

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ****Б. М. МАМИКОНЯН***Национальный политехнический университет Армении, Гюмрийский филиал, Гюмри, Армения
gyumri@polytechnic.am*

Аннотация. Предложен цифровой измеритель разности температур, в котором применяются платиновые термопреобразователи сопротивления (ПТС). Измеритель содержит измерительную цепь, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой индикатор. В измерительную цепь введен операционный усилитель для создания встречного тока в одном из ПТС, который включен в цепи обратной связи операционного усилителя. ПТС подключены по четырехпроводной линии связи, сопротивления проводов которой не нуждаются в подгонке, поскольку не влияют на результат измерения. Использован АЦП двухтактного интегрирования. На дифференциальные измерительные входы АЦП поступают сигналы падения напряжений соответствующих ПТС. На один из входов опорного напряжения АЦП поступает сигнал падения напряжения на опорном резисторе, в котором через ПТС протекает измерительный ток. Благодаря этому выходной код АЦП не зависит от измерительного тока. Выполнен метрологический анализ преобразования разности сопротивлений ПТС в цифровой код, источниками погрешностей являются напряжение смещения нуля операционного усилителя, неточность и нестабильность опорного резистора. Установлено, что рассмотренная схема измерительной цепи пригодна для использования в узкопределных измерителях разности температур. При этом линии связи ПТС могут иметь любую длину и не нуждаются в подгонке сопротивлений соединительных проводов.

Ключевые слова: измерение, разность температур, термопреобразователь сопротивления, измерительная цепь, измерительный ток, измерительное напряжение, опорное напряжение, погрешность измерения

Ссылка для цитирования: Мамиконян Б. М. Метрологический анализ цифрового измерителя разности температур с применением термопреобразователей сопротивления // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 342—349. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-342-349.

**METROLOGICAL ANALYSIS OF A DIGITAL TEMPERATURE DIFFERENCE METER
USING THERMAL RESISTANCE CONVERTERS****B. M. Mamikonyan***National Polytechnic University of Armenia, Gyumri Branch, Gyumri, Armenia
gyumri@polytechnic.am*

Abstract. A digital temperature difference meter is proposed, in which platinum resistance thermal converters are used. The meter contains a measuring circuit, an analog-to-digital converter (ADC), and a digital indicator. An operational amplifier is introduced into the measuring circuit to create a countercurrent in one of the resistance thermal converters included in the feedback circuit of the operational amplifier. The thermal converters are connected via a four-wire communication line. The line wire resistances do not affect the measurement result and therefore do not need to be adjusted. A push-pull integration ADC is applied. The differential measuring inputs of the ADC receive voltage drop signals from corresponding thermal converters. One of the reference inputs of the ADC receives a voltage drop signal across the reference resistor, in which the measuring current flows through the thermal converter. This makes the output code of the ADC to be independent of the measuring current. The metrological analysis of transformation of the thermal converter resistance difference into the digital code is performed, the revealed sources of errors are the zero-bias voltage of the

operational amplifier, inaccuracy and instability of the reference resistor. It is established that the considered scheme of the measuring circuit is suitable for use in narrow-limit temperature difference meters. In this case, the communication lines of thermal converters can have any length and do not need the connecting wires resistances to be adjusted.

Keywords: measurement, temperature difference, thermal resistance converter, measuring circuit, measuring current, measuring voltage, reference voltage, measurement error

For citation: Mamikonyan B. M. Metrological analysis of a digital temperature difference meter using thermal resistance converters. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 4. P. 342—349 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-342-349.

Введение. Измерение разности температур широко применяется во многих производствах. Такой подход используется для управления объектом, он позволяет обнаруживать отклонение различных технологических процессов от нормального хода, что трудно выявить посредством измерения температуры контролируемых точек в отдельности. Повышение точности, упрощение схемы и уменьшение эксплуатационных расходов измерителей разности температур особенно важно в холодильных установках, в системах исследования теплопроводности материалов, в химической, пищевой и других отраслях промышленности, в теплоэнергетике, при измерении количества теплоты в водяных системах теплоснабжения, где расход тепловой энергии прямо пропорционален разности температур горячей и холодной воды, протекающей по прямому и обратному трубопроводам.

Объекты исследования. Для измерения разности значений температуры в основном применяются термоэлектрические преобразователи (ТЭП) и платиновые термопреобразователи сопротивления (ПТС). Особенности измерения разности температур посредством ТЭП, области и диапазоны температур их применения, преимущества и недостатки подробно рассмотрены в работах [1—3]. Согласно [4], для различных типов ТЭП предел погрешности измерения температуры θ может находиться в диапазоне от $\pm 1,0$ °С (при низких значениях) до $\pm 0,0075\theta$ (при высоких). Это означает, что предел погрешности измерения ими разности температур может находиться в диапазоне от $\pm 2,0$ °С (при низких температурах) до $\pm 0,0075(\theta_1 + \theta_2)$, здесь θ_1 и θ_2 — температура точек, разность которых подлежит измерению.

По сравнению с ТЭП, ПТС имеют более высокую точность, чувствительность и стабильность метрологических характеристик, поэтому более предпочтительны для измерения малых разностей температур. В большинстве случаев измерение разности температур осуществляется цифровым методом. Возможно раздельное измерение температуры контролируемых точек с последующим определением разности значений или использование прямого метода (например, подключение обоих ПТС по электроизмерительной мостовой схеме и измерение разности их сопротивлений). При этом для повышения точности измерений в качестве датчиков применяются подобранные в пары ПТС, погрешности которых имеют один знак.

При разработке измерительных цепей (ИЦ) цифровых измерителей разности температур с применением ПТС возникают проблемы

1) обеспечения линейности преобразования разности сопротивлений ПТС в выходное напряжение;

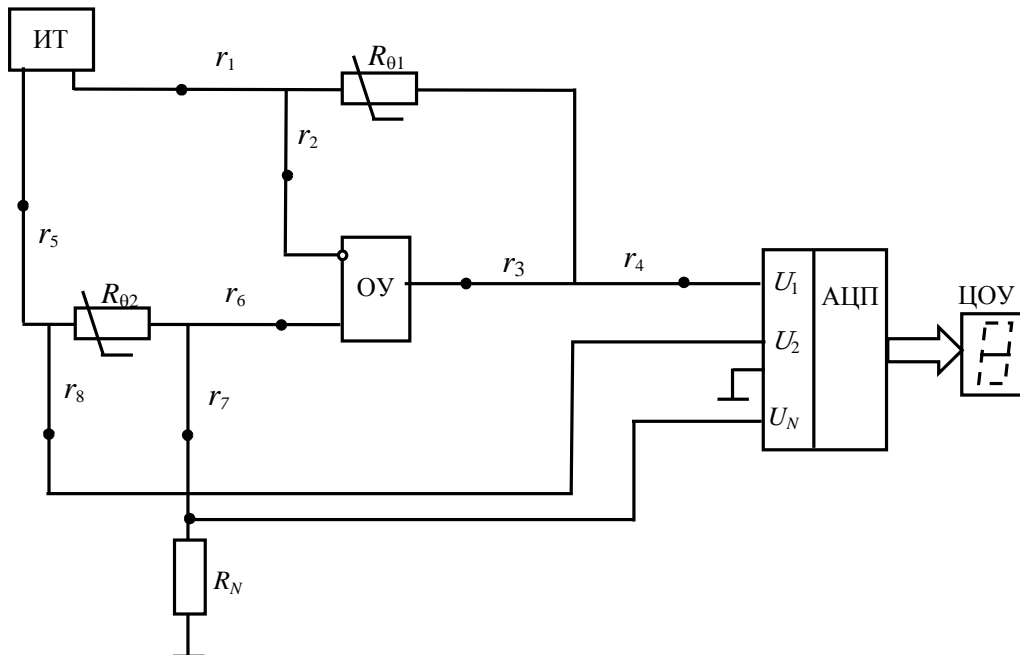
2) исключения влияния нестабильности тока питания ИЦ;

3) исключения влияния изменения сопротивлений проводов соединения ПТС с ИЦ.

Последняя проблема является наиболее сложной. ПТС имеют сравнительно небольшое приращение собственного сопротивления, а длина линии связи (ЛС), соединяющей ПТС с ИЦ, иногда составляет несколько сотен метров, в связи с чем определенное влияние на результат измерения оказывают сопротивления проводов ЛС, а также нестабильность этих сопротивлений. Для исключения (или уменьшения) этого влияния разработано множество

мостовых и дифференциальных схем ИЦ с трехпроводным и четырехпроводным включением ПТС [5—9]. Метрологический анализ показывает, что ИЦ имеют нелинейную характеристику преобразования, сравнительно низкую чувствительность, требуют тщательной подгонки сопротивлений проводов ЛС (погрешность $\pm 0,01$ Ом). Но даже при этом погрешность возникает вследствие изменения сопротивления проводов ЛС, которые обычно выполняются из меди и значительно (иногда соизмеримо с полным приращением сопротивления ПТС в узкопредельных измерителях разности температур) изменяют сопротивление при изменении температуры окружающей среды.

Данная проблема заставляет постоянно совершенствовать схемы ИЦ измерителей разности температур с целью устранения влияния сопротивлений проводов ЛС. Нами разработан [10] измеритель разности температур, в котором ИЦ выполнена по дифференциальной схеме сравнения сопротивлений $R_{\theta 1}$ и $R_{\theta 2}$ ПТС благодаря применению операционного усилителя (ОУ), который создает встречный ток в ПТС $R_{\theta 1}$. В результате на выходе ИЦ получается разность падений напряжений U_1 и U_2 на ПТС (см. рисунок) [10].



ПТС $R_{\theta 1}$ и $R_{\theta 2}$ подключены по четырехпроводной ЛС, сопротивления которых не нуждаются в подгонке, поскольку не влияют на результат измерения. Провода токовых зажимов ПТС r_1 , r_3 , r_5 , r_7 находятся за пределами цепи сравнения напряжений U_1 и U_2 . Через провода потенциальных зажимов ПТС r_2 , r_4 , r_6 , r_8 ток не течет из-за больших сопротивлений входов ОУ и АЦП. В результате ПТС $R_{\theta 1}$, $R_{\theta 2}$ и опорный резистор R_N соединены практически последовательно и через них течет один и тот же измерительный ток I источника тока (ИТ).

Выходное напряжение U_1 относительно инвертирующего входа ОУ равно $U_1 = IR_{\theta 1}$, а напряжение U_2 равно $U_2 = IR_{\theta 2}$ относительно неинвертирующего входа ОУ. Полагая потенциалы входов ОУ равными друг другу (с погрешностью напряжения смещения нуля ОУ), получаем $U_1 - U_2 = I(R_{\theta 1} - R_{\theta 2})$.

По сравнению с существующими аналогами, рассматриваемый измеритель выгодно отличается простотой и точностью измерения. Кроме ИТ, ОУ, АЦП и цифрового отсчетного устройства (ЦОУ) здесь имеется дополнительно лишь один резистор (R_N), а результат измерения не зависит как от измерительного тока I , так и от сопротивлений проводов ЛС.

Методика исследования. Рассмотрим работу измерителя с ПТС типа 100П, номинальная статическая характеристика которого для диапазона измерений от 0 до 850 °С описывается формулой*

$$R_{\theta} = R_0 W_{\theta} = R_0 (1 + A\theta + B\theta^2),$$

где R_{θ} — сопротивление ПТС, Ом, при температуре θ , °С, $R_0 = 100$ Ом — номинальное сопротивление ПТС при 0°С, $W_{\theta} = 1 + A\theta + B\theta^2$ — квадратичный полином Каллендара—Ван Дюзена; $A = 3,9690 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; $B = -5,841 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$; $W_{100} = R_{100}/R_0 = 1,3910$.

Если выбрать ПТС с одинаковыми статическими характеристиками, одинаковым начальным сопротивлением (при $\theta = 0$) $R_{01} = R_{02} = R_0$, то для выходного дифференциального напряжения

$$U_B = U_1 - U_2 = I(R_{01} - R_{02}) = IR_0(W_{01} - W_{02}) = IR_0 A \cdot \Delta\theta. \quad (1)$$

Поскольку в схеме измеряется разность падений напряжений на ПТС, то влиянием их самонагрева измерительным током на точность измерения можно пренебречь. Для $I = 2,6$ мА разности температур $\Delta\theta = 1,0$ °С будет соответствовать выходное напряжение

$$U_B = IR_0 A = 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 3,9690 \cdot 10^{-3} \approx 1,03 \text{ мВ.}$$

Следовательно, если требуется разработать узкопредельный измеритель разности температур, например, $\Delta\theta_m = 20,0$ °С, то для нормальной работы АЦП необходимо усиливать выходные напряжения ИЦ хотя бы в десять раз. Если выходные напряжения ИЦ будут поступать на входы АЦП без усиления, необходимо рассматривать достаточно широкий предел измерения разности температур $\Delta\theta_m = 200,0$ °С. В этом случае будем иметь максимальное выходное напряжение $U_{Bm} \approx 206$ мВ.

Целесообразно использовать АЦП двухтактного интегрирования на 3,5 десятичных разряда типов КР572ПВ2А либо КР572ПВ5А, погрешность которых меньше единицы низкого разряда кода [11]. Эти микросхемы имеют встроенный дешифратор и драйвер дисплея, благодаря чему напрямую соединяются с семисегментными цифровыми индикаторами. При этом микросхема КР572ПВ2А предназначена для работы с светодиодными индикаторами с общим анодом, а КР572ПВ5А — с жидкокристаллическими индикаторами. В разработке использован АЦП КР572ПВ2А (ICL7107CPLZ). Микросхема имеет следующие основные характеристики: напряжение смещения нуля аналоговой части < 10 мкВ, его температурный дрейф < 1,0 мкВ/°С, входные токи < 10 пА, линейность коэффициента преобразования < 0,2 е.м.р., а температурная стабильность < $5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, входное сопротивление > 20 МОм. АЦП имеет дифференциальные входы для измерительного и опорного напряжений; это позволяет измерять „плавающие“ напряжения относительно напряжений питания и существенно уменьшить влияние синфазных напряжений на точность измерения.

Выходному коду АЦП соответствует число $N_X = 10^3 U_B / U_N$, где опорное напряжение $U_N = IR_N$. В результате на выходе АЦП получается цифровой результат измерения в виде

$$N_X = \frac{10^3 (U_1 - U_2)}{U_N} = \frac{10^3 (R_{01} - R_{02})}{R_N} = \frac{10^3 \Delta R_{\theta}}{R_N} = \frac{10^3 R_0 A}{R_N} \cdot \Delta\theta. \quad (2)$$

* ГОСТ 6651-2009. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2019. 30 с.

Пределу измерения разности температур $\Delta\theta_m = 200,0$ °С должно соответствовать число $N_{Xm} = 2000$, поэтому из (2) следует

$$2000 = \frac{10^3 R_0 A}{R_N} \cdot \Delta\theta_m = \frac{10^3 \cdot 100 \cdot 3,9690 \cdot 10^{-3} \cdot 200}{R_N},$$

откуда получаем необходимое значение сопротивления опорного резистора $R_N = 39,69$ Ом, а опорное напряжение $U_N = IR_N = 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 39,69 \approx 103,2$ мВ.

Для максимального подавления сетевой помехи частота генератора тактовых импульсов АЦП f_T выбирается кратной частоте сети 50 Гц из условия [11]

$$4 \cdot 10^3 / f_T = 0,02n,$$

где n — целое число. Выбрав $n = 10$, получим

$$f_T = 4 \cdot 10^3 / 0,2 = 20 \text{ кГц.}$$

Частота тактовых импульсов АЦП может задаваться с помощью внешней RC-цепочки с резистором R_3 и конденсатором C_5 , номиналы которых выбираются из соотношения $R_3 C_5 \approx 0,45 / f_T$, причем для всех частот рекомендуется применять резистор R_3 с сопротивлением 100 кОм [11]. При этом емкость конденсатора будет равна

$$C_5 = \frac{0,45}{R_3 f_T} = \frac{0,45}{100 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^3} = 225 \text{ пФ.}$$

Используем в качестве R_3 резистор типа С2-29В-0,125-100 кОм $\pm 0,25\%$ -А-1, а C_5 — конденсатор типа К10-7В-МПО-50В-225 пФ $\pm 5\%$, температурный коэффициент емкости которого в диапазоне 0—70 °С составляет $+30 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹ [12].

Полный цикл преобразования микросхемы КР572ПВ2А длится 16000 периодов тактовых импульсов, следовательно, длительность одного преобразования составит

$$\tau_{\Pi} = 16 \cdot 10^3 / f_T = 16 \cdot 10^3 / 20 \cdot 10^3 = 0,8 \text{ с.}$$

В качестве цифровых индикаторов выбраны два семисегментных светодиодных индикатора с десятичной точкой типа АЛС 324Б, суммарный ток питания которых менее 70 мА.

Анализ погрешностей. Из (2) видно, что точность измерения разности сопротивлений ПТС обусловлена точностью и стабильностью напряжений $U_B = U_1 - U_2$ и U_N , следовательно, абсолютная погрешность измерения представится в виде суммы двух составляющих:

$$\Delta N_X = \frac{\partial N_X}{\partial U_B} \Delta U_B + \frac{\partial N_X}{\partial U_N} \Delta U_N,$$

откуда получаем выражение относительной погрешности

$$\delta(N_X) = \Delta(N_X) / N_X = \delta(U_B) - \delta(U_N). \quad (3)$$

Погрешностью ΔU_B является напряжение смещения нуля ОУ, поскольку точность и стабильность измерительного тока не вызывает погрешности измерения. Выбираем прецизионный ОУ типа К140УД24 (ICL7650) с автоподстройкой нуля по МДМ для низкочастотных сигналов, с коэффициентом усиления $A = 10^6$ и входным сопротивлением $R_{вх} = 10^{12}$ Ом, имеющий следующие предельные значения напряжения смещения нуля и его стабильности:

$U_{\text{СМ}} = \pm 5$ мкВ при температуре окружающей среды $T = 20$ °С; температурный коэффициент напряжения смещения нуля в диапазоне $T = (-55 \dots + 85)$ °С — $\alpha_T = \Delta U_{\text{СМ}} / \Delta T = 0,05$ мкВ/°С; коэффициент влияния нестабильности источников питания ($U_{\text{П}} = \pm 4,5 \dots \pm 5,5$ В) на напряжение смещения нуля $K_{\text{ВХ,ИП}} = 1,0$ мкВ/В.

Допустимое изменение напряжения смещения нуля ОУ в нормальных условиях (при 20 ± 5 °С) с учетом того, что если прибор настраивается при температуре 15 или 25 °С, то изменение температуры может быть равно $\Delta t = \pm 10$ °С. Следовательно, напряжение смещения нуля с учетом его температурного дрейфа будет

$$U_{\text{СМ}} + \Delta U_{\text{СМ}}(T) = U_{\text{СМ}} + \alpha_T \cdot 10^\circ\text{С} = 5 + 0,05 \cdot 10 = 5,5 \text{ мкВ.}$$

Изменение напряжения смещения нуля из-за нестабильности напряжения питания ОУ в допустимых пределах $\Delta U_{\text{П}} = \pm 1,0$ В составляет $\Delta U_{\text{СМ}}(\Delta U_{\text{П}}) = \pm 1,0$ мкВ.

Поскольку рассмотренные составляющие случайны и независимы, то суммарное значение напряжения смещения нуля ОУ будет

$$U_{\text{СМ}\Sigma} = \Delta U_{\text{В}} = \sqrt{[U_{\text{СМ}} + \Delta U_{\text{СМ}}(T)]^2 + [\Delta U_{\text{СМ}}(\Delta U_{\text{П}})]^2} = \sqrt{5,5^2 + 1,0^2} \approx 5,6 \text{ мкВ.}$$

Следовательно, для предела допускаемой основной приведенной погрешности получаем

$$\gamma(U_{\text{В}}) = \frac{5,6 \cdot 10^{-6} \cdot 100}{206 \cdot 10^{-3}} = 0,027 \%$$

— при $\Delta \theta_m = 200,0$ °С, и $\gamma(U_{\text{В}}) = 0,27$ %

— при $\Delta \theta_m = 20,0$ °С.

Погрешность $\delta(U_N)$ в (3) обусловлена неточностью и нестабильностью сопротивления резистора R_N , поскольку $U_N = IR_N$. В качестве резистора R_N выбираем наиболее распространенный прецизионный тонкопленочный резистор типа С2-29В. Они выпускаются с минимальным допускаемым отклонением от номинального сопротивления $\pm 0,1$ % и с минимальным температурным коэффициентом сопротивления $\alpha_T = \pm 25 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹*. Определим допустимое изменение сопротивления резистора R_N в нормальных условиях (при температуре $T = 20 \pm 5$ °С):

$$\Delta R_{NT} = \alpha_T \cdot \Delta T \cdot R_{NH} = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 10 R_{NH} = \pm 2,5 \cdot 10^{-4} R_{NH},$$

где R_{NH} — номинальное сопротивление резистора. Значит, суммарное абсолютное изменение сопротивления резистора в условиях эксплуатации для допуска $\pm 0,1$ % будет

$$\Delta R_{N\Sigma} = 0,001 R_{NH} + \Delta R_{Nt} = \pm 12,5 \cdot 10^{-4} R_{NH},$$

следовательно, $\delta(R_N) = \delta(U_N) = \Delta R_{N\Sigma} / R_{NH} \cdot 100 = 0,125$ %.

При суммировании учитываем, что погрешности $\delta(U_{\text{В}})$ и $\delta(U_N)$ в (3) случайны и независимы, подчиняются нормальному распределению, поэтому предел основной приведенной погрешности с доверительной вероятностью 0,95 определяем по формуле

$$\gamma(N_X) = \sqrt{[\gamma(U_{\text{В}})]^2 + [\delta(U_N)]^2},$$

* Прецизионные тонкопленочные резисторы С2-29В ОЖО.467.099 ТУ; ОЖО.467.130 ТУ, <http://www.rtkt.ru/files/s2-29v.pdf>.

в результате получаем: $\gamma(N_X) \approx 0,13\%$ при $\Delta\theta_m = 200,0\text{ }^\circ\text{C}$, и $\gamma(N_X) \approx 0,3\%$ — при $\Delta\theta_m = 20,0\text{ }^\circ\text{C}$. Здесь учтено, что поскольку $\delta(U_N)$ не зависит от диапазона измерения $\Delta\theta_m$, то $\delta(U_N) = \gamma(U_N)$.

Заключение. Оценим полученные результаты. Наиболее жесткие требования к измерительным преобразователям разности температур предъявляются в случае их использования в счетчиках тепловой энергии, в частности — систем квартирного теплоснабжения. Согласно требованиям [13], температура воды в трубе горячего водоснабжения может находиться в диапазоне $40 \leq \theta_T \leq 80\text{ }^\circ\text{C}$, а в трубе холодного водоснабжения — в диапазоне $30 \leq \theta_X \leq 70\text{ }^\circ\text{C}$. Следовательно, диапазон разности температур будет $10 \leq \Delta\theta \leq 50\text{ }^\circ\text{C}$. При этом предел приведенной погрешности измерения разности температур (без учета погрешности ПТС) не должен превышать $\pm 0,2\text{ }^\circ\text{C}$. Полученный выше результат $\gamma(N_X) \approx 0,3\%$ означает, что в разработанном измерителе разности температур эта погрешность при $\Delta\theta_m = 20,0\text{ }^\circ\text{C}$ не превышает $\pm 0,06\text{ }^\circ\text{C}$, следовательно, измеритель пригоден для использования в счетчиках тепловой энергии систем квартирного теплоснабжения. Отметим также, что измеритель выгодно отличается от аналогов совокупностью следующих свойств, которые следуют из формул (1) и (2):

— обеспечивается линейное преобразование разности сопротивлений ПТС в напряжение, что весьма важно для измерения этого напряжения;

— обеспечивается максимально возможная чувствительность преобразования измеряемой разности температур в напряжение $S = U_B / (R_{\theta 1} - R_{\theta 2}) = I$;

— исключено влияние на результат измерения сопротивлений проводов ЛС, благодаря чему ЛС может иметь практически любую длину и не нуждаться в подгонке сопротивлений соединительных проводов;

— на результат измерения не влияют изменения измерительного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геращенко О. А., Гордов А. Н., Еремина А. К. и др. Температурные измерения. Справочник. Киев: Наук. думка, 1989. 704 с.
2. Крамарухин Ю. Е. Приборы для измерения температуры. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
3. Industrial temperature measurement. Basics and practice. ABB Automation products GmbH, 2013. 324 p.
4. Заничковская Л. В. и др. О методических погрешностях некоторых схем измерения разности температур // Измерительная техника. 1972. № 11. С. 47—49.
5. Барковский Ю. М., Гаврилов Ю. М. Совершенствование вторичных приборов для измерения температуры и разности температур // Приборы и системы управления. 1994. № 1. С. 26—27.
6. Пат. РФ 2025675, МПК G01K 3/08 (1990.01). Устройство измерения температуры и разности температур / В. Д. Смирнов, В. Г. Матвеев. Заяв. 5057900/10 от 06.08.1992; опубл. 30.12.1994.
7. Пат. АМ 2120, МПК G01K 7/16 (2006.01). Измерительный преобразователь разности температур / Н. А. Шахкамян, А. С. Шахкамян. Заяв. АМ20070115 от 31.10.2007; опубл. 25.07.2008.
8. Пат. РФ 2405131, МПК G01K 3/08 (2006.01), G01K 7/16 (2006.01). Устройство измерения разности температуры с терморезистивными датчиками / С. Д. Леонов, А. А. Максимчук, Ю. В. Троцкий. Заяв. 2009143053/28 от 20.11.2009; опубл. 27.11.2010.
9. Пат. АМ 2571, МПК G01K 7/00 (2009.01). Аналого-цифровой преобразователь разности температур / Н. А. Шахкамян. Заяв. № АМ20100058 от 17.05.2010, опубл. 25.11.2011.
10. Пат. АМ 3417, МПК G01K 7/00 (2020.01). Электрический преобразователь разности температур / Б. М. Мамиконян, Х. Б. Мамиконян. Заяв. АМ20200069 от 14.08.2020; опубл. 16.11.2020.

11. Федорков Б. Г., Телец В. А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
12. Справочник РЭА (резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства). Минск: Беларусь, 1994. 592 с.
13. Соколов Е. А. Теплофикация и тепловые сети. М.: Энергоиздат, 1982. 360 с.

Сведения об авторе

Борис Мамиконович Мамиконян — д-р техн. наук, профессор; Национальный политехнический университет Армении, Гюмрийский филиал, кафедра ЭЭИАС;
E-mail: gyumri@polytechnic.am

Поступила в редакцию 19.10.22; одобрена после рецензирования 27.12.22; принята к публикации 28.02.23.

REFERENCES

1. Gerashchenko O.A., Gordov A.N., Eremina A.K. et al. *Temperaturnyye izmereniya. Spravochnik* (Temperature Measurements Directory), Kyiv, 1989, 704 p. (in Russ.)
2. Kramarukhin Yu.E. *Pribory dlya izmereniya temperatury* (Temperature Measuring Instruments), Moscow, 1990, 208 p. (in Russ.)
3. *Industrial temperature measurement. Basics and practice*, ABB Automation products GmbH, 2013, 324 p.
4. Zanchkovskaya L.V. et al. *Measurement Techniques*, 1972, no. 11, pp. 47–49. (in Russ.)
5. Barkovsky Yu. M., Gavrilov Yu. M. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 1994, no. 1, pp. 26–27. (in Russ.)
6. Patent RU 2025675, G01K 3/08 (1990.01), *Ustroystvo izmereniya temperatury i raznosti temperatur* (Device for Measuring Temperature and Temperature Difference), V.D. Smirnov, V.G. Matveev, Patent application no. 5057900/10, Priority 06.08.1992, Published 30.12.1994. (in Russ.)
7. Patent AM 2120, G01K 7/16 (2006.01), *Izmeritel'nyy preobrazovatel' raznosti temperatur* (Temperature Difference Measuring Transducer), N.A. Shakhkamyam, A.S. Shakhkamyam, Patent application no. AM20070115, Priority 31.10.2007, Published 25.07.2008. (in Russ.)
8. Patent RU 2405131, G01K 3/08 (2006.01), G01K 7/16 (2006.01), *Ustroystvo izmereniya raznosti temperatury s termorezistivnymi datchikami* (Device for Measuring Temperature Difference with Thermoresistive Sensors), S.D. Leonov, A.A. Maksimchuk, Yu.V. Troitskiy, Patent application no. 2009143053/28, Priority 20.11.2009, Published 27.11.2010. (in Russ.)
9. Patent AM 2571, G01K 7/00 (2009.01), *Anologo-tsifrovoy preobrazovatel' raznosti temperatur* (Analog-to-Digital Temperature Difference Converter), N.A. Shakhkamyam, Patent application no. AM20100058, Priority 17.05.2010, Published 25.11.2011. (in Russ.)
10. Patent AM 3417, G01K 7/00 (2020.01), *Elektricheskiy preobrazovatel' raznosti temperatur* (Electrical Temperature Difference Transducer), B.M. Mamikonyan, Kh.B. Mamikonyan, Patent application no. AM20200069, Priority 14.08.2020, Published 16.11.2020. (in Russ.)
11. Fedorkov B.G., Telets V.A. *Mikroskhemy TSAP i ATSP: funktsionirovaniye, parametry, primeneniye* (DAC and ADC Microcircuits: Operation, Parameters, Application), Moscow, 1990, 320 p. (in Russ.)
12. *Spravochnik REA (rezistory, kondensatory, transformatory, drosseli, kommutatsionnyye ustroystva)* (REA Handbook (Resistors, Capacitors, Transformers, Chokes, Switching Devices)), Minsk, 1994, 592 p. (in Russ.)
13. Sokolov E.A. *Teplofikatsiya i teplovyye seti* (Heat Supply and Heat Networks), Moscow, 1982, 360 p. (in Russ.)

Data on author

Boris M. Mamikonyan — Dr. Sci., Professor; National Polytechnic University of Armenia, Gyumri Branch, Department of EEIAS; E-mail: gyumri@polytechnic.am

Received 19.10.22; approved after reviewing 27.12.22; accepted for publication 28.02.23.