



УКРАЇНА

(19) UA (11) 48611 (13) A

(51) 6 G01K7/10

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДВИДАЄТЬСЯ ПІД
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ
ВЛАСНИКА
ПАТЕНТУ

(54) ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ І ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ

1

(21) 2001107243

(22) 24 10 2001

(24) 15 08 2002

(46) 15 08 2002, Бюл. № 8, 2002 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Дубровний
Олексій Анатолійович, Чефранов Петро
Валерійович(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

(57) 1. Термоелектричний спосіб вимірювання температури, що полягає в розміщенні робочого кінця термопару в тепловому контакті з контрольованим об'єктом, вимірюванні початкової термоЕРС на вільних кінцях термопару, охолодженні робочого кінця термопару пропусканням через нього постійного електричного струму, вимірюванні термоЕРС охолодженої термопару, зміні напрямку струму і нагріванні робочого кінця термопару, вимірюванні термоЕРС перегрітої термопару і визначенні температури за формулою, який відрізняється тим, що після вимірювання початкової термоЕРС E_1 пропускають постійний електричний струм в напрямку, при якому робочий кінець термопару охолоджується, ступенями збільшують струм, фіксуючи зниження термоЕРС, а потім її підвищення до початкового значення E_1 , після цього вимірюють значення компенсуючого струму I_k і електричну потужність W , що розсіюється у термопарі від компенсуючого струму, зменшують струм у два рази, проводять знову охолодження робочого кінця цим струмом протягом інтервалу часу, меншого теплової сталої термопару, вимірюють термоЕРС E_2 , після цього переривають струм на інтервал часу, достатній для досягнення початкового значення термоЕРС E_1 , змінюють

2

напрямок струму і нагрівають цим струмом робочий кінець термопару протягом такого ж проміжку часу, що і при охолодженні термопару, вимірюють термоЕРС E_3 , а температуру T_x визначають за формулою

$$T_x = \frac{(E_3 - E_2)(E_3 + E_2 - 2E_1)^2}{(E_1 - E_2)(E_3 + E_2 - 2E_1)^2} \left(\frac{W}{W'} \right) \left(\frac{l_k}{l} \right) T_K,$$

де T_K - температура, яку вимірюють в зоні робочого кінця термопару в процесі калібрування,

E_1, E_2, E_3 - термоЕРС, виміряні при калібруванні, I_k - значення струму компенсації охолодження і нагрівання робочого кінця термопару при калібруванні,

W' - електрична потужність, що розсіюється у термопарі від струму компенсації при калібруванні.

2. Термоелектричний пристрій для вимірювання температури, що містить термопару, мілівольтметр, перемикач і джерело постійного струму, який відрізняється тим, що додатково містить дві масивні мідні колодки з розділеними струмовими і потенціальними затискачами, реостат, міліамперметр, ватметр і чотирипакетний трипозиційний перемикач, вихідні контакти якого з'єднані між собою зустрічно, при цьому до потенціальних затискачів колодок під'єднані вільні кінці термопару і середні вхідні контакти чотирипакетного трипозиційного перемикача, до струмових затискачів колодок під'єднані крайні вхідні контакти цього перемикача, до вихідних середніх контактів перемикача під'єднаний мілівольтметр, а до крайніх вихідних контактів перемикача під'єднані послідовно з'єднані реостат, міліамперметр, струмова обмотка ватметра і джерело постійного струму.

Винахід відноситься до техніки вимірювання температури електричними методами і може бути застосований для вимірювання температури термопарою з допоміжним перегріванням і охолодженням її робочого кінця.

При точних вимірюваннях температури необхідно враховувати нелінійний характер статичної (градуювальної) характеристики термопару. Тому термоелектрорушійна сила (термоЕРС) E на вільних кінцях термопару

(19) UA (11) 48611 (13) A

визначається різницею термоЕРС робочого кінця, який нагрітий до вимірюваної температури T_1 , і термоЕРС вільних кінців, які термостатують або мають відому температуру T_2 , що визначається температурою оточуючого середовища з врахуванням поточних значень термоелектричних параметрів, термоЕРС

$$E = \alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2,$$

де α_1 і α_2 - коефіцієнти термоЕРС (коефіцієнти Зеебека), розміри яких залежать від температур T_1 і T_2

Тому що значення коефіцієнтів Зеебека α_1 і α_2 залежать від температури і змінюються в часі по мірі старіння і зносу термопар, то точне визначення невідомої температури T_1 навіть при відомій температурі T_2 пов'язане з певними труднощами. Для цього застосовують розглянуті нижче алгоритмічні методи, в яких робочий кінець термопар додатково нагрівають чи охолоджують електричним струмом, використовуючи ефект Пельтьє.

Відомий термоелектричний спосіб вимірювання температури по патенту України №22594А, МПК⁶G01K7/02, 1994, який полягає в додатковому нагріванні робочого кінця термопар, що знаходиться в середовищі, температуру якого вимірюють, постійним струмом за рахунок виділення теплоти Пельтьє на протязі інтервалу часу, меншого за теплову сталу термопар, вимірюванні термоЕРС в кінці нагрівання і визначенні температури T_x за формулою

$$T_x = \frac{(E_1 + E_0)^2 I_0 \Delta t}{(E_2 + E_1) c m},$$

де E_1 і E_2 - термоЕРС до нагрівання і після додаткового нагрівання робочого кінця термопар,

E_0 - термоЕРС вільних кінців термопар,

I_0 - постійний струм нагрівання,

Δt - час пропускання струму,

c - усереднена питома теплоємність робочого кінця термопар,

m - маса робочого кінця термопар.

У цю розрахункову формулу не входять термоелектричні коефіцієнти (Зеебека і Пельтьє), які залежать від температури і нестабільні в часі, що дозволяє вимірювати термопарою температуру в широкому діапазоні її значень. Проте, необхідність додаткового вимірювання теплоємності робочого кінця термопар ускладнює методику вимірювання температури. Використання у цьому способі лінійної залежності температури перегріву робочого кінця термопар тільки від виділеної теплоти Пельтьє приводить до значної методичної похибки вимірювання температури через те, що не враховується теплота Джоуля, яка виділяється в термоелектродах при пропусканні через них струму I_0 .

Відомий термоелектричний спосіб вимірювання температури по патенту України №17907А, МПК⁶G01K7/02, 1997, який полягає в додатковому нагріванні і охолодженні робочого кінця термопар постійним струмом, який пропускають у різних напрямках на протязі інтервалу часу, меншого за теплову сталу термопар, вимірюванні термоЕРС як додатково

нагрітого, так і охолодженого робочого кінця термопар і визначенні температури T_x за формулою

$$T_x = \frac{(N_2^I - N_4^I)(N_1^{II} + N_0)^2}{(N_2^{II} - N_4^{II})(N_1^I + N_0)^2} T_k,$$

де T_k - температура калібрування,

N_1^I, N_2^I, N_4^I - коди термоЕРС на вільних кінцях термопар, одержані в процесі калібрування,

$N_1^{II}, N_2^{II}, N_4^{II}$ - коди термоЕРС на вільних кінцях термопар, одержані в процесі вимірювання,

N_0 - код термоЕРС вільних кінців термопар

відносно температури, що відрізняється від температури й" градування (відхилення від 0°C коли застосовують шкалу Цельсія і від абсолютного нуля, якщо застосовують шкалу Кельвіна).

У цьому способі виключена необхідність додаткового визначення теплоємності робочого кінця термопар. Проте, в розрахункову формулу входить код термоЕРС вільних кінців термопар, який не залишається сталим через нестабільність їх температури, а також змін значень коефіцієнта Зеебека вільних кінців термопар з часом.

Відомий також термоелектричний спосіб вимірювання температури за патентом України №28733А МПК⁶G01K7/02 1999, який полягає в розміщенні робочого кінця термопар в тепловому контакті з контрольованим об'єктом, вимірюванні початкової термоЕРС на вільних кінцях термопар, охолодженні робочого кінця термопар при пропусканні через нього постійного електричного струму за інтервал часу, менший теплової сталої часу термопар, вимірюванні термоЕРС охолодженої термопар, зміни напрямку струму і нагріванні робочого кінця термопар на протязі того ж усталеного проміжку часу, вимірюванні термоЕРС перегрітої термопар і визначенні температури за формулою

Крім того, відомий спосіб включає операцію охолодження робочого кінця термопар після її нагрівання, а температуру T_x визначають за формулою

$$T_x = \frac{(E_x^{IV} - E_x^{II})(E_k^{IV} + E_k^{II} - 2E_k^I)^2}{(E_k^{IV} - E_k^{II})(E_x^{IV} + E_x^{II} - 2E_x^I)^2} T_k,$$

де T_k - температура калібрування, яку проводять перед початком експлуатації термопар,

E_k^I, E_x^I - початкові термоЕРС в процесах калібрування і вимірювання, відповідно,

E_k^{II}, E_x^{II} - термоЕРС після охолодження термопар в процесах калібрування і вимірювання,

E_k^{IV}, E_x^{IV} - термоЕРС після додаткового нагрівання термопар в процесах калібрування і вимірювання

Відомий термоелектричний спосіб виключає вплив непостійності температури вільних кінців термопар і не потребує знання кодів їх термоЕРС. Проте, цей спосіб передбачає сталість теплоти Джоуля в процесах калібрування і вимірювання. При експлуатації термопар разом із змінами коефіцієнтів Зеебека і Пельтьє неминучі і зміни електричного опору електродів термопар, що обумовлює значну зміну теплоти Джоуля в процесах калібрування і вимірювання, що додає похибку вимірювання температури, особливо при роботі її робочого кінця в агресивному середовищі.

Відомий термоелектричний пристрій для вимірювання температури (Див. Анатичук Л. І. Термoelementы и термоeлектрические устройства. Справочник - К: Наукова думка, 1979, стр. 77 - 79), який складається з термопар, вільні кінці якої розміщені в коробці компенсації змін їх температури і мілівольтметра, під'єднаного до виходу компенсаційної коробки. Проте, у цьому пристрої через непостійність значень коефіцієнта Зеебека робочих кінців не компенсується вплив змін статичної характеристики термопар відносно номінальної.

Відомий також термоелектричний пристрій для вимірювання температури, до складу якого входять термопара, мілівольтметр, перемикач і джерело постійного струму (див. Головкин Д. Б., Дубровний В. О., Скрипник Ю. О. і Хімічева Г. І. Високоточні вимірювання багатфункціональними термосенсорами - Київ: Либідь, 2000, стор. 188).

Крім того, відомий пристрій включає додаткову термопару, робочий кінець якої з'єднаний з робочим кінцем основної термопар, а також резистори і керовані ключі. У відомому пристрої прогресуючі похибки при старінні термопар коригуються адитивним тепловим впливом на її робочий кінець. Адитивний вплив складається з періодичного підігрівання робочого кінця допоміжної термопар спільного з робочим кінцем основної термопар електричним струмом і введення у вимірювальний ланцюг основної термопар резистора, який періодично шунтується керованим ключем.

Проте, в цьому пристрої результат вимірювання температури також залежить від нестабільності коефіцієнта Пельтьє і електричного опору термопар, що не дає можливості одержати високу точність вимірювання температури.

В основу винаходу покладено задачу створення таких термоелектричного способу та пристрою для вимірювання температури, в яких введення нових операцій у спосіб, елементів та їх зв'язків у пристрій дозволило б підвищити точність вимірювання температури термопарою, статична характеристика якої зазнала змін.

Поставлена задача вирішується тим, що в термоелектричний спосіб вимірювання температури, що полягає в розміщенні робочого кінця термопар в тепловому контакті з контрольованим об'єктом, вимірюванні початкової термоЕРС на вільних кінцях термопар, охолодженні робочого кінця термопар при пропусканні через нього постійного електричного струму за інтервал часу, менший теплової сталої часу термопар, вимірюванні термоЕРС

охолодженої термопар, зміни напрямку струму і нагріванні робочого кінця термопар на протязі того ж установленого проміжку часу, вимірюванні термоЕРС перегрітої термопар і визначенні температури за формулою, згідно з винаходом, що після вимірювання початкової термоЕРС E_1 пропускають постійний електричний струм в напрямку, при якому робочий кінець термопар охолоджується, ступенями збільшують струм, фіксуючи зниження термоЕРС а потім її підвищення до початкового значення E_1 , після чого вимірюють значення компенсуючого струму I_K і електричну потужність W , що розсіюється у термопарі від компенсуючого струму, зменшують струм у два рази, проводять знову охолодження робочого кінця цим струмом на протязі інтервалу часу, меншого теплової сталої термопар, вимірюють термоЕРС E_2 після чого переривають струм на інтервал часу, достатній для досягнення початкового значення термоЕРС E_1 , змінюють напрям струму і нагрівають цим струмом робочий кінець термопар на протязі проміжку часу, що і при охолодженні термопар, вимірюють термоЕРС E_3 , а температуру T_X визначають за формулою

$$T_X = \frac{(E_3 - E_2) \left(E_3 + E_2 - 2E_1 \right)^2 \left(\frac{W}{W'} \right)^2 \left(\frac{I_K}{I_K'} \right)}{\left(E_3 - E_2 \right) \left(E_3 + E_2 - 2E_1 \right)^2 \left(\frac{W}{W'} \right)^2 \left(\frac{I_K}{I_K'} \right)} T_K,$$

де T_K - температура, яку вимірюють в зоні робочого кінця термопар в процесі калібрування,

E_1, E_2, E_3 - термоЕРС, виміряні при калібруванні,

I_K - значення струму компенсації охолодження і нагрівання робочого кінця термопар при калібруванні,

W - електрична потужність, що розсіюється у термопарі від струму компенсації при калібруванні.

Поставлена задача вирішується також тим, що термоелектричний пристрій для вимірювання температури, що включає термопару, мілівольтметр, перемикач і джерело постійного струму, згідно з винаходом до його складу включені також дві масивні мідні колодки з розділеними струмовими і потенціальними затискачами, реостат, міліамперметр, ватметр і чотирипакетний трипозиційний перемикач, вихідні контакти якого з'єднані між собою зустрічне, при цьому до потенціальних затискачів колодок під'єднані вільні кінці термопар і середні вхідні контакти чотирипакетного трипозиційного перемикача, до струмових затискачів колодок під'єднані крайні вхідні контакти цього перемикача, до вихідних середніх контактів перемикача під'єднаний мілівольтметр, а до крайніх вихідних контактів перемикача під'єднані послідовно з'єднані реостат, міліамперметр, струмова обмотка ватметра і джерело постійного струму.

Саме визначення струму, при якому повністю компенсується охолодження робочого кінця термопар його нагріванням, що фіксується по досягненню початкового значення термоЕРС робочого кінця термопар, вимірювання значення компенсуючого струму і електричної потужності, що йому відповідає і яка розсіюється в

електричному ланцюзі термопар, охолодження і нагрівання робочого кінця термопар на протязі короткого інтервалу часу половинним значенням компенсуючого струму дозволяє врахувати зміни електричного опору термопар в процесі експлуатації після її калібрування і виключити методичну похибку при розрахунку температури за значеннями вимірюваних і калібрувальних термоЕРС, що дозволяє підвищити точність вимірювання температури термопарою, статична характеристика якої зазнала змін в процесі експлуатації.

На фіг 1 приведена електрична схема термоелектричного пристрою для вимірювання температури, на фіг 2 - статичні (номінальна і робоча) характеристики термопар, на фіг 3 - залежності термоЕРС термопар від постійного струму, який пропускають через її робочий кінець і збільшенні значення струму до повної компенсації ефекту охолодження (Пельтьє) ефектом нагрівання (Джоуля) електричним струмом, на фіг 4 - динамічна характеристика термопар, тобто залежність температури її робочого кінця в часі при протіканні через нього постійного струму різного значення і різної полярності.

Термоелектричний пристрій для вимірювання температури (Фіг 1) складається з термопар 1, робочий кінець якої має температуру T_x контрольованого об'єкта, а вільні кінці, що розміщені на масивних мідних колодках 2 і 3, - температуру T_0 оточуючого середовища. До потенціальних затисків на колодках крім вільних кінців термопар мідними дротами через середні розмикаючі контакти чотириполюсного трипозиційного перемикача 4 під'єднаний прилад 5 для вимірювання термоЕРС, наприклад, мілівольтметр, а через крайні замикаючі контакти, які з'єднані зустрічне, - потенціальна обмотка ватметра 6. До струмових затисків на колодках 2 і 3 через крайні замикаючі контакти перемикача 4 під'єднані послідовно з'єднані струмова обмотка ватметра 6, реостат 7, міліамперметр 8 і джерело постійного струму 9. Крайні контакти перемикача 4 з'єднані між собою зустрічне, що забезпечує змину напругу пропускання струму через робочий кінець термопар і потенціальну обмотку ватметра. Реостатом 7 можна змінювати значення струму, що протікає через термопару. Міліамперметром 8 вимірюють значення струму, а ватметром 6 - потужність, що розсіюється в термопарі. Масивні колодки 2 і 3 забезпечують стабільність температури T_0 вільних кінців термопар, коли через неї пропускають струм, а розділені потенціальні і струмові затискі - відсутність впливу змін опору перехідних контактів на вимірювану термоЕРС.

Суть термоелектричного способу вимірювання температури термопарою

полягає в наступному

Значення термоЕРС на вільних кінцях термопар 1, яка має нелінійну статичну характеристику, можна виразити формулою

$$E_1 = \alpha_x T_x - \alpha_0 T_0, \quad (1)$$

де α_x - коефіцієнт Зеебека робочого кінця термопар при його температурі T_x ,

α_0 - коефіцієнт Зеебека вільних кінців термопар при температурі, що дорівнює T_0 і визначається температурою колодок 2 і 3.

У відповідності до виразу (1) термопарою вимірюють різницю температур $T_x - T_0$ і для визначення T_x треба знати не тільки температуру її вільних кінців T_0 , але і значення коефіцієнтів Зеебека при обох температурах T_x і T_0 . При температурі T_x , яка невідома і може змінюватися в широких межах, точне значення коефіцієнту α_x визначити досить складно. Крім того що значення коефіцієнтів Зеебека залежать від температури, вони можуть змінюватися в процесі експлуатації і старіння термопар - звичайно їх значення зменшуються у часі в результаті незворотних фізико-хімічних змін матеріалів електродів, які створюють робочий кінець термопар. Тому термопар мають нелінійну і нестабільну статичну характеристику. На фіг 2 кривою 11 показана номінальна (градуювальна) характеристика термопар, яка з часом може перетворитися в робочу статичну характеристику, що показана кривою 12.

В окопах робочої точки А (Фіг 2), яка задається вимірюваною температурою T_x робочого кінця, нелінійну номінальну статичну характеристику термопар можна замінити дотичною, кут нахилу якої до осі абсцис визначає чутливість термопар при температурі T_x . В процесі експлуатації номінальна статична характеристика термопар через деградацію матеріалів робочого кінця і зміни температури вільних кінців зміщується і робоча точка В характеризується меншою термоЕРС і меншим значенням чутливості. Тому рівняння (1) в окопах робочої точки приймає вигляд

$$E_1 = (\alpha_x + \Delta\alpha_x) T_x - \alpha_0 (T_0 + \Delta T_0) + \Delta E_0, \quad (2)$$

де α_x і α_0 - значення коефіцієнтів Зеебека у відповідності до номінальної статичної характеристики при температурах T_x і T_0 ,

$\Delta\alpha_x$ - зміна значення коефіцієнта Зеебека робочого кінця термопар через процеси зносу і старіння, а також через зміни його температури T_x ,

ΔT_0 - зміна температури вільних кінців, що враховує зміни температури оточуючого середовища,

ΔE_0 - додаткова термоЕРС, що виникає в результаті неоднорідності термоелектродів і градієнту температури по їх довжині в результаті змін T_x .

Похибку, що виникла, можна розділити на дві складові: мультиплікативну (похибку чутливості), яка змінює нахил дотичної, і адитивну (похибку нуля), що зміщує дотичну паралельно відносно початкового положення. Враховуючи ці складові, вираз (2) можна записати так

$$E_1 = \alpha_x (1 + \gamma_1) T_x - \alpha_0 T_0 + \delta_1, \quad (3)$$

де $\gamma_1 = \Delta\alpha_x / \alpha_x$ - відносна мультиплікативна складова похибки,

$\delta_1 = \alpha_0 \Delta T_0 + \Delta E_0$, - абсолютна адитивна складова похибки.

При неконтрольованих змінах коефіцієнта α_0 також виникає додаткова адитивна похибка.

Згідно з запропонованим способом спочатку встановлюють контакти перемикача 4 в середнє положення (як показано на фіг 1), вимірюють і

фіксують значення термоЕРС E_1 . Після цього встановлюють перемикач 4 у верхнє положення і через робочий кінець термопарі пропускають постійний струм у напрямі, при якому виникає охолодження робочого кінця за рахунок поглинання теплоти Пельтьє, яка лінійно залежить від струму (пряма 13 на фіг 3). Тому що робочий кінець і термоелектроди термопарі мають електричний опір, то одночасно в них відбувається виділення теплоти Джоуля, яка пропорційна квадрату струму (крива 14 на фіг 3). Ця теплота виділяється по всій довжині електродів термопарі пропорційно їх опору і частину теплоти, яка підігріває власно робочий кінець термопарі, можна врахувати коефіцієнтом $k < 1$. Якщо час дії струму Δt_1 (фіг 4) менше теплової сталої і термопарі ($\Delta t_1 < \tau$), то охолодження робочого кінця носить адиабатичний характер (без теплообміну робочого кінця з оточуючим середовищем), а динамічну характеристику можна виразити прямою. Інтенсивність охолодження зворотно пропорційна теплоємності робочого кінця. Тому термоЕРС на вільних кінцях термопарі за час Δt_1 приймає значення

$$E_2 = \alpha_X (1 + \gamma_2) [T_X - (p_X I - k I^2 R_X) \Delta t / C] - \alpha_0 T_0 + \delta_2, \quad (4)$$

де p_X - коефіцієнт Пельтьє матеріалів електродів, що створюють робочий кінець термопарі при температурі T_X ,

I - значення струму через робочий кінець,

k - коефіцієнт, що визначає долю теплоти Джоуля, яка поступає в робочий кінець від електродів,

R_X - електричний опір термоелектродів, який змінюється в процесі експлуатації, а також залежить від температури T_X ,

C - еквівалентна теплоємність робочого кінця термопарі,

γ_2 і δ_2 - похибки другого термоелектричного перетворення

Значення струму I вибирають з умови максимального охолодження робочого кінця термопарі при одночасному поглинанню і виділенню тепла (екстремум кривої 15 на фіг 3)

$$\frac{dE_2}{dI} = 2kI_0 R_1 - p_X = 0, \quad (5)$$

звідкіля оптимальне значення струму

$$I_0 = \frac{p_X}{2kR_X}$$

Після встановлення оптимального струму I_0 згідно з (6) перемикач 4 переводять у середнє положення (показане на фіг 1), після чого вимірюють значення термоЕРС E_2 . При охолодженні робочого кінця термопарі її термоЕРС зменшується ($E_2 < E_1$). Проте, визначити точне значення оптимального струму I_0 за максимумом охолодження, при якому $E_1 - E_2 = \Delta E_{\max}$ важко через пологий характер кривої 15 (фіг 3) біля її екстремуму. Тому перемикач 4 знову встановлюють у верхнє положення і через термопару пропускають струм, збільшуючи його значення реостатом 6 (фіг 1), і періодично замірюючи значення термоЕРС. Коли вона досягне свого попереднього значення E_1 , це означає, що теплота Джоуля, яка збільшується за

квадратичним законом (крива 14 на фіг 3) повністю компенсує теплоту Пельтьє і можна записати

$$p_X I_k = k I_k^2 R_X, \quad (7)$$

де I_k - значення компенсуючого струму

Як видно з виразу (7), компенсуючий струм

$$I_k = \frac{p_X}{kR_X} \quad (8)$$

Порівнюючи вирази (6) і (8), можна зробити висновок, що

$$I_0 = I_k / 2 \quad (9)$$

Таким чином, оптимальне значення струму на охолодження дорівнює половині компенсуючого. Вимірюють значення компенсуючого струму I_k міліамперметром 8, а потужність W , яка розсіюється у термопарі - ватметром 6. Встановлюють половинне значення струму, яке згідно з (9) дорівнює оптимальному значенню струму

Встановлюють перемикач 4 у верхнє положення і охолоджують робочий кінець термопарі оптимальним струмом I_0 на протязі часу Δt_1 . Перемикач 4 переводять у середнє положення і вимірюють термоЕРС E_2 охолодженої термопарі

$$E_2 = \alpha_X (1 + \gamma_2) [T_X - (p_X I_0 - k I_0^2 R_X) \Delta t_1 / C] - \alpha_0 T_0 + \delta_2, \quad (10)$$

Вимірюють і фіксують значення термоЕРС E_2

Потім витримують паузу Δt_2 (фіг 4) до досягнення температурою робочого кінця термопарі попереднього значення T_X , що визначається за досягненням термоЕРС попереднього значення E_1 через процес його нагрівання теплопередачею від об'єкту контролю. Після цього перемикачем 4 (фіг 1), який встановлюють у нижнє положення, змінюють напрям протікання струму через термопару. В результаті реверсивності ефекту Пельтьє у робочому кінці термопарі відбувається додавання теплоти Пельтьє і теплоти Джоуля, що приводить до швидкого нагрівання робочого кінця (крива 16 на фіг 3) за час $\Delta t_3 = \Delta t_1$ (фіг 4) відбувається перегрівання робочого кінця на $+ \Delta T_{\text{нагр}}$. При цьому термоЕРС приймає значення

$$E_3 = \alpha_1 (1 + \gamma_3) [T_X - (p_1 I_0 - k I_0^2 R_X) \Delta t_1 / C] - \alpha_0 T_0 + \delta_3, \quad (11)$$

де γ_3 і δ_3 - похибки третього термоелектричного перетворення

Вимірюють і фіксують термоЕРС E_3

Далі вимикають струм I_0 і термопара за деякий час (порядку паузи Δt_2 (фіг 4) набуває попередньої температури T_X . Вона готова до нового циклу вимірювання при новому значенні вимірюваної температури або для повторення вимірювань при тому ж значенні T_X з метою усереднення результату кількох вимірювань

Тому що зміни температури $+ \Delta T_{\text{нагр}}$ і $- \Delta T_{\text{ох}}$ (фіг 4) практично не перевищують 3 К, то можна вважати, що зміни температури ΔT в околах робочої точки T_X відбуваються за лінійним законом (дотичні на фіг 2)

$$\Delta T = \alpha_1 (k I_0^2 R_X \pm p_1 I_0) \Delta t / C \ll T_X, \quad (12)$$

а всі похибки перетворень можна вважати однаковими

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3, \quad \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 \quad (13)$$

Електрична потужність, яка розсіюється на

робочому кінці термопарі в момент компенсації витрачається порівну на теплоту Пельтьє і Джоуля, що поступає в робочий кінець. Тому при компенсуючому струмі I_K сумарна електрична потужність W

$$W = kI_K^2 R_x + p_x I_K = 2kI_K^2 R_x \quad (14)$$

З виразу (14) можна визначити поточне значення опору термопарі

$$R_x = \frac{W}{2kI_K^2} = \frac{W}{8kI_0^2} \quad (15)$$

З виразів (10) і (11) визначимо додаткове значення термоЕРС від теплоти Пельтьє

$$E_3 - E_2 = 2\alpha_{1x} (1 + \gamma_1) p_x I_0 \Delta t / C \quad (16)$$

а з виразів (3), (10) і (11) - додаткове значення термоЕРС від теплоти Джоуля

$$E_3 + E_2 - 2E_1 = 2\alpha_x (1 + \gamma_1) kI_0^2 R_x \Delta t / C \quad (17)$$

Враховуючи, що коефіцієнт Пельтьє визначається коефіцієнтом Зеебека і температурою робочого кінця термопарі, маємо

$$p_x = \alpha_x (1 + \gamma_1) T_x \quad (18)$$

Підставивши значення p_x з (18) у вираз (16), одержимо

$$E_3 - E_2 = 2\alpha_x^2 (1 + \gamma_1)^2 T_x I_0 \Delta t / C \quad (19)$$

Якщо поділити вираз (19) на квадрат виразу (17), одержимо

$$\frac{E_3 - E_2}{(E_3 + E_2 - 2E_1)^2} = \frac{C}{2k^2 I_0^2 R_x^2 \Delta t} T_x \quad (20)$$

Якщо значення електричного опору R_x з виразу (15) підставити в (20), то одержимо

$$\frac{E_3 - E_2}{(E_3 + E_2 - 2E_1)^2} = \frac{64Ck^2 I_0}{W^2 \Delta t} T_x \quad (21)$$

З виразу (21) видно, що одержане відношення виміряних термоЕРС не залежить від значень адитивної і мультиплікативної складових похибки γ і δ , коефіцієнта Зеебека α і Пельтьє p , опору робочого кінця термопарі R_x , які змінюються в часі, а також не залежить від температури вільних кінців T_0 . Тому відношення термоЕРС, аналогічне (21) може бути одержане для будь-якої відомої температури, наприклад, в умовах калібрування при відомій температурі T_K і відповідних значеннях виміряних термоЕРС

$$\frac{E'_3 - E'_2}{(E'_3 + E'_2 - 2E'_1)^2} = \frac{64Ck^2 I'_0}{(W')^2 \Delta t} T_K \quad (22)$$

де E'_1, E'_2, E'_3 - термоЕРС, що відповідають температурі калібрування T_K ,

I'_0 - оптимальний струм охолодження при калібруванні (див. фіг. 3),

W' - виміряна електрична потужність при компенсуючому значенні струму і калібруванні

Розділивши праву і ліву частини рівнянь (21) на (22), одержимо

$$\frac{(E_3 - E_2)(E'_3 + E'_2 - 2E'_1)^2}{(E'_3 - E'_2)(E_3 + E_2 - 2E_1)^2} \left(\frac{W'}{W} \right)^2 \left(\frac{I_0}{I'_0} \right) T_x / T_K, \quad (23)$$

З виразу (23), а також враховуючи, що $I_0 = I_K$ /

2, визначаємо вимірювану температуру

$$T_x = \frac{(E_3 - E_2)(E'_3 + E'_2 - 2E'_1)^2}{(E'_3 - E'_2)(E_3 + E_2 - 2E_1)^2} \left(\frac{W'}{W} \right)^2 \left(\frac{I_K}{I'_K} \right) T_K. \quad (24)$$

Одержана формула (24) дозволяє визначити температуру T_x з допомогою термопарі незалежно від ступені нестійкості і нестабільності її статичної характеристики, значення електричного опору, а також від поточного значення температури оточуючого середовища T_0 . Точність вимірювання температури обмежується тільки похибками вимірювання електричних величин (струму, напруги і потужності). Тому що у вираз (24) входять не абсолютні значення цих величин, а їх різниці і відношення, то похибки вторинних приладів 5, 6 і 8 (фіг. 1) майже повністю виключаються. Результат, в основному, визначається точністю, з якою відоме значення калібрувальної температури T_K .

Термоелектричний пристрій для вимірювання температури працює в такій послідовності

Калібрування термопарі пристроєм здійснюють при відомій температурі робочого кінця T_K і температурі вільних кінців T_0 , яка звичайно дорівнює температурі оточуючого середовища на момент калібрування. При середньому положенні контактів перемикача 4 (фіг. 1) вимірюють і фіксують значення термоЕРС E'_1 . Потім перемикають перемикач 4 у верхнє положення і через робочий кінець термопарі пропускають струм від джерела 9, ступенями збільшуючи реостатом 7 його значення і періодично вимірюючи термоЕРС мілівольтметром 5. Коли вона досягне свого попереднього значення E'_1 , це означає, що струм досяг свого компенсуючого значення $I'_K = 2I'_0$. Вимірюють і фіксують значення цього струму міліамперметром 8 і потужності W' що розсіюється в робочому кінці і термоелектродах термопарі ватметром 6.

При цьому температура вільних кінців термопарі не повинна змінюватися відносно початкової температури T_0 . Останнє досягається за рахунок значної теплової інерції масивних мідних колодок 2 і 3 (фіг. 1).

Далі встановлюють перемикач 4 у верхнє положення і через робочий кінець термопарі пропускають встановлений реостатом 7 струм $I'_0 = I_K / 2$, значення якого контролюють міліамперметром 8. Напрямок струму вибирають таким, щоб за час Δt_1 робочий кінець термопарі охолонув на 3-5 К. Перемикаючи перемикач 4 у середнє положення, вимірюють і фіксують значення E'_2 охолодженого робочого кінця термопарі. Під час витримки часу Δt_2 робочий кінець термопарі, нагріваючись від об'єкту контролю, знову здобуває початкову температуру T_K , яку контролюють за показами мілівольтметра 5 (термоЕРС E_1). При цьому визначають значення витримки часу Δt_2 яка буде дорівнювати і відповідній витримці часу і в процесі вимірювання.

Потім встановлюють перемикач 4 в нижнє положення, пропускаючи через робочий кінець термопарі струм I_0 на протязі витримки часу Δt_1

Далі встановлюють перемикач 4 в середнє положення і вимірюють термоЕРС E_3 , що відповідає перегріванню термопары на $\Delta T_{\text{нагр}}$. Робочий кінець термопары поступово (за час порядку Δt_2) набуває початкової температури

Зрозуміло, що на протязі всього циклу калібрування (та і циклу вимірювання, як буде сказано нижче) температура оточуючого робочий кінець і вільні кінці термопары середовища не повинна змінюватися в межах допустимої похибки вимірювання температури

В результаті калібрування термопары даного типу одержують три значення термоЕРС E_1, E_2, E_3 , а також витримки часу Δt_1 і Δt_2 (фіг 4), які застосовують і в процесі вимірювання невідомої температури T_x

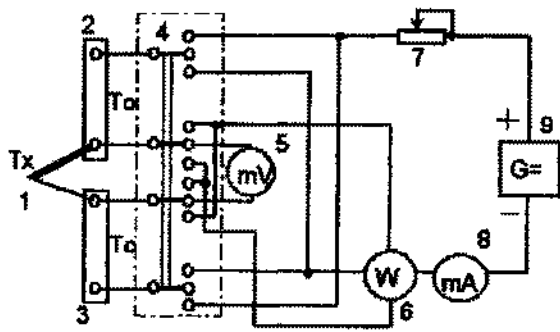
Процес вимірювання невідомої температури T_x проводять у такій же послідовності, як і калібрування. Вимірюють і фіксують значення термоЕРС E_1, E_2 і E_3 , а також значення потужності W . Оптимальне значення струму I_0 визначають, як повоинне значення компенсуючого струму I_k , при температурі T_x при плавному збільшенні струму в напрямі, що викликає спочатку охолодження робочого кінця, а потім досягнення ним початкової температури так, як було вказано вище в процесі калібрування. Фактичну температуру об'єкта обчислюють за формулою (24) з врахуванням результатів попереднього калібрування незалежно від значення T_0 в момент вимірювання

Приклад. Досліджувалася залежність коефіцієнта Зеебека α від температури робочого і

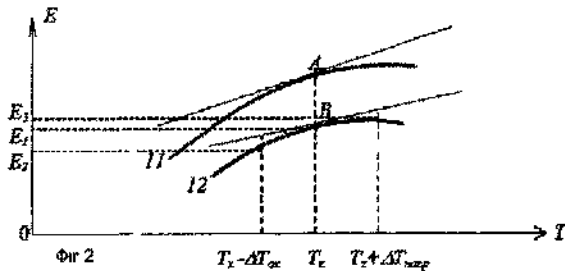
вільних кінців, а також часу експлуатації термопары типу ТХА (К). При вимірюванні температури робочого кінця від 500 до 900К і температури вільних кінців 293К було визначено, що коефіцієнт Зеебека α зменшується від 20 до 12мкВ/К за час роботи термопары в агресивному середовищі (водневих печах) протягом 1000 годин. При цьому значення коефіцієнта Зеебека α зменшилося на 17%, що обумовило похибку порядку десятків К при вимірюванні температур в межах (800–850)К. Дослідження цієї ж термопары після 1000 годин роботи показали, що при зменшеному коефіцієнті Зеебека α оптимальний струм охолодження I_0 знаходиться в межах 0,6–1,2А при зміні абсолютної температури робочого кінця від 500 до 900К, а струм компенсації перевищує оптимальний в 2 рази незалежно від ступеню деградації термопары

Визначення відомої абсолютної температури за формулою (24) після проведення додаткових вимірювань термоЕРС охолодженого і перегрітого робочого кінця термопары, а також вимірювань оптимального струму і електричної потужності дозволило одержати результат з похибкою не більше 1,2К. Дякуючи цьому термін експлуатації термопары був продовжений до 2000 годин при допустимій похибці до $\pm 1,5$ К.

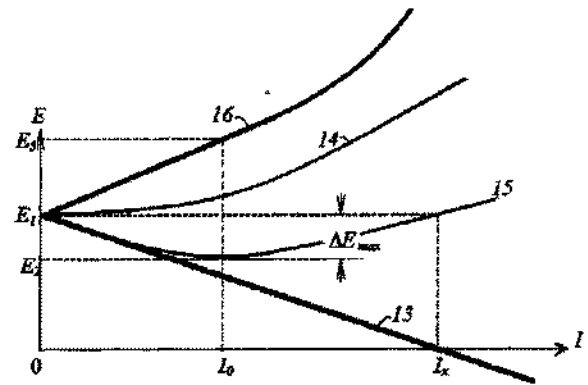
Для автоматизації процедур калібрування і вимірювання була застосована мікропроцесорна система на основі програмованого контролера і цифрових вимірювачів струму, напруги і потужності



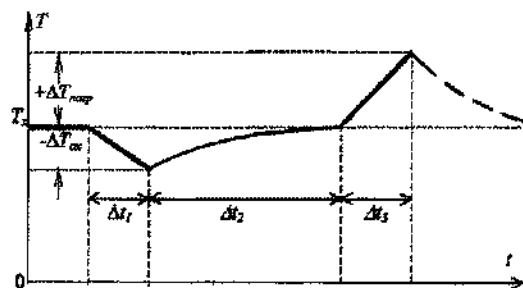
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

ДП «Український інститут промислової власності» (Укрпатент)
вул. Сим'ї Хохлових, 15, м. Київ, 04119, Україна
(044) 456 – 20 – 90

ТОВ «Міжнародний науковий комітет»
вул. Артема, 77, м. Київ, 04050, Україна
(044) 216 – 32 – 71