



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 54911

(13) A

(51) 7 G01K15/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ  
НА ВІНАХІДВидається під  
відповідальність  
власника  
патенту**(54) ВБУДОВАНА СИСТЕМА КАЛІБРУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕРМОМЕТРІВ**

1

2

(21) 2002054003

(22) 16 05 2002

(24) 17 03 2003

(46) 17 03 2003, Бюл. № 3, 2003 р.

(72) Скрипник Юрій Олександрович, Кондрашов  
Сергій Іванович, Чуніхіна Тетяна Віталіївна(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

(57) Вбудована система калібрування цифрових термометрів, яка містить термоелектричний перетворювач, до робочого спаю якого через термоелектроди підключені подовжувальні компенсаційні дроти, послідовно з'єднані диференційний підсилювач і аналого-цифровий перетворювач, вторинний цифровий прилад і кероване джерело струму, яка відрізняється тим, що в ній як вторинний цифровий прилад застосований мікропроцесорний контролер з цифровим індикатором, який з'єднаний з першим виходом контролера, а як кероване джерело струму застосований цифро-аналоговий перетворювач, входом з'єднаний з другим виходом контролера, виходом - з входом перетворювача напруги в постійний струм, а також введені другий цифро-аналоговий перетворювач,

перетворювач напруги в змінний струм і перетворюючий трансформатор, які з'єднані послідовно, конденсатори і мультиплексор з чотирма диференційними каналами і декодером, який з'єднаний входом з третім виходом контролера, при цьому входи першого і другого каналів, третього і четвертого каналів мультиплексора включені паралельно і з'єднані відповідно з кінцями подовжувальних компенсаційних дротів, виходи перетворювача напруги в постійний струм з'єднані з різномісними виходами першого і четвертого диференційних каналів мультиплексора, один кінець вихідної обмотки перетворюючого трансформатора з'єднаний з робочим спаєм термоелектричного перетворювача, другий кінець - з однойменними виходами другого і третього каналів через конденсатори, вхід диференційного підсилювача з'єднаний з однойменними, але протилежними виходами другого і третього каналів, вихід аналого-цифрового перетворювача з'єднаний з входом контролера, четвертий вихід якого з'єднаний з входом другого цифро-аналогового перетворювача

Винахід відноситься до області вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів і може бути застосований для автоматичного калібрування цифрових термометрів або вимірювальних каналів температури об'єктів без використання зразкових засобів

Відомо, що похибка зразкового термометра повинна бути в 5-10 разів меншою за допустиму похибку калібруемого термометра. Це означає, що для калібрування цифрового термометра з допустимою похибкою  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  треба використовувати зразковий термометр з максимальною похибкою не більш ніж декілька сотих градуса. При цьому необхідно гарантувати точність показів самого зразкового термометра. Це забезпечується шляхом порівняння його

показів з первинним еталоном температури (точка розтавання льоду або потрійна точка води). Системи для здійснення калібрування з похибкою  $\pm 0,01^\circ\text{C}$  описані в роботах метрологічних установ [1].

Однак, необхідність використання вбудованих еталонів температури ускладнює застосування таких систем для автоматичного калібрування термометрів, які працюють у широкому діапазоні температур [2].

Відома вбудована система калібрування цифрових термометрів [3], яка містить джерело постійного струму, вбудований нагрівач, зразковий резистор, підсилювач, комутатор, подвійний термоелектричний перетворювач з чотирма термоелектродами і одним робочим спаєм, вторинний вимірювальний прилад, цифрові

(13) A

(11) 54911

(19) UA

амперметр та міліамперметр, відповідно, у ланцюзі нагрівання та у токовому ланцюзі термоелектричного перетворювача

Похибка калібруемого термометра визначається значенням струму, який протікає через нагрівач і створює задану температуру, і показами термометра, які одержують під час додаткового охолодження робочого спаю термоелектричного перетворювача постійним струмом. Залежність визначеної похибки від коефіцієнту Пельтьє робочого спаю термоелектричного перетворювача та його еквівалентної теплоємності, які самі залежать від температури, знижує точність калібрування, оскільки вказані параметри змінюються у процесі експлуатації термометра.

Відома вбудована система калібрування цифрових термометрів [4], яка містить термостат, в якому розміщені кінці подовжувальних компенсаційних дротів калібруемого термоелектричного термометра, другий термостат, в якому розташовані кінці додаткових подовжувальних компенсаційних дротів, комутатор, входи якого з'єднані з кінцями подовжувальних компенсаційних дротів, виходи - з вторинним приладом, компресор, задавач витрат повітря та з'єднувальні трубки.

Похибку калібруемого термометра визначають за трьома показами вторинного приладу, які отримують під час перемикання вторинного приладу від одного термостату до другого і охолодження робочого спаю термоперетворювача потоком повітря, яке пропускають під захисним чохлам термоелектричного перетворювача.

До формули для визначення похибки входить коефіцієнт конвективних витрат, який пропорційний витраті охолоджуючого повітря. Тому що цей параметр важко стабілізувати на протязі всього періоду експлуатації термометра, то похибка калібрування залишається великою.

Відома також вбудована система калібрування цифрових термометрів [5], яка містить термоелектричний перетворювач, до робочого спаю якого через термоелектроди підключені подовжувальні компенсаційні дрони, послідовно з'єднані диференційний підсилювач та аналого - цифровий перетворювач, вторинний цифровий прилад та кероване джерело струму. Окрім того, до відомої системи входить компресор, задавач витрат повітря, з'єднувальні трубки, секундомір, міліамперметр, а також цифровий мілівольтметр як вторинний прилад. При цьому компресор через задавач витрат повітря і трубки з'єднаний з повітряними каналами фарфорового сердечника калібруемого термоелектричного перетворювача, а за допомогою секундоміра контролюється час нагріву і охолодження його робочого спаю.

Похибка калібруемого термометра визначається обчислювальним шляхом за формулою, до якої входить термічний коефіцієнт термоелектричного перетворювача. Стабільність цього коефіцієнту залежить від стабільності роботи компресора і задавача витрат на протязі тривалого часу, а також сталості часових інтервалів додаткового нагріву і охолодження робочого спаю термоелектричного

перетворювача, що задаються секундоміром. В процесі експлуатації термометра важко забезпечити зберігання одного й того ж компресора і задавача витрат, за допомогою яких початкове було визначено термічний коефіцієнт. Використання другого компресора або задавача під час наступного калібрування змінить коефіцієнт конвективних витрат робочого спаю термоелектричного перетворювача, що зумовить зміну термічного коефіцієнту. Останнє значно знизить точність визначення похибки калібруемого первинного перетворювача термометра.

В основу винаходу покладена задача створення такої вбудованої системи калібрування цифрових термометрів, в якій введення нових елементів і зв'язків дозволило б охолодження робочого спаю термоелектричного перетворювача здійснювати електричним струмом, але при цьому виключався би вплив непостійності коефіцієнта Пельтьє робочого спаю термоелектричного перетворювача у процесі експлуатації, що забезпечує підвищення точності і автоматизацію процесу калібрування цифрових термометрів із внесенням поправки без використання механічного обладнання та зразкових засобів.

Поставлена задача вирішується тим, що у вбудованій системі калібрування цифрових термометрів, яка складається з термоелектричного перетворювача, до робочого спаю якого через термоелектроди підключені подовжувальні компенсаційні дрони, послідовно з'єднаних диференційного підсилювача та аналого - цифрового перетворювача, вторинного цифрового приладу та керованого джерела струму, згідно з винаходом як вторинний цифровий прилад застосований мікропроцесорний контролер з цифровим індикатором, з'єднаний з першим виходом контролера, а як кероване джерело струму застосований цифро - аналоговий перетворювач, входом з'єднаний з другим виходом контролера, виходом - зі входом перетворювача напруги в постійний струм, а також введені другий цифро - аналоговий перетворювач, перетворювач напруги у змінний струм і перетворюючий трансформатор, з'єднані послідовно конденсатори і мультиплексор з чотирма диференційними каналами і декодером, який з'єднаний входом з третім виходом контролера, при цьому входи першого і другого каналів, третього і четвертого каналів мультиплексора включені паралельно і з'єднані відповідно з кінцями подовжувальних компенсаційних дротів, виходи перетворювача напруги в постійний струм з'єднані з різномісними виходами першого та четвертого диференційних каналів мультиплексора, один кінець вихідної обмотки перетворюючого трансформатора з'єднаний з робочим спаєм термоелектричного перетворювача, другий кінець - з однойменними виходами другого та третього каналів через конденсатори, вхід диференційного підсилювача з'єднаний з однойменними, але протилежними виходами другого та третього каналів, вихід аналого - цифрового перетворювача з'єднаний зі входом контролера, четвертий вихід якого з'єднаний зі входом другого цифро-

аналогового перетворювача

Саме застосування мікропроцесорного контролера з цифровим індикатором як вторинного цифрового приладу і цифро-аналогових перетворювачів з відповідними перетворювачами роду струму як керованих джерел постійного і змінного струмів, введення в систему мультиплектора з чотирма диференційними каналами і декодером, з'єднання введених елементів з раніше використаними вказаним чином дозволило встановлювати необхідну температуру робочого спаю термоперетворювача змінним струмом, а дійсну температуру робочого спаю при змінній градувальній характеристиці термометра визначати за цифровими кодами термоЕРС, яку одержують під час почергового охолодження і нагрівання робочого спаю постійним струмом, який пропускаять у різних напрямках, перетворення термоЕРС в цифрові коди за допомогою диференційного підсилювача і цифро-аналогового перетворювача, запам'ятання їх в пам'яті контролера, управління значеннями змінного і постійного струмів кодами контролера і обробка проміжних вимірювань у процесорі контролера за програмою, записаною у пам'яті контролера, забезпечують підвищення точності визначення похибок цифрового термометра після тривалої експлуатації і повну автоматизацію процесу калібрування термометрів із внесенням поправок без використання механічного обладнання і зразкових засобів вимірювання

На фіг 1 зображена функціональна схема вбудованої системи калібрування цифрових термометрів

Система (фіг 1) містить термоелектричний перетворювач (ТЕП) 1, який включає робочий спай 2, термоелектроди 3, подовжувальні компенсаційні дроти 4, мультиплексор 5 з чотирма диференційними каналами, ключами 6, 7, 8, 9, і 10, 11, 12, 13 різномісних каналів і декодером 14, конденсатори 15 і 16, диференційний підсилювач 17, аналога - цифровий перетворювач (АЦП) 18, мікропроцесорний контролер 19, блок індикації 20, цифро - аналогові перетворювачі (ЦАП) 21 і 22, перетворювач напруги в постійний струм 23, перетворювач напруги у змінний струм 24 і перетворюючий трансформатор 25 В ТЕП 1 робочий спай 2 створений термоелектродами 3 із різних матеріалів, вільні кінці яких через подовжувальні компенсаційні дроти 4 з'єднані з попарно з'єднаними входами чотирьох диференційних каналів мультиплектора 5 Вільні кінці ТЕП через дроти 4 і ключі 9, 11 з'єднані зі входами диференційного підсилювача 17, вихід якого через АЦП 18 з'єднаний з входом контролера 19, до першого виходу якого підключений блок індикації 20 Другий вихід контролера з'єднаний з входом ЦАП 21, третій вихід з'єднаний з входом декодера 14 мультиплектора 5, а четвертий вихід з'єднаний з входом ЦАП 22 Вихід ЦАП 22 через перетворювач 24 з'єднаний з первинною обмоткою перетворюючого трансформатора 25, вторинна обмотка якого одним кінцем з'єднана з робочим кінцем робочого спаю 2, другим кінцем з'єднана

через конденсатори 15, 16, контакти 8, 10 і подовжувальні дроти 4 з вільними кінцями ТЕП 1 Виходи перетворювача 23 через контакти 6, 7 з'єднані з одним вільним кінцем ТЕП 1, а через контакти 12, 13 з'єднані з другим вільним кінцем ТЕП 1

Послідовність роботи ключей чотирьохканального мультиплектора 5 проводиться згідно за алгоритмом Управління мультиплексором 5, АЦП 18, ЦАП 21 і ЦАП 22 здійснюється від мікропроцесорного контролера 19

Пристрій працює так

Цифровий термометр (фіг 1) калібрується перед початком експлуатації з урахуванням градувальної характеристики ТЕП 1, записаної в пам'яті мікропроцесорного контролера 19 Нагрів робочого спаю 2 ТЕП до заданої температури здійснюється змінним струмом нагріву  $I_{H1}$  від трансформатора 25 через конденсатори 15, 16 і замкнуті контакти 8, 10 мультиплектора 15 за програмою контролера 19 Під час нагріву робочого спаю 2 до температури  $T_{K1}$  термоЕРС, яка формується робочим спаєм з термоелектродами 3, подається на вхід диференційного підсилювача 17 Цю термоЕРС при температурі калібрування  $T_{K1}$  можна представити у вигляді

$$E_1' = \alpha_k T_{K1} - \alpha_0 T_0 \quad (1)$$

де  $\alpha_k$  - коефіцієнт Зеебека робочого спаю ТЕП, який залежить від температури  $T_{K1}$ ,

$\alpha_0$  - коефіцієнт Зеебека вільних кінців ТЕП при їх температурі  $T_0$

Внаслідок того, що коефіцієнт Зеебека

$$\alpha_k = \frac{dE}{dT_k}$$

функціонально залежить від температури  $T_k$ , градувальна характеристика ТЕП в загальному випадку нелінійна Проте, в околицях робочої точки градувальної характеристики її можна замінити апроксимуючою дотичною і вважати, що невеликі зміни температури  $\Delta T_k$  робочого спаю ( $\Delta T_k \ll T_{K1}$ ) призводять до пропорційних, тобто лінійних змін термоЕРС

ТермоЕРС  $E_1'$  після підсилення диференційним підсилювачем 17 перетворюється аналого - цифровим перетворювачем 18 у цифровий код  $N_1'$ , 7 який заноситься у пам'ять контролера 19 Після цього по команді контролера 19 в мультиплексорі 15 розмикаються контакти 9, 11 і замикаються контакти 6, 12, і від джерела струму 21 через робочий спай 2 починає протікати постійний струм  $I$  у напрямку, який у спай завдяки ефекту Пельтьє призводить до поглинання певної кількості теплоти Одночасно з цим в ТЕП відбувається і виділення теплоти Джоуля, кількість якої пропорційна опору робочого спаю 2 та опору участків термоелектродів 3, які примикають до нього Результуюча електрична потужність, яка розсіюється в робочому спаї ТЕП, буде

$$W = kI^2 R_k - PI, \quad (2)$$

де  $R_k$  - еквівалентний опір калібруемого ТЕП,

$k$  - коефіцієнт, який ураховує долю теплоти Джоуля, що поступає до робочого спаю,

$P$  - коефіцієнт Пельтьє матеріалів

термоелектродів Охолодження робочого спаю виникає тоді, коли виконується умова

$$PI > kI^2 R_k \quad (3)$$

Під час збільшення струму  $I$  від нуля спочатку виникає охолодження спаю  $I$ , як наслідок, зменшення термоЕРС, а потім через квадратичну залежність теплоти Джоуля від струму відбувається підвищення температури,  $I$ , відповідно, збільшення термоЕРС Струм, за яким настає максимальне

охолодження спаю, можна визначити із рівняння

$$\frac{dW}{dI} = 2kIR_k - P = 0 \quad (4)$$

звідкіля оптимальний струм охолодження

$$I_0 = \frac{P}{2kR_k} \quad (5)$$

У більшості ТЕП  $k \approx 0,5$ , тому що половина теплоти Джоуля поступає на робочий спай, половина - на вільні кінці Тому можна вважати, що

$$I_0 = \frac{P}{R_k} \quad (6)$$

Згідно з першим термоелектричним співвідношенням Томсона коефіцієнти Зеебека і Пельтьє зв'язані так

$$P = \alpha_k N \quad (7)$$

Враховуючи (7), потужність, яка розсіюється в робочому спаї ТЕП, може бути представлена у вигляді

$$W = 0,5I_0^2 R_k - \alpha_k T_{k1} I_0 \quad (8)$$

Під впливом оптимального струму  $I_0$  робочий спай ТЕП охолоджується, його температура зменшується за експоненційним законом

$$T(t) = T_{k1} - [1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau})] \Delta T_{k1} \quad (9)$$

де  $\tau$  - теплова стала часу робочого спаю ТЕП,  $\Delta T_{k1}$  - усталена температура охолодження робочого спаю ТЕП Тривалість  $\Delta t$  охолодження вибирають такою, щоб забезпечити практично адиабатичний характер охолодження робочого спаю ТЕП, тобто без теплообміну з об'єктом контролю Усталена температура охолодження  $\Delta T_1$ , вибирається в межах 5-10 К Тоді з урахуванням вибору тривалості охолодження ( $\Delta T < \tau$ ) термоЕРС знижується за лінійною залежністю і в кінці часового інтервалу  $\Delta t$  приймає значення

$$E_2' = \alpha_k [T_{k1} + (0,5I_0^2 R - \alpha_k T_{k1} I_0) \frac{\Delta t}{c_1}] - \alpha_0 T_0 \quad (10)$$

де  $c_1$  - еквівалентна теплоємність робочого спаю, яка визначається його масою, питомими теплоємностями матеріалів термоелектродів, а також температурою спаю  $T_{k1}$

В кінці часового інтервалу  $\Delta t$ , який задається контролером 19, контакти мультиплектора 6, 12 розмикаються, а контакти 9, 11 замикаються При цьому термоЕРС  $E_2'$  перетворюється в цифровий код  $N_2'$ , який заноситься до пам'яті контролера Черговою командою контролера 19 контакти 9, 11 мультиплектора 15 розмикаються, а контакти 7, 13 замикаються При цьому через робочий спай 2 ТЕП починає протікати постійний струм в

протилежному напрямку Внаслідок реверсивності ефекту Пельтьє в спаї ТЕП виникає виділення теплоти Внаслідок поєднання теплот Джоуля і Пельтьє починається швидкий нагрів робочого спаю, і за час  $\Delta t_1$ , відбувається відновлення початкової температури робочого спаю  $T_{k1}$  Потім в інтервал часу  $\Delta t_2 = \Delta t$  відбувається його перегрів відносно усталеної температури калібрування  $T_{k1}$  ТермоЕРС ТЕП в кінці  $\Delta t$  приймає значення

$$E_3' = \alpha_k [T_{k1} + (0,5I_0^2 R_k + \alpha_k T_{k1} I_0) \frac{\Delta t}{c_1}] - \alpha_0 T_0 \quad (11)$$

Внаслідок того, що охолодження і додатковий нагрів робочого спаю постійним струмом відбуваються в невеликих діапазонах ( $\Delta T_k = 5-10$ К), то коефіцієнт Зеебека у виразах (1), (10) та (11) приймається однаковим і рівним  $\alpha_k$

Контролером 19 контакти 7, 13 мультиплектора 5 розмикаються, контакти 9, 11 знов замикаються і цифровий код  $N_3'$ , що відповідає термоЕРС  $E_3'$ , запам'ятовується в пам'яті контролера На цьому процес калібрування при температурі  $T_{k1}$  закінчується, а в пам'яті контролера зберігаються коди  $N_1'$ ,  $N_2'$ ,  $N_3'$ , а також код температури  $T_{k1}$ , який визначається автоматично за градуовальною характеристикою ТЕП, код оптимального струму  $I_0$  і код струму нагріву  $I_{H1}$  робочого спаю ТЕП

Далі за командою контролера за допомогою ЦАП 22 вироблюється нове значення струму нагріву  $I_{H2} > I_{H1}$  і описані вище операції повторюються Результати калібрування при температурі  $T_{k2}$  також заносяться до пам'яті контролера 19

В процесі експлуатації термометра в ТЕП відбуваються незворотні фізико-хімічні процеси, які пов'язані зі старінням і зносом робочого спаю При цьому, як правило, знижується чутливість і з-за зменшення коефіцієнта Зеебека, виникає зміщення нуля термометра внаслідок непостійності температури вільних кінців ТЕП, виявляється термоелектрична неоднорідність термоелектродів, а також виникають похибки у вторинних перетворювачах (підсилювач 17, АЦП 18 і т.п.) В результаті градуовальна характеристика ТЕП деформується і зміщується, що зумовлює велику похибку термометра під час подальшої експлуатації

При нелінійній градуовальній характеристиці ТЕП вказані зміни у кожній робочій точці можна врахувати поворотом апроксимуючої дотичної (мультиплікативна похибка або похибка чутливості) і паралельним зміщенням дотичної (адитивна похибка або похибка нуля) Для врахування цих похибок проводять повторне калібрування термометра

З цієї метою за командою контролера 19 за допомогою ЦАП 22 і перетворювачів 24 і 25 формують ступенчато зростаючий почергово змінний струм нагріву  $I_{H1}, I_{H2}, I_{H3}, \dots$ , які через замкнуті контакти 8, 10 пропускають через робочий спай 2 ТЕП 1 При значенні нагріваючого струму  $I_{H1}$  проводять охолодження і додатковий нагрів робочого спаю шляхом пропускання через нього постійного струму  $I_0$  в різних напрямках у той же

послідовності, що і під час початкового калібрування

Спочатку, під час замикання контактів 9,11 мультимплексора 5 вимірюють термоЕРС ТЕП, яка відповідає температурі нагріву робочого спаю змінним струмом  $I_{H1}$ . Внаслідок того, що градувальна характеристика ТЕП 1 у процесі експлуатації змінилася, температура робочого спаю достовірно невідома. Результат термоелектричного перетворення невідомої температури  $T_{X1}$  за аналогією з (1) можна представити у вигляді

$$E_1'' = (\alpha_k + \Delta\alpha) T_{X1} - \alpha_0 (T_0 + \Delta T_0) = \alpha_k (1 + \gamma) T_{X1} - \varepsilon_0 T_0 + \delta, \quad (12)$$

де  $\Delta\alpha$  - неконтролюємі зміни коефіцієнта Зеебека робочого спаю,

$\Delta T_0$  - нестабільність температури вільних кінців ТЕП,

$$\gamma = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_k}$$

- відносна мультиплікативна похибка, яка призводить до зміни чутливості ТЕП,

$\delta = \varepsilon \Delta T$  - абсолютна адитивна похибка, яка зумовлює зміщення нуля ТЕП

ТермоЕРС  $E_1''$  перетворюється в цифровий код  $N_1''$ , який запам'ятовується в пам'яті контролера 19

$$N_1'' = S[\alpha_k(1 + \gamma_1) T_{X1} - \varepsilon_0 T_0 + \delta_1] \quad (13)$$

де  $S$  - номінальна крутизна перетворення термоЕРС в цифровий код,

$\gamma_1$  і  $\delta_1$  - похибки, які містять мультиплікативні і адитивні складові похибок підсилювача 17 і АЦП 18

Далі проводять додаткові вимірювання термоЕРС ТЕП  $E_2''$  при охолодженні і  $E_3''$  при нагріві його робочого спаю оптимальним струмом  $I_0$  таким же шляхом, як і при первинному калібруванні термометра. Зміна температури робочого спаю і вимірювання відповідних термоЕРС виконуються аналогічними перемиканнями контактів мультимплексора 5. Так, після охолодження робочого спаю на протязі  $\Delta t$  отримують код

$$N_2'' = S\{\alpha_k(1 + \gamma_2) T_{X1} + [0,5 I_0^2 R_k - \alpha_k(1 + \gamma_2) T_{X1} | I_0] \Delta t / c_2 - \varepsilon_0 T_0 + \delta_2\}, \quad (14)$$

де  $\gamma_2$  і  $\delta_2$  - похибки перетворення термоЕРС  $E_2''$  в код,

$c_2$  - еквівалентна теплоємність після експлуатації термометра

Цифровий код  $N_2''$  заноситься в пам'яті контролера 19. Після цього змінюють напрям струму  $I_0$  через робочий спай і нагрівають його на протязі того ж часу  $\Delta t$ . Код додатково нагрітого спаю також заноситься в пам'яті

$$N_3'' = S\{\alpha_k(1 + \gamma_3) T_{X1} + [0,5 I_0^2 R_k + \alpha_k(1 + \gamma_3) T_{X1} | I_0] \Delta t / c_2 - \varepsilon_0 T_0 + \delta_3\}, \quad (15)$$

де  $\gamma_3$  і  $\delta_3$  - похибки перетворення термоЕРС  $E_3''$  в код

Після запам'ятовування кодів  $N_1''$ ,  $N_2''$ ,  $N_3''$  з урахуванням кодів початкового калібрування, які зберігаються в пам'яті, в процесорі контролера 19 обчислюється код числа

$$N = \frac{(N_3'' - N_2'')(N_2' + N_3' - 2N_1')^2}{(N_3' - N_2')(N_2'' - 2N_1'')^2} \quad (16)$$

Для визначення залежності числа  $N$  від температури  $T_{X1}$ , слід урахувати, що всі зміни температури робочого спаю від струму  $I_0$ , що пропускають через нього, відбуваються в невеликому діапазоні температур ( $\Delta T_k \ll T_k$ ). Тому і відповідні термоЕРС ( $E_1''$ ,  $E_2''$  і  $E_3''$ ) також змінюються мало. Можна вважати, що похибки перетворення термоЕРС в код відбуваються приблизно з однаковими похибками

$$\gamma_1 \approx \gamma_2 \approx \gamma_3 = \gamma, \\ \delta_1 \approx \delta_2 \approx \delta_3 = \delta, \quad (17)$$

Перетворення термоЕРС  $E_1'$ ,  $E_2'$  і  $E_3'$  в цифрові коди в процесі початкового калібрування відбувається при номінальній крутизні перетворення  $S$ , похибки перетворення  $\gamma$  і  $\delta$ , які ураховують також похибки аналога - цифрового перетворення, з'являються пізніше в процесі експлуатації термометра після початкового калібрування. Тоді, підставив у вираз (16) коди  $N_1'$ ,  $N_2'$  і  $N_3'$  з (1), (10), (11) і коди  $N_1''$ ,  $N_2''$  і  $N_3''$  з (13), (14), (15), отримуємо код відношення температур

$$N_0 = \frac{T_{X1}}{T_{K1}} = \frac{N_{X1}}{N_{K1}}, \quad (18)$$

де  $N_{X1}$  і  $N_{K1}$  - коди температур після і при початковому калібруванні струмом  $I_{H1}$

З виразу (18) визначимо значення температури робочого спаю ТЕП при повторному калібруванні, код якої відповідає змінному струму нагріву  $I_{H1}$

$$N_{X1} = N_0 N_{K1} = \frac{(N_3'' - N_2'')(N_2' + N_3' - 2N_1')^2}{(N_3' - N_2')(N_2'' + N_3'' - 2N_1'')^2} N_{K1} \quad (19)$$

З виразу (19) видно, що результат обчислення температури робочого кінця ТЕП навіть після тривалої експлуатації термометра не залежить від поточних значень коефіцієнтів Зеебека і Пельтьє, непостійності еквівалентної теплоємності робочого спаю, значень постійного і змінного струмів

Код похибки термометра в першій повіряємої точці градувальної характеристики можна визначити з виразу

$$\Delta N_1 = N_1'' - \frac{(N_3'' - N_2'')(N_2' + N_3' - 2N_1')^2}{(N_3' - N_2')(N_2'' + N_3'' - 2N_1'')^2} N_{K1} \quad (20)$$

де  $N_1''$  - код показу термометра в процесі повторного калібрування. Відповідно визначаються коди похибки  $\Delta N$  при нагрівачих струмах  $I_{H2}$ ,  $I_{H3}$  -  $I_{Hn}$

$$\Delta N_1 = N_1'' - \frac{(N_3'' - N_2'')(N_2' + N_3' - 2N_1')^2}{(N_3' - N_2')(N_2'' + N_3'' - 2N_1'')^2} N_{K1} \quad (21)$$

де  $N_{11}''$  - коди показів термометра при різних струмах нагріву робочого спаю ТЕП в процесі повторного калібрування,

$N_{K1}$  - код температури робочого спаю ТЕП при і - му струмі нагріву в процесі первинного калібрування, яка визначається по номінальній градувальній характеристиці

Далі за результатами повторного калібрування в пам'яті контролера вносять коди поправок

$$P_1 = -\Delta N_1,$$

$$P_2 = -\Delta N_2,$$

$$P_1 = -\Delta N_1, \quad (22)$$

Подальша експлуатація термометра відбувається по його градувальній характеристиці з урахуванням поправок (22). В процесі повторних калібрувань уточнюються значення поправок, чим забезпечується збільшення строку експлуатації термометра і підвищення його метрологічної надійності.

При експлуатації цифрового термометра замикаються тільки контакти 9, 11 мультиплектора 5 і працює основний канал термоелектричного перетворення температури робочого спаю ТЕП, який приводять в тепловий контакт з об'єктом, який контролюється. На табло цифрового індикатора 20 виводиться температура робочого спаю ТЕП, яка визначається за його градувальною характеристикою з урахуванням поправок. Строк експлуатації термометра після повторних калібрувань продовжується, а найбільший строк роботи термометра визначається припустимим значенням поправок, які вводяться.

Дослідження виявили, що вбудована система калібрування у цифровому вимірювачі температур в діапазоні 0-550°C на основі хромель-копелевої та хромель-алюмелевої термопар типа ТХК - 0063

і ТХА - 0063 градування ХА дозволяє продовжити їх строк роботи в 3-5 раз при припустимій похибці не більш  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Особливо ефективно автокалібрування при вимірюваннях температур в агресивних середовищах, наприклад, в промислових алюмінієвих

електролізерах, де гарантований строк служби хромель-алюмелевих термопар типа ТХА - 191 не перевищує 50 годин. З внесенням поправок строк служби зростає до 300 годин, коли відбувається вже фізичне зруйнування робочого спаю термопар. При цьому похибка цифрового вимірювача знаходиться в межах  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ .

Джерела інформації

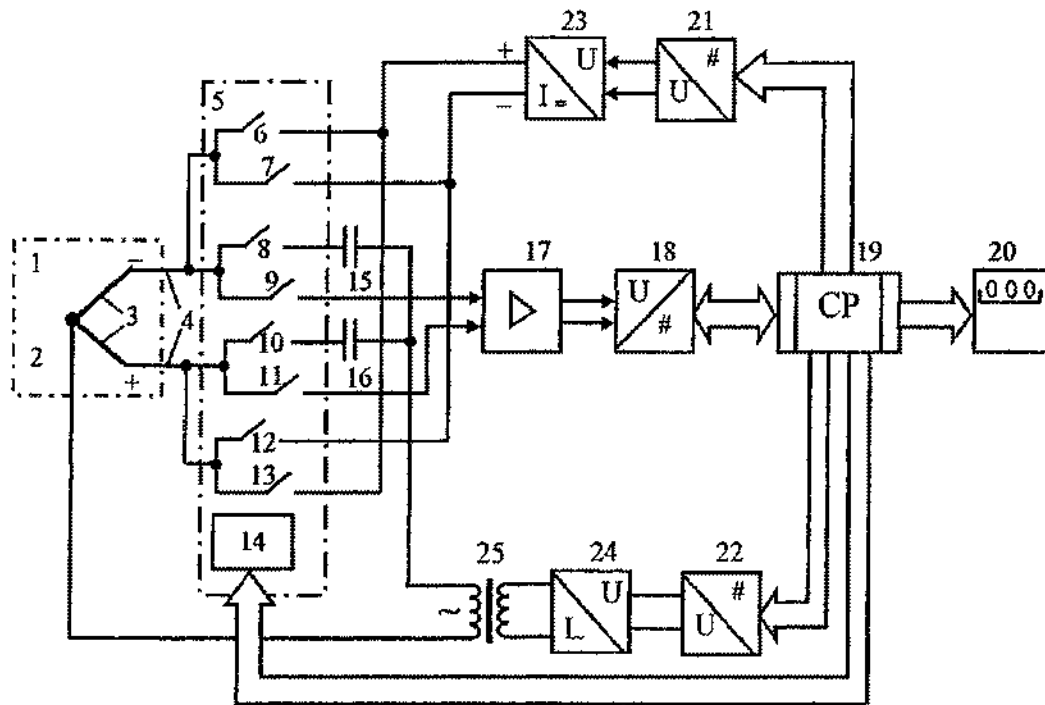
1 Collier RD Calibration with confidence The assurance of temperature accuracy In Temperature its measurement and control in Science and Industry, 1982, Vol 5, part 2 New York American Institute of Physic, pp 1311-1315

2 Саченко А А , Мильченко В Ю , Кочан В В Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами - М Энергоатомиздат, 1986, с 25-29

3 А С СССР №1362964, кл G 01K 15/00, 1987

4 А С СССР №1397752, кл G 01 K 15/00, 1988

5 Патент РФ №2010191, кл G 01 K 15/00, 1994



Фиг.1