

УДК 536.31

Ю.Й. Стрілецький, А.Г. Винничук, О.Є. Середюк

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

МЕТРОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ВИМІРЮВАННЯ РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР

Розроблений пристрій для прецизійного вимірювання різниці температур на базі терморезисторів. Розглянута запропонована методологія вимірювання різниці температур та її практична реалізація. В статті наведена структурна схема розробленого пристрою для прецизійного вимірювання різниці температур на базі терморезисторів. Викладені особливості методики калібрування пристрою і наведені результати його метрологічних досліджень на базі теорії невизначеності у вимірюваннях.

Ключові слова: терморезистор, різниця температур, схемна реалізація, калібрування, невизначеність.

Вступ

Температура технологічного об'єкта чи робочого середовища є одним із найбільш поширених вимірюваних параметрів практично у будь-якій галузі промисловості. Вона суттєво впливає на властивості і характеристики всіх технологічних об'єктів, і в багатьох випадках є найважливішим інформаційним параметром, який безпосередньо впливає на якісні характеристики процесів і об'єктів. Тому вимірювання температури є важливим інформаційним процесом, а підвищення точності вимірювання є актуальним завданням.

Для вимірювання температури використовуються багато різних підходів та способів [1]. Аналіз літературних джерел [2 – 4] показав, що забезпечення високої точності вимірювання абсолютної температури є складним завданням внаслідок наявності похибки пристроїв для вимірювання температури і нелінійності градуувальних характеристик первинних перетворювачів у широкому діапазоні вимірюваних температур. Тому для вирішення низки практичних завдань, з метою підвищення точності вимірювань, варто використовувати вимірювання не абсолютного значення температури, а різниці температур.

В цьому аспекті відомі наукові дослідження [3] стосовно аналізу точності вимірювання різниці температур приладом, який базується на застосуванні платинових термоперетворювачів.

Водночас, як відомо, одними із найбільш поширених давачів температури є терморезистори із мідного дроту. Вони забезпечують достатню для практики лінійність зміни опору в діапазоні температури від 0 до 400 градусів [5]. Однак точність їх виготовлення без калібрування не забезпечує можливість вимірювати абсолютне значення температури краще $0,1^{\circ}\text{C}$ [5].

Тому постає проблема розроблення пристрою для прецизійного вимірювання різниці температур з

використанням терморезисторів та розроблення методики його калібрування для забезпечення можливості вимірювання різниці температур з високою точністю [4].

Метою роботи є розроблення та метрологічне дослідження пристрою для прецизійного вимірювання різниці температур.

Виклад основного матеріалу

Для реалізації поставленої задачі пропонується в основу пристрою покласти два терморезистори, які характеризуються малою інерційністю та високою чутливістю. Однак суттєвим недоліком таких давачів є низька відтворюваність характеристик і зміна її в часі, що потребує періодичного калібрування для забезпечення високої точності вимірювання.

У випадку вимірювання різниці температур процес калібрування можна суттєво спростити. Розглянемо це більш детально.

Під впливом температури змінюється електричний опір терморезистора за законом [5]:

$$R(t) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (1)$$

де α – температурний коефіцієнт електричного опору; R_0 – опір терморезистора при початковій температурі; t – зміна температури терморезистора відносно початкової.

Коефіцієнт α визначається матеріалом терморезистора, а R_0 – його фізичними властивостями за початкових умов.

Для перетворення зміни опору в напругу через терморезистор пропускають невеликий струм. Таким чином напруга буде залежати від температури, струму і параметрів терморезистора:

$$U(t) = i \cdot R_0 + i \cdot R_0 \cdot \alpha \cdot t, \quad (2)$$

де i – сила струму.

Для вимірювання різниці температур використовується щонайменше два термоопори. Тому із

врахуванням індивідуальних особливостей кожного з них отримуємо залежності:

$$U_1(t) = i_1 \cdot R_{01} + i_1 \cdot R_{01} \cdot \alpha_1 \cdot t, \quad (3)$$

$$U_2(t) = i_2 \cdot R_{02} + i_2 \cdot R_{02} \cdot \alpha_2 \cdot t. \quad (4)$$

Оскільки струм, що протікає через терморезистор, і початкове значення опору з часом змінюються несуттєво, то залежності (3) – (4) можна подати із заміною змінних $B = i \cdot R_0$ і $K = i \cdot R_0 \cdot \alpha$:

$$U_1(t) = B_1 + K_1 \cdot t, \quad (5)$$

$$U_2(t) = B_2 + K_2 \cdot t. \quad (6)$$

Таким чином отримано дві лінійні функції (5) – (6) залежності напруги від температури. Оскільки за допомогою термоопорів необхідно вимірювати різницю температур, то отримуємо такий вираз:

$$U(t_D) = K_1 \cdot t_1 - K_2 \cdot t_2 + B_1 - B_2 = (K_1 - K_2) \cdot t_D + (B_1 - B_2). \quad (7)$$

Залежність (7) є функцією різниці напруги від різниці температури. Її параметрами є коефіцієнти K і B , які визначаються фізичними властивостями терморезисторів. Для спрощення запровадимо ще одну заміну:

$$K_D = K_1 - K_2, \quad (8)$$

$$B_D = B_1 - B_2. \quad (9)$$

Тоді (7) із врахуванням (8)–(9) набуде вигляду:

$$U(t_D) = K_D \cdot t_D + B_D. \quad (10)$$

Значення коефіцієнтів K і B залежать від струму, що протікає через терморезистори. Тому при калібруванні двом терморезисторам надають однакову температуру і змінюючи струм через один із них встановлюють нульову напругу $U(t_D)$. Таким чином B_D перетворюється в нуль.

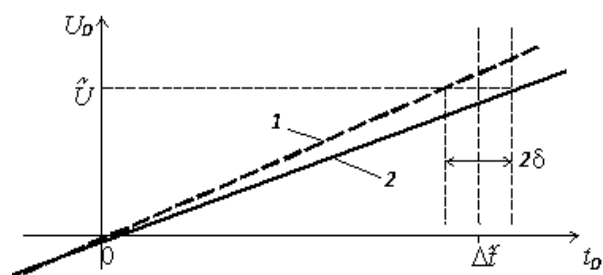
Для усунення багатозначності необхідно виконати умову, при якій коефіцієнти B_1 і B_2 стануть однаковими. Для цього можна скористатися підстроюванням струму, що буде протікати через один із термоопорів так, щоб при однаковій різниці температур ($t_D = 0$) напруга $U(t_D)$ також була рівна нулю. За таких умов залежність напруги від різниці температур буде лінійною функцією, яка залежить тільки від одного коефіцієнта K_D . Для числового встановлення цього коефіцієнта необхідно задати певний перепад температури між двома термооперами і виміряти різницю напруг, яка при цьому утворилася. Наприклад, один із термоопорів поміщається в середовище із температурою t_2 , а інший залишається в тому середовищі, де калібрувався при температурі t_1 перший опір.

При вимірюванні різниці між t_1 і t_2 завжди буде присутня похибка. Тому формулу для визначення коефіцієнта перетворення K_D пристрою вимірювання різниці температур при його калібруванні можна записати:

$$K_D = \frac{\tilde{U}}{\Delta \tilde{t} \pm \delta}, \quad (11)$$

де \tilde{U} – напруга, яка виміряна при калібруванні за різницею температур $\Delta \tilde{t}$; δ – похибка вимірювання різниці температур $\Delta \tilde{t}$.

Як відомо з (11), в коефіцієнті K_D присутня складова δ , яка зменшує точність визначення t_D , що ілюструється на рис. 1.



1, 2 – при похибці вимірювання $-\delta$ і $+\delta$ відповідно

Рис. 1. Графічне зображення залежності $U_D = f(t_D)$ для двох термоопорів

При вимірюванні різниці температур t_D за відомим коефіцієнтом K_{Di} і вимірявши напругу між терморезисторами, можна записати:

$$t_D = \frac{U_D}{K_D} = \frac{U_D}{\tilde{U}} \cdot (\Delta \tilde{t} \pm \delta) = \frac{U_D \cdot \Delta \tilde{t}}{\tilde{U}} \pm \frac{U_D \cdot \delta}{\tilde{U}}. \quad (12)$$

Із даної залежності видно, що абсолютна похибка виміряної різниці температури t_D залежить від похибки вимірювання калібрувальної різниці температур δ і співвідношення між напругами U_D/\tilde{U} . Чим більше буде \tilde{U} , тим точнішими будуть результати вимірювання.

Так, наприклад, якщо вибрати для калібрування різницю температури 30°C і вимірювати цю температуру із похибкою $\pm 0,1^\circ\text{C}$, а самі вимірювання проводити поблизу різниці температур 1°C , то співвідношення напруг буде $\frac{U_D}{\tilde{U}} \approx \frac{1}{30}$, а абсолютне

відхилення - $\pm \frac{1}{30} \cdot 0,1 = 0,0033^\circ\text{C}$. Отже, після калібрування теоретично є можливим вимірювати різницю температур близько 1°C із абсолютним відхиленням $\pm 0,0033^\circ\text{C}$.

Пристрій, що дає можливість вимірювати різницю температури, можна побудувати за наступною структурною схемою (рис. 2).

Джерело опорної напруги $U_{оп}$ формує струм, який використовується для перетворення опору терморезистора в напругу. Струм через один із терморезисторів регулюється для забезпечення рівності напруг на виході перетворювачів за однакової тем-

пературі на терморезисторах при калібруванні. Далі напруги, пропорційні температурі і залежні від опорної напруги, віднімаються і подаються на керуваний підсилювач. Напруга із виходу керуваного підсилювача подається на вхід аналого-цифрового перетворювача. Опорною напругою при перетворенні є та ж напруга, яка використовувалась для формування струмів терморезисторів.

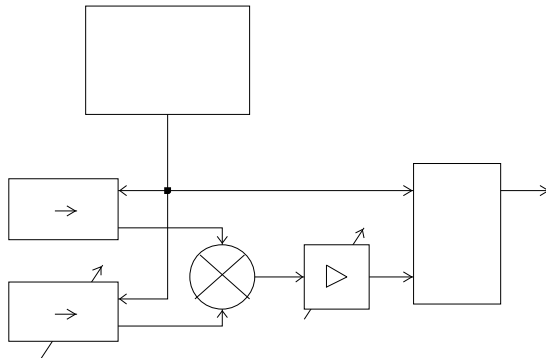


Рис. 2. Структурна схема пристрою для вимірювання різниці температур

Використання одного джерела опорної напруги для формування сигналу і його перетворення в код робить незалежним вихідний код від значення опорної напруги.

Сучасні засоби вимірювання використовують цифрові засоби відображення, яким передують аналого-цифрове перетворення і засоби математичної обробки. Тому потреба в калібруванні мінімальна. Достатньо провести вимірювання напруги на виході кожного з термоперетворювачів при двох відомих температурах t_1 і t_2 . За цими температурами шукають коефіцієнти K_1 , B_1 для визначення температури за допомогою першого давача:

$$U_{T1} = B_1 + K_1 \cdot t_1, \quad (13)$$

$$U_{T2} = B_2 + K_2 \cdot t_2. \quad (14)$$

Далі шукаються коефіцієнти K_2 , B_2 із залежності

$$U_D(t_D) = (K_1 - K_2) \cdot t_D + (B_1 - B_2), \quad (15)$$

використовуючи напругу $U_D(0)$ на виході в момент, коли давачі знаходяться при однаковій температурі. При цьому маємо:

$$B_2 = B_1 + U_D(0) \quad (16)$$

і напругу $U_D(t_1 - t_2)$ при встановленні датчиків за різних температур:

$$K_2 = K_1 - \frac{U_D \cdot (t_1 - t_2) - (B_1 - B_2)}{(t_1 - t_2)}. \quad (17)$$

Викладені міркування показують, що використання розробленого пристрою дає можливість проводити лабораторні вимірювання перепадів температури з роздільною здатністю $0,01$ °C. При цьому, для її калібрування не потрібні складні системи і взірці

матеріалів із відомою температурою плавлення.

Індивідуальне калібрування розробленого пристрою проводилось за допомогою двох лабораторних термометрів, покази яких t_1 і t_2 наведені в табл. 1. Еталонні термометри атестовані з абсолютною похибкою $\Delta(t) = 0,1$ °C в діапазоні від 0 до 50 °C. Враховуючи, що дана абсолютна похибка визначає стандартну невизначеність типу В, яка за умови рівномірного закону розподілу ймовірності появи будь-якого результату з даного діапазону вимірювань дає можливість записати:

$$u_B(t_D) = \sqrt{\left(\frac{\Delta(t)}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(t)}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,082, \text{ °C}. \quad (18)$$

Стандартну невизначеність типу В вимірювання напруги U_D (табл. 1) розраховуємо, виходячи з того, що найменший розряд застосовуваного цифрового вольтметра становить $0,001$ В. Тоді невизначеність типу В вимірювання становить:

$$u_B(U_D) = \frac{\Delta(U_D)}{\sqrt{3}} = 0,578, \text{ мВ}. \quad (19)$$

Стандартну невизначеність типу В визначення коефіцієнта перетворення K_D розраховуємо наступним чином:

$$u_B(K_D) = \sqrt{\left(\frac{\partial K_D}{\partial t_D}\right)^2 \cdot u_B^2(t_D) + \left(\frac{\partial K_D}{\partial U_D}\right)^2 \cdot u_B^2(U_D)}. \quad (20)$$

З врахуванням аналітичних виразів для часткових похідних з (11), формула (20) набуває вигляду:

$$u_B(K_D) = \sqrt{\left(\frac{U_D}{t_D^2}\right)^2 \cdot u_B^2(t_D) + \left(\frac{1}{t_D}\right)^2 \cdot u_B^2(U_D)}. \quad (21)$$

Результати розрахунку для кожного вимірювання наведені в табл. 1.

Стандартна невизначеність типу А визначення коефіцієнта K_D обчислюється як експериментальне стандартне відхилення середнього арифметичного значення результату вимірювання:

$$u_A(K_D) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (K_{Di} - \overline{K_D})^2} = 0,0016 \text{ В / °C}, \quad (22)$$

де K_{Di} – значення коефіцієнта перетворення пристрою вимірювання різниці температур при i -му вимірюванні; $\overline{K_D}$ – середнє арифметичне значення коефіцієнта перетворення за результатами всіх вимірювань.

Слід зазначити, що для подальших розрахунків приймаємо максимальне значення стандартної невизначеності типу В коефіцієнта K_D (табл. 1), тобто $u_B(K_D) = 0,0048 \text{ В / °C}$.

Результати калібрування пристрою для вимірювання різниці температур

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_D = t_1 - t_2, ^\circ\text{C}$	$U_D, \text{В}$	$K_D, \text{В}/^\circ\text{C}$	$U_B(K_D), \text{В}/^\circ\text{C}$
15	33	-18	-3,55	0,1972	0,0009
15	29	-14	-2,77	0,1978	0,0011
20	28,5	-8,5	-1,753	0,2062	0,0019
20	25,5	-5,5	-1,108	0,2016	0,0032
20	23,5	-3,5	-0,72	0,2057	0,0048
23,5	20	3,5	0,71	0,2028	0,0047
25,5	20	5,5	1,096	0,1992	0,0029
28,5	20	8,5	1,667	0,1961	0,0018
29	15	14	2,81	0,2007	0,0011
33	15	18	3,5	0,1944	0,0008

Сумарна невизначеність за умови відсутності кореляції між вище вказаними складовими буде визначатись наступним чином:

$$u_C = \sqrt{u_A^2(K_D) + u_B^2(K_D)} = 0,0051, \text{В}/^\circ\text{C}. \quad (23)$$

Розширена невизначеність при заданій ймовірності 0,95 визначається через коефіцієнт охоплення $k=2$:

$$U = k \cdot u_C = 0,0102 \text{ В}/^\circ\text{C}, \text{ при } P=0,95. \quad (24)$$

ВИСНОВКИ

Розроблений пристрій для прецизійного вимірювання різниці температур на базі терморезисторів. Розглянуті теоретичні засади функціонування розробленого пристрою і наведена його структурна схема. Викладені практичні аспекти методики його калібрування.

Здійснений розрахунок значення розширеної невизначеності визначення коефіцієнта перетворення вимірюваної різниці температур, що обґрунтовує можливість використання розробленого пристрою для прецизійного вимірювання різниці температур.

Список літератури

1. Matthias Nau. *Elektrische Temperaturmessung* / Matthias Nau. – JUMO GmbH & Co. KG // ISBN-13:978-3-935742-06-1. – 156 p.
2. Hots Natalija. *Analiza czynników składowych błędów pirometrii radiacyjnej* / Natalija Hots, Tadeusz Piątkowski // *Pomiary Automatyka Kontrola*. – 2009. – №11. – P. 874-877 (Польща).
3. Олеськів Т. *Метрологічне забезпечення вимірювачів різниці температур на основі платинових термоперетворювачів з дводротовою лінією зв'язку* / Т. Олеськів, В. Яцук // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2013. – Вип. 74. – С. 25-28.
4. *Метрологическое обеспечение диодной термометрии* / Ю.М. Шварц, А.Н. Иващенко, М.М. Шварц и др. // *Приборы*. – 2007. – Т. 86, № 8. – С. 7-11.
5. *Метрологія. Термоперетворювачі опору з платини, міді та нікелю. Загальні технічні вимоги та методи вимірювань: ДСТУ ГОСТ 6651:2014. – [Чинний від 2014-11-1, на заміну ДСТУ 2858-94 (ГОСТ 6651-94)].* – К.: Мінекономрозвитку України, 2014. – III. – 25 с.

Надійшла до редколегії 10.12.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.В. Руженцев, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР

Ю.Й. Стрилецкий, А.Г. Винничук, О.Е. Середюк

Разработано устройство для прецизионного измерения разности температур на базе терморезисторов. Рассмотрена предложенная методология измерения разности температур и ее практическая реализация. В статье приведена структурная схема разработанного устройства для прецизионного измерения разности температур на базе терморезисторов. Изложены особенности методики калибровки устройства и приведены результаты его метрологических исследований на базе теории неопределенности в измерениях.

Ключевые слова: терморезистор, разница температур, схемная реализация, калибровка, неопределенность.

METROLOGICAL RESEARCH DEVICE FOR PRECISION MEASUREMENT OF THE TEMPERATURE DIFFERENCE

Yu.Y. Striletskiy, A.G. Vynnychuk, O.J. Seredjuk

The device for precision measurement of temperature difference at the thermistor was developed. The proposed methodology of measuring the temperature difference and its practical implementation was considered. The block diagram of the developed device for precision measurement of temperature difference at the thermistor was shown in the article. The above features of the device calibration methods and the results of its metrological studies based on the theory of uncertainty in measurements.

Keywords: thermistor, temperature difference, circuit implementation, calibration, uncertainty.