



УКРАЇНА

(19) UA (11) 34797 (13) A

(51) 6 G01K7/02

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

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

(21) 99073863

(22) 07.07.1999

(24) 15.03.2001

(46) 15.03.2001, Бюл. № 2, 2001 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Юрчик Геннадій
Васильович, Скирута Михайло Андрійович, Логви-
ненко Артем Павлович(73) ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЛЕГКОЇ ПРОМИС-
ЛОВОСТІ УКРАЇНИ

(57) 1. Спосіб вимірювання температури термопарою, який полягає у внесенні робочого кінця термопару у контрольоване середовище, реєстрації термоелектрорушійної сили на вільних кінцях термопару, що відповідає температурі контрольованого середовища, нагріванні робочого кінця термопару електричним струмом на протязі часу, вибраного в інтервалі 0,1...0,2 від теплової сталої часу термопару, реєстрації миттєвих значень термоелектрорушійної сили на вільних кінцях термопару, визначенні контрольованої температури, який відрізняється тим, що після реєстрації термоелектрорушійної сили на вільних кінцях при початковій чутливості термопару, яка відповідає температурі контрольованого середовища, змінюють чутливість робочого кінця термопару на визначене значення, реєструють термоелектрорушійну силу на вільних кінцях термопару, нагрівають додатково робочий кінець термопару з допомогою змінного струму, після чого реєструють миттєве значення термоелектрорушійної сили на вільних кінцях термопару, установлюють початкову чутливість робочого кінця термопару, реєструють на вільних кінцях термопару нове миттєве значення термоелектрорушійної сили, припиняють протікання змінного струму, а контрольовану температуру визначають за формулою

$$T_x = \left\{ \frac{2(Z_1'' - Z_2'')(Z_4'' - Z_1'')}{[(Z_4'' - Z_3'') - (Z_1'' - Z_2'')]Z_1''} \cdot \frac{(Z_1'' - Z_2'')}{(Z_1'' - Z_2'')} \right\} T_k$$

де T_k - температура, при якій калібрують термопару на місці її установки перед початком тривалої експлуатації; $Z_1'' = (N_1'' + N_{01})$ та $Z_2'' = (N_2'' + N_{02})$ - результуючі коди, де N_1'' і N_2'' - коди термоелек-

трорушійної сили на вільних кінцях термопару, які отримані відповідно в процесі попередньої калібровки і поточного вимірювання; $Z_2' = (N_2' + N_{02})$ та $Z_2'' = (N_2'' + N_{02})$ - результуючі коди, де N_2' і N_2'' - коди термоелектрорушійної сили термопару відповідно при початковій чутливості і при зміні чутливості її робочого кінця на визначене значення в тих же умовах; $Z_3'' = (N_3'' + N_{02})$, де N_3'' - код термоелектрорушійної сили на вільних кінцях термопару за умови зміненої чутливості робочого кінця термопару і одночасного додаткового його нагрівання на місці установки термопару; $Z_4'' = (N_4'' + N_{01})$, де N_4'' - код термоелектрорушійної сили на вільних кінцях термопару при додатково нагрітому її робочому кінці та початковому значенні чутливості; N_{01} та N_{02} - цифрові коди термоелектрорушійної сили вільних кінців термопару відповідно при початковій та зміні на визначене значення чутливості її робочого кінця.

2. Пристрій для вимірювання температури термопарою, який містить термопару, два термоелектроди якої з'єднані компенсаційними дротами з коробою стабілізації або компенсації змін температури вільних кінців термопару, нормуючий підсилювач, послідовно з'єднані з ним аналого-цифровий перетворювач, мікроЕОМ і під'єднаний до її першого виходу цифровий індикатор, цифроаналоговий перетворювач, кодовий вхід якого під'єднаний до другого виходу мікроЕОМ, який відрізняється тим, що в нього введені мідна підложка, автоматичний перемикач, третій термоелектрод в термопарі, який одним кінцем механічно з'єднаний з робочим кінцем термопару, а другим кінцем з'єднаний через компенсаційний дріт з одним із входів автоматичного перемикача, другий вхід якого з'єднаний з першим термоелектродом, а вихід автоматичного перемикача з'єднаний з входом нормуючого підсилювача, цифроаналоговий перетворювач, виконаний по типу "цифра - змінний струм", трансформатор струму, первинна обмотка якого підключена до виходу цифроаналогового перетворювача, а вторинна обмотка - до мідної підложки, з якою механічно з'єднаний робочий кінець термопару, керуючий вхід автоматичного перемикача з'єднаний з третім виходом мікроЕОМ.

(19) UA (11) 34797 (13) A

Винахід відноситься до термометрії і може бути застосований для вимірювання температури за допомогою термопар, які працюють в агресивних середовищах і екстремальних умовах з підвищеною точністю за рахунок автокалібровки та надлишковості вимірювань.

Найбільше поширення для вимірювання високих температур з достатньою точністю найшли термоелектричні перетворювачі (термопари), які перетворюють температуру в електрорушійну силу і градууються в лабораторних умовах. Особливостями їх роботи в складних умовах, зв'язаних з високими температурами та агресивними середовищами (металургія, хімічні виробництва, атомна енергетика тощо), є прогресуюча похибка вимірювань через деградацію термоелектродів та зміну їх термоелектричних властивостей. При цьому поступово змінюється чутливість робочого кінця термопари (коефіцієнта Зеебека). Відповідно змінюється початковий кут нахилу її градуовальної характеристики (ГХ), що викликає мультиплікативну складову похибки вимірювання (похибку чутливості).

Другим джерелом похибки вимірювання являється термоелектрична неоднорідність електродів термопари внаслідок зміни хімічного складу дрітків електродів, втрати компонентів сплаву або домішок при окисленні чи випаровуванні, зміни фізичного стану внаслідок механічних зміщень, рекристалізації, пружних напружень тощо.

Додаткова паразитна термоелектрорушійна сила (ТЕРС), яка обумовлена градієнтом температури і неоднорідністю електродів, є джерелом паралельного зміщення ГХ термопари відносно її початкового положення, що викликає адитивну складову похибки вимірювання (похибку нуля). Наявність прогресуючої адитивної і мультиплікативної похибок обімажує термін експлуатації термопар і потребує їх періодичної зміни. В термометрії використовують різні способи та схематехнічні рішення.

Відомий спосіб вимірювання температури термопарою за А.С. СРСР № 777475, кл. G01K 7/02, 1980, який полягає у внесенні робочого кінця термопари у контрольоване середовище, реєстрації ТЕРС на її вільних кінцях, нагріванні робочого кінця термопари шляхом пропускання через неї постійного електричного струму, реєстрації ТЕРС на вільних кінцях термопари, визначенні шуканої температури за формулою:

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

де Π - коефіцієнт Пельтьє термопари;

I_0 - струм через робочий кінець термопари;

$k = E_1/E_2$ - відношення значень зареєстрованих значень ТЕРС: E_1 - до E_2 - після нагрівання термопари;

λ - теплопровідність термоелектродів.

Даний спосіб дає можливість отримати результат вимірювання з підвищеною точністю при умові високої стабільності коефіцієнта Пельтьє у широкому діапазоні контрольованих температур. Але цей коефіцієнт функціонально пов'язаний з коефіцієнтом Зеебека, тобто коефіцієнтом чутли-

вості термопари, і тому відомий спосіб не виключає впливу нестабільності чутливості термопари на точність визначення температури. Крім того, спосіб не виключає похибку, обумовлену появою адитивної паразитної ТЕРС через виникнення термоелектричної неоднорідності електродів внаслідок швидкого їх старіння в умовах високих температур і, особливо, в агресивних середовищах.

Відомий спосіб вимірювання температури термопарою за А.С. СРСР № 1280338, кл. G01K 7/02, 1986, суть якого полягає у внесенні робочого кінця термопари у контрольоване середовище, реєстрації першого усталеного показу термопари, нагріванні робочого кінця термопари пропусканням через електроди термопари електричного струму, реєстрації другого усталеного показу термопари, припиненні електричного струму через електроди термопари і наступному охолодженні робочого кінця термопари потоком повітря, реєстрації третього усталеного показу термопари, нагріванні робочого кінця термопари електричним струмом при одночасному його охолодженні потоком повітря, реєстрації четвертого усталеного показу термопари, визначенні шуканої температури за формулою.

Недоліком цього способу являється те, що формула для визначення шуканого значення температури також містить коефіцієнт Пельтьє, що також не дає можливості усунути повністю вплив нестабільності термопари на результат вимірювання.

Відомий також спосіб вимірювання температури термопарою за патентом України № 12392, кл. G01K 7/02, 1996, який полягає у внесенні робочого кінця термопари у контрольоване середовище, реєстрації ТЕРС на вільних кінцях термопари, що відповідає температурі контрольованого середовища, нагріванні робочого кінця термопари електричним струмом на протязі часу, вибраного в інтервалі 0,1...0,2 від теплової сталої часу термопари, реєстрації миттєвих значень ТЕРС на вільних кінцях термопари, визначенні контрольованої температури за формулою. Крім того, відомий спосіб включає операцію охолодження робочого кінця термопари зміною напрямку пропускання електричного струму на протилежний на протязі заданого часу. А контрольована температура визначається за формулою

$$T_x = \left[\frac{2(N_1' + N_0)}{(N_1' + N_0)} - \frac{(N_2' - N_1')}{(N_2' + N_1')} \right] \cdot T_k,$$

де T_k - температура калібровки пристрою;

N_1' і N_1'' - коди ТЕРС на вільних кінцях термопари, які отримані в процесі попередньої калібровки;

N_2' і N_2'' - коди ТЕРС додатково нагрітої термопари в тих самих умовах;

N_0 - код ТЕРС вільних кінців термопари.

Перевагою даного способу є те, що він дозволяє обчислити поправку на зміну чутливості термопари в процесі її тривалої експлуатації, а значення шуканої температури обчислюється за допомогою алгоритму, який враховує знайдене значення поправки. Крім того, перетворювальна характеристика термопари з урахуванням введеної поправки приймає лінійний характер, що дає мож-

ливість усунути похибку від нелінійності характеристики термопари. Даний спосіб виключає вплив нестабільності коефіцієнтів Пельтьє та Зеебека термопари на точність результату обчислення температури.

Проте даний спосіб не дозволяє усунути вплив на точність визначення шуканої температури вагової адитивної похибки, яка обумовлюється завжди присутньою неоднорідністю електродів термопари по її довжині та градієнтом температури, який накладається на цю неоднорідність.

Відомий цифровий пристрій для вимірювання температури термопарою (див. Линевет Ф. Измерение температуры в технике. Справочник. Пер. с нем., 1980, с. 193), який складається з термопари, нормуючого підсилювача, аналого-цифрового перетворювача і цифрового вимірювального приладу. Недоліком такого пристрою є залежність результатів вимірювання від ступеня нелінійності градуовальної характеристики, нестабільності чутливості термопари, а також від похибки, обумовленої появою неоднорідності електродів термопари в процесі її тривалої експлуатації.

Відомий пристрій для вимірювання температури термопарою (див. Чапенко М. П. Измерительные информационные системы. М.: Энергоатомиздат, 1985, с. 158), який складається з термопари, робочий кінець якої розміщений в контрольованому середовищі, термоелектроди якої з'єднані компенсаційними дротами з коробкою стабілізації або компенсації зміни температури вільних кінців термопари, нормуючого підсилювача, послідовно з'єднаних з ним аналого-цифрового перетворювача, мікроЕОМ і цифрового індикатора. В пам'ять ЕОМ занесена градуовальна характеристика термопари. Код вимірюваної ТЕРС, одержаний за допомогою аналого-цифрового перетворювача, порівнюється в мікроЕОМ з кодом ТЕРС градуовальної характеристики. Згідно таблиці відповідності формується код вимірюваної температури, який виводиться на цифровий індикатор. При вимірюваннях поточних значень температури з допомогою таблиць відповідності лінеаризується перетворювальна характеристика термопари і цим забезпечується цифровий відлік температури.

Проте реальна нестабільність параметрів термопари, перш за все прогресуюча зміна коефіцієнта Зеебека, а також прогресуюча похибка від неоднорідності електродів, не дозволяє повністю лінеаризувати перетворювальну характеристику через виникаючу нееквівалентність таблиці відповідності. Крім того, зміни коефіцієнта Зеебека та поява паразитної ТЕРС термопари, викликані неоднорідністю її електродів, під впливом дестабілізуючих факторів нічим не компенсується, що викликає досить великі похибки вимірювання температури.

Відомий також пристрій для вимірювання температури термопарою за патентом України № 12392, кл. G01K 7/02, 1996, який містить термопару, два термоелектроди якої з'єднані компенсаційними дротами з коробкою стабілізації або компенсації змін температури вільних кінців термопари, нормуючий підсилювач, послідовно з'єднаний з ним аналого-цифровий перетворювач, мікроЕОМ і під'єднаний до її першого виходу цифровий індикатор, цифроаналоговий перетворювач, кодовий

вихід якого під'єднаний до другого виходу мікроЕОМ.

Крім того відомий пристрій має стробуючий ключ, двохполюсний трипозиційний перемикач, аналогові виходи стандартного цифроаналогового перетворювача через двохполюсний трипозиційний перемикач з'єднані з вільними кінцями термопари, третій вихід мікроЕОМ з'єднаний з керуючим входом стробуючого ключа, який зв'язано між вільним кінцем термопари і входом нормуючого підсилювача, а четвертий вихід мікроЕОМ з'єднаний з керуючим входом двохполюсного трипозиційного перемикача.

Відомий пристрій дозволяє значно зменшити вплив непостійності як коефіцієнта Зеебека, так і коефіцієнта Пельтьє, виключаючи вплив непостійності теплофізичних властивостей контрольованого середовища на результат вимірювання за рахунок використання початкової ділянки кривої нагрівання термопари.

Проте введення у пристрій-прототип для вимірювання температури термопарою аналого-цифрового перетворювача, мікроЕОМ з цифровим індикатором, стандартного цифроаналогового перетворювача, під'єднаного до другого виходу мікроЕОМ, не дозволяє усунути вплив на точність вимірювання температури вагової адитивної похибки, яка обумовлюється завжди присутньою неоднорідністю електродів термопари по її довжині та градієнтом температури, який накладається на цю неоднорідність.

Задача винаходу полягає у створенні таких способу і пристрою для вимірювання температури термопарою, в яких введення нових операцій у спосіб, введення нових елементів та зв'язків у пристрій дозволило б підвищити точність вимірювання температури в умовах швидкого дрейфу градуовальних характеристик термопар завдяки усуненню впливу на результат вимірювання вагової адитивної похибки, яка обумовлюється завжди присутньою неоднорідністю електродів термопари по їх довжині та градієнтом температури, який накладається на цю неоднорідність.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі вимірювання температури термопарою, який полягає у внесенні робочого кінця термопари у контрольоване середовище, реєстрації ТЕРС на вільних кінцях термопари, що відповідає температурі контрольованого середовища, нагріванні робочого кінця термопари електричним струмом на протязі часу, вибраного в інтервалі 0,1..0,2 від теплової сталої часу термопари, реєстрації миттєвих значень ТЕРС на вільних кінцях термопари, визначенні контрольованої температури, згідно винаходу після реєстрації ТЕРС на вільних кінцях термопари, яка відповідає температурі контрольованого середовища, змінюють чутливість робочого кінця термопари на визначене значення, реєструють значення ТЕРС на вільних кінцях термопари, нагрівають додатково робочий кінець термопари за допомогою змінного струму, після чого реєструють миттєве значення ТЕРС на вільних кінцях термопари, установлюють початкову чутливість робочого кінця термопари, реєструють на вільних кінцях термопари нове миттєве значення ТЕРС, припиняють протікання електричного стру-

му, а контрольовану температуру визначають за формулою

$$T_x = \left\{ \frac{2(Z_1'' - Z_2'')(Z_4'' - Z_1'')}{(Z_4'' - Z_3'') - (Z_1'' - Z_2'')Z_1''} - \frac{(Z_1'' - Z_2'')}{(Z_1'' - Z_2'')} \right\} T_k$$

де T_k - температура, при якій калібрують термопару на місці її установки перед початком тривалої експлуатації;

$Z_1' = (N_1' + N_{01})$ та $Z_1'' = (N_1'' + N_{01})$ - результуючі коди, де N_1' і N_1'' - коди ТЕРС на вільних кінцях термопар, які отримані відповідно в процесі попередньої калібровки і поточного вимірювання;

$Z_2' = (N_2' + N_{02})$ та $Z_2'' = (N_2'' + N_{02})$ - результуючі коди, де N_2' і N_2'' - коди ТЕРС термопар відповідно при початковій чутливості і при зміні чутливості її робочого кінця на визначене значення в тих же умовах.

$Z_3' = (N_3' + N_{02})$, де N_3' - код ТЕРС на вільних кінцях термопар за умови зміненої чутливості робочого кінця термопар і одночасного і додаткового його нагрівання на місці установки термопар;

$Z_4' = (N_4' + N_{01})$, де N_4' - код ТЕРС на вільних кінцях термопар при додатково нагрітому її робочому кінці та початковому значенні чутливості;

N_{01} та N_{02} - цифрові коди ТЕРС вільних кінців термопар відповідно при початковій та змінній на визначене значення чутливості її робочого кінця.

Поставлена задача вирішується також тим, що пристрій для вимірювання температури термопарою містить термопару, два термоелектроди якої з'єднані компенсаційними дротами з коробкою стабілізації або компенсації зміни температури вільних кінців термопар, нормуючий підсилювач, послідовно з'єднані з ним аналого-цифровий перетворювач, мікроЕОМ і під'єднаний до її першого виходу цифровий індикатор, цифроаналоговий перетворювач, кодовий вхід якого під'єднаний до другого виходу мікроЕОМ, згідно винаходу в нього введені мідна підложка, автоматичний перемикач, третій термоелектрод в термопарі, який одним кінцем механічно з'єднаний з робочим кінцем термопар, а другим кінцем з'єднаний через компенсаційний дріт з одним із входів автоматичного перемикача, другий вхід якого з'єднаний з першим термоелектродом, а вихід автоматичного перемикача з'єднаний з входом нормуючого підсилювача, цифроаналоговий перетворювач виконаний по типу "цифра - змінний струм", трансформатор струму, первинна обмотка якого підключена до виходу цифроаналогового перетворювача, а вторинна обмотка - до мідної підложки, з якою механічно з'єднаний робочий кінець термопар, керуючий вхід автоматичного перемикача з'єднаний з третім виходом мікроЕОМ.

Обробка результатів вимірювань за запропонованою формулою виключає вплив непостійності коефіцієнтів Зеебека, Пельтьє, а також прогресуючої паразитної ТЕРС, яка з'являється внаслідок появи додаткової термоелектричної неоднорідності електродів термопар при тривалій її експлуатації, особливо в умовах агресивного середовища, що дозволяє забезпечити знаходження поправок до кінцевого результату вимірювання.

Введення в структуру мікропроцесорного цифрового пристрою мідної підложки, автоматичного перемикача, третього термоелектрода термопар, цифроаналогового перетворювача типу "цифра - змінний струм", трансформатора струму дозволяє забезпечити вимірювання і реєстрацію кодів ТЕРС на вільних кінцях термопар під час зміни чутливості робочого кінця термопар на визначене значення, а також на початку і в кінці додаткового нагрівання робочого кінця термопар, як в режимі калібровки, так і в режимі вимірювання. Цифроаналоговий перетворювач "цифра - змінний струм" у структурі пристрою дає можливість формувати струм додаткового нагрівання робочого кінця термопар програмним шляхом в залежності від вибраної температури калібровки з достатньо високою повторюваністю, що підвищує точність вимірювання температури. Запропонований пристрій, працюючий за визначеним алгоритмом в режимі калібровки термопар і в режимі поточних вимірювань контрольованої температури, дозволяє отримати значення шуканої температури з підвищеною точністю за рахунок обчислення поправок і виключення з результату алгоритмічного обчислення як мультиплікативної похибки, викликані зміною чутливості робочого кінця термопар, так і адитивної похибки, обумовленої неоднорідністю термоелектродів термопар.

На фіг. 1 зображена функціональна схема пристрою для вимірювання температури термопарою, а на фіг. 2, 3 - структурна схема алгоритму функціонування пристрою.

Пристрій складається з трьохелектродної термопар 1, три термоелектроди якої (1.1, 1.2 і 1.3) з'єднані на коподці 2 з компенсаційними дротами 3, коробки стабілізації або компенсації зміни температури вільних кінців термопар 4, автоматичного перемикача 5, нормуючого підсилювача 6, аналого-цифрового перетворювача 7, мікроЕОМ 8, цифрового індикатора 9, цифроаналогового перетворювача, виконаного по типу "цифра - змінний струм" 10, трансформатора струму 11 і мідної підложки 12 робочого кінця термопар.

Вільні кінці термопар розташовані в коробці 4, температура якої стабілізується або вводиться автоматична компенсація зміни температури вільних кінців так, що термоЕРС термопар відповідає розрахунковій температурі T_0 . До виходу коробки 4 під'єднаний автоматичний перемикач 5, через який ТЕРС термопар подається на вхід нормуючого підсилювача 6 і далі на аналого-цифровий перетворювач 7, в якому ТЕРС перетворюється в код, що подається на вхід мікроЕОМ 8. Перший вхід мікроЕОМ 8 з'єднаний з цифровим індикатором 9, а другий вихід - з кодовим входом цифроаналогового перетворювача 10, третій вихід - з керуючим входом перемикача 5. Первинна обмотка трансформатора струму 11 підключена до виходу цифроаналогового перетворювача 10, а вторинна обмотка - до мідної підложки, з якою механічно з'єднаний робочий кінець трьохелектродної термопар.

Пристрій працює за програмою, яка записана в постійному запам'ятовуючому пристрої мікроЕОМ 8 (фіг. 2, 3).

Спосіб вимірювання температури полягає в наступному. Робочий кінець трьохелектродної тер-

мопери вносять в контрольоване середовище, температуру якого в межах ($T_{\text{хMin}} \dots T_{\text{хMax}}$) необхідно вимірювати. Три вільні кінці термопар розміщені в коробці 4, стабілізовану або розрахункову температуру якої T_0 можна вважати сталою ($T_0 = \text{const}$). Перемикач 5 дозволяє здійснювати перекомутацію вільних кінців і утворювати таким чином два варіанти термопар з одним спільним електродом (1.1-1.2; 1.2-1.3).

В процесі пуско-налагоджувальних робіт на технологічному об'єкті, на момент встановлення цієї термопар, здійснюють її калібровку. Температуру калібровки вибирають із співвідношення

$$T_k = \sqrt{T_{\text{хMin}} T_{\text{хMax}}} \quad (1)$$

де T_k - температура калібровки термопар;

$T_{\text{хMin}}$ і $T_{\text{хMax}}$ - відповідно мінімальна і максимальна температури діапазону вимірювання.

Перетворюють ТЕРС на вільних кінцях термопар (1.1-1.2), яка відповідає температурі її калібровки, в цифровий код

$$N_1 = S(\epsilon_{n1} T_k - \epsilon_{01} T_0), \quad (2)$$

де S - стабілізоване сталі значення крутизни характеристики аналого-цифрового перетворювача ТЕРС в код;

ϵ_{n1} - початкове значення коефіцієнта Зеебека робочого кінця термопар (1.1-1.2) при температурі калібровки T_k на початку її експлуатації, яке можна визначити з градувальної характеристики термопар;

ϵ_{01} - коефіцієнт Зеебека вільних кінців термопар (1.1-1.2), що відповідає їх температурі T_0 .

З урахуванням того, що вільні кінці термопар працюють при сталій температурі, значно нижчій від температури вимірювання, і не в агресивному середовищі, можна вважати коефіцієнт ϵ_{01} практично незмінним на протязі тривалого часу експлуатації термопар.

Визначають код ТЕРС вільних кінців термопар (1.1-1.2) з урахуванням її градувальної характеристики, згідно із співвідношенням

$$N_{01} = S \epsilon_{01} T_0 = S \epsilon_{n1} T_k - N_1. \quad (3)$$

Виходячи з рівняння (3), вираз для початкового значення коефіцієнта Зеебека робочого кінця термопар (1.1-1.2) з матеріалу першого і другого електродів має наступний вигляд

$$\epsilon_{n1} = \frac{N_1 + N_{01}}{S T_k}. \quad (4)$$

Коди N_1 та N_{01} реєструють в мікроЕОМ 8 і обчислюють їх суму

$$Z'_1 = N_1 + N_{01}, \quad (5)$$

значення якої також реєструють. Потім змінюють коефіцієнт чутливості робочого кінця термопар з ϵ_{n1} на ϵ_{n2} шляхом перекомутації вільних кінців тр-

ьохелектродної термопар, використовуючи додатковий третій електрод із відповідного іншого матеріалу, утворюють другий варіант термопар (1.2-1.3), ТЕРС на вільних кінцях якої відповідає температурі калібровки. Цифровий код цієї ТЕРС дорівнює

$$N_2 = S(\epsilon_{n2} T_k - \epsilon_{02} T_0) = S \left[\epsilon_{n1} \left(1 - \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_{n1}} \right) T_k - \epsilon_{02} T_0 \right] = S[\epsilon_{n1} k_1 T_k - \epsilon_{02} T_0] \quad (6)$$

де $\epsilon_{n2} \neq \epsilon_{n1}$ - початкове значення коефіцієнта Зеебека робочого кінця термопар (1.2-1.3),

$$k_1 = \left(1 - \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_{n1}} \right); \quad \Delta \epsilon = (\epsilon_{n1} - \epsilon_{n2}).$$

Визначають код ТЕРС вільних кінців термопар (1.2-1.3) з урахуванням її градувальної характеристики

$$N_{02} = S \epsilon_{02} T_0 = S \epsilon_{n2} T_k - N_2. \quad (7)$$

Отримані коди ТЕРС N_2 та N_{02} реєструють в мікроЕОМ 8 і обчислюють їх суму

$$Z'_2 = N_2 + N_{02}, \quad (8)$$

значення якої також реєструють. Далі з допомогою автоперемикача 5 знову підключають до електричного тракту пристрою термопару (1.1-1.2). На цьому процедура калібровки термопар перед її тривалою експлуатацією закінчується. В процесі експлуатації термопар у складі пристрою починає зростати похибка результату вимірювання температури внаслідок деградації термопар, що обумовлює появу неконтрольованих змін її градувальної характеристики.

Вимірювання поточних значень контрольованої температури починається (фіг.3) з визначення коду ТЕРС на вільних кінцях термопар (1.1-1.2), який буде дорівнювати

$$N''_1 = S[(\epsilon_{n1} + \Delta \epsilon_{x1}) T_k + \Delta \epsilon_1 - \epsilon_{01} T_0], \quad (9)$$

де $\Delta \epsilon_{x1}$ - зміни коефіцієнта Зеебека під впливом дестабілізуючих факторів і деградації робочого кінця термопар, а також відмінності контрольованої температури T_x від температури калібровки T_k ;

$\Delta \epsilon_1$ - абсолютна адитивна похибка, викликана неоднорідністю термоелектродів термопар (1.1-1.2) і переладом температур T_x і T_0 .

Цифровий код N''_1 реєструють в мікроЕОМ 8 і обчислюють суму кодів

$$Z''_1 = N''_1 + N_{01}, \quad (10)$$

значення якої також реєструють.

Цифровий код (9) з урахуванням виразу (3) можна подати у вигляді

$$N''_1 = S \varepsilon_{n1} T_x + S \Delta \varepsilon_{x1} T_x + S \Delta \theta_1 - S \varepsilon_{01} T_0 =$$

$$S \varepsilon_{n1} T_x + \Delta N_1 + \Delta N_2 - N_{01}, \quad (11)$$

де $\Delta N_1 = S \Delta \varepsilon_{x1} T_x$ - мультиплікативна похибка вимірювання в код від зміни чутливості робочого кінця термопар;

$\Delta N_2 = S \Delta \theta_1$ - адитивна похибка вимірювання в код від неоднорідності електродів термопар, яка виникла в процесі тривалої експлуатації термопар.

З виразу (11) випливає, що дійсне значення контрольованої температури можна визначити за формулою

$$T_x = \frac{N'_1 + N_{01} - \Delta N_1 - \Delta N_2}{S \varepsilon_{n1}} \quad (12)$$

Похибки вимірювання ΔN_1 та ΔN_2 невідомі і їх вплив на результат вимірювання можна зменшити, вносячи компенсуючі поправки, що мають зворотні знаки до знаків похибок. Для визначення поправок вимірюють ТЕРС термопар (1.2-1.3), утвореної з допомогою додаткового третього електроду (1.3) шляхом перекомутації вільних кінців трьохелектродної термопар. Цифровий код, що відповідає ТЕРС на вільних кінцях термопар (1.2-1.3) буде мати значення

$$\begin{aligned} N'_2 &= S[(\varepsilon_{n2} + \Delta \varepsilon_{x2}) T_x + \Delta \theta_2 - \varepsilon_{02} T_0] = \\ &= S[(\varepsilon_{n1} + \Delta \varepsilon_{x1}) T_x k_2 + \Delta \theta_2 - \varepsilon_{02} T_0] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{де } k_2 = \left(1 - \frac{\Delta \varepsilon''}{\varepsilon_{n1} + \Delta \varepsilon_{x1}} \right);$$

$$\Delta \varepsilon'' = (\varepsilon_{n1} + \Delta \varepsilon_{x1}) - (\varepsilon_{n2} + \Delta \varepsilon_{x2}).$$

де $\Delta \varepsilon_{x2}$ - зміни коефіцієнта Зеебека робочого кінця термопар (1.2-1.3) під впливом дестабілізуючих факторів і відмінності температури T_x від температури калібровки термопар T_k . При цьому, вважаючи, що умови деградації робочих кінців термопар (1.1-1.2) і (1.2-1.3) практично однакові, можна вважати справедливою рівність $\Delta \varepsilon_{x1} = \Delta \varepsilon_{x2}$.

Цифровий код N''_2 реєструють в мікроЕОМ 8 і обчислюють суму кодів

$$Z''_2 = N''_2 + N_{02}, \quad (14)$$

значення якої також реєструють.

Потім додатково нагрівають робочий кінець трьохелектродної термопар, розташований на мідній підложці, пропускаючи змінний струм визначеного значення I_0 через цю мідну підложку на протязі певного (заданого) часу t , після чого реєструють миттєве значення ТЕРС на вільних кінцях термопар (1.2-1.3). Цифровий код нового значення ТЕРС буде мати значення

$$N''_3 = S[(\varepsilon_{n1} + \Delta \varepsilon_{x2})(T_x + \Delta T)k_2 + \Delta \theta_2 - \varepsilon_{02} T_0], \quad (15)$$

де $\Delta T = \frac{I_0^2 R}{c m}$ - температура додаткового перегріву робочого кінця термопар,

I_0 - змінний струм визначеного значення через мідну підложку, з якою механічно з'єднаний робочий кінець трьохелектродної термопар;

R - омичний опір мідної підложки;

c - усереднена питома теплоємність робочого кінця трьохелектродної термопар і мідної підложки;

m - маса робочого кінця трьохелектродної термопар і мідної підложки;

$t = p \tau$ - час нагрівання робочого кінця термопар;

τ - теплова стала термопар; $p = (0,1 \dots 0,2)$.

Цифровий код N''_3 реєструють в мікроЕОМ 8 і обчислюють суму кодів

$$Z''_3 = N''_3 + N_{02}, \quad (16)$$

значення якої також реєструють. Шляхом перекомутації вільних кінців трьохелектродної термопар змінюють коефіцієнт чутливості робочого кінця термопар на початкове значення $(\varepsilon_{n1} + \Delta \varepsilon_{x1})$ і реєструють на вільних кінцях термопар (1.1-1.2) нове миттєве значення ТЕРС, цифровий код якої буде дорівнювати

$$N'_4 = S[(\varepsilon_{n1} + \Delta \varepsilon_{x1})(T_x + \Delta T) + \Delta \theta_2 - \varepsilon_{01} T_0]. \quad (17)$$

Після реєстрації цифрового коду N'_4 в мікроЕОМ 8 обчислюють суму кодів

$$Z''_4 = N'_4 + N_{01}, \quad (18)$$

значення якої також реєструють.

Враховуючи, що адитивна похибка термопар від неоднорідності її елементів визначається градієнтом температури $(T_x - T_0)$, який є однаковим для двох варіантів термопар (1.1-1.2) і (1.2-1.3), можна вважати справедливою рівність $\Delta \theta_1 = \Delta \theta_2 = \Delta \theta$.

Отримані результати вимірювань використовують для знаходження поправки на адитивну похибку до кінцевого результату визначення контрольованої температури за формулою

$$\Delta N_2 = Z'_1 - \frac{(Z'_1 - Z'_2)(Z'_4 - Z'_1)}{(Z'_4 - Z'_3) - (Z'_1 - Z'_2)}. \quad (19)$$

Якщо в формулу (19) замість результуючих кодів Z'_1, Z'_2, Z'_3, Z'_4 підставити їх кодові значення з виразів (3), (7), (9), (13), (15), (17), то отримаємо рівність правої та лівої частин рівняння (19). Таким чином, поправка ΔN_2 у першому наближенні дорівнює похибці вимірювання, обумовленій неоднорідністю електродів і протилежна їй за знаком.

Далі знаходять виправлений результат точного вимірювання температури шляхом вве-

дення у вираз (9) поправки на адитивну похибку (19) з протилежним знаком

$$N_1 = N_1' - \Delta N_2 = \frac{(Z_1'' - Z_2'')(Z_4'' - Z_1'')}{(Z_4'' - Z_3'') - (Z_1'' - Z_2'')} - N_{01} \quad (20)$$

Поправку на мультиплікативну похибку, обумовлену зміною чутливості робочого кінця термопар ΔN_1 знаходять, використовуючи виправлений цифровий код N_1 , а також цифрові коди N_{01} , N_{02} , N_1' , N_2' , N_1'' , N_2'' , N_3'' , N_4'' за формулою

$$\Delta N_1 = \left[\frac{(N_1 + N_{01})}{(N_1' + N_{01})} - \frac{(Z_1'' - Z_2'')}{(Z_1' - Z_2')} \right] Z_1' =$$

$$= \left[\frac{(Z_1'' - Z_2'')(Z_4'' - Z_1'')}{(Z_4'' - Z_3'') - (Z_1'' - Z_2'')} - \frac{(Z_1'' - Z_2'')}{(Z_1' - Z_2')} \right] Z_1' \quad (21)$$

Якщо у формулу (21) замість цифрових кодів підставити їх значення з виразів (3), (7), (9), (13), (15), (17), то отримаємо

$$\Delta N_1 = \left[\frac{(\epsilon_{n1} + \Delta \epsilon_{x1}) T_x}{\epsilon_{n1} T_k} - \frac{T_x \Delta \epsilon''}{T_k \Delta \epsilon'} \right] S \epsilon_{n1} T_k =$$

$$= S \left[(\epsilon_{n1} + \Delta \epsilon_{x1}) T_x - T_x \epsilon_{n1} \frac{\Delta \epsilon''}{\Delta \epsilon'} \right] \quad (22)$$

Так як відношення $\Delta \epsilon'' / \Delta \epsilon' = 1$, то вираз (22) буде мати наступний вигляд

$$\Delta N_1 = S[(\epsilon_{n1} + \Delta \epsilon_{x1}) T_x - \epsilon_{n1} T_x] = S \Delta \epsilon_{x1} T_x \quad (23)$$

Отже поправка на мультиплікативну похибку ΔN_1 (23) пропорційна у першому наближенні похибці чутливості робочого кінця термопар.

Підставляючи виправлений цифровий код результату вимірювання (20), а також цифровий код поправки (21) на мультиплікативну похибку, обумовлену зміною чутливості робочого кінця термопар у формулу (12), обчислюють шукане дійсне значення контрольованої температури за наступною формулою

$$T_x = \left\{ \frac{2(Z_1'' - Z_2'')(Z_4'' - Z_1'')}{(Z_4'' - Z_3'') - (Z_1'' - Z_2'')} - \frac{(Z_1'' - Z_2'')}{(Z_1' - Z_2')} \right\} T_k \quad (24)$$

Необхідно відмітити, що в остаточну формулу не входять конструктивні (S , m , ϵ) та режимні параметри (I_0 , t), а лише зареєстровані цифрові коди ТЕРС термопар.

Таким чином, вираз (24) дає можливість отримувати більш точні значення контрольованої температури за рахунок введення алгоритмічної корекції прогресуючих похибок термопар, обумовлених як зміною чутливості її робочого кінця, так і появою неоднорідності її електродів в процесі

тривалої експлуатації термопар в умовах високих температур та агресивності контрольованого середовища.

Запропонований алгоритм (24) обчислення контрольованої температури при вимірюваннях її в заданому діапазоні дозволяє також лінеаризувати перетворювальну характеристику термопар незалежно від ступеня її нелінійності за градуювальною кривою і уникнути похибки нелінійності.

Пристрій для вимірювання температури термопарою працює згідно з алгоритмом (див. фіг. 2) таким чином

Попередньо в постійний запам'ятовувачий пристрій (ПЗП) мікроЕОМ 8 вводять параметри трьохелектродної термопар і вимірювального пристрою T_0 - стабілізовану температуру вільних кінців термопар в коробці 4, ϵ_{n1} та ϵ_{n2} - табличні значення коефіцієнтів Зеебека робочих кінців термопар (1.1-1.2) та (1.2-1.3) при температурі калібрування T_k трьохелектродної термопар; S - значення крутизни характеристики аналого-цифрового перетворювача ТЕРС в цифровий код, яке визначають за параметрами ланок пристрою 6 і 7, t - час адиабатичного нагрівання робочого кінця трьохелектродної термопар, який дорівнює (0,1 - 0,2) t - теплової сталої часу термопар, змонтованої на об'єкті, I_0 - струм додаткового нагрівання мідної підложки і робочого кінця трьохелектродної термопар; T_k - температура калібрування термопар

Після проведення підготовчих операцій виконують калібровку термопар на місці її установки при визначеній температурі T_k . Калібровка виконується автоматизовано у відповідності з підпрограмою (фіг. 2, 3), яка реалізується з допомогою мікроЕОМ 8. По команді мікроЕОМ 8 вмикається перемикач 5 і на виході аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 7 з'являється цифровий код N_1 , який відповідає температурі калібрування T_k термопар (1.1-1.2) код N_1' запам'ятовують в мікроЕОМ 8. Обчислюють суму кодів $Z_1' = (N_1' + N_{01})$, яку також запам'ятовують. Далі по команді мікроЕОМ 8 перемикач 5 перемикає вільні кінці трьохелектродної термопар і на виході АЦП 7 з'являється цифровий код N_2' , який відповідає температурі калібрування T_k термопар (1.2-1.3). Код N_2' запам'ятовують в мікроЕОМ 8 і обчислюють суму кодів $Z_2' = (N_2' + N_{02})$, яку також запам'ятовують. Таким чином, в результаті калібрування термопар на початку її експлуатації отримують значення кодів N_1' , N_2' , N_{01} , N_{02} , Z_1' та Z_2' , які зберігаються у пам'яті мікроЕОМ 8 і використовуються в подальшому як сталі величини для обчислення контрольованої температури (фіг. 2) у відповідності з формулою (24).

В процесі подальшої експлуатації пристрою термопар під дією високих температур і агресивності контрольованого середовища поступово деградує, що обумовлює появу як мультиплікативної похибки чутливості, так і адитивної похибки нуля, обумовленої появою термоелектричної неоднорідності електродів термопар.

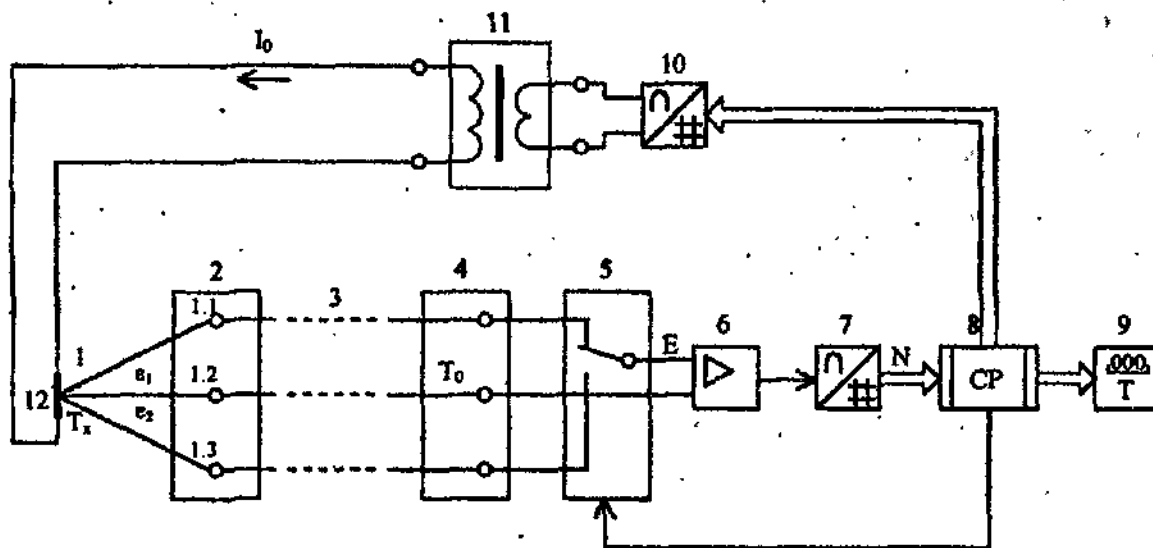
Для отримання результату вимірювання температури з підвищеною точністю виконують послідовно основне і три додаткових вимірювання температури (фіг. 2, 3) і відповідно отримують значення цифрових кодів N_1' , N_2' , N_3' та N_4' . При цьому значення цифрових кодів N_1' і N_2' отримують

мують у відповідності з операціями аналогічними при отриманні кодів N'_1 і N'_2 . Цифрові коди N''_1 і N''_2 запам'ятовують в мікроЕОМ 8 і обчислюють суми кодів $Z''_1 = (N''_1 + N_{01})$ та $Z''_2 = (N''_2 + N_{02})$, які також запам'ятовують. Для отримання цифрового коду N''_3 по команді від мікроЕОМ 8 (фіг. 1,3) перемикач 5 підключає вільні кінці термопари (1.2-1.3) до входу підсилювача 6. Одночасно від мікроЕОМ 8 поступає команда на ЦАП 10, який формує визначене значення змінного електричного струму через первинну обмотку трансформатора струму 11. В результаті на вторинній обмотці трансформатора з'являється змінний електричний струм I_0 , який протікає через мідну підложку 12, механічно з'єднану з робочим кінцем трьохелектродної термопари, і нагріває її на протязі визначеного часу t . Після цього ресетують в мікроЕОМ 8 миттєве значення цифрового коду N''_3 на виході АЦП 7. Цифровий код N''_3 запам'ятовують і обчислюють суму кодів $Z''_3 = (N''_3 + N_{03})$, яку також запам'ятовують в мікроЕОМ 8. Далі для отримання цифрового коду N''_4 по команді мікроЕОМ 8 контакти перемикача 5 повертаються в початкове положення, при якому термопара (1.1-1.2) знову підключається до підсилювача 6 і АЦП 7, на виході якого з'являється цифровий код N''_4 , який відповідає миттєвому значенню ТЕРС на вільних кінцях термопари (1.1-1.2) при додатковому нагріві її робочого кінця. Запам'ятовують в мікроЕОМ 8 код N''_4 і обчислюють суму кодів $Z''_4 = (N''_4 + N_{04})$, яку також запам'ятовують. По команді від мікроЕОМ 8 відключається ЦАП 10 і припиняється змінний електричний струм I_0 .

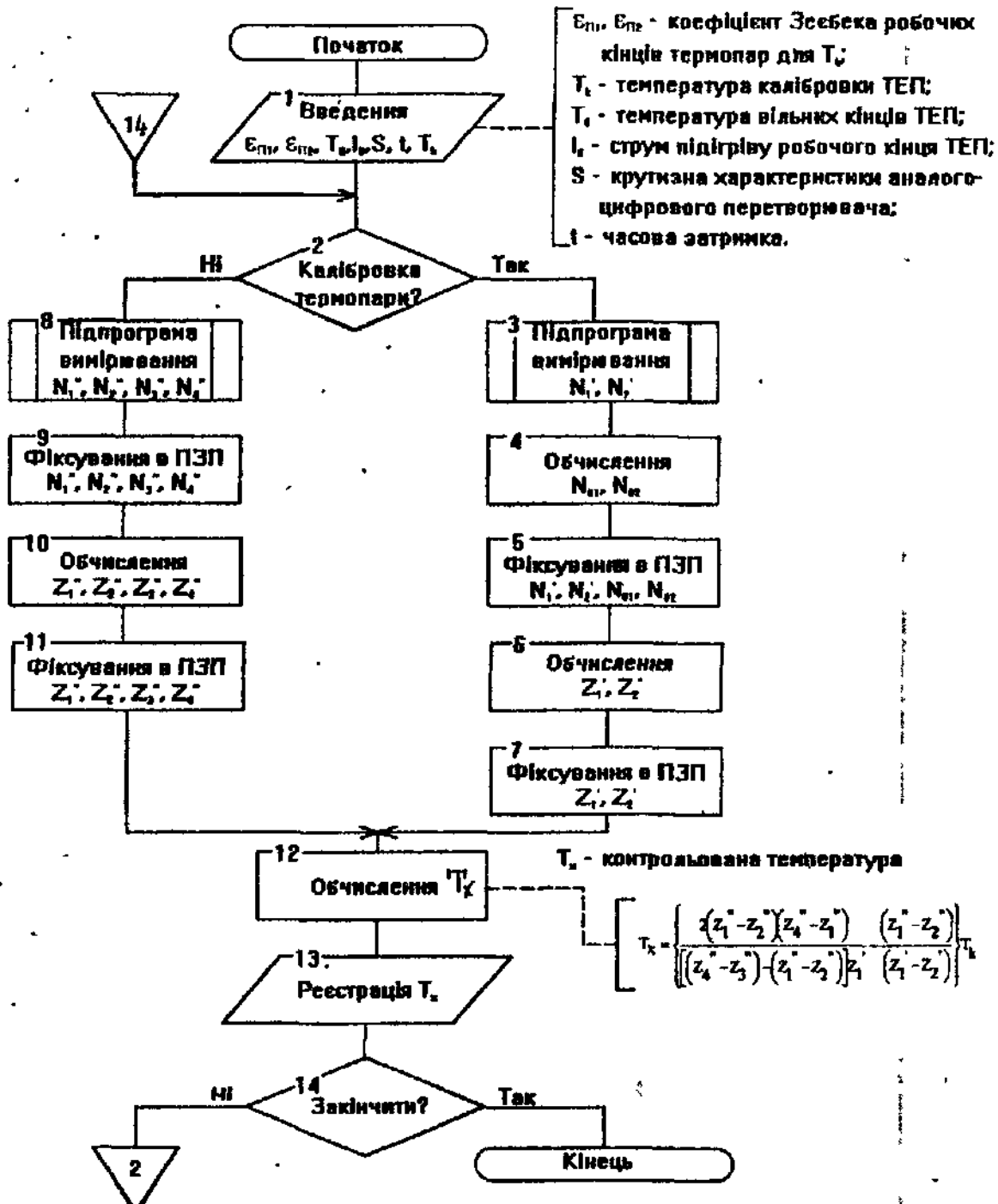
Далі мікроЕОМ 8 обчислює за формулою (24) дійсне значення контрольованої температури T_x , яке виводиться на цифрове табло. На цьому закінчується цикл вимірювання. Наступний цикл починається з вимірювання ТЕРС на вільних кінцях термопари (1.1-1.2), тобто при початковій чутливості.

Перевагою запропонованого пристрою є те, що він відрізняється простотою схеми і високою надійністю. Може бути реалізований на відносно дешевих серійно випускаємих вітчизняних мікроелектронних перетворювачах та мікроЕОМ. В пристрої використовувалась трьохелектродна термопара градування ЗККн (залізо-копель-константан) для діапазона температур 573... 773 К, яка забезпечує початкові значення коефіцієнтів Зеебека при температурі 673К $\epsilon_{n1} = 0,063$ мВ/К і $\epsilon_{n2} = 0,055$ мВ/К. Додатковий нагрів робочого кінця термопари обирають в межах $\Delta T = 20...25$ К, що забезпечується змінним струмом нагрівання $I_0 = 1,0 \dots 1,5$ А при опорі мідної підложки $R = 0,1$ Ом. При вимірюваннях у широкому температурному діапазоні струм I_0 обирається по піддіапазонах, що фіксується в пам'яті мікроЕОМ 8.

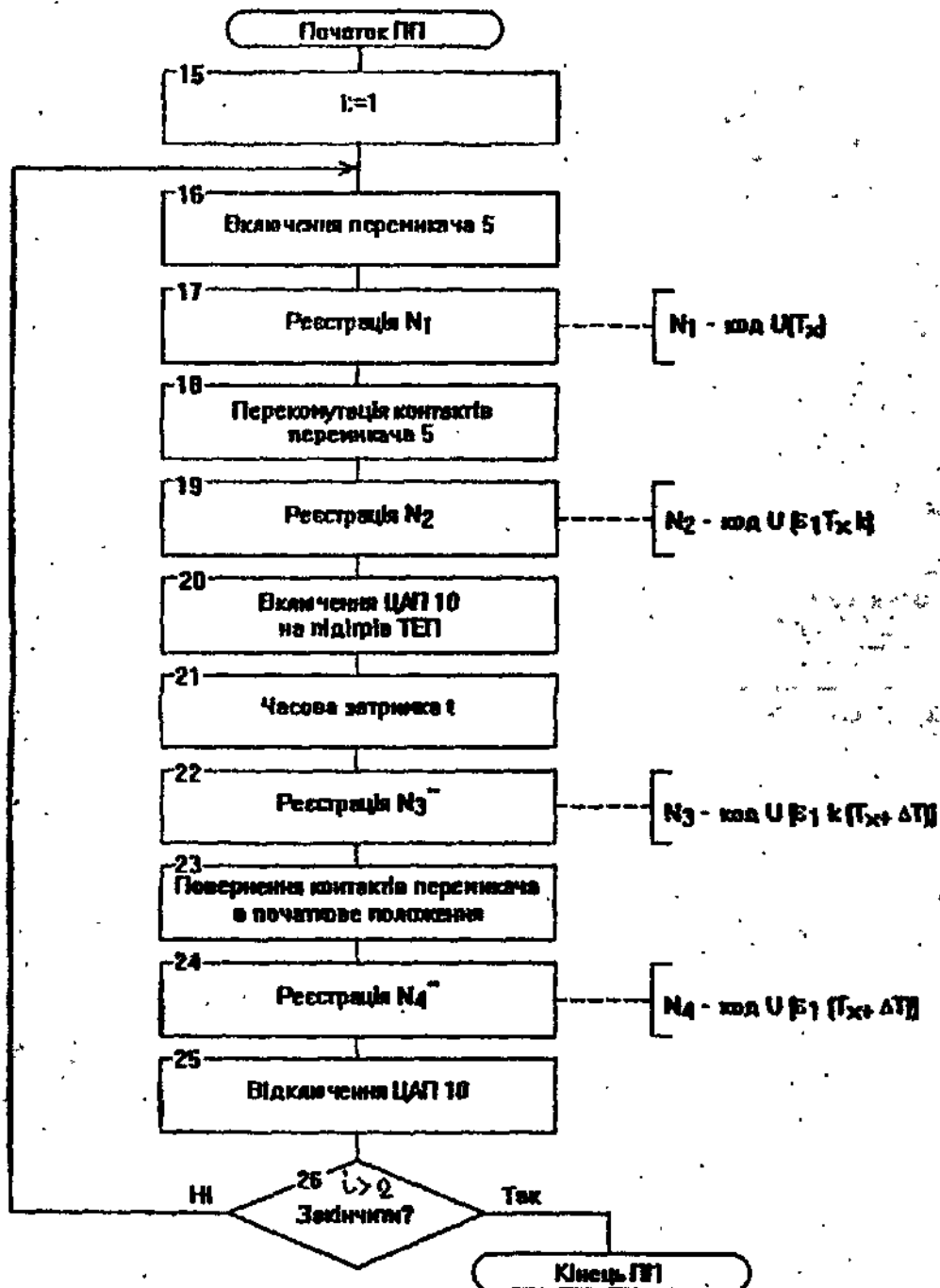
Спосіб вимірювання, який реалізується з допомогою пристрою, дає можливість отримувати лінійну залежність вихідного цифрового коду від вимірюваної температури і уникнути похибки нелінійності реальної характеристики перетворення термопари при одночасній автоматичній корекції прогресуючих похибок чутливості термопари і похибки, обумовленої неоднорідністю електродів термопари.



Фиг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3

Тираж 50 екз.

Відкрите акціонерне товариство «Патент»
 Україна, 88000, м. Ужгород, вул. Гагаріна, 101
 (03122) 3 - 72 - 89 (03122) 2 - 57 - 03