



УКРАЇНА

(19) UA (11) 54500 (13) U  
(51) МПК  
G01K 7/10 (2006.01)МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

## (54) ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

1

2

(21) u201006245

(22) 25.05.2010

(24) 10.11.2010

(46) 10.11.2010, Бюл. № 21, 2010 р.

(72) СКРИПНИК ЮРІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ, ВАГАНОВ  
ОЛЕКСІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ, КОМНАЦЬКА ІННА  
МИКОЛАЇВНА, РУЖИНСЬКИЙ ВОЛОДИМИР АН-  
ДРІЙОВИЧ(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ(57) Термоелектричний спосіб вимірювання тем-  
ператури, при якому розміщують робочий кінець  
термопари в тепловому контакті з контрольованим  
об'єктом, вимірюють початкову термоЕРС  $E_1$  на  
вільних кінцях термопари, пропускають через неї  
постійний струм в напрямі, при якому робочий кі-  
нець охолоджується, поступово збільшують та  
періодично переривають струм, вимірюють термоЕРС  $E_2$  знеструмленої термопари і порівнюють  
її з початковою термоЕРС  $E_1$ , встановлюють ком-

пенсуючий струм, при перериванні якого термоЕРС  $E_2$  досягає свого початкового значення  $E_1$ , і визначають температуру за формулою, який **від-різняється** тим, що попередньо фіксують температуру вільних кінців термопари  $T_0$  при початковій термоЕРС  $E_1$ , додатково включають компенсуючий струм до збільшення термоЕРС  $E_3$ , змінюють напрям протікання компенсуючого струму для нагрівання термопари, відключають компенсуючий струм, вимірюють термоЕРС нагрітої термопари  $E_4$ , включають компенсуючий струм, вимірюють зменшене значення термоЕРС  $E_5$ , а температуру визначають за формулою:

$$T_X = \frac{E_3 + E_4 - E_5 - E_1}{E_3 + E_4 - E_5 - 5E_1} \cdot T_0,$$

де  $T_0$  - температура вільних кінців термопари.

Корисна модель належить до техніки вимірювання температур за допомогою термопар і може бути використана для підвищення чутливості і точності термоелектричних термометрів за допомогою компенсуючого струму, що протікає через термопару.

Для підвищення чутливості термоелектричних термометрів застосовують термопари з напівпровідникових електродів, наприклад, із сплавів вісмуту з оловом і вісмуту з сурмою, що мають високе значення термоелектрорушійної сили (термоЕРС) - 140-160 мкВ/К проти 40-60 мкВ/К у металевих термопар. Ще більші термоЕРС створюють напівпровідникові електроди з електронною та дірковою провідностями. Так, термоелектроди із сплавів сурми з цинком (SbZn) мають електронну провідність і чутливість 200-250 мкВ/К. Термоелектроди із сплаву сурми з кадмієм (SbCd) мають діркову провідність і чутливість 300-400 мкВ/К. Сумарна чутливість термопари з такими електродами досягає значення 500-600 мкВ/К.

ТермоЕРС на виході металевих термопар лінійно залежить від різниці температури робочого кінця  $T_X$  і температури вільних кінців  $T_0$ :

$$E = S(T_X - T_0), \quad (1)$$

де  $S$  - чутливість термопари.

У напівпровідникових термопарах чутливість  $S$  істотно залежить від різниці температур  $T_X - T_0$ , якщо температура  $T_0 = \text{const}$ . Тому градувальні характеристики таких термопар нелінійні, а з врахуванням специфіки напівпровідникових матеріалів, і нестабільні в процесі експлуатації. Нелінійність і нестабільність значною мірою обмежує використання напівпровідникових термопар для точних вимірювань температури.

Відомий термоелектричний спосіб вимірювання температури (Патент України № 22594А, МПК G01K7/02, 1997 р.), оснований на додатковому нагріванні робочого кінця термопари постійним струмом за рахунок виділення теплоти Пельтьє за

(13) U

(11) 54500

(19) UA

час, менший теплової постійної термопар, і визначенні температури  $T_X$  за формулою:

$$T_X = \frac{\epsilon_1 + E_0}{\epsilon_2 - E_1} \cdot \frac{I_0 \cdot \Delta t}{c \cdot m}, \quad (2)$$

де  $E_1$  і  $E_2$  - термоЕРС до нагрівання і після нагрівання робочого кінця термопар;

$E_0$  - термоЕРС вільних кінців термопар;

$I_0$  - постійний струм через робочий кінець термопар;

$\Delta t$  - час нагрівання термопар;

$c$  і  $m$  - питома усереднена теплоємність робочого кінця термопар і його маса.

У формулу (2) не входить чутливість  $S$  термопар, а, отже, на покази термоелектричного термометра не впливає її нестабільність і залежність від температури. Проте, необхідність знати теплоємність робочого кінця термопар і похибку у встановленні часу нагрівання, а також неврахування теплоти Джоуля в електродах термопар, знижує точність вимірювання температури  $T_X$ .

Відомий термоелектричний спосіб вимірювання температури (Патент України № 28733А, МПК G01K7/02, 1997 р.), в якому після вимірювання термоЕРС робочий кінець термопар додатково охолоджують постійним струмом за час, менший за теплову постійну термопар, змінюють напрям струму і здійснюють додатковий нагрів робочого кінця термопар за той же проміжок часу, визначають температуру за формулою:

$$T_X = \frac{\epsilon_X'' - E_X' \cdot \epsilon_K'' + E_K' - 2E_K}{\epsilon_K'' - E_K' \cdot \epsilon_X'' + E_X' - 2E_X} \cdot T_K, \quad (3)$$

де  $E_K, E_X$  - термоЕРС в процесі калібрування і початку вимірювань;

$E_K', E_X'$  - термоЕРС після охолодження в процесі калібрування і вимірювань;

$E_K'', E_X''$  - термоЕРС після нагрівання в процесі калібрування і вимірювань;

$T_K$  - температура калібрування термопар.

В процесі експлуатації через старіння і зношення термопар змінюються значення термоЕРС, отримані в процесі калібрування перед початком експлуатації  $\epsilon_K, E_K', E_K''$  при температурі  $T_K$ . Тому в процесі вимірювання робочих температур  $T_X$  неминуче виникає похибка. Повторне калібрування в робочих умовах ускладнене, що обмежує можливість високоточних вимірювань температури напівпровідниковими термопарами.

Відомий також термоелектричний спосіб вимірювання температури (Патент України № 48611А, МПК G01K7/10, 2002 р.), при якому розміщують робочий кінець термопар в тепловому контакті з контрольованим об'єктом, вимірюють початкову термоЕРС  $E_1$  на вільних кінцях термопар, пропускають через неї постійний струм в напрямі, при якому робочий кінець охолоджується, поступово збільшують та періодично переривають струм, вимірюють термоЕРС  $E_2$  знеструмленої термопар-

ри і порівнюють її з початковою термоЕРС  $E_1$ , встановлюють компенсуючий струм, при перериванні якого термоЕРС  $E_2$  досягає свого початкового значення  $E_1$  і визначають температуру за формулою. Крім того, відомий термоелектричний спосіб вимірювання температури включає такі операції, як зменшення компенсуючого струму в два рази, повторне охолодження робочого кінця термопар цим струмом на протязі часу, меншого за теплову постійну термопар, нагрівання робочого кінця цим струмом, вимірювання компенсуючого струму і електричної потужності, яка розсіюється в термопарі, і визначення температури, що вимірюється, за формулою:

$$T_X = \frac{\epsilon_3 - E_2}{\epsilon_3 - E_2'} \cdot \frac{\epsilon_3' + E_2' - 2E_1'}{\epsilon_3 + E_2 - 2E_1} \cdot \left( \frac{W}{W'} \right)^2 \cdot \left( \frac{l_K}{l_K'} \right) \cdot T_K, \quad (4)$$

де  $E_1, E_2$  і  $E_3$  - термоЕРС, виміряні на початку додаткового охолодження і нагрівання;

$E_1', E_2'$  і  $E_3'$  - термоЕРС, виміряні в процесі калібрування;

$W$  і  $W'$  - електричні потужності, що розсіюються в термопарі при вимірюванні та калібруванні;

$l_K, l_K'$  - компенсаційні струми при вимірюванні та калібруванні.

Вимірювання електричної потужності, що розсіюється в термопарі, при встановленому компенсаційному струмі дозволяє врахувати зміни не тільки чутливості (коефіцієнт Зеебека), коефіцієнта Пельтьє, але і опір електродів термопар. Проте, зміни умов теплообміну термопар з об'єктом, який контролюють, в процесі додаткового охолодження і нагрівання робочого кінця термопар не враховуються. Зокрема, не враховуються зміни еквівалентної теплоємності, яка впливає як на калібрувальні, так і на поточні значення термоЕРС. В результаті з'являється прогресуюча похибка, яка не дозволяє гарантувати високу точність вимірювання протягом тривалого часу. В основу корисної моделі покладена задача створити такий термоелектричний спосіб вимірювання температури, в якому введення нових операцій і нової розрахункової формули дозволило б виключити всі похибки, що з'являються внаслідок зміни параметрів термопар в процесі її експлуатації, що забезпечить високу точність вимірювання температури напівпровідниковими термопарами.

Поставлена задача вирішується тим, що в термоелектричному способі вимірювання температури, при якому розміщують робочий кінець термопар в тепловому контакті з контрольованим об'єктом, вимірюють початкову термоЕРС  $E_1$  на вільних кінцях термопар, пропускають через неї постійний струм в напрямі, при якому робочий кінець охолоджується, поступово збільшують та періодично переривають струм, вимірюють термоЕРС  $E_2$  знеструмленої термопар і порівнюють її з початковою термоЕРС  $E_1$  встановлюють компенсуючий струм, при перериванні якого термо-

ЕРС  $E_2$  досягає свого початкового значення  $E_1$  і визначають температуру за формулою, згідно з корисною моделлю, попередньо фіксують температуру вільних кінців термопари  $T_O$  при початковій термоЕРС  $E_1$ , додатково включають компенсуючий струм до збільшення термоЕРС  $E_3$ , змінюють напрям протікання компенсуючого струму для нагрівання термопари, відключають компенсуючий струм, вимірюють термоЕРС нагрітої термопари  $E_4$ , включають компенсуючий струм, вимірюють зменшене значення термоЕРС  $E_5$ , а температуру визначають за формулою:

$$T_X = \frac{E_3 + E_4 - E_5 - E_1}{E_3 + E_4 - E_5 - 5E_1} \cdot T_O, \quad (5)$$

де  $T_O$  - температура вільних кінців термопари.

Введення в термоелектричний спосіб вимірювання температури нових операцій по нагріванню термопари компенсуючим струмом, вимірюванню термоЕРС при відключеному і включеному компенсуючому струмі, дозволяє виявити вплив падіння напруги на електродах термопари від компенсуючого струму на термоЕРС як в режимі вимірювання температури контрольованого об'єкту, що нагріває робочий кінець термопари, так і при додатковому нагріві робочого кінця термопари компенсуючим струмом. Переривання компенсуючого струму забезпечує можливість вимірювання термоЕРС тільки в залежності від теплового стану робочого кінця термопари. Подальші включення компенсуючого струму і протікання його по електродах термопари дозволяє врахувати вплив опору термопари на тепловий баланс її робочого кінця. Запропонована формула для визначення температури, що вимірюється, включає тільки термоЕРС, які безпосередньо вимірюються в процесі контролю без використання результатів попереднього калібрування. Це дозволяє врахувати всі зміни параметрів термопари в процесі її експлуатації, а також нелінійну залежність чутливості термопари від значень температури, що забезпечує високу точність вимірювання.

На рисунку приведена електрична схема, що дозволяє вимірювати температуру запропонованим способом.

На малюнку робочий кінець 1 термопари з електродів 2 і 3 знаходиться в зоні температури, що вимірюється, а її вільні кінці розташовані на мідних колодках 4 і 5 з температурою  $T_O$ . До потенційних затисків мідних колодок 4 і 5 підключений мілівольтметр 6, а до струмових затисків мідних колодок 4 і 5 через трипозиційні перемикачі 7 і 8 та реостат 9 підключено джерело 10 постійної напруги.

Суть термоелектричного способу вимірювання температури полягає в наступному.

На початку вимірювань трипозиційні перемикачі 7 і 8 встановлюють в середньому положенні, і постійний струм від джерела 10 постійної напруги через термопару не протікає. Через різницю тем-

ператур  $T_X$  і  $T_O$  на вільних кінцях термопари виникає термоЕРС, яка згідно (1) дорівнює:

$$E_1 = \varepsilon (T_X - T_O) = S (T_X - T_O), \quad (6)$$

де  $\varepsilon$  - коефіцієнт термоЕРС Зеебека, що визначає чутливість  $S$  термопари  $\varepsilon = S$ .

ТермоЕРС (6) вимірюється мілівольтметром 6. Далі трипозиційні перемикачі 7 і 8 переводяться у верхнє положення, і через електроди 2 і 3 та робочий кінець 1 термопари починає протікати постійний струм в напрямку, який викликає охолодження робочого кінця 1 термопари за рахунок поглинання теплоти Пельтьє. Проходження електричного струму через електроди 2 і 3 викликає їх нагрівання за рахунок виділення теплоти Джоуля. Якщо теплота Пельтьє поглинається в контактному переході електродів 2 і 3 в зоні робочого кінця 1 термопари, то теплота Джоуля виділяється по всій довжині електродів 2 і 3. За рахунок теплопровідності електродів 2 і 3, які зазвичай ізолюються, половина теплоти поступає в робочий кінець 1 термопари, а інша половина - в мідні колодки 4 і 5, в яких розсіюється. ТермоЕРС, що виникає в охолодженій термопарі, можна представити як:

$$E_2 = S \left( T_X - \frac{\rho I - 0.5 I^2 R}{\alpha F} - T_O \right), \quad (7)$$

де  $\rho$  - коефіцієнт Пельтьє матеріалів електродів, які створює робочий кінець 1 термопари;

$R$  - опір електродів 2 і 3 при їх послідовному з'єднанні;

$I$  - постійний струм, що задається реостатом 9 і джерелом 10 постійної напруги;

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі робочого кінця 1 термопари в контрольоване середовище;

$F$  - площа поверхні теплообміну робочого кінця 1 термопари.

При збільшенні струму  $I$  спочатку відбувається охолодження робочого кінця 1 термопари. При збільшенні струму починає переважати теплота Джоуля через квадратичну залежність її від струму  $I^2 R$ . В результаті охолодження робочого кінця 1 термопари початкова термоЕРС  $E_1$  починає зменшуватися. Процес охолодження і подальшого нагрівання контролюють по мілівольтметру 6, періодично встановлюючи трипозиційні перемикачі 7 і 8 в середнє положення.

При збільшенні струму виникає компенсація ефекту Пельтьє, що охолоджує, нагріваючою теплотою Джоуля. Цей стан фіксують мілівольтметром 6, коли термоЕРС термопари  $E_2$  стане рівною початковій термоЕРС  $E_1$ :

$$E_2 = E_1. \quad (8)$$

Рівності (8) відповідає умова:

$$\rho I_K - 0.5 I_K^2 R = 0, \quad (9)$$

звідки:

$$\rho = 0.5 I_K R, \quad (10)$$

де  $I_K$  - компенсуючий струм.

Відповідно до першого термоелектричного співвідношення Томпсона, коефіцієнт Пельтьє пов'язаний з коефіцієнтом Зеебека таким чином:

$$p = \varepsilon T_X = ST_X, \quad (11)$$

де  $T_X$  - температура спаю (робочого кінця 1 термопар).  
Із врахуванням співвідношення (10) маємо:

$$ST_X = 0.5I_K R. \quad (12)$$

Підставляючи значення чутливості  $S$  з виразу (6), отримуємо:

$$T_X = \frac{0.5I_K R}{E_1} \cdot (T_X - T_O), \quad (13)$$

звідки вимірювана температура:

$$T_X = \frac{I_K R}{I_K R - 2E_1} \cdot T_O \quad (14)$$

Для визначення падіння напруги на електродах 2 і 3 термопар від компенсуючого струму  $I_K R$  вимірюють термоЕРС при протіканні через електроди 2 і 3 термопар компенсуючого струму. Для цього трипозиційні перемикачі 7 і 8 переводять у верхнє положення. Покази мілівольтметра 6 збільшуються до значення:

$$E_3 = E_1 + I_K R. \quad (15)$$

Далі трипозиційні перемикачі 7 і 8 переводять в нижнє положення. При цьому змінюється напрям протікання компенсуючого струму через робочий кінець 1 термопар. У цих умовах в робочому кінці 1 термопар починає виділятися теплота Пельтьє, яка додається до теплоти Джоуля. Встановлюють трипозиційні перемикачі 7 і 8 знов в середнє положення і вимірюють значення термоЕРС:

$$E_4 = S \cdot \left( T_X + \frac{pI_K + 0.5I_K^2 R}{\alpha F} - T_O \right) \quad (16)$$

Знов трипозиційні перемикачі 7 і 8 переводять в нижнє положення і вимірюють термоЕРС з урахуванням падіння напруги на електродах 2 і 3 термопар від компенсуючого струму. Але через зміну полярності падіння напруги на електродах 2 і 3 від зміни напрямку протікання компенсуючого струму вимірювана термоЕРС зменшується:

$$E_5 = E_4 - I_K R. \quad (17)$$

Враховуючи результати термоЕРС (6), (15), (16) і (17), що були виміряні, визначають різницю термоЕРС:

$$E_5 - E_3 = E_4 - I_K R - E_1 - I_K R, \quad (18)$$

звідки падіння напруги на електродах 2 і 3 термопар:

$$I_K R = \frac{E_3 + E_4 - E_5 - E_1}{2}. \quad (19)$$

Підставляючи падіння напруги (19) у вираз (14), остаточно отримуємо значення температури, що вимірюється:

$$T_X = \frac{E_3 + E_4 - E_5 - E_1}{E_3 + E_4 - E_5 - 5E_1} \cdot T_O. \quad (20)$$

В розрахункову формулу (20) входять тільки значення термоЕРС, що були виміряні. При цьому похибка мілівольтметра 6 виключається, оскільки вона входить в чисельник і знаменник отриманого виразу. Похибка визначення температури  $T_X$ , в основному, залежить від стабільності температури вільних кінців термопар  $T_O$ . Останню можна стабілізувати термостатуванням або застосуванням електричних схем компенсації з терморезистором.

Температура, розрахована по формулі (20), не залежить від ступеня нелінійності статичної характеристики термопар. На відміну від способу прототипу, вимірювання запропонованим способом не вимагає попереднього калібрування. Тому відсутня похибка від часової і температурної деградації калібрувальних термоЕРС. Для реалізації запропонованого способу не потрібні додаткові вимірювання компенсуючого струму міліамперметром і електричної потужності, яка розсіюється в термопарі при її охолодженні і нагріванні, ватметром. Всі вимірювання здійснюються одним мілівольтметром.

Запропонований спосіб може бути використаний і для підвищення точності вимірювання високих температур за допомогою термопар з тугоплавких неметалічних з'єднань (графітовольфрамові, з карбиду кремнію, з силіцид-молібдена-силіцид-вольфрама і т. п.), які після 25-30 годин експлуатації різко змінюють свої параметри. Запропонований спосіб дозволяє використовувати напівпровідникові термопар до їх повного фізичного зносу, коли порушується електропровідність їх електродів.

Для реалізації запропонованого способу немає нагальної потреби у спеціальних конструкціях термопар (трёхелектродні, спарені та ін.), які використовуються у відомих аналогах та прототипі.

