

УДК 536.531

**Н. Васильків; О. Кочан**

*Тернопільський національний економічний університет*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІН ПРОФІЛЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ПОХИБКУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ НЕОДНОРІДНИМИ ТЕРМОПАРАМИ**

***Резюме.** Досліджено прояв однієї з малодосліджених похибок термопар – похибки від набутої в процесі експлуатації термоелектричної неоднорідності їх електродів. Дослідження цієї похибки проведено на основі результатів експериментальних досліджень часового дрейфу характеристики перетворення термопар, для чого розроблено спеціальну методiku. Проведені дослідження дозволили оцінити похибку вимірювання температури залежно від характеру змін профілю температурного поля і виявити найбільш небезпечний режим експлуатації термопар.*

***Ключові слова:** термопари, термоелектричний перетворювач, похибка неоднорідності, температурне поле.*

**N. Vasytkiv, O. Kochan**

## **INVESTIGATION OF INFLUENCE THE CHANGE PROFILE OF TEMPERATURE FIELD ON MEASUREMENT TEMPERATURE BY HETEROGENEOUS THERMOCOUPLES**

***The summary.** In this paper the investigation of one of less investigational errors of thermocouples - errors from the thermo-electric heterogeneity of their electrodes purchased in the process of exploitation – has been shown. Research of this error is conducted on the basis of results of experimental researches of time drift characteristic of thermocouples transformation, what the special methodology is worked out for. The conducted researches allowed estimating the error of temperature measuring depending on character of changes of the temperature field type and educing the most dangerous mode of exploitation of thermocouples.*

***Key words:** thermocouples, thermo-electric transformer, error of heterogeneity, temperature field.*

**Вступ.** Термопари є одними з найбільш розповсюджених давачів температури в промисловості. Прогрес мікроелектроніки привів до того, що на сьогодні похибка вимірювання температури приладами і системами, що використовують термопари, практично повністю визначається похибками останніх [1, 2]. Термопари мають такі недоліки:

- 1) відносно великий початковий розкид характеристик перетворення (ХП) [3, 4];
- 2) значний часовий дрейф ХП [5, 6], пов'язаний з деградаційними процесами в електродах термопар під дією високих температур експлуатації;
- 3) значну набуто в процесі експлуатації термоелектричну неоднорідність, теж пов'язану з деградаційними процесами в термоелектродах [7, 8].

Методи зменшення впливу перших двох недоліків на результат вимірювання температури досліджені в ряді наукових робіт і узагальнені в [9, 10]. Третій недолік, як підкреслено в [11], менш досліджений, тому набуто в процесі експлуатації термоелектрична неоднорідність становить значну небезпеку. Її причиною є те, що швидкість протікання деградаційних процесів у термоелектродах залежить від температури експлуатації їх окремих ділянок, а проявляється вона як залежність термо-е.р.с. термопари від профілю температурного поля вздовж її електродів, незважаючи на те, що температура робочого і вільних кінців залишається постійною. Вперше на цю похибку звернуто увагу в [7], де зроблено висновок: “похибку дрейфу ХП термопар не можна коригувати”. Однак в роботах [8, 12] показано, що цей висновок надто

поспішний – розроблено метод метрологічної перевірки термопар у температурному полі, що імітує поле експлуатації [8], метод перерахунку похибки, знайденої в одному профілі температурного поля (наприклад, у профілі температурного поля метрологічної перевірки), в інший профіль температурного поля (наприклад, у профіль температурного поля експлуатації) [8], метод корекції похибки неоднорідності на базі математичних моделей дрейфу ділянок термопар [8], метод уточнення математичних моделей дрейфу ділянок термопар за результатами метрологічної перевірки [12].

Однак досі невідомі теоретичні або експериментальні дослідження максимальних значень похибки вимірювання температури, викликаних зміною профілю температурного поля вздовж електродів термопар, що мають значну, набуто в процесі тривалої експлуатації, термоелектричну неоднорідність електродів, об'єкта вимірювання. Основу для таких досліджень дає робота [13], де досліджено зв'язок похибки від часового дрейфу ХП термопар з похибкою від набутої неоднорідності як різних проявів одного і того ж процесу – накопичення деградаційних змін у термоелектродах, а також показано, що максимальні значення цих похибок рівні.

**Метою даної статті** є розроблення методики дослідження максимальних значень похибки вимірювання температури, викликаних набутою в процесі тривалої експлуатації термоелектричною неоднорідністю електродів термопар, а також проведення таких досліджень і виявлення найбільш небезпечних щодо впливу на результат вимірювання цієї похибки змін профілю температурного поля об'єктів вимірювання або режимів експлуатації термопар. Дослідження проведено методом імітаційного моделювання на базі результатів експериментальних досліджень часового дрейфу електродів термопар.

#### **Методика дослідження впливу профілю температурного поля на похибку вимірювання температури**

Як зазначено вище, основою для розроблення методики дослідження впливу профілю температурного поля на похибку вимірювання температури можуть бути результати досліджень, опубліковані в [13]. Через тісний зв'язок часового дрейфу і набутої неоднорідності як основу для досліджень можна використати результати експериментальних досліджень часового дрейфу термопар під дією високих температур. Найповніші результати таких досліджень для найпоширеніших термопар типу ХА наведено в [14].

Для оцінювання значень похибки від неоднорідності, аналогічно, як і в [8, 12], розіб'ємо кожен електрод термопар на ділянки, в межах яких характер дрейфу можна вважати однаковим. Як відомо [8, 12, 13], термо-е.р.с. кожної ділянки є функцією трьох змінних  $\Delta E = f(t_e, \tau_e, t_d)$  – температури експлуатації цієї ділянки  $t_e$ , часу експлуатації  $\tau_e$  і температури  $t_d$ , в яку ділянка потрапила в результаті зміни профілю температурного поля (температури діапазону). Однак функцію трьох змінних, по-перше, важко апроксимувати, по-друге, для її апроксимації немає достатньої кількості результатів експериментальних досліджень. Тому для оцінювання похибки неоднорідності використаємо спрощену функцію двох змінних  $\Delta E = f(t_e, t_d)$ , а оцінювання похибки від неоднорідності проведемо для фіксованого значення часу експлуатації (1000 годин). Апроксимацію проведемо для термопар типу ХА, що експлуатувалися при температурі робочого кінця 800°C. Через те, що ми досліджуємо властивості похибки, мала похибка апроксимації не є основною вимогою. Важливішою є простота апроксимаційних функцій та можливість їх диференціювання в довільній точці.

Через те, що, коли  $t_e = 0$  або  $t_d = 0$ , вплив часового дрейфу на результат вимірювання температури відсутній, тобто  $\Delta E = 0$ , функцію дрейфу доцільно представити як добуток двох функцій [15]:

$$\Delta E = k \cdot f(t_e) \cdot \varphi(t_d), \quad (1)$$

де  $k$  – масштабний коефіцієнт, а функції  $f(t_e)$ ,  $\varphi(t_d)$  незалежні та дорівнюють нулю при нульовому значенні аргументу.

Попередні дослідження показали, що залежність дрейфу хромелевого електрода від температури експлуатації  $t_e$  доцільно апроксимувати функцією виду  $\sqrt{t_e}$ , а від температури діапазону  $t_d$  – функцією виду  $a_n \cdot t_d^n + \dots + a_1 \cdot t_d$ . Коефіцієнти функцій  $k, a_n, \dots, a_1$  визначено шляхом перебору їх значень з допомогою комп'ютерної програми. Для термопар типу ХА, які вимірюють температуру  $800^\circ\text{C}$ , згідно з [14], дрейф хромелевого електрода при 1000 годинах експлуатації описується функцією виду

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

а дрейф алюмелевого електрода – функцією виду

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

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

Для проведення оцінювання впливу набутої в процесі експлуатації неоднорідності термоелектродів на результат вимірювання температури розіб'ємо обидва електроди термопари на 24 однакові ділянки (рис. 1). Крім того, введемо такі припущення:

1. Температура вільних кінців становить  $0^\circ\text{C}$ . При цій температурі експлуатуються ділянки від 1 до 8.
2. Температура робочого кінця становить  $800^\circ\text{C}$ . При цій температурі експлуатуються ділянки від 17 до 24.
3. Температурне поле рівномірно змінюється від  $0^\circ\text{C}$  до  $800^\circ\text{C}$ . У зоні температурного градієнту перебувають ділянки від 9 до 16. Різниця температур між початком і кінцем  $i$ -тої ділянки  $\Delta t = t_i - t_{i-1} = 100^\circ\text{C}$ , тобто на кожен ділянку припадає зміна температури  $100^\circ\text{C}$ .
4. У межах кожної ділянки неоднорідність не проявляється.
5. За температуру експлуатації  $t_e$  приймається середнє арифметичне значення температур експлуатації початку та кінця ділянки до зміни профілю температурного поля.
6. За температуру діапазону  $t_d$  приймається середнє арифметичне значення температур експлуатації початку та кінця ділянки після зміни профілю температурного поля.

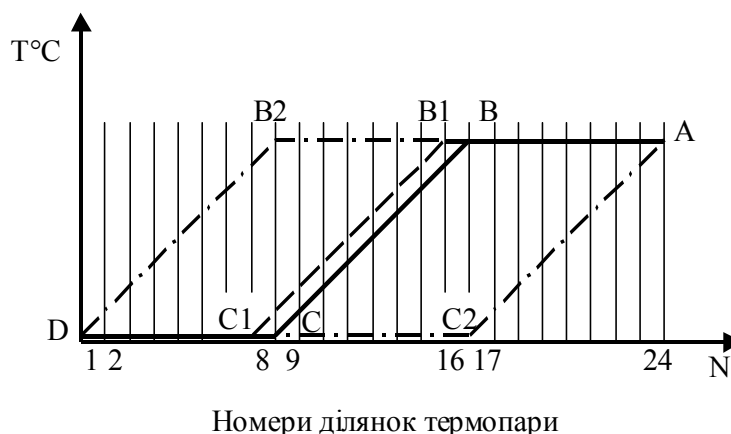


Рисунок 1 – Розбиття електродів термопари на ділянки

Похибка від набутої в процесі експлуатації неоднорідності термоелектродів буде дорівнювати зміні вихідної термо-е.р.с. термопари, наприклад, при зміні профілю температурного поля з А,В,С,Д до А,В1,С1,Д. Причиною зміни вихідної термо-е.р.с. є неоднаковість відхилення ХП кожної ділянки неоднорідної термопари для різних температур діапазону  $t_d$ . Цю зміну вихідної термо-е.р.с. можна оцінити таким чином.

На першому етапі обчислимо відхилення ХП хромелевого  $\Delta E_X$  та алюмелевого  $\Delta E_A$  електродів термопари від номінальної до зміни профілю температурного поля, тобто при умові  $t_{di} = t_{ei}$ . Це означає, що температура кожної ділянки залишається незмінною. Обчислити відхилення  $\Delta E_X$  і  $\Delta E_A$  можна за формулою

$$\Delta E = \sum_{i=1}^{24} \Delta E_i = \sum_{i=1}^{24} \Delta e_i(t_{ei}, t_{di}) \cdot \Delta t_i, \quad (4)$$

де  $\Delta E_i$  – відхилення термо-е.р.с.  $i$ -тої ділянки відповідного термоелектрода від номінального значення;  $t_{ei}, t_{di}$  – температури експлуатації та діапазону  $i$ -тої ділянки відповідного термоелектрода;  $\Delta e_i(t_{ei}, t_{di})$  – відхилення питомої термо-е.р.с.  $i$ -тої ділянки відповідного термоелектрода;  $\Delta t_i$  – різниця температур між початком і кінцем ділянки (згідно з прийнятими припущеннями  $\Delta t_i = 100^\circ\text{C}$ ).

Значення дрейфу питомої термо-е.р.с.  $\Delta e_i(t_{ei}, t_{di})$  можна визначити з (2), (3) як їх часткові похідні за температурою діапазону  $t_d$ . Для цього запишемо відповідні залежності дрейфу питомої термо-е.р.с. при 1000 годинах експлуатації для хромелевого електрода

$$\Delta e_X^{1000} = 0,035 \sqrt{t_e} (-13,8 \cdot 10^{-7} \cdot t_d^2 + 0,55 \cdot 10^{-3} \cdot t_d + 0,213) \mu\text{V} / ^\circ\text{C} \quad (5)$$

і для алюмелевого електрода

$$\Delta e_A^{1000} = 0,035 \sqrt{t_e} (-16 \cdot 10^{-9} \cdot t_d^3 + 2,73 \cdot 10^{-5} \cdot t_d^2 - 0,76 \cdot 10^{-2} \cdot t_d + 0,715) \mu\text{V} / ^\circ\text{C}. \quad (6)$$

На другому етапі обчислимо відхилення ХП хромелевого  $\Delta E_X$  та алюмелевого  $\Delta E_A$  електродів термопари від номінальної після зміни профілю температурного поля з А,В,С,Д до А,В1,С1,Д, тобто при умові  $t_{di} \neq t_{ei}$ . Це означає, що температура  $t_{di}$  ділянок 8...16 змінилася, а температура всіх інших ділянок залишається незмінною. В цьому випадку обчислити відхилення  $\Delta E_X$  і  $\Delta E_A$  можна за формулою (4), але за умови підстановки в залежності (5), (6) відповідного значення  $t_{di}$ .

Різниця значень відхилень ХП хромелевого  $\Delta E_X$  та алюмелевого  $\Delta E_A$  електродів термопари від номінальної, визначена до і після зміни профілю температурного поля, відповідає похибці від набутої термоелектричної неоднорідності для даної зміни профілю температурного поля. Для побудови функціональної залежності похибки неоднорідності від зміни профілю температурного поля необхідно повторити другий етап обчислень для отримання всіх проміжних значень похибки, що відповідають послідовному переміщенню профілю температурного поля в можливих межах.

Якщо профіль температурного поля змістити до положення А,В2,Д, то, незважаючи на тривалий час експлуатації термопари, її дрейф ХП відсутній, адже в зону градієнта температури потрапили ділянки від 1 до 8, що знаходилися раніше при температурі вільних кінців і не дрейфували. Якщо профіль температурного поля змістити до положення А,С2,Д, то зміна ХП термопари буде максимальною, адже в зону градієнту температури потрапили ділянки від 17 до 24, що знаходилися раніше при максимальній температурі, тобто дрейфували з максимальною інтенсивністю. Таким чином, різниця термо-е.р.с., викликана зміною профілю температурного поля від

A,B2,D, до A,C2,D, як це було показано в [13], відповідає одночасно максимальній похибці часового дрейфу і максимальній похибці від набутої неоднорідності. Однак, якщо обчислити похибку дрейфу для профілю температурного поля A,B,C,D відповідно до запропонованої вище методики, то отримане значення дрейфу буде суттєво нижчим, ніж вказано в [14]. Це пов'язано з тим, що, як було вказано в [13], значення дрейфу, отримані під час експериментальних досліджень у незмінному температурному полі не відповідають максимальним, адже, згідно з (4), сумарний дрейф дорівнює сумі дрейфів ділянок, які потрапили в зону градієнта і генерують термо-е.р.с. А при постійній витримці термопар в профілі температурного поля A,B,C,D термо-е.р.с. генерують також ділянки, які експлуатуються при низьких температурах (наприклад, ділянки 9...11), і мають малий дрейф. Тому дані [14] для проведення досліджень згідно з розробленою методикою не придатні – потрібні результати досліджень максимального дрейфу ХП електродів термопар. Однак аналіз даних [14] показує, що криві дрейфу ХП термопар є подібними самі собі. Тому можна помножити залежності дрейфу питомої термо-е.р.с. (2), (3) на відповідні коефіцієнти  $K_p$ , які перетворять їх у наближені залежності максимального дрейфу питомої термо-е.р.с. Як показали результати обчислень, для залежності (2) дрейфу хромелю  $K_{pX} = 2,11$ , а для залежності (3) дрейфу алюмелю  $K_{pA} = 1,39$ .

### Результати дослідження впливу профілю температурного поля на похибку вимірювання температури

Можливі різні варіанти змін профілю температурного поля об'єкта вимірювання вздовж електродів термопар, яка розміщена в його стінці перпендикулярно до градієнта цього поля. Аналіз показує, що їх можна звести до комбінації з трьох базових варіантів. Перший варіант можна умовно назвати проникненням у стінку високої температури. Зміну профілю температурного поля вздовж електродів термопар, розбитої на 24 ділянки згідно з рис.1, проілюстровано на рис.2. Такий варіант можливий при зміні потужності об'єкта вимірювання в умовах інтенсивної тепловіддачі з поверхні (наприклад, при використанні водяного охолодження). Похибка від впливу зміни профілю для першого варіанта представлена на рис. 3. По осі абсцис відкладені номери ділянок проникнення високої температури, а по осі ординат – значення похибки від набутої за 1000 годин експлуатації неоднорідності. Як бачимо з рис.3, такий варіант зміни профілю температурного поля є не дуже небезпечним, максимальне значення похибки результату вимірювання температури від набутої в процесі експлуатації неоднорідності термоелектродів не перевищує  $2^{\circ}\text{C}$  і є меншим за допустиму похибку термопар. Нерівномірність ходу кривої похибки (рис.3) пояснюється своєрідним характером функції дрейфу алюмелевого термоелектрода.

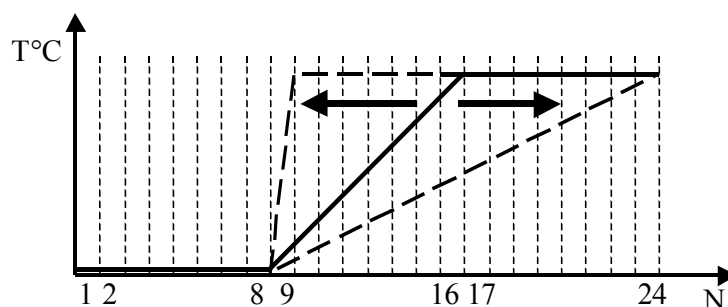


Рисунок 2 - Перший варіант зміни профілю температурного поля вздовж електродів термопар

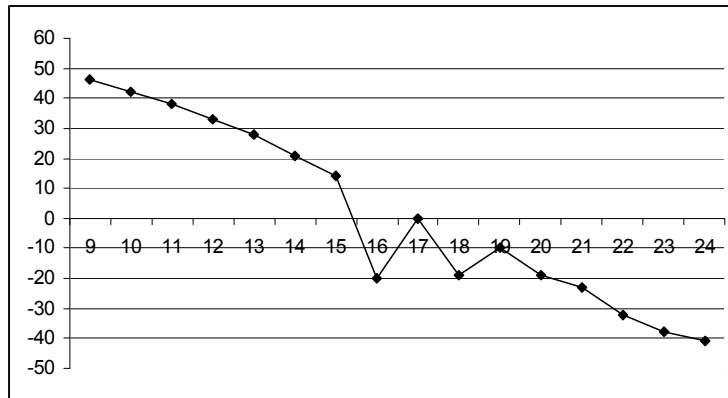


Рисунок 3 – Значення похибки (в мкВ) від впливу зміни профілю температурного поля для першого варіанта

Другий варіант можна умовно назвати проникненням у стінку температури оточуючого середовища. Для цього випадку зміну профілю температурного поля вздовж електродів термопари, розбитої на 24 ділянки згідно з рис.1, проілюстровано на рис.4. Такий варіант можливий при зміні тепловіддачі з поверхні об'єкта вимірювання (наприклад, у результаті добових і сезонних змін температури оточуючого середовища). Похибка від впливу зміни профілю температурного поля для другого варіанта представлена на рис. 5. По осі абсцис відкладені номери ділянок проникнення температури оточуючого середовища, а по осі ординат – значення похибки від набутої за 1000 годин експлуатації неоднорідності в мкВ. Як бачимо з рис. 5, такий варіант зміни профілю температурного поля є значно небезпечнішим, максимальне значення похибки результату вимірювання температури від набутої в процесі експлуатації неоднорідності термоелектродів досягає 5,5°C.

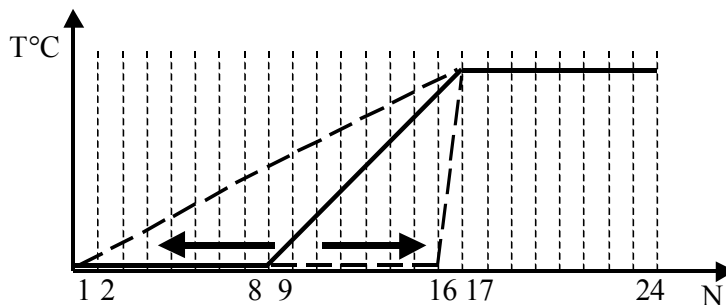


Рисунок 4 – Другий варіант зміни профілю температурного поля вздовж електродів термопари

Третій варіант являє собою комбінації двох попередніх, його можна інтерпретувати як зміну глибини занурення термопари. Для цього варіанта зміну профілю температурного поля вздовж електродів термопари проілюстровано на рис. 6. Похибка від впливу зміни профілю температурного поля для третього варіанта представлена на рис.7. По осі абсцис відкладені номери ділянок, профіль температурного поля яких змінився (рахунок ведеться по ділянках, що примикають до температури вільних кінців), а по осі ординат – значення похибки від набутої за 1000 годин експлуатації неоднорідності в мкВ. Як бачимо з рис.7, такий варіант зміни профілю температурного поля є найбільш небезпечним, максимальне значення похибки результату вимірювання температури від набутої в процесі експлуатації неоднорідності термоелектродів досягає 11°C. Крім того, за такого варіанта зміни профілю температурного поля максимальна чутливість до зміни (перша похідна похибки від набутої неоднорідності по зміні профілю температурного поля) має максимальне

значення біля перетину кривою похибки від набутої неоднорідності осі абсцис. Це означає підвищену чутливість цієї похибки до малих змін профілю температурного поля. Таким чином, третій варіант є безумовно найбільш небезпечним режимом експлуатації термопар, при якому похибка від набутої неоднорідності домінує.

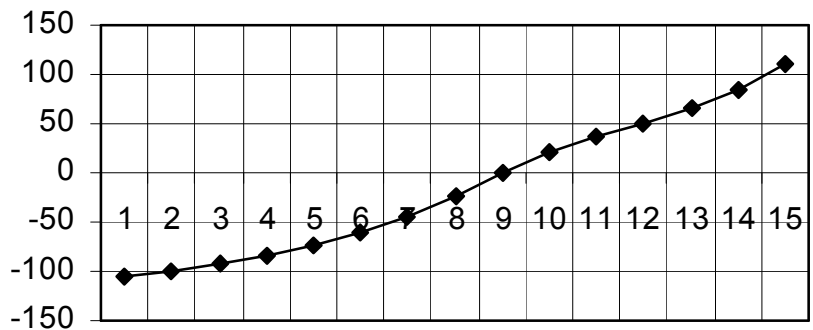


Рисунок 5 – Значення похибки (в мкВ) від впливу зміни профілю температурного поля для другого варіанта

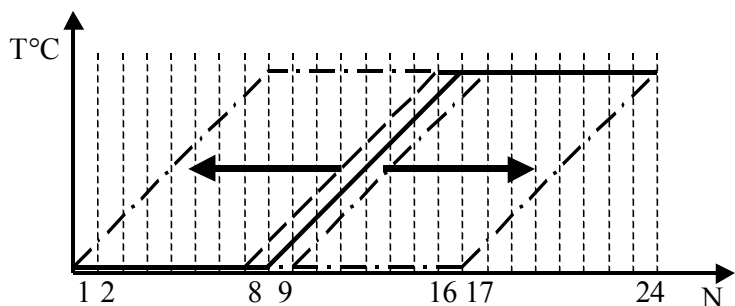


Рисунок 6 – Третій варіант зміни профілю температурного поля вздовж електродів термопар

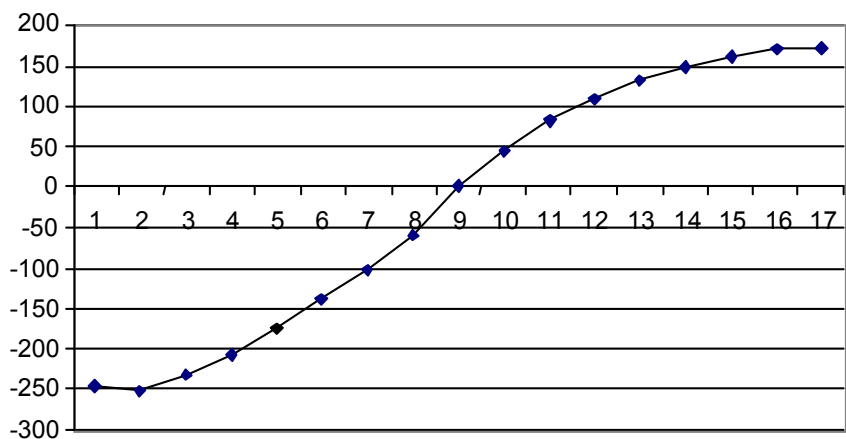


Рисунок 7 – Значення похибки (в мкВ) від впливу зміни профілю температурного поля для третього варіанта

**Висновки.** Як показали подані в даній статті дослідження впливу змін профілю температурного поля на похибку вимірювання температури термопарами, що мають значну, набуту в процесі експлуатації, неоднорідність термоелектродів, похибка результату вимірювання залежить від характеру змін згаданого профілю. В процесі дослідження виявлено найбільш небезпечні умови експлуатації термопар, з огляду прояву похибки від набутої неоднорідності, – зсув профілю температурного поля вздовж осі термопар. Такі умови цілком можуть виникати в процесі експлуатації

термопар. У такому випадку вже при експлуатації термопар типу ХА протягом півтора місяця при вимірюванні відносно невисокої температури 800°C похибка від зміни профілю температурного поля може досягати 11°C, а швидкість її наростання перевищувати 1 мкВ на 1°C зміни градієнта температурного поля. Отримані значення похибки конкретизують небезпеку від термоелектричної неоднорідності термопар і дозволяють реальніше оцінювати похибку вимірювання температури в умовах експлуатації.

#### **Література**

1. <http://www.thermo-electra.com/>
2. Кочан Р. В. Вдосконалення компонентів прецизійних розподілених інформаційно-вимірювальних систем: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.16 "Інформаційно-вимірювальні системи"/ Р.В.Кочан – Львів, 2005. – 16с.
3. Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення (ГОСТ 3044-94): ДСТУ 2837-94. – К.: Держстандарт України, 1995. –38 с. (Національний стандарт України).
4. International standard IEC 584-2.
5. Датчики для измерения температуры в промышленности / [Г.В.Самсонов, А.И.Киц, О.А.Кюздени и др.]. – К.:Наукова думка, 1972. – 223 с.
6. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis.- Vulkan-Verlag, Essen, 1981. – 498 p.
7. Киренков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности / И.И.Киренков // Исследование в области температурных измерений: Сб.тр. – М.: ВНИИМ,1976. – С. 11-15.
8. Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.11.15 "Метрология и метрологическое обеспечение"/ В.Ю.Мильченко. – М., 1984. – 25с.
9. Саченко А.А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий: дис... доктора техн. наук: 05.11.16 / Саченко Анатолий Алексеевич. – Ленинград, 1988. – 278 с.
10. Березький О.М. Системи вимірювання температури з елементами штучного інтелекту: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.04 "Прилади і методи вимірювання теплових величин"/ О.М.Березький. – Львів, 1996. – 16 с.
11. Southworth D.J. Temperature Calibration with Isotech Block Baths. Handbook of Isothermal Corporation Limited, 1999.
12. Чирка М.І. Підвищення точності вимірювання температури термоелектричними перетворювачами в нерівномірних теплових полях: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.04 "Прилади і методи вимірювання теплових величин"/ М.І.Чирка. – Львів, 1997. – 16 с.
13. Кочан О.В. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар / О.В.Кочан, Р.В.Кочан, В.Я.Яскілка, Н.М.Васильків // Вісник Тернопільського державного технічного університету . – 2007. – №1. – С.122–129.
14. Рогельберг И.Л. Стабильность термоэлектродвижущей силы термопар хромель-алюмель при нагреве на воздухе при температурах до 1200° С / И.Л.Рогельберг, А.Г.Нужнов, Г.Н.Покровская [и др.] // Исследование сплавов для термопар: Сб.тр. института Гипроцветметобработка. – М.: Металлургия, 1967. – Т.11. – Вып.24. – С.54–65.
15. Морс Ф.Н., Фешбах Г. Методы теоретической физики. Том 2. / Ф.Н.Морс, Г.Фешбах. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 886с.

*Одержано 29.04.2010 р.*