



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 45037

(13) A

(51) B 01K 7/02

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДВидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕРМОПАРОЮ ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ

1

2

(21) 2001031746

(22) 15 03 2001

(24) 15 03 2002

(46) 15 03 2002, Бюл. № 3, 2002 р.

(72) Діденко Костянтин Іванович, Кондрашов Сергій Іванович, Чунхіна Тетяна В'ячеславівна

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

(57) 1 Спосіб вимірювання температури, який полягає у внесенні робочого кінця термопару у середовище, температуру якого вимірюють, реєстрації термоелектрорушійної сили (термоЕРС) на вільних кінцях термопару, охолодженні робочого кінця термопару шляхом пропускання через термопару електричного струму упродовж часу, рівного 0,1-0,2 сталої часу термопару, реєстрації поточного значення термоЕРС на вільних кінцях термопару, зміни напрямку струму та подальшому підігріву робочого кінця до початкової температури, продовженні розігріву робочого кінця термопару упродовж часу, рівного часу охолодження, реєстрації поточного значення термоЕРС на вільних кінцях, новий зміни напрямку струму через термопару та її охолодженні до початкової температури і визначенні температури за формулою, який відрізняється тим, що температуру калібрування встановлюють на об'єкті у зоні робочого кінця термопару у процесі її роботи шляхом поступового підігрівання її робочого кінця нагрівачем у її складі, обчислюють миттєві значення першої похідної термоЕРС на вільних кінцях термопару, визначають момент досягнення температури фазового переходу реперного матеріалу, що розміщений у термопарі як момент, коли перша похідна стає рівною нулю, проводять операції додаткового охолодження та додаткового нагрівання робочого кінця термопару за рівні відрізки часу відносно температури фазового переходу шляхом пропускання струму через робочий спай термопару у різних напрямках, а вимірювану температуру обчислюють за формулою

$$\dot{\theta}_0 = \dot{\theta}_0 \frac{(A_{\theta}^{IV} - A_{\theta}^{II})(A_{\theta}^{IV} + A_{\theta}^{II} - 2A_{\theta}^I)}{(A_{\theta}^{III} - A_{\theta}^I)(A_{\theta}^{III} + A_{\theta}^{II} - 2A_{\theta}^I)}$$

де

$\dot{\theta}_0$ - температура фазового переходу реперного матеріалу,

$A_{\theta}^I, A_{\theta}^I$ - значення термоЕРС на вільних кінцях термопару, отримані у точці фазового переходу та при вимірюванні робочої температури, відповідно,

$A_{\theta}^{II}, A_{\theta}^{II}$ - значення термоЕРС на вільних кінцях додатково охолодженої термопару за рахунок ефекту Пельтьє у процесі калібрування та вимірювання,

$A_{\theta}^{III}, A_{\theta}^{III}$ - значення термоЕРС на вільних кінцях додатково підігрітої термопару за рахунок ефекту Пельтьє у процесі калібрування та вимірювання робочої температури

2 Пристрій для вимірювання температури термопарою, який складається з термопару, робочий кінець якої розміщений у контрольованому середовищі, термоелектроди якої з'єднані компенсаційними дротами з коробкою стабілізації або компенсації змін температури вільних кінців термопару, нормуючого підсилювача, послідовно з'єднаних з ним аналого-цифрового перетворювача, мікро-ЕОМ, цифрового індикатора, стробуючого ключа, двополюсного трипозиційного перемикача і цифро-аналогового перетворювача, кодовий вихід якого під'єднаний до другого виходу мікро-ЕОМ, а аналогові входи через двополюсний трипозиційний перемикач з'єднані з вільним кінцем термопару, третій вихід мікро-ЕОМ з'єднаний з керуючим входом стробуючого ключа, який ввімкнено між вільними кінцями термопару і входом нормуючого підсилювача, а четвертий вихід мікро-ЕОМ з'єднано з керуючим входом двополюсного трипозиційного перемикача, який відрізняється тим, що термопара має реперний матеріал, розміщений у її середині поблизу робочого спаю, нагрівач робочого кінця, зразковий резистор, другий аналого-цифровий перетворювач, другий цифро-аналоговий перетворювач, кодовий вихід якого під'єднаний до п'ятого виходу мікро-ЕОМ, а аналогові входи з'єднані з нагрівачем, який розташований поблизу робочого кінця термопару і реперного матеріалу, та зразковим резистором, вихідна напруга з якого подається на другий аналого-цифровий перетворювач, кодовий вихід якого підключено до другого входу мікро-ЕОМ

(19) UA (11) 45037 (13) A

Винахід відноситься до області вимірювання температури і може бути застосований для підвищення точності термопар, що знаходяться в тривалій експлуатації, особливо в агресивному середовищі

Відомий спосіб вимірювання температури термопарою, який складається із внесення робочого кінця термопари в середовище, температуру якого треба виміряти, і вимірюванні електрорушійної сили (термоЕРС), що виникає на вільних кінцях термопари [1]

В процесі тривалої експлуатації, особливо в агресивному середовищі, в результаті окисдування термоелектродів, вуглецювання і інших змін їх хімічного складу під впливом агресивного середовища, а також дифузії компонентів термопари через спай робочого кінця, деформації термоелектродів і т.п., тобто деградації термопари, змінюється коефіцієнт Зеебека, який визначає чутливість термопари до температури, внаслідок чого з'являються похибка при вимірюванні нульовій температурі термопари і мультиплікативна похибка внаслідок зміни її чутливості у діапазоні робочих температур

Для діагностики стану термопари застосовують спосіб [2], суть якого полягає у внесенні робочого кінця термопари в середовище, температуру якого виміряють, реєстрації термоЕРС на вільних кінцях термопари, нагріванні робочого кінця термопари пропусканням через термопару електричного струму, реєстрації термоЕРС на вільних кінцях термопари і визначенні температури за формулою. При цьому здійснюють реєстрацію усталеного значення термоЕРС, визначають відношення зареєстрованих значень, а вимірювану температуру визначають за наступною формулою

$$T_x = \frac{P \cdot I_0}{\lambda(k-1)},$$

де P - коефіцієнт Пельтьє,

I_0 - струм, що протікає через робочий кінець термопари,

$$k = \frac{E_2}{E_1} - \text{відношення значень зареєстрованих}$$

термоЕРС E_1 - до E_2 - після нагрівання,

λ - теплопровідність термоелектродів термопари з врахуванням тепловіддачі в оточуюче середовище

Як видно з приведеної формули, на точність вимірювання температури цим способом не впливає коефіцієнт Зеебека, тобто його нестабільність в процесі експлуатації. Це досягається формуванням адіабатичного теплового впливу III_0 на робочий кінець термопари поблизу робочої температури. Проте, коефіцієнт Пельтьє функціонально пов'язаний з коефіцієнтом Зеебека ϵ співвідношенням $P = \epsilon T_x$, і тому відомий спосіб не виключає повністю впливу нестабільності коефіцієнта Зеебека.

Крім того, параметр λ , який входить до розрахункової формули, в значній мірі залежить від теплофізичних властивостей контрольованого середовища. При зміні цих властивостей в процесі тривалої експлуатації термопари також виникає додаткова похибка через зміни параметра λ , яку важко врахувати або компенсувати. Реєстрація усталеного значення температури після додаткового нагрівання робочого кінця термопари потребує значного часу. Тривале охолодження робочого кінця після вимикання струму додаткового нагрівання в значній мірі збільшує тривалість вимірювального циклу.

Відомий спосіб вимірювання температури термопарою [3], суть якого полягає у внесенні робочого кінця термопари, у середовище, температуру якого виміряють, реєстрації термоЕРС на вільних кінцях термопари, нагріванні та охолодженні робочого кінця термопари шляхом пропускання через термопару електричного струму і визначенні температури за формулою

$$T_x = \frac{(N_2^I \cdot N_4^I)(N_3^{II} + N_0)^2}{(N_3^{II} - N_4^{II})(N_1^I + N_0)^2} T_K \quad (1)$$

де T_K - температура калібрування термопари,

цифровий індикатор. При вимірюваннях поточних значень температури за допомогою таблиці відповідності лінеаризується перетворювальна характеристика термомпари. Проте, зміни коефіцієнта Зеебека під впливом дестабілізуючих факторів не компенсуються, що викликає великі похибки при вимірюваннях, які ще й змінюються при тривалій експлуатації термомпари.

Таким чином, введення у пристрій для вимірювання температури аналого-цифрового перетворювача і мікро-ЕОМ з цифровим індикатором не вирішує задачу підвищення точності вимірювання температури термомпарою з реальною нелінійною і нестабільною характеристикою.

Відомий пристрій для вимірювання температури [3]. Пристрій містить дві термомпари, з'єднаних робочими кінцями, колодку вільних кінців робочої термомпари, стробуючий ключ, нормуючий підсилювач, аналого-цифровий перетворювач, мікро-ЕОМ, цифровий індикатор, цифро-аналоговий перетворювач та двополісний перемикач.

Вільні кінці робочої термомпари розміщені на колодці та з'єднані компенсаційними термоелектродами з коробкою компенсації вільних кінців. Стробуючий ключ з'єднує вихід компенсаційної коробки з входом нормуючого підсилювача, вихід якого через аналого-цифровий перетворювач поєднаний зі входом мікро-ЕОМ. Перший вихід мікро-ЕОМ поєднаний з цифровим індикатором, другий - з кодовим входом цифро-аналогового перетворювача, третій - з керуючим входом перемикача, четвертий - з керуючим входом стробуючого ключа. Входи перемикача поєднані з виходами цифро-аналогового перетворювача, а його виходи поєднані через термоелектроди з вільними кінцями другої термомпари, розміщені на спеціальній колодці.

Обробка результатів вимірювання за запропонованою формулою (1) виключає вплив непостійності коефіцієнтів Зеебека і Пельтьє на результат вимірювання, а також дозволяє лінеаризувати характеристику перетворення термомпари відносно калібрувальної температури. Проте, похибки вимірювання температури T_x визначаються нестабільністю температури T_0 та точністю відтворення температури T_k . Крім того, калібрування термомпари у робочому режимі неможливо.

Таким чином, введення у пристрій для вимірювання температури цифро-аналогового перетворювача і перемикача для підключення термомперетворювачів на його вихід та застосування мікро-ЕОМ не вирішує задачу стабілізації значень кодів N_0 та N_k , які відповідають цифровим відлікам температур T_0 та T_k , і не дозволяє підвищити точність вимірювання температури T_x згідно формули (1).

Відомий термоелектричний цифровий термометр з автокалібрувкою тепловими тестами Джоуля та Пельтьє [4]. У ньому використовується лише одна робоча термомпара, на вільні кінці якої підключено вихід двополісного перемикача, вхід якого поєднано з виходом цифро-аналогового перетворювача.

Обробка результатів вимірювання згідно запропонованої формули (2) дозволяє виключити вплив непостійності коефіцієнтів Зеебека та Пельтьє на результат вимірювання, лінеаризувати

функцію перетворення термомпари відносно калібрувальної температури T_k , а також дозволяє виключити необхідність калібрування термомпари при температурі T_0 .

Проте, пристрій не може здійснювати калібрування термомпари під час її роботи при температурі T_x , а тому і дозволяє виключити лише мультиплікативну складову похибки термомпари.

Таким чином, введення у пристрій для вимірювання температури аналого-цифрового перетворювача, мікро-ЕОМ, цифро-аналогового перетворювача та нового алгоритму обробки результатів вимірювання повністю не вирішує задачу підвищення точності вимірювання термомпарою з реальною нелінійною та нестабільною характеристикою безпосередньо на об'єкті експлуатації термомпари, без її демонтажу.

В основу винаходу покладена задача створення такого способу та пристрою для вимірювання температури термомпарою, в яких нове виконання операцій додаткового підігріву робочого спаю ідо температури фазового переходу реперного матеріалу у складі термомпари, додаткового підігріву та додаткового охолодження термомпари поблизу цієї точки, та введення додаткових операцій підігріву та охолодження термомпари поблизу робочої точки термомпари, введення нових блоків та зв'язків у програмуєчий пристрій виключає вплив нестабільності температури калібрувальної точки термомпари, впливи нестабільності та нелінійності градуєвальної характеристики термомпари на результат вимірювання температури у процесі тривалої експлуатації. Завдяки цьому підвищується точність вимірювання та строк експлуатації термомпари.

Поставлена задача вирішується тим, що спосіб вимірювання температури, який складається з внесення робочого кінця термомпари середовище, температуру якого вимірюють, реєстрації термоЕРС на вільних кінцях термомпари, охолодження робочого кінця термомпари пропусканням через термомпару електричного струму протягом часу, рівного 0,1 - 0,2 сталої часу термомпари, реєстрації поточного значення термоЕРС на вільних кінцях термомпари, зміни напрямку струму та подальшого підігріву робочого кінця до початкової температури, продовженні розігріву робочого кінця термомпари упродовж часу, рівного часу охолодження, реєстрації поточного значення термоЕРС на вільних кінцях, нової зміни напрямку струму через термомпару та її охолодження до початкової температури та визначенні температури за формулою згідно з винаходом, температура калібрування встановлюється на об'єкті у зоні робочого кінця термомпари у процесі її роботи шляхом поступового підігрівання її робочого кінця нагрівачем у складі термомпари, обчислення миттєвих значень першої похідної сигналу термоЕРС на вільних кінцях термомпари, визначення моменту досягнення температури фазового переходу реперного матеріалу, що містить у собі термомпара, коли перша похідна стає рівною нулю, проведення операцій додаткового охолодження та додаткового нагрівання робочого кінця термомпари за рівні відрізки часу відносно температури фазового переходу шляхом пропускання струму через робочий спай термомпари у різних напрямках та визначення вимірюваної температури

за формулою

$$T_x = T_\phi \frac{(E_\phi^{IV} - E_x^U)(E_\phi^{IV} + E_\phi^{II} - 2E_\phi^I)}{(E_x^{IV} - E_\phi^U)(E_x^{IV} + E_x^{II} - 2E_x^I)}, \quad (3)$$

де T_ϕ - температура фазового переходу реперного матеріалу,

E_ϕ^I, A_ϕ^I - значення термоЕРС на вільних кінцях термопар, отримані у точці фазового переходу та при вимірюванні робочої температури, відповідно,

E_ϕ^{II}, A_ϕ^{II} - значення термоЕРС на вільних кінцях додатково охолодженої термопар за рахунок ефекту Пельтьє у процесі калібрування та вимірювання,

E_ϕ^{IV}, A_ϕ^{IV} - значення термоЕРС на вільних кінцях додатково підігрітої термопар за рахунок ефекту Пельтьє у процесі калібрування та вимірювання робочої температури

Поставлена задача вирішується також тим, що пристрій для вимірювання температури, який складається з термопар, робочий кінець якої розміщений в контрольованому середовищі, термоелектроди якої з'єднані компенсаційними дротами з коробкою стабілізації або компенсації змін температури вільних кінців термопар, нормуючого підсилювача, послідовно з'єднаних з ним аналого-цифрового перетворювача, мікро-ЕОМ, цифрового індикатора, стробуючого ключа, двополюсного трипозиційного перемикача і цифро-аналогового перетворювача, кодовий вихід якого під'єднаний до другого виходу мікро-ЕОМ, а аналогові виходи через двополюсний трипозиційний перемикач з'єднані з вільним кінцем термопар, третій вихід мікро-ЕОМ з'єднаний з керуючим входом стробуючого ключа, який ввімкнено між вільними кінцями термопар і входом нормуючого підсилювача, а четвертий вихід мікро-ЕОМ з'єднано з керуючим входом двополюсного трипозиційного перемикача згідно з винаходом має реперний матеріал, розміщений у термоперетворювачі поблизу робочого спаю, нагрівач робочого спаю, зразковий резистор, другий аналого-цифровий перетворювач та другий цифро-аналоговий перетворювач, кодовий вихід якого під'єднаний до п'ятого виходу мікро-ЕОМ, а аналогові виходи з'єднані з нагрівачем, який розміщений поблизу робочого кінця термопар і реперного матеріалу, та зразковим резистором, вихідна напруга з якого подається на другий аналого-цифровий перетворювач, кодовий вихід якого підключений до другого входу мікро-ЕОМ

Додатковий підігрів робочого кінця термопар до температури фазового переходу реперного матеріалу, яка встановлюється вищою за температуру робочого діапазону термопар, дозволяє виконати процедуру калібрування термопар у процесі її роботи, без її демонтажу, виключити вплив процедури калібрування на процедуру вимірювання у робочому діапазоні температур, виключити вплив зміни значення термоЕРС, отриманого при калібруванні термопар, на результати розрахунків значення дійсної робочої температури, виключити, таким чином, вплив непостійності коефіцієнтів Зеебека та Пельтьє на результат вимірювання і забез-

печити більшу точність визначення значення поправки до результату вимірювання робочої температури

Введення в структуру мікропроцесорного цифрового пристрою додаткових цифро-аналогового та аналого-цифрового перетворювачів дозволяє забезпечити вимірювання сили струму нагрівника, яка відповідає температурі робочого спаю, що дозволяє підвищити точність визначення температури фазового переходу Другий цифро-аналоговий перетворювач у структурі пристрою дає можливість формувати струм додаткового нагрівника робочого кінця термопар програмним шляхом у такий спосіб, що забезпечує максимальну точність визначення температури фазового переходу реперного матеріалу, що підвищує точність калібрування термопар і точність вимірювання робочої температури

Мікро-ЕОМ у складі пристрою забезпечує не тільки визначення та реєстрацію кодів термоЕРС у режимі вимірювання, але й обчислення миттєвих значень першої похідної сигналу термоЕРС на вільних кінцях термопар у режимі калібрування, що забезпечує високу точність визначення моменту фазового переходу реперного матеріалу і, як наслідок, високу точність вимірювання температури калібрування у робочому режимі термопар

На фіг 1 зображена функціональна схема цифрового пристрою для вимірювання температури термопарою, а на фіг 2 - часові діаграми роботи термопар у робочому режимі та режимі калібрування

Пристрій складається з термоелектроперетворювача 1, що має у своєму складі термоелектроди 2, нагрівач 3, реперний матеріал 4, коробки 5 з компенсаційними дротами, коробки стабілізації або компенсації змін температури вільних кінців термопар 6, стробуючого ключа 7, нормуючого підсилювача 8, першого аналого-цифрового перетворювача 9, мікро-ЕОМ 10, цифрового індикатора 11, першого цифро-аналогового перетворювача 12, двохполюсного трипозиційного ключа 13, другого цифро-аналогового перетворювача 14, другого аналого-цифрового перетворювача 15, зразкового резистора 16

Вільні кінці термопар розміщені у коробці 6, температура якої стабілізується, або вводиться автоматична компенсація змін температури вільних кінців так, що термоЕРС термопар відповідає розрахунковій температурі T_0 . До виходу коробки 6 під'єднаний стробуючий ключ 7, через який термоЕРС термопар подається на вхід нормуючого підсилювача 8 і далі - на аналого-цифровий перетворювач 9, в якому термоЕРС перетворюється в код, що подається на перший вхід мікро-ЕОМ 10. Перший вихід мікро-ЕОМ з'єднаний з цифровим індикатором 11, другий вихід - з кодовим входом першого цифро-аналогового перетворювача 12, третій вихід - з керуючим входом стробуючого ключа 7, четвертий вихід - з керуючим входом двохполюсного трипозиційного перемикача 13, п'ятий вихід - з кодовим входом другого цифро-аналогового перетворювача 14. Входи перемикача 13 з'єднані з симетричними аналоговими виходами першого цифро-аналогового перетворювача коду в струм 12, а його виходи - з зажимами термоелектродів 2, які

розміщені на колодці 5 У термоперетворювачі 1 розміщений реперний матеріал 4 і спіраль нагрівача 3, яка послідовно поєднана з зразковим резистором 16, і вони підключені до аналогового виходу другого цифро-аналогового перетворювача коду в струм 14 Сигнал напруги, пропорційний току підігрівача, з зразкового резистора 16 подається на вхід другого аналого-цифрового перетворювача 16, кодовий вихід якого підключено до другого входу мікро-ЕОМ

Пристрій працює з програмою, яка записана в постійному запам'ятовуючому пристрої мікро-ЕОМ

Спосіб вимірювання температури здійснюється так

Робочий кінець термомпари розміщують в контрольованому середовищі, температуру якого в межах T_{min} - T_{max} треба виміряти Вільні кінці термомпари розміщені в коробці 6, стабілізовану або розрахункову температуру якої T_0 можна вважати сталою ($T_0 = \text{const}$)

ТермоЕРС термомпари у залежності від температури T_x робочого кінця та температури T_0 вільних кінців виражається залежністю

$$E_x = \varepsilon_x T_x - \varepsilon_0 T_0 \quad (4)$$

де ε_x - значення коефіцієнту Зеебека при температурі T_x ,

ε_0 - значення коефіцієнту Зеебека при температурі T_0

Так як ε_x залежить від температури, то градувальна характеристика термомпари має нелінійний характер і може бути задана поліноміальною залежністю вигляду

$$E(T) = \sum_{i=0}^n a_i T^i \quad (5)$$

Тоді коефіцієнти ε_x і ε_0 і вирази для лінеаризованої моделі E_x мають такий вигляд

$$\varepsilon_x = \left. \frac{\partial E(T)}{\partial T} \right|_{T=T_x} \quad \varepsilon_0 = \left. \frac{\partial E(T)}{\partial T} \right|_{T=T_0} \quad (6)$$

Таким чином, ε_x та ε_0 - це коефіцієнти диференціальної чутливості термомпари з нелінійною функцією перетворення у точках T_x та T_0 , відповідно, а термоЕРС у точці T_x може бути представлена виразом

$$E(T_x) = \sum_{i=0}^{n-1} a_{i+1} (i+1) T_x^{(i+1)} - \sum_{i=0}^{n-1} a_{i+1} (i+1) T_0^{(i+1)} \quad (7)$$

У процесі експлуатації термомпари її робочий кінець під впливом високих температур та дії агресивного середовища змінює свої властивості і коефіцієнт Зеебека змінюється з часом На математичній моделі термомпари (7) це визначається зміною коефіцієнтів a_i , в околицях точки T_x Так як вільні кінці термомпари знаходяться у стабільних умовах при невеликих температурах T_0 , диференціальну чутливість ε_0 можна вважати незмінною, а вираз (7) приймає вигляд

$$E^*(T_x) = \sum_{i=0}^{n-1} a_{i+1}^* (i+1) T_x^{(i+1)} - \sum_{i=0}^{n-1} a_{i+1} (i+1) T_0^{(i+1)} \quad (8)$$

де $E^*(T_x)$ - фактична термоЕРС на виході термомпари при вимірюванні температурі T_x , яка відрізняється від її нормованого значення, заданого виразом (7),

a_{i+1}^* - реальні значення параметрів моделі (5)

функції перетворення термомпари

Для визначення реальних значень коефіцієнтів a_{i+1}^* моделі (5) можна застосувати тестовий метод контролю Як відомо, при значенні коефіцієнту параметру моделі $a_0 = 0$ у виразі (7) можна обмежитися лише адитивними тестовими впливами, які для формування моделі функції перетворення термомпари необхідно формувати поблизу температури калібрування T_ϕ

У процесі калібрування робочий кінець термомпари нагрівають нагрівачем 4 до температури фазового переходу реперного матеріалу T_ϕ , яка вище робочої зони температур $T_\phi > T_{\text{max}}$ На часовій діаграмі фіг 2 показано процеси зміни температури робочого спаю у процесі калібрування та вимірювання Момент досягнення фазового переходу визначається вимірюванням значення струму нагрівача I_1 , шляхом вимірювання падіння напруги на зразковому резисторі R_N за допомогою аналого-цифрового перетворювача 15, так і визначенням значення першої похідної сигналу термоЕРС на вільних кінцях термомпари Розігрів робочого кінця термомпари починається з моменту t_0 до моменту фазового переходу реперного матеріалу t_1 , при температурі T_ϕ Значення термоЕРС у точці T_ϕ має вигляд

$$E(T_\phi) = \varepsilon_\phi T_\phi - \varepsilon_0 T_0 \quad (9)$$

При досягненні температури фазового переходу T_ϕ ток I_1 нагрівача встановлюють рівним нулю

Далі через робочий кінець термомпари 1 пропускають електричний струм I_0 від першого цифро-аналогового перетворювача 12 через перемикач 13 Це викликає охолодження робочого кінця термомпари за рахунок поглинання теплоти Пельтьє Струм I_0 вибирають з умови максимального охолодження робочого кінця за час $\Delta t_1 = t_3 - t_2$ з урахуванням виділення теплоти Джоуля по довжині електродів Цей струм має значення

$$I_0 = \frac{P_\phi}{R} \quad (10)$$

де $P_\phi = \varepsilon_\phi T_\phi$ - значення коефіцієнта Пельтьє при абсолютній температурі T_ϕ ,

R - опір електродів термомпари

Код струму I_0 попередньо обчислюється, запам'ятовується мікро-ЕОМ 10 і вводиться у ЦАП 12

Інтервал охолодження Δt_1 , встановлюється таймерами мікро-ЕОМ, При охолодженні робочого кінця за час Δt_1 , менший за його теплову постійну часу τ , процес поглинання тепла здійснюється адіабатично З урахування лінійної апроксимації градувальної характеристики термомпари (9) при $\Delta T_\phi < T_\phi$, лінійної залежності ΔT_ϕ від теплоти Джоуля та Пельтьє ($\Delta t_1 < \tau$), а також того, що коефіцієнт Пельтьє однозначно залежить від температури робочого кінця $P_\phi = \varepsilon_\phi T_\phi$, отримуємо значення термоЕРС у момент t_3 закінчення процесу охолодження термомпари

$$E_\phi^* = E_\phi \left\{ T_\phi + \frac{0,5 R I_0^2 - \varepsilon_\phi T_\phi I_0}{c m} \Delta t_1 \right\} - \varepsilon_0 T_0 \quad (11)$$

де c - питома теплоємність робочого кінця термомпари,

m - його маса

По команді мікро-ЕОМ обнулюється ЦАП12, замикається ключ 7, код термоЕРС E_{ϕ}^{22} заноситься у пам'ять мікро-ЕОМ 10. Потім по команді мікро-ЕОМ 10 розмикається ключ 13, включається ЦАП, а перемикач переводиться у протилежне положення, що змінює напрям протікання електричного струму через робочий кінець термопарі 1, за рахунок якого він починає нагріватись. Так як при цьому теплоти Пельтьє та Джоуля сумуються, то виконується швидкий нагрів робочого кінця, і термоЕРС через час $(t_4 - t_3)$ досягає температури фазового переходу T_{ϕ} . Момент фазового переходу встановлюється мікро-ЕОМ шляхом обчислення першої похідної змінного сигналу термо-ЕРС, коли вона стає рівною нулю. У цей момент фіксується інтервал часу $(t_4 - t_5)$. Подальший розігрів термопарі виконується за час $\Delta t_2 = t_6 - t_5$, рівний часу Δt_1 . У цей час термоЕРС зростає і досягає значення

$$E_{\phi}^{III} = E_{\phi}(T_{\phi} + \frac{0,5RI_0^2 + \epsilon_{\phi}T_{\phi}I_0}{cm} \Delta t_1) - \epsilon_0 T_0 \quad (12)$$

По команді мікро-ЕОМ обнулюється ЦАП12, замикається ключ 7, і код термоЕРС E_{ϕ}^{22} заноситься у пам'ять мікро-ЕОМ 10. Перемикач 13 знов переводиться у протилежне положення. Значення струму I_0 встановлюється рівним нулю. З моменту t_6 термопара поступово охолоджується до температури контрольованого середовища T_x . На цьому

$$E_x^I = \epsilon_x T_x - \epsilon_0 T_0 = \epsilon_{\phi}(1+\gamma)T_x - \epsilon_{\phi} T_0, \quad (13)$$

$$E_x^II = \epsilon_{\phi}(1+\gamma) \left[T_x + \frac{0,5RI_0^2 - (1+\gamma)\epsilon_{\phi}T_x I_0}{cm} \Delta t_1 \right] - \epsilon_0 T_0, \quad (14)$$

$$E_x^{III} = \epsilon_{\phi}(1+\gamma) \left[T_x + \frac{0,5RI_0^2 + (1+\gamma)\epsilon_{\phi}T_x I_0}{cm} \Delta t_1 \right] - \epsilon_0 T_0 \quad (15)$$

де $\lambda = \frac{\Delta \epsilon_x}{\epsilon_x}$ - відносна зміна коефіцієнта Зеебека при зміні вимірюваної температури T_x відносно температури калібрування T_{ϕ} .

У процесі виміру невідомої температури T_x значення $E_x^I, E_x^{II}, E_x^{III}$ перетворюють у цифрові коди, які запам'ятовуються мікро-ЕОМ.

Вирішуючи рівняння (9) - (15) відносно невідомої температури T_x , отримуємо кінцеву формулу для розрахунку невідомої температури

$$\gamma_{\lambda} = \frac{(E_x^{III} - E_x^I)(E_x^I + E_x^{II} - 2E_{\phi}^I)}{(E_x^{III} - E_x^{II})(E_x^{II} + E_x^I - 2E_{\phi}^I)}, \quad (16)$$

В процесі повторного охолодження термопарі за час $(t_{12} - t_{13})$ мікроЕОМ обчислює вимірянну температуру T_x за формулою (16), а результат виміру після перетворення у десятковий код виводиться на цифрове табло 11. Далі процес може бути повторено.

Як видно з отриманого співвідношення вимірювана температура T_x не залежить від непостійності коефіцієнта Зеебека $\Delta \epsilon_x$, теплофізичних параметрів робочого кінця самої термопарі (см), а також виділення тепла Джоуля у термопарі. За рахунок додаткових вимірювань значень термоЕРС

процес калібрування термопарі закінчується. За рахунок того, що температура фазового переходу відома з високою точністю, і сам процес калібрування за наявності нагрівача 4 може бути проведений на об'єкті у процесі роботи термопарі, виникає можливість виключити вплив змін коефіцієнту Зеебека ϵ_{ϕ} при старінні термопарі за рахунок корекції значень термоЕРС $E_{\phi}^I, E_{\phi}^{II}, E_{\phi}^{III}$. Таким чином, виключається адитивна складова похибки за рахунок неточного відтворення температури калібрування.

Процес вимірювання робочої температури починається з визначення коду поточного значення термоЕРС E_x^I . Процес виміру нових значень невідомої температури T_x виконується аналогічно процедурі калібрування. Вимірюють термоЕРС, що виникає на вільних кінцях термопарі.

В процесі експлуатації термопарі під впливом дестабілізуювальних факторів, а також зміни температури робочого кінця виникають неконтрольовані зміни коефіцієнта Зеебека відносно його номінального значення. Крім того, коефіцієнт Зеебека змінюється в залежності від контрольованої температури T_x внаслідок нелінійності функції перетворення. Вимірювані значення термоЕРС поблизу температури T_x при контрольованих тестових впливах будуть такими

під час тестових впливів поблизу температури фазового переходу і робочої температури та обробки результатів вимірювань виключається вплив зміни коефіцієнта Зеебека робочого кінця, а також лінеаризується функція перетворення термоперетворювача відносно температури T_{ϕ} .

У порівнянні з прототипом виключена похибка вимірювання температури калібрування термопарі, стало можливим її калібрування не тільки під час монтажу термопарі, а й у процесі експлуатації. Це забезпечує продовження строку експлуатації термопарі та підвищує точність вимірювання температури.

Термоелектричний пристрій для вимірювання температури (фиг 1) працює так

Попередньо в постійній запам'ятовуючій пристрій мікро-ЕОМ вводять параметри термопарі T_0 - стабілізовану температуру вільних кінців термопарі в коробці 6, ϵ_0 - табличне значення коефіцієнта Зеебека, що відповідає температурі вільних кінців T_0 , значення часу Δt_1 - час адиабатичного нагрівання робочого кінця термопарі, який, згідно викладеного вище становить (0,1 - 0,2) τ теплової сталої часу τ термопарі, вмонтованій на об'єкті, I_0 - струм додаткового нагрівання та охолодження термопарі, знайдений з умов (10). При калібруванні

пристрою відома температура фазового переходу T_{ϕ} реперного матеріалу, яку також заносять у пам'ять мікро-ЕОМ. Також у пам'ять мікро-ЕОМ заносять програму зміни току нагрівача 4 у залежності від співвідношення фактичної температури T_x та температури фазового переходу T_{ϕ} . Значення перепаду температур $(T_{\phi} - T_x)$ визначає час нагрівання, що дозволяє попередньо оцінити відрізок часу $(t_0 - t_1)$ до моменту фазового переходу.

На першому етапі виконується калібрування пристрою. За програмою мікро-ЕОМ змінюється струм I_1 на виході другого цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) до моменту фазового переходу реперного матеріалу. Точне значення струму I_1 вимірюється під час аналого-цифрового перетворення напруги від струму I_1 на зразковому резисторі R_N 16. Це аналого-цифрове перетворення реалізує другий АЦП, вихід якого підключено до мікро-ЕОМ. Точне вимірювання току дозволяє прогнозувати момент наступу фазового переходу реперного матеріалу. У цей час вимірюється як термоЕРС на вільних кінцях термопар, так і її перша похідна. Відлік термоЕРС здійснюється у час, коли перша похідна змінної термоЕРС стає рівною нулю. Після цього мікро-ЕОМ встановлює значення току $I_1 = 0$. У момент t_2 включається програма генерації тестових впливів, під час якої через робочий кінець термопар пропускають струм I_0 змінних напрямків у фіксовані моменти t_3, t_5, t_6 з урахуванням затримок часу на фазові переходи $(t_1 - t_2), (t_4 - t_5)$. У результаті калібрування у пам'ять мікро-ЕОМ заносять коди, які відповідають значенням термоЕРС $E_{\delta}^1, A_{\delta}^{22}, A_{\delta}^{33}$.

Операція калібрування з підгрівом робочого кінця дозволяє провести калібрування термопар на об'єкті під час його роботи. Вона здійснюється через достатньо великий відрізок часу, можливо 1 - 2 рази на рік. Уточнений код E_{ϕ} термоЕРС, що відповідає значенню температури T_{ϕ} , оновлюється у пам'яті мікро-ЕОМ.

Після закінчення калібрування термопар встановлюють значення струму $I_1 = 0$, і термопара поступово приймає значення вимірюваної температури T_x за час, який може дорівнювати (7 - 10) τ теплової сталості часу τ термопар.

Режим вимірювання проводиться по тій же програмі, що й режим калібрування. У результаті одержують коди, що відповідають значенням термоЕРС $E_x^I, E_x^{II}, E_x^{III}$, що заносять у пам'ять мікро-ЕОМ.

Відмінною є частина підпрограми додаткового охоплення термопар у відрізок часу $t_{12} - t_{13}$, що

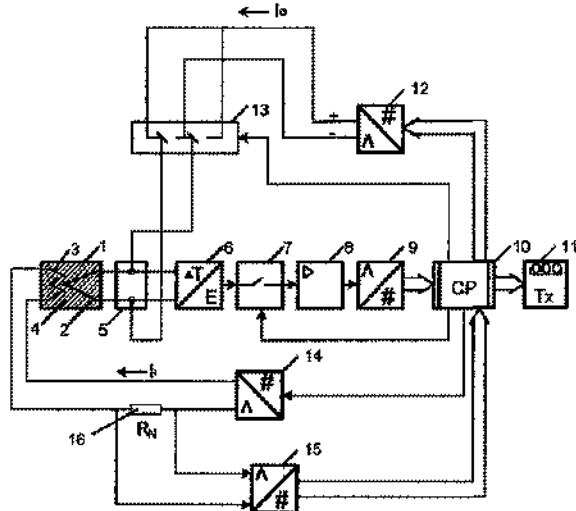
дозволяє скоріше вивести термопару на робочий режим.

Запропонований пристрій може працювати з термопарами, які мають у своєму складі реперний матеріал 3 та нагрівач 4. Компенсаційна коробка може бути різних типів, наприклад, КТ - 54, яка приводить термоЕРС термопар до значення, що відповідає розрахунковій температурі вільних кінців термопар, як правило, це $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$.

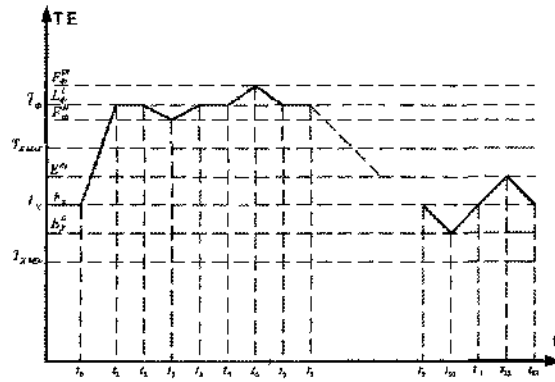
Порівняно з пристроєм - прототипом запропонований пристрій дає змогу проводити калібрування термопар під час її роботи, а не лише після її монтажу, що дозволяє підвищити точність вимірювання не лише за рахунок виключення мультипликативної складової похибки термопар внаслідок зміни її чутливості, а й виключити адитивну складову похибки за рахунок підвищення точності вимірювання у точці T_{ϕ} - температури фазового переходу матеріалу, яка відома з високою точністю. Розміщення точки фазового переходу за верхньою межею вимірюваних температур T_{max} дає змогу виключити вплив фазових переходів у зоні робочих температур. Це дає змогу значно продовжити термін використання термопар при їх експлуатації в агресивних середовищах при суттєвому підвищенні точності вимірювання при зберіганні показників швидкодії термопар у робочих режимах вимірювання.

Джерела інформації

- 1 Левшин В. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин - Л. Энергоатомиздат, 1983, с. 259 - 260.
- 2 А. С. СРСР №777475, кл. G01K7/02, 1980.
- 3 Опис до патенту України UA17987A, кл. G01K7/02, бюл. №5, 1997.
- 4 Головкин Д. Б., Скрипник Ю. О., Хімичова Г. І. Структурно - алгоритмічні методи підвищення точності вимірювання температури - К. ФАДА, ЛТД, 1999, с. 141 - 147.
- 5 А. С. СРСР №1796919, кл. G01K7/02, бюл. №7, 1993.
- 6 А. С. СРСР №569876, кл. G01K7/02, бюл. №31, 1977.
- 7 Цапенко М. П. Измерительные информационные системы - М. Энергоатомиздат, 1985, с. 158.
- 8 Опис до патенту України UA №17907A, кл. G01K7/02, бюл. №5, 1997.



Фиг. 1



Фиг. 2