



УКРАЇНА

(19) UA (11) 17907 (13) A

(51) G 01 K 7/02

ДЕРЖАВНЕ  
ПАТЕНТНЕ  
ВІДОМСТВООПИС ДО ПАТЕНТУ  
НА ВІНАХІДбез проведення експертизи по суті  
на підставі Постанови Верховної Ради України  
№ 3769-ХІІ від 23.ХІІ. 1993 р.Публікується  
в редакції заявника

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

1

(21) 96072773

(22) 10.07.96

(24) 03.06.97

(46) 31.10.97. Бюл. № 5

(47) 03.06.97

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Хімцева  
Ганна Іванівна, Скрипник Ігор Юрьевич,  
Санніков Володимир Юрьевич(73) Державна академія легкої промисло-  
вості України (UA)

(57) 1. Термоелектричний спосіб вимірювання температури, заключаючийся во внесенні робочого кінця термопары в среду, температуру которой измеряют, регистрации значения измеряемой термоЭДС на свободных концах, нагреве рабочего конца термопары пропусканием тока через термопару и определении температуры по формуле, отличающийся тем, что после регистрации термо-ЭДС на свободных концах термопары нагрев рабочего конца термопары пропусканием тока через термопару осуществляют в течение времени, которое выбирают в интервале 0,1...0,2 тепловой постоянной времени термопары, после завершения нагрева регистрируют текущее значение термо-ЭДС на свободных концах, затем охлаждают рабочий конец изменением направления протекания тока через термопару до достижения первоначального значения термо-ЭДС, после чего охлаждают рабочий конец термопары в течение времени, равного времени нагрева, после завершения охлаждения регистрируют текущее значение термо-ЭДС на свободных концах, вновь изменяют направление тока через термопару и нагревают рабочий конец до достижения

2

первоначальной температуры, а температуру определяют за время достижения рабочим концом термопары первоначальной температуры по формуле:

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

где  $T_k$  – температура калибровки, которую устанавливают на объекте в зоне рабочего конца перед началом эксплуатации термопары;

$N_1^{II}$  и  $N_1^I$  – коды термо-ЭДС на свободных концах термопары, полученные в процессе измерения и калибровки;

$N_2^{II}$  и  $N_2^I$  – коды термо-ЭДС на свободных концах дополнительно нагретой током термопары в процессе измерения и калибровки;

$N_4^{II}$  и  $N_4^I$  – коды термо-ЭДС на свободных концах дополнительно охлажденной током термопары в процессе измерения и калибровки;

$N_0$  – код термо-ЭДС свободных концов термопары, полученный в процессе калибровки.

2. Термоэлектрическое устройство для измерения температуры, содержащее термопару, рабочий конец которой помещен в контролируемую среду, свободные концы через последовательно соединенные коробку компенсации температуры свободных концов, нормирующий усилитель и аналого-цифровой преобразователь соединены с входом микро-ЭВМ, к выходу которой подключен цифровой индикатор, отличающийся тем, что оно снабжено второй термопарой, стробирующим ключом, двухполюсным переключателем и цифроаналоговым преобразователем, кодовый вход

(19) UA (11) 17907 (13) A

которого подключен ко второму выходу микро-ЭВМ, его токовые выходы через двухполюсный переключатель соединены со свободными концами второй термопары, рабочий конец которой соединен с рабочим концом первой термопары, третий выход микро-ЭВМ соединен с управляющим вхо-

дом двухполюсного переключателя, а четвертый выход микро-ЭВМ соединен с управляющим входом стробирующего ключа, который включен между коробкой компенсации температуры свободных концов первой термопары и входом нормирующего усилителя.

Изобретение относится к области измерения температуры термоэлектрическими преобразователями (термопарами) и может быть использовано для увеличения точности и срока службы термопар, находящихся в длительной эксплуатации в агрессивной среде или работающих в экстремальных условиях.

Известен термоэлектрический способ измерения температуры, заключающийся во внесении рабочего конца термопары в среду, температуру которой измеряют, стабилизации температуры свободных концов и измерении термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС), генерируемой на свободных концах термопары (см., например, Левшина Е.С., Новицкой П.В. Электрические измерения физических величин. - Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1983, с.259-260).

В процессе длительной эксплуатации, особенно в агрессивной среде, в результате окисления термоэлектродов, испарения металлов с электродов, диффузии компонентов сплавов через спай рабочего конца, деформации термоэлектродов и влияния других дестабилизирующих факторов изменяется коэффициент Зеебека, определяющий чувствительность термопары к температуре. В результате этого изменяется наклон градуировочной характеристики и соответственно возникает погрешность чувствительности термопары.

Для диагностики состояния термопары используют способ по авт. св. СССР № 302622, кл. G 01 K 7/02, 1971, основанный на дополнительном нагревании рабочего конца термопары периодическими импульсами тока, в промежутках между которыми проверяют наличие дополнительной термо-ЭДС. В этом способе исключается грубая погрешность измерения, в частности, от обрыва термоэлектродов термопары. Однако способ не позволяет контролировать возрастающую погрешность от постепенной деградации параметров термопары,

влияющих на чувствительность, особенно в тяжелых условиях эксплуатации.

Известен также термоэлектрический способ измерения температуры по авт. св. СССР № 777475, кл. G 01 K 7/02, 1980, заключающийся во внесении рабочего конца термопары в среду, температуру которой измеряют, регистрации значения измеряемой термо-ЭДС на свободных концах, нагреве рабочего конца термопары пропусканием тока через термопару и определении температуры по формуле. При этом регистрируют установившееся значение термо-ЭДС и определяют отношение зарегистрированных значений термо-ЭДС, а температуру  $T_x$  определяют по формуле:

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

где  $\Pi$  - коэффициент Пельтье рабочего конца термопары;

$I_0$  - ток, пропускаемый через рабочий конец термопары;

$K = E_2/E_1$  - отношение значений зарегистрированных термо-ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  до и после нагрева;

$\lambda$  - теплопроводность рабочего конца термопары с учетом теплоотдачи в контролируемую среду.

Как видно из приведенной формулы, на точность измерения температуры этим способом непосредственно не влияет коэффициент Зеебека. Однако входящий в формулу коэффициент Пельтье  $\Pi$  функционально связан с функциональными коэффициентами Зеебека  $E$  соотношением  $\Pi = ET_x$ .

Таким образом, известный способ не исключает полностью влияние нестабильности коэффициента Зеебека, а, следовательно, и непостоянство чувствительности термопары на точность измерения температуры.

Кроме того, входящая в расчетную формулу теплопроводность рабочего конца в значительной мере зависит от теплофизических свойств контролируемой среды. При изменении этих свойств в процессе дли-

тельной эксплуатации также возникает дополнительная погрешность из-за изменений параметра  $\lambda$ , которую трудно скомпенсировать или учесть. Не учтено в известном способе и выделение теплоты Джоуля в термоэлектродах термопары, что нарушает линейную зависимость между нагревающим током и дополнительной температурой нагрева.

Регистрация установившейся температуры после дополнительного нагрева рабочих концов термопары связана с большими затратами времени оператора из-за ее тепловой инерционности. Длительное охлаждение рабочих концов термопары после выключения нагревающего тока для подготовки ее к следующему измерению еще в большей мере увеличивает суммарное время измерительного цикла нагрев-охлаждение.

Дополнительный нагрев используют в термоэлектрическом устройстве для измерения температуры по авт. св. СССР № 1229597, кл. G 01 K 7/02, 1984, содержащем две термопары с соединенными рабочими концами, источник тока, мультивибратор, ключи, резисторы, подключенные к свободным концам первой термопары, управляемый резистор и последовательно включенные дифференциальный усилитель, избирательный усилитель, демодулятор и интегратор, выход которого соединен со входом управляемого резистора, включенного между источником тока и свободными концами второй термопары.

Однако уравнение измерительного преобразования этого устройства также включает коэффициент Пельтье. Следовательно, влияние неустойчивости коэффициента Зеебека на чувствительность термопары в устройстве с дополнительным нагревом полностью не устраняется.

Известно термоэлектрическое устройство для измерения температуры (см., например, Линевет Ф. Измерение температуры в технике, Справочник, пер. с нем., 1980, с. 193), которое содержит термопару, нормирующий усилитель, аналого-цифровой преобразователь и цифровой измерительный прибор. Недостатком таких устройств несмотря на определенные преимущества цифровых термометров по сравнению с аналоговыми является зависимость результатов измерения от степени нелинейности градуировочной характеристики, неустойчивости чувствительности термопары.

Известно также термоэлектрическое устройство для измерения температуры (см. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. - М.: Энергоатомиздат,

1985, с. 158, 159), содержащее термопару, рабочий конец которой помещен в контролируемую среду, свободные концы, через последовательно соединенную коробку компенсации температуры свободных концов, нормирующий усилитель и аналого-цифровой преобразователь соединены с входом микро-ЭВМ, к выходу которой подключен цифровой индикатор.

В известном устройстве в память микро-ЭВМ заносится градуировочная характеристика термопары. При измерениях текущих значений температуры кода термо-ЭДС, получаемые посредством аналого-цифрового преобразователя, с помощью таблицы соответствия сопоставляются с кодами градуировочной характеристики. В результате линейризуется преобразовательная характеристика термопары и тем самым обеспечивается цифровой отсчет температуры. Однако реальная неустойчивость параметров термопары, прежде всего деградация коэффициента Зеебека в процессе длительной эксплуатации термопары, не позволяет только аппаратными средствами линейризовать преобразовательную характеристику из-за возникающей неэквивалентности таблицы соответствия реальной характеристике термопары. Кроме того, изменения коэффициента Зеебека от дестабилизирующих факторов ничем не компенсируются, что вызывает большие погрешности измерения при длительной эксплуатации термопары.

В основу изобретения положена задача создания такого способа и устройства измерения температуры, в которых новое выполнение операции дополнительного нагрева, введение дополнительной операции охлаждения рабочего конца, повторение этих операций при калибровке и измерении, введение новых блоков и связей в программируемое устройство исключает влияние неустойчивости и нелинейности градуировочной характеристики термопары на результат измерения температуры в процессе длительной эксплуатации. Благодаря этому повышается точность и увеличивается срок службы термопары.

Поставленная задача решается тем, что в термоэлектрический способ измерения температуры, заключающийся во внесении рабочего конца термопары в среду температуру которой измеряют, регистрации значений измеряемой термо-ЭДС на свободных концах, нагреве рабочего конца термопары пропусканием тока через термопару и определении температуры по формуле, согласно изобретения, после регистрации термо-ЭДС на свободных концах термопары на-

грев рабочего конца термопары пропусканием тока через термопару осуществляют в течение времени, которое выбирают в интервале 0,1...0,2 тепловой постоянной времени термопары, после завершения нагрева регистрируют текущее значение термо-ЭДС на свободных концах, затем охлаждают рабочий конец изменением направления протекания тока через термопару до достижения первоначального значения термо-ЭДС, после чего охлаждают рабочий конец термопары в течение времени равного времени нагрева, после завершения охлаждения регистрируют текущее значение термо-ЭДС на свободных концах, вновь изменяют направление тока через термопару и нагревают рабочий конец до достижения первоначальной температуры, а температуру  $T_x$  определяют за время достижения рабочим концом термопары первоначальной температуры по формуле.

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

где  $T_k$  — температура калибровки, которую устанавливают на объекте контроля в зоне рабочего конца перед началом эксплуатации термопары;

$N_1^{II}$  и  $N_1^I$  — коды термо-ЭДС на свободных концах термопары, полученные в процессе измерения и калибровки;

$N_2^{II}$  и  $N_2^I$  — коды термо-ЭДС на свободных концах дополнительно нагретой током термопары в процессе измерения и калибровки;

$N_4^{II}$  и  $N_4^I$  — коды термо-ЭДС на свободных концах дополнительно охлажденной током термопары в процессе измерения и калибровки;

$N_0$  — код термо-ЭДС свободных концов термопары, полученный в процессе калибровки.

Поставленная задача решается также тем, что термоэлектрическое устройство для измерения температуры, содержащее термопару, рабочий конец которого помещен в контролируемую среду, ее свободные концы через последовательно соединенные коробку компенсации температуры свободных концов, нормирующий усилитель и аналого-цифровой преобразователь соединены с входом микро-ЭВМ, к выходу которой подключен цифровой индикатор, согласно изобретению снабжен второй термопарой, стробирующим ключом, двухполюсным переключателем и цифро-аналоговым преобразователем, кодовый вход которого подключен ко второму выходу микро-ЭВМ, его токовые выходы через двухполюсный переключатель соединены со свободными

концами второй термопары, рабочий конец которой соединен с рабочим концом второй термопары, третий выход микро-ЭВМ соединен с управляющим входом двухполюсного переключателя, а четвертый выход микро-ЭВМ соединен с управляющим входом стробирующего ключа, который включен между коробкой компенсации температуры свободных концов термопары и входом нормирующего усилителя.

Дополнительный нагрев и охлаждение термопары в течение небольшого времени по сравнению с ее тепловой постоянной времени электрическим током, направление которого периодически изменяется на противоположное, исключает практически влияние контролируемой среды на процесс нагрев-охлаждение термопары и значительно сокращает время измерения. Обработка результатов измерений по предложенной формуле исключает влияние непостоянства коэффициентов Зеебека и Пельтье на результат измерения, которая возникает из-за зависимости этих коэффициентов от температуры и вследствие деградации этих параметров в процессе длительной эксплуатации, особенно в агрессивной среде.

Введение в структуру микропроцессорного устройства дополнительно стробирующего ключа, двухполюсного переключателя и цифро-аналогового преобразователя позволило обеспечить программное измерение и регистрацию кодов термо-ЭДС на свободных концах термопары в начале и в конце временных интервалов нагрева и охлаждения, исключить влияние тока нагрева термопары и ее теплофизических параметров на регистрируемую термо-ЭДС. Запоминание и сравнение кодов термо-ЭДС в микро-ЭВМ в режимах калибровки и измерения обеспечивает вычисление измеряемой температуры без влияния нелинейности и нестабильности градуировочной характеристики термопары.

На фиг.1 изображена функциональная схема цифрового термоэлектрического устройства для измерения температуры; на фиг.2 — график изменения кода термо-ЭДС рабочего конца термопары в процессе калибровки; на фиг.3 — блок-схема алгоритма изменения температуры контролируемой среды.

Устройство содержит две термопары 1 и 2, соединенные рабочими концами, колодки свободных концов 3 и 4, коробку 5 компенсации температуры свободных концов термопары 1, стробирующий ключ 6, нормирующий усилитель 7, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 8, микро-ЭВМ 9,

цифровой индикатор 10, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 11 и двухполюсный переключатель 12.

Свободные концы термопары 1, расположенные на колодке 4, соединены удлинительными термоэлектродами с коробкой 5 компенсации температуры свободных концов. Строблирующий ключ 6 соединяет выход коробки 5 с входом нормирующего усилителя 7, выход которого через аналого-цифровой преобразователь 8 соединен со входом микро-ЭВМ 9. Первый выход микро-ЭВМ 9 соединен с цифровым индикатором 10, второй — с кодовым входом цифро-аналогового преобразователя 11, третий — с управляющим входом переключателя 12 и четвертый — с управляющим входом стробирующего ключа 6. Входы переключателя 12 соединены с симметричными токовыми выходами цифро-аналогового преобразователя 11, а его выходы соединены через удлинительные термоэлектроды со свободными концами термопары 2, размещенными на колодке 3.

Устройство работает по программе, записанной в ПЗУ микро-ЭВМ 9, в соответствии с блок-схемой алгоритма фиг.3.

Термоэлектрический способ измерения температуры осуществляется следующим образом.

Рабочий конец термопары 1 (фиг.1) помещают в исследуемую среду, в которой измеряемая температура изменяется в диапазоне  $T_{x\min} \dots T_{x\max}$ . Свободные концы термопары размещают в среде с известной и стабильной температурой, например, в термостате или соединяют с компенсационной коробкой 5. Преобразуют измеряемую термо-ЭДС на свободных концах термопары 1 в цифровой код с помощью нормирующего усилителя 7 и аналого-цифрового преобразователя 8

$$N_1 = S(\epsilon_x T_x - \epsilon_0 T_0), \quad (1)$$

где  $S$  — крутизна аналого-цифрового преобразования термо-ЭДС в код;

$\epsilon_x$  — текущее значение коэффициента Зеебека рабочих концов, соответствующее температуре  $T_x$ ;

$\epsilon_0$  — коэффициент Зеебека свободных концов термопары, соответствующий температуре  $T_0$ .

В процессе пуско-наладочных работ, когда на контролируемый объект вмонтирована новая термопара 1 с известной градуировочной характеристикой, производят ее калибровку. Для этого температуру калибровки выбирают из соотношения

$$T_k = (T_{x\max} + T_{x\min})/2. \quad (2)$$

Преобразуют измеряемую термо-ЭДС на свободных концах термопары 1, которая соответствует калибровочной температуре  $T_k$ , в цифровой код

$$N_1' = S(\epsilon_n T_k - \epsilon_0 T_0), \quad (3)$$

где  $\epsilon_n$  — начальное значение коэффициента Зеебека, которое по градуировочной характеристике термопары соответствует температуре  $T_k$ .

Регистрируют полученное значение кода  $N_1'$  в микро-ЭВМ 9.

Из соотношения (3) с учетом зарегистрированного кода  $N_1'$  и известных параметров  $\epsilon_n, S$  и  $T_k$  определяют код термо-ЭДС свободных концов термопары 1

$$N_0 = S\epsilon_0 T_0 = S\epsilon_n T_k - N_1'. \quad (4)$$

Так как температура  $T_0$  стабильна в процессе эксплуатации термопары, то  $\epsilon_0$  не изменяется. Поэтому в дальнейшем считаем, что код свободных концов  $N_0 = \text{const}$ .

Далее пропускают через рабочий конец температуры 1 ток  $I_0$ , поступающий по термопаре 2 от источника тока 11 через переключатель 12 в направлении, которое вызывает дополнительный нагрев этого конца за счет выделяемой теплоты Пельтье и теплоты Джоуля на 5...10% от температуры  $T_k$ . Из-за тепловой инерции термопары температура рабочего конца возрастает постепенно по экспоненциальному закону (фиг.2).

$$T_k(t_1) = T_k + [1 - \exp(-t_1/\tau)] T_y, \quad (5)$$

где  $t_1$  — время дополнительного нагрева;

$\tau$  — тепловая постоянная времени термопары;

$\Delta T_y$  — установившийся нагрев рабочего конца термопары.

На начальном участке кривой разогрева (5) термопары происходит адиабатический нагрев его рабочего конца. В результате этого температура рабочего конца возрастает линейно в соответствии с зависимостью

$$T_k(t_2) = T_k + \frac{(\Pi' I_0 + 0.5 R I_0^2) t_2}{c m}, \quad (6)$$

где  $\Pi'$  — коэффициент Пельтье рабочего конца термопары, соответствующий температуре  $T_k$ ;

$R$  — сопротивление термоэлектродов и рабочего конца термопары;

$c$  — удельная усредненная теплоемкость рабочего конца;

$m$  — масса рабочего конца;

$t_2$  — время адиабатического нагрева рабочего конца.

Коэффициент 0.5 в выражении (6) учитывает только ту часть теплоты Джоуля, которая поступает к рабочему концу.

В промышленных термопарах сопротивление термоэлектродов и рабочего конца мало, поэтому теплота Пельтье преобладает над теплотой Джоуля.

Время нагрева рабочего конца  $t_2$  должно быть меньше тепловой постоянной времени термопары, когда на процесс нагрева мало влияет теплоотдача поверхности рабочего конца в контролируемую среду и теплопроводность термоэлектродов. Поэтому время нагрева выбирают из условия

$$t_2 = (0,1 \dots 0,2) \tau \quad (7)$$

При этом погрешность от замены реальной экспоненциальной зависимости (5) линейной зависимостью (6) при времени нагрева (7) не превышает 0,5%.

Процесс нагрева рабочего конца прерывают при  $t_2 = \Pi \tau$ , где  $0,1 < \Pi < 0,2$  и регистрируют в этот момент с помощью ключа 6 значение кода от текущей температуры  $T_k$  в микро-ЭВМ 9 (фиг.1)

$$N_2^I = S[\epsilon_n(T_k + \frac{\Pi^I I_0 + 0,5 R I_0^2}{c m} t_2) - \epsilon_0 T_0]. \quad (8)$$

Учитывая, что коэффициент Пельтье связан с коэффициентом Зеебека соотношением

$$\Pi^I = \epsilon_n T_k. \quad (9)$$

получаем код термо-ЭДС дополнительно нагретой термопары (рис.2)

$$N_2^I = S[\epsilon_n(T_k + \frac{\epsilon_n T_k I_0 + 0,5 R I_0^2}{c m} t_2 - \epsilon_0 T_0)]. \quad (10)$$

Регистрирует в микро-ЭВМ 9 полученное значение кода  $N_2^I$ .

Затем изменяют направление протекания тока через рабочий конец термопары переключателем 12 и адиабатически охлаждают его в течение времени  $t_3$ , которая определяется достижением первоначального значения температуры  $T_k$ . В процессе охлаждения рабочего конца код термо-ЭДС термопары уменьшается в соответствии с выражением (фиг.2)

$$N_3^I = S[\epsilon_n(T_k + \frac{0,5 R I_0^2 - \epsilon_n T_k I_0}{c m} t_3) - \epsilon_0 T_0]. \quad (11)$$

где  $T_k^I$  — температура нагретого рабочего конца термопары, соответствующая коду.

При достижении первоначального кода термо-ЭДС  $N_3^I = N_1^I$  (фиг.2) фиксируют время  $t_3$  и устанавливают отсчет времени охлаждения  $t_4$ , которое выбирают равным времени нагрева  $t_2$ . Регистрируют в микро-ЭВМ 9 замыканием ключа 6 текущее значение кода термо-ЭДС по истечению времени  $t_4 = t_2$

$$N_4^I = S[\epsilon_n(T_k + \frac{0,5 R I_0^2 - \epsilon_n T_k I_0}{c m} t_2) - \epsilon_0 T_0]. \quad (12)$$

После регистрации  $N_4^I$  вновь изменяют переключателем 12 (фиг.1) направление про-

текания тока через рабочий конец термопары 1 и нагревают его в течение времени  $t_5$ . Время нагрева  $t_5$  определяют по достижению первоначального кода термо-ЭДС  $N_5^I = N_1^I$  (фиг.2). Задают и запоминают время нагрева  $t_2, t_5$  и время охлаждения  $t_3$  и  $t_4$  в микро-ЭВМ 9 (фиг.1).

На этом процесс калибровки термопары на объекте контроля заканчивается.

Процесс измерения текущей температуры  $T_x$  на работающем объекте начинается с определения кода термо-ЭДС на свободных концах термопары 1, рабочий конец которой находится в тепловом контакте с контролируемой средой. В процессе эксплуатации термопары под воздействием дестабилизирующих факторов и текущих изменений температуры возникают неконтролируемые отклонения коэффициента Зеебека рабочего конца термопары относительно начального значения  $\epsilon_n$ , соответствующего калибровочной температуре. Поэтому при измерении температуры  $T_x$  в контролируемой среде объекта получают код термо-ЭДС с новым значением коэффициента Зеебека

$$N_1^{II} = S[\epsilon_n + \Delta \epsilon_x] T_x - \epsilon_0 T_0]. \quad (13)$$

где  $\Delta \epsilon_x$  — изменение коэффициента Зеебека рабочего конца в результате воздействия дестабилизирующих факторов и отличия измеряемой температуры  $T_x$  от калибровочной  $T_k$ .

Регистрируют полученное значение кода  $N_1^{II}$  в микро-ЭВМ 9. При этом коэффициент Пельтье (9) с учетом измерения коэффициента Зеебека и температуры  $T_x$  принимает значение

$$\Pi^{II} = (\epsilon_n + \Delta \epsilon_x) T_x. \quad (14)$$

Дополнительно нагревают рабочий конец термопары тем же самым током  $I_0$ . В соответствии с выражением (8) получают код термо-ЭДС дополнительно нагретой термопары при температуре  $T_x$

$$N_2^{II} = S[(\epsilon_n + \Delta \epsilon_x)(T_x + \frac{0,5 R I_0^2 + (\epsilon_n + \Delta \epsilon_x) I_0 T_x}{c m} t_2) - \epsilon_0 T_0] \quad (15)$$

Регистрируют код термо-ЭДС дополнительно нагретой термопары в микро-ЭВМ 9.

Изменяют направление протекания тока через рабочий конец термопары переключателем 12 и охлаждают его в течение времени  $t_3$ . Далее продолжают охлаждать рабочий конец термопары в течение времени  $t_4$ . В конце временного интервала  $t_4 = t_2$  регистрируют код термо-ЭДС термопары, который по аналогии с выражением (12) будет иметь вид:

$$N_4^{II} = S \left[ (\varepsilon_n + \Delta \varepsilon_x) (T_x + \frac{0,5 R I_0^2 + (\varepsilon_n + \Delta \varepsilon_x) I_0 T_x}{c m} t_2) - \varepsilon_0 T_0 \right] \quad (16)$$

Регистрируют полученное значение кода  $N_4^{II}$  в микро-ЭВМ 9. После этого вновь изменяют направление протекания тока через рабочий конец термопары переключателем 12 и нагревают его в течение времени  $t_5$  до достижения первоначальной температуры  $T_x$  фиг.2. После этого термопара 1 готова к новому циклу измерения, который начинается с регистрации кода  $N_1^{II}$ , от текущего значения измеряемой температуры  $T_x$ .

Для определения температуры  $T_x$  по зарегистрированным кодам  $N_1^{II}$ ,  $N_2^{II}$  и  $N_4^{II}$  и ранее зарегистрированным кодам  $N_1^I$ ,  $N_2^I$  и  $N_4^I$  при калибровке проводят следующие вычисления.

Из выражений (10) и (12) определяют разность кодов

$$N_2^I - N_4^I = \frac{2 S \varepsilon_n^2 I_0 T_k}{c m} t_2 \quad (17)$$

и из выражений (15) и (16) разность кодов

$$N_2^{II} - N_4^{II} = \frac{2 S (\varepsilon_n + \Delta \varepsilon_x)^2 I_0 T_x}{c m} t_2 \quad (18)$$

Отношение разностных кодов имеет вид

$$\frac{N_2^I - N_4^I}{N_2^{II} - N_4^{II}} = \frac{\varepsilon_n^2 T_k}{(\varepsilon_n + \Delta \varepsilon_x)^2 T_x} \quad (19)$$

откуда измеряемая температура

$$T_x = \frac{N_2^{II} - N_4^{II}}{N_2^I - N_4^I} = \frac{\varepsilon_n^2}{(\varepsilon_n + \Delta \varepsilon_x)^2} T_k \quad (20)$$

Согласно выражению (13) коэффициент Зеебека рабочего конца термопары при измеряемой температуре  $T_x$

$$\varepsilon_n + \Delta \varepsilon_x = \frac{N_1^{II} + N_0}{S T_x} \quad (21)$$

а этот же коэффициент при температуре калибровки  $T_k$  из (3) равен

$$\varepsilon_n = \frac{N_1^I + N_0}{S T_k} \quad (22)$$

Подставляя значения  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_n + \Delta \varepsilon_x$  в выражение (20), окончательно получаем

$$T_x = \frac{(N_2^{II} - N_4^{II})(N_1^I + N_0)^2}{(N_2^I - N_4^I)(N_1^{II} + N_0)^2} T_k \quad (23)$$

Как видно из полученного выражения (23), измеряемая температура  $T_x$  не зависит от непостоянства коэффициента Зеебека  $\Delta \varepsilon_x$ , теплофизических параметров рабочего конца самой термопары ( $c$  и  $m$ ), а также выделения теплоты Джоуля в термопаре.

Таким образом, за счет дополнительных измерений нагретого и охлажденного рабочего конца термопары при калибровке и измерении и обработке результатов промежуточных измерений по формуле (23)

исключается полностью влияние деградации коэффициента Зеебека рабочего конца в контролируемой зоне объекта, а также линейризуется преобразовательная характеристика термопары относительно калибровочной температуры независимо от степени нелинейности градуировочной характеристики новой температуры.

Благодаря этому увеличивается срок службы термопары, который ограничивается в условиях эксплуатации допустимой погрешностью измерения от изменения чувствительности термопары и нестабильностью ее градуировочной характеристики. По сравнению со способом-прототипом исключено непостоянство как коэффициента Зеебека так и коэффициента Пельтье. Исключено также влияние непостоянства теплофизических свойств контролируемой среды на результат измерения за счет использования начального участка кривой нагрева термопары. Повышено быстродействие измерений за счет кратковременного нагрева и принудительного охлаждения рабочего конца термопары. Это обеспечивает повышение точности и срока службы термопары при износе ее рабочего конца.

Термоэлектрическое устройство для измерения температуры фиг.1 работает в соответствии с алгоритмом фиг.3.

На этапе пуско-наладочных работ производится калибровка устройства. В соответствии с выбранным типом термопары и ее тепловой инерционностью выбирают время нагрева  $t_2$  из соотношения (7). По диапазону регулируемых температур объекта выбирают температуру калибровки  $T_k$  согласно формулы (2) и ток нагрева  $I_0$ , обеспечивающий рекомендуемый перегрев относительно . В процессе калибровки по результатам измерений температуры определяют коды  $N_1^I$ ,  $N_2^I$  и  $N_4^I$ . Вычисляют код  $N_0$  по соотношению (4) и определяют экспериментально время охлаждения  $t_3$  и время нагрева  $t_5$  по равенству кодов в процессе охлаждения ( $N_3^I = N_1^I$ ) и нагрева ( $N_5^I = N_1^I$ ) термопары. В память микро-ЭВМ 9 вводят исходные данные ( $T_k$ ,  $I_0$ ,  $t_2$ ) и результаты калибровки ( $N_1^I$ ,  $N_2^I$ ,  $N_4^I$ ,  $N_0$ ,  $t_3$  и  $t_5$ ).

Измерение текущих значений температуры  $T_x$  на работающем объекте осуществляется автоматически по программе, введенной в память микро-ЭВМ 9 согласно алгоритма фиг.3. Под воздействием температуры контролируемой среды  $T_x$  на свободных концах термопары 1 генерируется термо-ЭДС, пропорциональная разности температур  $T_x$  и  $T_0$ , где  $T_0$  — температура свободных концов термопары на колодке 4,

изменения которой компенсируются колодой 5, процесс преобразования и измерения термо-ЭДС термопары в исходном, дополнительно нагретом и охлажденном состояниях осуществляется в три такта работы микро-ЭВМ 9.

В первый такт работы микро-ЭВМ 9 ( $i = 1$ ) замыкается стробирующий ключ 6 и на вход нормирующего усилителя 7 поступает измеряемая термо-ЭДС. Выходное напряжение усилителя 7 с помощью аналого-цифрового преобразователя 8 преобразуется в цифровой код  $N_1^i$ , который вводится в микро-ЭВМ 9, где запоминается в оперативной памяти. Ключ 6 после этого размыкается. Далее по команде микро-ЭВМ 9 включается ЦАП 11 (цифро-аналоговый преобразователь) и на его токовых выходах кодом ЭВМ формируется постоянный ток  $I_0$ , который через замкнутые контакты переключателя 12 и термоэлектроды термопары 2 протекает через общий рабочий конец термопар 1 и 2, вызывая его дополнительный нагрев.

Во втором такте измерения ( $i = 2$ ) происходит замыкание стробирующего ключа 6 и преобразование термо-ЭДС подогретого рабочего конца термопары 1 с помощью блоков 7 и 8 в цифровой код  $N_2^i$ , который запоминается в оперативной памяти микро-ЭВМ 9. Стробирующий ключ 6 после этого размыкается. Далее переключатель 12 по команде микро-ЭВМ 9 переводится в противоположное положение, что приводит к изменению направления протекания тока через рабочий конец термопары 2 и принудительному охлаждению общего рабочего спая. Охлаждение рабочего конца термопары 1 происходит в течение времени  $t = t_3 + t_2$ , которое задается микро-ЭВМ 9.

Поскольку получение кода после охлаждения на время не производится для соблюдения порядка индексации получаемых кодов значение индекса  $i$  увеличивается на единицу ( $i = i + 1$ ).

На третьем этапе измерения ( $i = 4$ ) замыкается стробирующий ключ 6 и осуществляется преобразование термо-ЭДС охлажденного рабочего конца термопары 1 в цифровой код  $N_4^i$ , который запоминается

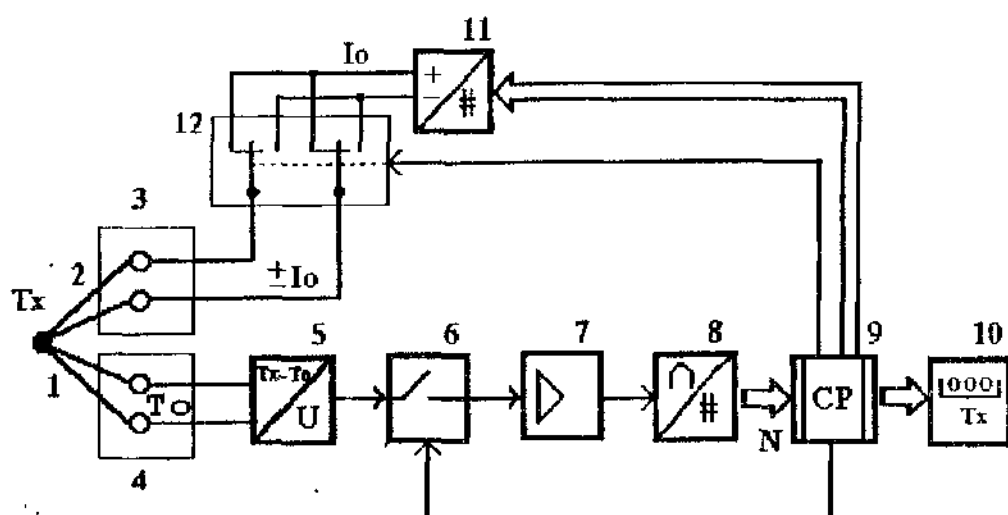
в микро-ЭВМ 9. Затем переключатель 12 по команде микро-ЭВМ 9 вновь переводится в исходное положение, что приводит к нагреванию рабочего конца термопары 1 в течение времени  $t_5$  и достижению первоначальной температуры. Одновременно с этим в процессоре микро-ЭВМ 9 происходит вычисление температуры  $T_x$  по формуле (23) с учетом данных, которые хранятся в памяти ЭВМ.

Результат измерения температуры  $T_x$  в цифровой форме выводится на цифровой индикатор 10 или используется для управления температурой объекта. По истечению времени нагрева  $t_5$  повторяется новый цикл измерения, начиная с первого такта. В конце каждого цикла работы устройства по команде микро-ЭВМ 9 в индикаторе 10 происходит запись нового значения температуры  $T_k$  фиг.3.

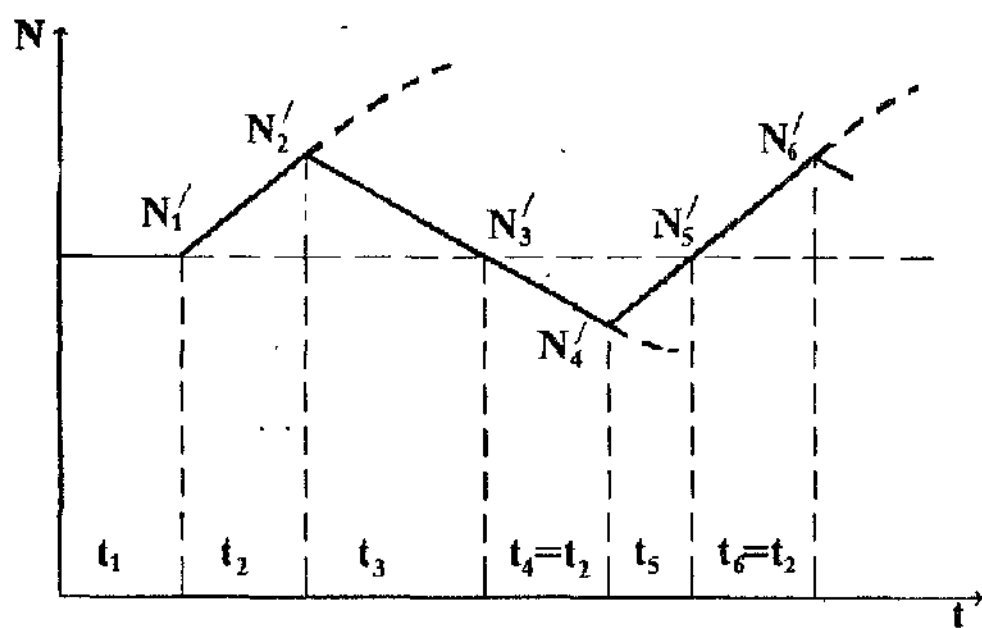
Поскольку уравнение измерительного преобразования температуры 23 с компенсацией погрешности от изменений коэффициента Зеебека  $\Delta \epsilon_x$  линейно относительно  $T_k$ , то необходимость дополнительной linearизации результатов измерений в ЭВМ с помощью таблиц соответствия отпадает. Вместо всей градуировочной характеристики термопары в память ЭВМ вводят только значение коэффициента Зеебека  $\epsilon_n$  новой термопары, которое соответствует температуре калибровки  $T_k$ , и по введенному значению крутизны преобразования  $S$  вычисляется код  $N_0$  по формуле (4) на этапе калибровки. После этого код  $N_0$  вместе с кодами калибровки  $N_1^1$ ,  $N_2^1$  и  $N_4^1$  хранится в памяти ЭВМ и используется для вычисления текущих значений температуры.

Благодаря короткому принудительному нагреву и охлаждению рабочего конца термопары значительно сокращается время цикла одного измерения и повышается быстродействие термоэлектрического устройства. По сравнению с устройством-прототипом повышена точность благодаря исключению влияния нестабильности градуировочной характеристики термопары.

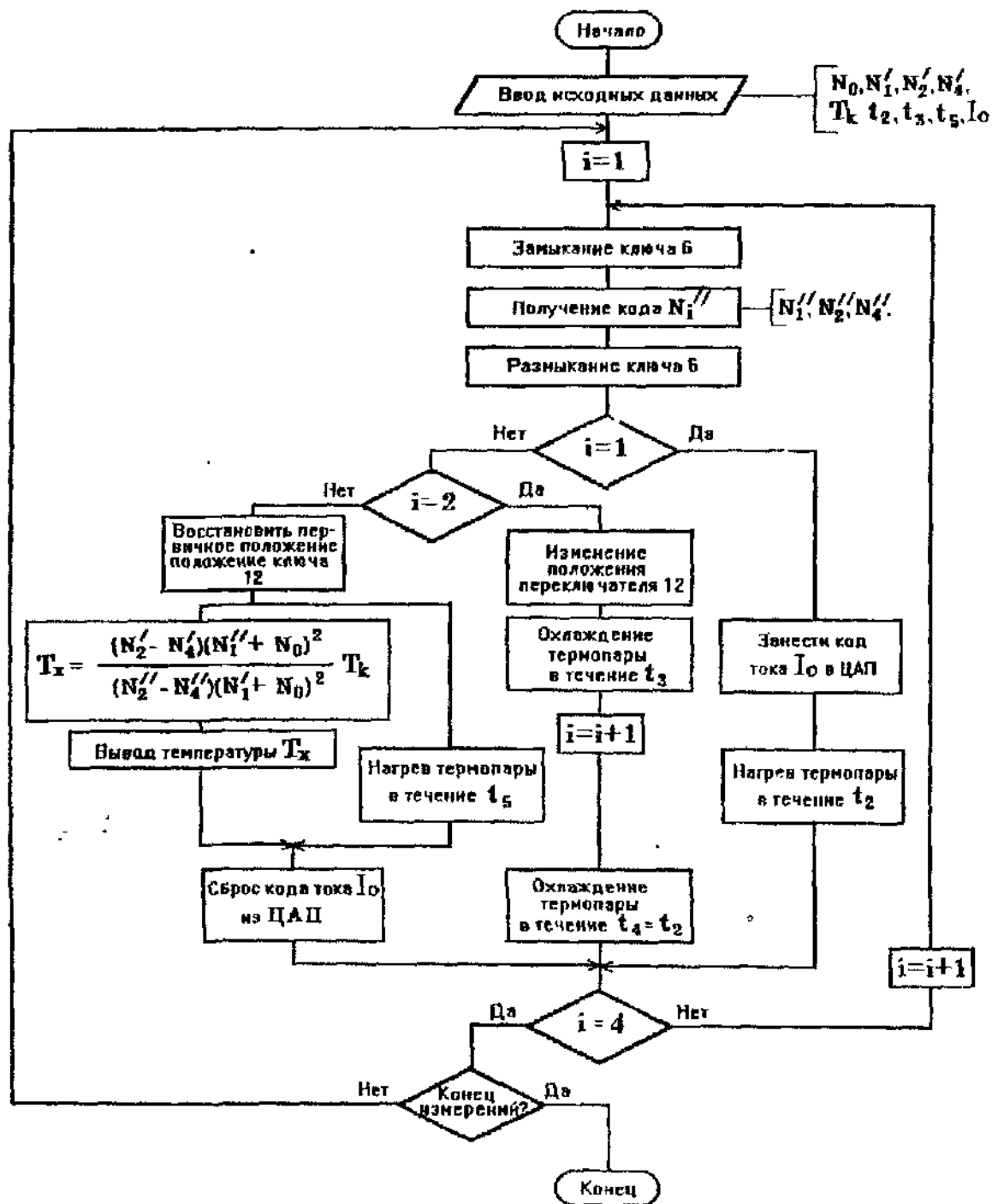




Фиг. 1



Фиг. 2



СРис.3

Упорядник

Техред М.Келемеш

Коректор Л.Лукач

Замовлення 4256

Тираж

Підписне

Державне патентне відомство України,  
254655, ГСП, Київ-53, Львівська пл., 8

Відкрите акціонерне товариство "Патент", м. Ужгород, вул.Гагаріна, 101