

УДК 536.531

**О. Кочан, Н. Васильків**

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

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОН МАКСИМАЛЬНОГО ПРОЯВУ ПОХИБКИ НЕОДНОРІДНОСТІ ТЕРМОПАР**

*У статті проведено теоретичний аналіз температурних зон, де максимально проявляє себе похибка від набутої в процесі тривалої експлуатації термопар термоелектричної неоднорідності їх електродів на генеровану термопарами термо-е.р.с. Зроблено висновки щодо доцільності експериментального дослідження похибки від набутої термопар термоелектричної неоднорідності в низькотемпературній зоні – від нуля до 350°C і виготовлення макетів термоелектричних перетворювачів для таких досліджень із конструкційних сталей.*

**Ключові слова:** термопари, термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля, похибка неоднорідності.

**O. Kochan, N. Vasytkiv**

## **INVESTIGATION THE ZONES OF THE MAXIMAL INFLUENCE OF AN ERROR OF THERMOCOUPLES HETEROGENEITY**

*Abstract. In this paper is analyzed the temperature zones, in which as much as possible shows itself an error from heterogeneity of thermocouples acquired during long operation. The conclusions about expediency of experimental researches of an error from heterogeneity of thermocouples in a zone of low temperatures from zero up to 350 degrees are made. The conclusions about expediency of manufacturing of breadboard models of thermocouple converters for such researches of constructional steel are made.*

**Key words:** thermocouples, thermocouple based sensor with controlled profile of temperature field, heterogeneity error.

### **Умовні позначення**

$e_N, \Delta e_k$  – номінальне значення питомої термо-е.р.с. (термоелектрична здатність) для даного термоелектроду (матеріалу) та індивідуальне її відхилення для  $k$  – тої ділянки відповідно;

$E_{\Sigma N}$  – номінальне значення термо-е.р.с., яке генерує термоелектрод під дією заданої різниці температур  $t_{rk} - t_0$  ;

$\nabla t, \nabla t_{CONS}, \nabla t_{VAR}$  – градієнт температурного поля вздовж термоелектродів термопари та його постійна та змінна частини;

$\Delta e_k$  – похибка окремих ділянок термоелектродів;

$\Delta E_{\Sigma}$  – сумарна похибка термоелектроду;

$\Delta \Delta E_{\Sigma}$  – вплив на результат вимірювання температури похибки неоднорідності.

**Вступ.** На сьогодні одними з найбільш розповсюджених первинних перетворювачів температури є термопари. Характерними для них є зростання похибки від часового дрейфу (поступової зміни) характеристики перетворення [1] та наростання похибки від набутої термоелектричної неоднорідності (зміни генерованої термо-е.р.с. від зміни профілю температурного поля вздовж термоелектродів при незмінній різниці температур між робочим і вільними кінцями [2]). Як показано в [3], обидві ці похибки є різними проявами однієї причини – поступової зміни кристалічного стану та хімічного складу термоелектродів під дією часу і температури експлуатації. Якщо на методи боротьби з часовим дрейфом звертається значна увага [4, 5], то похибка неоднорідності

залишається однією з найбільш мало досліджених похибок. Хоча, як вказано в [6], нехтування нею може суттєво обмежити ефективність боротьби з часовим дрейфом – адже, як показано в [3], максимальне значення похибки від неоднорідності електродів для даної термопари рівне максимальній похибці її часового дрейфу.

Враховуючи сказане, в [7-9] запропоновано нові шляхи боротьби з проявами похибки неоднорідності – термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля та спосіб корекції похибки неоднорідності термопар шляхом її прогнозу. Однак запропоновані способи і пристрої, для їх впровадження, вимагають проведення відповідних теоретичних та експериментальних досліджень. Метою даної статті є визначення умов, при яких спостерігається максимальний вплив на результат вимірювання температури похибки неоднорідності, тобто діапазонів температури, при яких необхідно проводити експериментальні дослідження. Визначення проводиться на прикладі найбільш розповсюджених термопар типу хромель-алюмель.

### **Методика визначення зони максимального прояву похибки неоднорідності**

Як показано в [3], сумарну термо-е.р.с.  $E_{\Sigma}$  одного термоелектроду можна визначити як

$$E_{\Sigma} = \int_0^{t_{rk}} (e_N + \Delta e_k) dt = \int_0^{t_{rk}} e_N dt + \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k(t) dt = E_{\Sigma N} + \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k(t) dt \quad , \quad (1)$$

де  $e_N, \Delta e_k$  – номінальне значення питомої термо-е.р.с. (термоелектрична здатність) даного термоелектроду (матеріалу) та індивідуальне її відхилення для  $k$  – тої ділянки відповідно;  $t_{rk}$  – температура робочого кінця термопари;  $E_{\Sigma N}$  – номінальне значення термо-е.р.с., яке генерує термоелектрод під дією заданої різниці температур  $t_{rk} - t_0$ .

Інтеграл в кінцевому перетворенні (1) визначає похибку  $\Delta E_{\Sigma}$  характеристики перетворення термоелектроду. Для переходу від інтегрування по температурі  $t$  до інтегрування по довжині  $l$  термоелектродів позначимо градієнт температурного поля вздовж термоелектродів

$$\nabla t = \frac{\partial t}{\partial l} \quad . \quad (2)$$

У процесі тривалої експлуатації, під дією високих температур, змінюється хімічний склад термоелектродів (окислення, міграція) та їх кристалічний стан, причому інтенсивність змін сильно залежить від температури, при якій дана ділянка перебувала під час експлуатації [1, 10]. В результаті накопичення цих змін похибка  $\Delta e_k$  окремих ділянок термоелектродів стає неоднаковою. Таким чином, на основі (1), з врахуванням (2) запишемо вираз, який визначає сумарну похибку термоелектроду  $\Delta E_{\Sigma}$  в температурному полі експлуатації

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k(t) dt = \int_0^l \Delta e_k(t) \frac{\partial t}{\partial l} dl = \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t dl \quad . \quad (3)$$

Для визначення зони максимального прояву похибки неоднорідності виділимо в градієнті температурного поля вздовж термоелектродів  $\nabla t$  постійну та змінну частини

$$\nabla t = \nabla t_{CONS} + \nabla t_{VAR} \quad (4)$$

і запишемо (3) з врахуванням (4)

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t dl = \int_0^l \Delta e_k(t) (\nabla t_{CONS} + \nabla t_{VAR}) dl = \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t_{CONS} dl + \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t_{VAR} dl \quad . \quad (5)$$

На основі аналізу (5) можна стверджувати, що сумарна похибка термоелектроду  $\Delta E_{\Sigma}$  визначається як постійною, так і змінною частинами градієнта температурного поля

вздовж термоелектродів  $\nabla t$ . Однак саме похибка неоднорідності  $\Delta\Delta E_{\Sigma}$ , власне як зміна генерованої термопарою термо-е.р.с. від зміни профілю температурного поля вздовж термоелектродів при незмінній різниці температур між робочим і вільними кінцями, визначається тільки другим інтегралом рівняння (5), тобто

$$\Delta\Delta E_{\Sigma} = \int_0^l \Delta e_k(t) \nabla t_{VAR} dl \quad . \quad (6)$$

Таким чином, з (6) очевидно, що, максимальний вплив на результат вимірювання температури похибка неоднорідності  $\Delta\Delta E_{\Sigma}$ , при деякій фіксованій зміні градієнту  $\nabla t_{VAR}$ , буде мати при умові максимуму індивідуального відхилення номінального значення питомої термо-е.р.с. даного термоелектроду  $\Delta e_k$  тих ділянок термопари, яким відповідає зміна градієнту  $\nabla t_{VAR}$ . Для знаходження цього максимуму слід спочатку, на основі (1), записати похибку  $\Delta E_{\Sigma}$  характеристики перетворення термоелектроду

$$\Delta E_{\Sigma} = \int_0^{t_{rk}} \Delta e_k(t) dt \quad . \quad (7)$$

Звідси видно, що

$$\Delta e_k = \frac{dE_{\Sigma}}{dt} \quad . \quad (8)$$

З викладеного можна зробити висновок, що похибка неоднорідності  $\Delta\Delta E_{\Sigma}$  буде максимально впливати на результат вимірювання при тих температурах, при яких зміна функції похибки дрейфу (7) буде максимальною, тобто функція (8) швидкості зміни похибки дрейфу  $\Delta e_k$  буде мати максимальні значення.

Згідно з [11], екстремуми функції  $\Delta e_k$  можна знайти, прирівнявши до нуля її похідну

$$\frac{d^2 E_{\Sigma}}{dt^2} = 0 \quad . \quad (9)$$

Однак нас цікавлять не екстремуми функції (8), а максимальні значення зміни функції (7), і не в цілому, а на деякому відрізку, який відповідає діапазону вимірювання температури даною термопарою. Тому, згідно з [11], необхідно додатково перевірити значення зміни функції (7) на кінцях цього відрізка. Таку перевірку можна виконати, знайшовши значення функції (8) на кінцях заданого відрізка.

### **Зона максимального прояву похибки неоднорідності хромелевого електрода**

Для визначення зон максимального прояву похибки неоднорідності окремих електродів необхідно спочатку апроксимувати результати дослідження їх дрейфу. Така робота для електродів найбільш розповсюджених термопар типу хромель-алюмель вже проведена у [3] для результатів дослідження, опублікованих в [10]. Для хромелевого термоелектроду діаметром 1,2 мм, при його експлуатації протягом 10000 годин при температурі 800°C, апроксимована функція похибки його характеристики перетворення  $\Delta E_{\Sigma X}$  (в мікрвольтах) має вид

$$\Delta E_{\Sigma X} = -4,315 \times 10^{-7} \times t^3 + 2,366 \times 10^{-4} \times t^2 + 0,2744 \times t \quad . \quad (10)$$

Перша похідна в цьому випадку буде функцією виду

$$\frac{dE_{\Sigma X}}{dt} = -12,945 \times 10^{-7} \times t^2 + 4,732 \times 10^{-4} \times t + 0,2744 \quad , \quad (11)$$

а друга – функцією виду

$$\frac{d^2 E_{\Sigma X}}{dt^2} = -25,89 \times 10^{-7} \times t + 4,732 \times 10^{-4} \quad . \quad (12)$$

З (12), згідно з (9), ординату екстремуму функції (10) можна знайти з рівняння

$$-25,89 \times 10^{-7} \times t + 4,732 \times 10^{-4} = 0, \quad (13)$$

рішенням якого є значення  $t \approx 182,8^\circ\text{C}$ . Швидкість зміни функції (10) похибки дрейфу хромелю для значень  $t = 0$ ,  $t = 182,8^\circ\text{C}$  і  $t = 800^\circ\text{C}$  можна визначити шляхом підстановки цих значень в (11). Вони складатимуть відповідно  $0,274 \mu\text{V}^\circ\text{C}$ ,  $0,317 \mu\text{V}^\circ\text{C}$  та  $-0,175 \mu\text{V}^\circ\text{C}$ . Таким чином, найбільш небезпечною зоною, в якій похибка неоднорідності хромелю найбільше проявляє себе, тобто максимально впливає на результат вимірювання температури, є зона в околиці температури  $182,8^\circ\text{C}$ .

### **Зона максимального прояву похибки неоднорідності алюмелевого електроду**

Аналогічно до попереднього розділу, для алюмелевого термоелектроду діаметром 1,2 мм, при його експлуатації протягом 10000 годин при температурі  $800^\circ\text{C}$ , апроксимована функція похибки характеристики перетворення  $\Delta E_{\Sigma A}$  (в мікрвольтах) має вид

$$\Delta E_{\Sigma A} = -3,65 \times 10^{-9} \times t^4 + 7 \times 10^{-6} \times t^3 - 4,192 \times 10^{-3} \times t^2 + 0,8864 \times t. \quad (14)$$

Перша похідна в цьому випадку буде функцією виду

$$\frac{dE_{\Sigma A}}{dt} = -14,6 \times 10^{-9} \times t^3 + 21 \times 10^{-6} \times t^2 - 8,384 \times 10^{-3} \times t + 0,8864. \quad (15)$$

а друга – функцією виду

$$\frac{d^2 E_{\Sigma A}}{dt^2} = -43,8 \times 10^{-9} \times t^2 + 42 \times 10^{-6} \times t - 8,384 \times 10^{-3}. \quad (16)$$

З (16), згідно з (9), ординати екстремумів функції (14) можна знайти з рівняння

$$-43,8 \times 10^{-9} \times t^2 + 42 \times 10^{-6} \times t - 8,384 \times 10^{-3} = 0, \quad (17)$$

розв'язками якого є значення  $t_1 \approx 282,5^\circ\text{C}$  і  $t_2 \approx 676,5^\circ\text{C}$ . Швидкість зміни функції (14) похибки дрейфу хромелю для значень  $t = 0$ ,  $t = 282,5^\circ\text{C}$ ,  $t = 676,5^\circ\text{C}$  і  $t = 800^\circ\text{C}$  можна визначити шляхом підстановки цих значень в (15). Вони складатимуть відповідно  $0,886 \mu\text{V}^\circ\text{C}$ ,  $-0,135 \mu\text{V}^\circ\text{C}$ ,  $0,305 \mu\text{V}^\circ\text{C}$  та  $0,144 \mu\text{V}^\circ\text{C}$ . Таким чином, найбільш небезпечною зоною, в якій похибка неоднорідності алюмелю найбільше проявляє себе, тобто максимально впливає на результат вимірювання температури, є зона в околиці температури вільних кінців.

### **Зона максимального прояву похибки неоднорідності термопар в цілому**

Знаючи залежності (10) і (14), можна визначити також зону максимального прояву похибки неоднорідності для термопар хромель-алюмель в цілому. Для цього просумуємо дрейфи обох термоелектродів, тобто залежності (10) і (14)

$$\Delta E_{\Sigma XA} = -3,65 \times 10^{-9} \times t^4 + 6,569 \times 10^{-6} \times t^3 - 3,955 \times 10^{-3} \times t^2 + 1,161 \times t. \quad (18)$$

Перша похідна в цьому випадку буде функцією виду

$$\frac{dE_{\Sigma XA}}{dt} = -14,6 \times 10^{-9} \times t^3 + 19,71 \times 10^{-6} \times t^2 - 7,91 \times 10^{-3} \times t + 1,161, \quad (19)$$

а друга – функцією виду

$$\frac{d^2 E_{\Sigma XA}}{dt^2} = -43,8 \times 10^{-9} \times t^2 + 39,42 \times 10^{-6} \times t - 7,91 \times 10^{-3}. \quad (20)$$

З (20), згідно з (9), ординати екстремумів функції (18) можна знайти з рівняння

$$-43,8 \times 10^{-9} \times t^2 + 39,42 \times 10^{-6} \times t - 7,91 \times 10^{-3} = 0, \quad (21)$$

розв'язками якого є значення  $t_1 \approx 304^\circ\text{C}$  і  $t_2 \approx 596^\circ\text{C}$ . Швидкість зміни функції (18) похибки дрейфу термопар хромель-алюмель в цілому для значень  $t = 0$ ,  $t = 304^\circ\text{C}$ ,  $t = 596^\circ\text{C}$  і  $t = 800^\circ\text{C}$  можна визначити шляхом підстановки цих значень в (19). Вони складатимуть відповідно  $1,161 \mu\text{V}^\circ\text{C}$ ,  $0,1677 \mu\text{V}^\circ\text{C}$ ,  $0,357 \mu\text{V}^\circ\text{C}$  та  $-0,0278 \mu\text{V}^\circ\text{C}$ . Таким чином, найбільш небезпечною зоною, в якій похибка

неоднорідності термопар хромель-алюмель в цілому найбільше проявляє себе, тобто максимально впливає на результат вимірювання температури, є зона в околиці температури вільних кінців.

### **Висновки**

Наведений у статті аналіз показав, що, незважаючи на те, що часовий дрейф всіх термопар зростає при їх експлуатації при високих температурах (використанні для тривалого вимірювання високих температур), похибка неоднорідності термоелектродів найбільш поширеного типу термопар – хромель-алюмель – максимально впливає на результат вимірювання температури при зміні профілю температурного поля якраз в низькотемпературній зоні – від нуля до 350°C. Відповідно в цій зоні треба проводити як теоретичні, так і експериментальні дослідження методів і засобів боротьби з похибкою неоднорідності термопар. З результатів проведених в даній статті теоретичних досліджень також впливає доцільність виготовлення макетів термоелектричних перетворювачів, призначених для дослідження ефективності методів корекції та компенсації похибки неоднорідності, із звичайних конструкційних сталей, а не з спеціальних високотемпературних нержавіючих сталей, які важко обробляються.

### **Література**

1. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В.Самсонов, А.И.Киц, О.А.Кюздени и др. - Киев.: Наукова думка, 1972.- 223 с.
2. Гришков А.Я., Сирота А.М. Влияние неоднородности термоэлектродов на показания термопар// Исследования сплавов для термопар. - М.: Металлургия, 1969. - С.107-115.
3. О. Кочан, Н. Васильків, Р. Кочан, В. Яскілка. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар. Вісник Тернопільського державного технічного університету. - №1, 2007. С.122-129.
4. Саченко А.А. Разработка методов повышения точности и создание систем прецизионного измерения температуры для промышленных технологий. Дис...д-ра техн. наук: 05.11.16. - Ленинград, 1988.- 278с.
5. Березький О.М. Засоби вимірювання температури з елементами штучного інтелекту. Автореферат дис... к.т.н.: 05.11.04 - Львів, Державний університет "Львівська політехніка", 1996.
6. Кириков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности // Исследование в области температурных измерений: Сб.тр.- М.: ВНИИМ.-1976.-С.11-15.
7. О.В. Кочан, Р.В. Кочан. Термоелектричний перетворювач. Пат. 200701855 Україна, заявлено 22.02.2007.
8. О.В. Кочан. Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля. Вісник Тернопільського державного технічного університету. - №2, 2008, с.102-108.
9. Васильків Н.М., Кочан О.В., Кочан В.В. Спосіб корекції похибки неоднорідності термопар. Заявка на патент № а 2008 05623, МПК G01K 7/00, заявлено 29.04.2008.
10. Рогельберг Н.А., Пигидина Э.Н., Покровская Г.Н. и др. Изменения термоэлектрической силы проволок из хромеля и алюмеля при нагреве на воздухе при 800°C продолжительностью до 10000 ч. // В сб. Исследование сплавов для термопар. Труды института Гипроцветметобработка. Том III. - М.: "Металлургия", 1969. -С.33-41.
11. Ковальчук Б.В., Шіпка Й.Г. Математичний аналіз. В трьох частинах. Навчальний посібник. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2002. – 270 с.

*Одержано 20.03.2009 р.*