрівача, без повного усунення змін від попереднього (повного охолодження всіх зон);

7) складанні та розв'язанні K систем рівнянь вигляду (8), причому як значення ΔP_i не мусить обов'язково виступати саме потужність зони, можлива підстановка деякого параметра, яким характеризується керуючий вплив. Наприклад, під час використання для встановлення потужності зон широтно-імпульсного модулятора, як ΔP_i може виступати її відносне значення, яке безпосередньо заноситься у відповідний канал модулятора і характеризує зміну шпарності вихідних імпульсів.

Необхідно відзначити, що різниці перебігу процесу теплопередачі до робочого кінця ТЕП і до вільних кінців приведуть до того, що коефіцієнти $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ під час експериментального дослідження окремих зон будуть асиметричними щодо нагрівача зони. Приклад розподілу температури (вказано її відносне до максимального нагрівання ввімкненої зони значення) для

макетного взірця ТЕП з КПТП показано на рис. 2. Додаткову перевірку правильності виконання експерименту при визначенні коефіцієнтів $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ можна здійснити на основі формули (1) – при фіксованих (для конкретного ТЕП з КПТП) значеннях λ , ΔT і S_N відносна зміна температури в межах середніх зон буде пропорційна $1/L$, тобто обернена відносної відстані зони, яку ми аналізуємо, від зони, нагрівач якої ввімкнений. Цю залежність доволі добре ілюструють зображені на рис. 2 результати експериментальних досліджень макета ТЕП з КПТП – розподіл температур зон щодо центральної доволі добре відповідає гіперболічному закону.

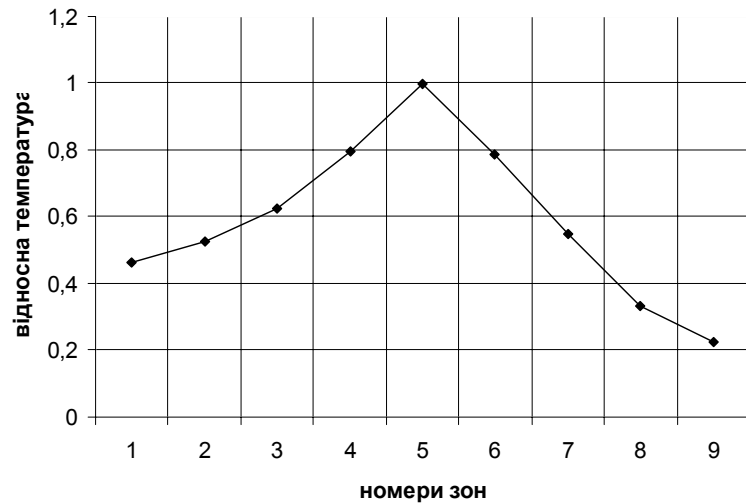


Рис. 2. Розподіл температури щодо максимального нагрівання п'ятої зони

Алгоритм керування на базі пропонованого методу зображено на рис. 3. Під час його виконання обчислений згідно з результатами розв'язання системи рівнянь (3) керуючий вплив (потужність для кожної зони) реалізується виконавчими пристроями. Очевидно, що похибки визначення коефіцієнтів $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ не дозволяють відразу отримати потрібні температури зон. Тому через деякий час, на основі результатів нових вимірювань, повинен бути сформований новий, уточнений, керуючий вплив, який краще наблизить температури зон до заданих. Через те, що різниця температур в наступних циклах керування буде меншою, то і похибка наближення спадатиме.

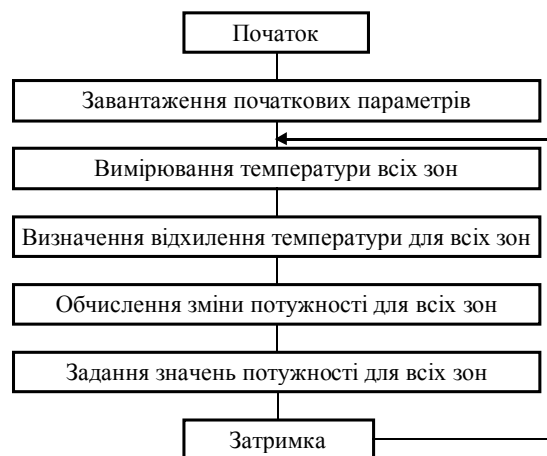


Рис. 3. Алгоритм керування на базі пропонованого методу

Сформовані заново керуючі впливи, для уникнення збудження систем регулювання, повинні залишатися незмінними протягом проміжку часу, що істотно перевищує постійну часу перехідного процесу встановлення температури в зонах ТЕП з КПТП. Значення постійної часу можна одержати під час експериментального визначення коефіцієнтів $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$.

Необхідно відзначити, що причиною автогенерації невеликої амплітуди (систематичного коливання температур окремих зон щодо середнього значення з періодом декілька годин) може бути похибка визначення коефіцієнтів $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$. Якщо обчислені згідно з (5)–(8) зміни потужності зон ΔP_i будуть відчутно вищими від необхідних для досягнення заданої температури зони, то в кожному циклі керування температура буде “проскакувати” задане значення, що зумовить коливання температури. Для уникнення цього явища пропонується після обчислень згідно з (5)–(8) штучно зменшити значення зміни потужності на декілька процентів. Крім того, для уникнення “розхитування” системи регулювання через дію випадкової похибки, яка зумовлена шумом вимірювального каналу та дією залишкових завод нормального і загального вигляду, доцільно ввести в канал керування гістерезис. Для цього недоцільно змінювати потужність нагрівачів при малих відхиленнях температур зон від заданих – згідно з [10, 11] відхилення, що не перевищують 1°C , викликають такі малі залишкові похибки неоднорідності, що ними можна нехтувати.

Експериментальне дослідження методу. Під час експериментальних досліджень підсистеми встановлення заданого профілю температурного поля ТЕП з КПТП необхідно визначити:

- 1) чи похибка встановлення профілю температурного поля не перевищує заданої;
- 2) за який час похибка встановлення профілю температурного поля не перевищує заданої;
- 3) чи не виникає коливань температури (самозбудження) під час експлуатації ТЕП з КПТП.

Для виконання експериментальних досліджень був використаний стенд [13, 14], що являє собою трубчасту електропеч, температура в якій задається окремим регулятором. Термо-ЕРС головної термопари та термопар вимірювання температури всіх зон вимірюється окремою 16-точковою системою (аналогічно описаній у [10, 11]) на базі мікроконвертора типу ADUC-834 та герконових реле РГК-15 з додатковими термовирівнювачами. Ця система вимірює опір термометра для врахування температури вільних кінців всіх термопар. Потужність нагрівачів задається із дискретністю 1 % дев'ятиканальним широтно-імпульсним модулятором на мікроконтролері AT89C2051 з додатковими ключами на потужних транзисторах. Всі вузли гальванічно розв'язані за допомогою оптронів. Сумарна похибка вимірювання напруги в діапазоні 80 мВ при відносних вимірюваннях не перевищує 2 мкВ.

Досліджувався макетний взірець ТЕП з КПТП на базі термопар типу ХА, в якому вздовж електродів головної термопари розміщено дев'ять зон нагрівачів [5]. Отже, пропонується методика визначення коефіцієнтів $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ вимагає проведення 9-ти експериментів замість 81. Експериментально досліджені профілі температурних полів від нагрівання макета ТЕП з КПТП окремими нагрівачами під час визначення коефіцієнтів $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$ наведені на графіку рис. 4.

Згідно з результатами експериментальних досліджень, показаних на графіках рис. 4, було визначено 81 коефіцієнт $k_{00} \dots k_{(K-1)(K-1)}$, які було включено в програму системи керування профілем температурного поля макетного взірця. Результати експериментальних досліджень макета ТЕП з КПТП [5] наведені на рис. 5, 6. Максимальне відхилення профілю температурного поля макета ТЕП з КПТП від зовнішнього профілю становило 16°C . На рис. 5 показано графік похибки встановлення профілю температурного поля відповідно до номера зони за першою оцінкою потужності згідно з (5)–(7). Як очевидно з рис. 5, ця похибка не перевищує $2,5^\circ\text{C}$, що спричиняє залишкову похибку неоднорідності, якою, згідно з [10, 11], можна нехтувати. Процес встановлення профілю температурного поля відповідно до зон у разі подальшої експлуатації показано на рис. 6. Як зрозуміло з рис. 6, похибка встановлення профілю температурного поля поступово зменшується,

тобто відбувається загасання перехідного процесу. У результаті похибка профілю температурного поля ТЕП з КПТП зменшується до приблизно 1 °С. Однак, ця похибка не повністю характеризує можливості пропонованого методу, через те, що, згідно з розділом 2, потужність нагрівачів змінювалася тільки при відхиленнях профілю від заданого більших 1 °С (гістерезис).

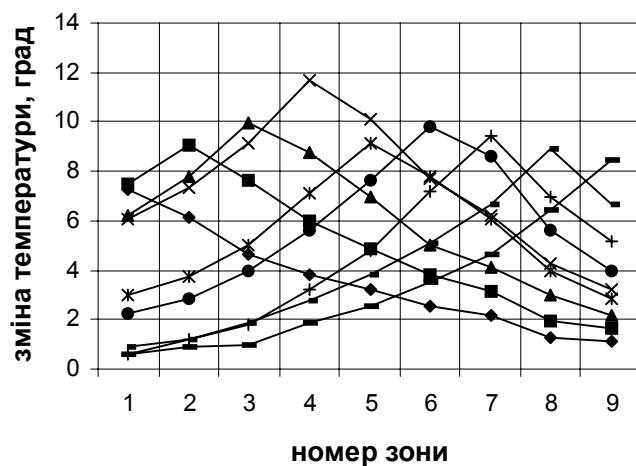


Рис. 4. Наведені профілі температурних полів від нагрівання макета окремими нагрівачами

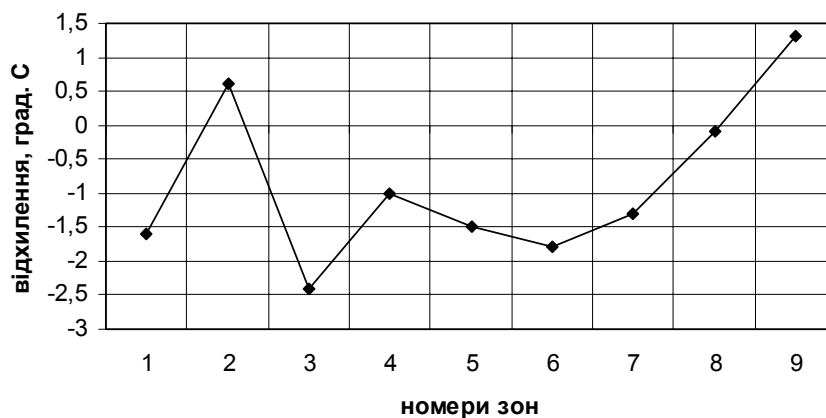


Рис. 5. Похибка встановлення профілю температурного поля за першою оцінкою потужності

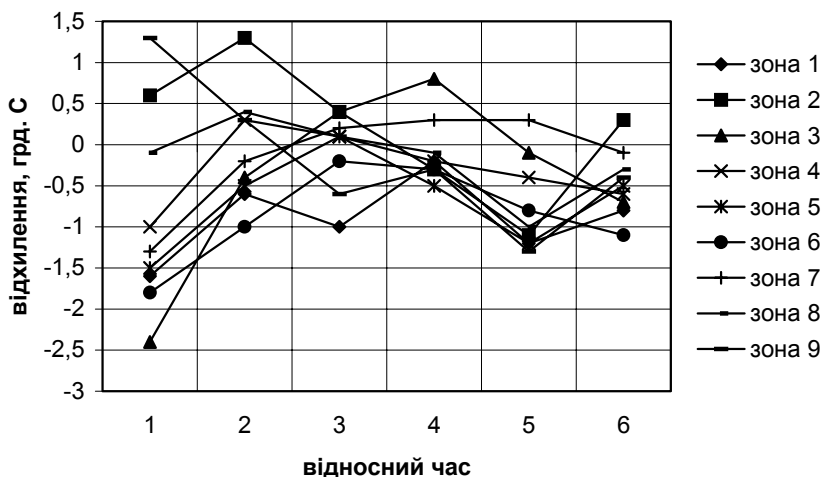


Рис. 6. Встановлення профілю температурного поля у разі тривалої експлуатації

Варто відзначити, що час на рис. 6 вказано відносний, його проміжки відповідають двом постійним часу прогрівання зон. А постійна часу перехідного процесу порівняно велика, для макета вона становила приблизно 1,9 год. Вивчаючи графіки рис. 6, бачимо, що під час дослідження макета автогенерації помітної амплітуди не виникало. Коливання графіків рис. 6 на рівні 1 °С можна пояснити як залишковою автогенерацією малої амплітуди, так і впливом гістерезису (1 °С), похибок дискретності широтно-імпульсного модулятора (1 %) і вимірювальної системи (1 мкВ, що відповідає 0,025 °С), а також дією шумів вимірювальної системи (теж близько 1 мкВ) і залишкових нормальних і загальних завод.

Висновки. Як зрозуміло з результатів виконаних теоретичних та експериментальних досліджень запропонованого методу керування профілем температурного поля вздовж електродів головної термопарі ТЕП з КППП, метод забезпечує достатню точність встановлення і підтримання заданого профілю. При тому метод не вимагає експериментальних досліджень великого обсягу або складності. Метод забезпечує також стійкість системи керування. При цьому обчислювальна складність методу є невисока. Це дозволяє використати його в системах на базі 8-бітних мікроконтролерів. Наприклад, для MCS-51 сумісних мікроконтролерів, при використанні мови С-51 (компілятор фірми Keil), необхідно не більше 4 кБ пам'яті програми і не більше 380 байт оперативної пам'яті.

1. Киренков И.И. *Некоторые законы термоэлектрической неоднородности // Исследования в области температурных измерений: Сб.тр. – М.: ВНИИМ. 1976. – С.11–15.* 2. Кочан О., Васильків Н., Кочан Р., Яскілка В. *Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар // Вісн. Терноп. держ. техн. ун-ту. 2007. – №1. – С.122–129.* 3. Кочан О.В., Кочан Р.В. *G01K 7/02. Термоелектричний перетворювач. Заявка на пат. України № а 2007 01855. Заявл. 22.02.2007.* 4. Кочан О. *Термоелектричний перетворювач з корекцією похибки неоднорідності // Вимірювальна техніка та метрологія. 2008. Вип. 68. – С.144–153.* 5. Кочан О. *Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля // Вісн. Терноп. держ. техн. ун-ту. 2008. – №2. – С.102–108.* 6. Соболев А.В. *Повышение точности регулирования температурного поля путем совершенствования алгоритма управления многозонным термическим объектом : Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06: – Рыбинск, 2004. – 159 с.* 7. Бутковский А.Г. *Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975. – 568 с.* 8. Крижанівський С.С. *Диференціальні рівняння. – Харків: Держ. наук.-техн. вид-во України ім. Гонти, 1938. – 398 с.* 9. Недужий И.А., Алабовский А.Н. *Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1981. – 248 с.* 10. Кочан О.В., Кочан Р.В. *Оцінка похибки вимірювання температури з допомогою термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля // Вісн. Хмельницьк. нац. ун-ту. – Хмельницький, №2, т. 1 “Технічні науки”. 2007. – С.237–241.* 11. Kochan O., Kochan R., Wojko O., Chyrka M. *Temperature Measurement System Based on Thermocouple With Controlled Temperature Field. Proc.of the IEEE international workshop on Intelligent Data Acquisition and Advancing Computing Systems (IDAACS'2007), Dortmund, Germany, September 6 – 8, 2007 pp. 47–51.* 12. http://ru.wikipedia.org/wiki/Memod_Gaycca. 13. Кочан О.В., Васильків Н.М., Яскілка В.Я. *Піч дослідження впливу температурного поля на термоелектричний перетворювач // XII наук. конф. Тернопільськ. держ. техн. ун-ту імені Івана Пулюя. – Тернопіль, 15 травня 2008. С. 150.* 14. О. Кочан, Н. Васильків, В. Яскілка. *Стенд дослідження термоелектричних перетворювачів з керованим профілем температурного поля // Вісник Терноп. держ. техн. ун-ту (прийнято до друку).*