

УДК: 536.5, 621.38

ISSN 1729-4428 (Print)  
ISSN 2309-8589 (Online)

О.С. Кшевецький

## Оцінка порівняно малих різниць температур з використанням резистивних датчиків температури. Частина 1

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна, [shevos@gmail.com](mailto:shevos@gmail.com)

Описана методика оцінки порівняно малих різниць температур з використанням 4-х резистивних датчиків температури, які електрично з'єднані за мостовою схемою. Описані приклад експериментальної оцінки різниці температур на протилежних зовнішніх поверхнях керамічних пластинах термоелектричного модуля та приклади тестування деяких елементів оціночної системи. Розглянуті фактори, які можуть впливати на результати вказаної оцінки.

**Ключові слова:** вимірювання різниці температур, резистивні датчики температури, термоелектричний модуль.

Подано до редакції 09.04.2025; прийнято до друку 11.07.2025.

### Вступ

Деякі застосування (наприклад, ті що описані в [1 – 5]) термоелектричних теплових насосів (ТТН) на основі термоелектричних модулів (ТЕМ) можуть передбачати роботу цих ТТН і ТЕМ при порівняно малих різницях температур між їх відповідними тепловиділяючими та теплопоглинальними теплообмінними частинами. У зв'язку з цим актуальною є експериментальна оцінка порівняно малих різниць температур. Дані про порівняно малі різниці температур можуть використовуватися і при дослідженні властивостей, параметрів, характеристик термоелектричних матеріалів та елементів [6]. Експериментальна інформація про порівняно малі різниці температур може бути потрібна також при реалізації чи дослідженні інших процесів.

Метою цієї роботи є оцінка порівняно малих різниць температур на основі експериментальних даних, які отримуються з використанням резистивних датчиків температури (RTD) [7 – 15].

Для реалізації такої мети завданням цієї роботи є отримати приклад використання 4-х резистивних датчиків температури, які електрично з'єднані за мостовою схемою для оцінки порівняно малих

різниці температур, отримати інформацію про особливості такого їх застосування та отримати результати тестування деяких елементів оціночної системи.

### I. Опис методики оцінки та особливостей її реалізації

У цій роботі для оцінки порівняно малих різниць температур використовувалася схема, яка відображена на рис. 1. Схема, яка відображена на рис. 2 також може бути використана для оцінки порівняно малих різниць температур. У цій роботі схема, яка відображена на рис. 2 використовувалася для порівняння.

На рис. 1 представлена схема відповідного використання 4-х RTD. На рис. 2 представлена схема відповідного використання 2-х RTD.

На схемі рис. 1:  $R1 - R4 - RTD$ ;  $r5 - r12$  – опори з'єднувальних провідників, наприклад, виводів RTD, контактів, дротів та інших з'єднувальних елементів;  $K1$  – комутаційний елемент (комутатор, ключ). При цьому датчики  $R1$  та  $R2$  мають температуру  $T_1$ , а датчики  $R3$  та  $R4 - T_2$ .

На схемі рис. 2:  $R1 - R2 - RTD$ ;  $r3 - r6$  – опори

з'єднувальних провідників, наприклад, виводів RTD, контактів, дротів та інших з'єднувальних елементів;  $K1$  та  $K2$  – комутаційні елементи (комутатори, ключі). При цьому датчик  $R1$  має температуру  $T_1$ , а датчик  $R2$  –  $T_2$ .

Зокрема, значення напруги між вузлами 1 та 2 на рис. 1  $U_{12}$  та напруги між вузлами 1 та 2 на рис. 2  $U_{12}$  можна використовувати для оцінки (визначення) різниці температур  $\Delta T$ :

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (1)$$

та зміни різниці температур  $\varphi$ :

$$\varphi = (\Delta T)_A - (\Delta T)_B, \quad (2)$$

де  $(\Delta T)_A = (T_1 - T_2)_A$  – різниця температур за умов  $A$ ;  $(\Delta T)_B = (T_1 - T_2)_B$  – різниця температур за умов  $B$ .

Якщо умови  $B$  такі, що при цьому різниця температур має значення  $0^\circ\text{C}$ , тоді можна вважати, що різниця температур і зміна різниці температур однакові (тоді  $\Delta T = \varphi$ ).

Напруга між вузлами 3 та 4 на рис. 1  $U_{34}$  у випадку

використання джерела струму залежить, зокрема, від температур  $T_1$  та  $T_2$ . Зокрема, значення напруги між вузлами 3 та 4 на рис. 1  $U_{34}$  в такому випадку можна використовувати для оцінки (визначення) середньої температури  $T_{av}$ :

$$T_{av} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3)$$

В експериментах у цій роботі використовувалися RTD в необхідній кількості з 8-ми RTD з номінальним опором при температурі  $0^\circ\text{C}$   $1000 \Omega$ , розмірами приблизно  $2.3 \text{ мм} \times 2.1 \text{ мм} \times 0.9 \text{ мм}$  та довжиною виводів приблизно  $6 \text{ мм}$ . RTD з'єднувалися з іншими елементами відповідної схеми монтажними дротами довжиною приблизно  $22.5 \text{ см}$  та опором приблизно  $0.09 \Omega$  (параметри вказані для одного окремо взятого монтажного дроту).

Калібрування всіх RTD та їх підбір за параметрами у цій роботі не здійснювалися. Здійснювалося лише спрощене тестування одного з RTD разом із його з'єднувальними провідниками. Для цього тестування використовувався датчик температури TMP117 з відповідною реєструючою

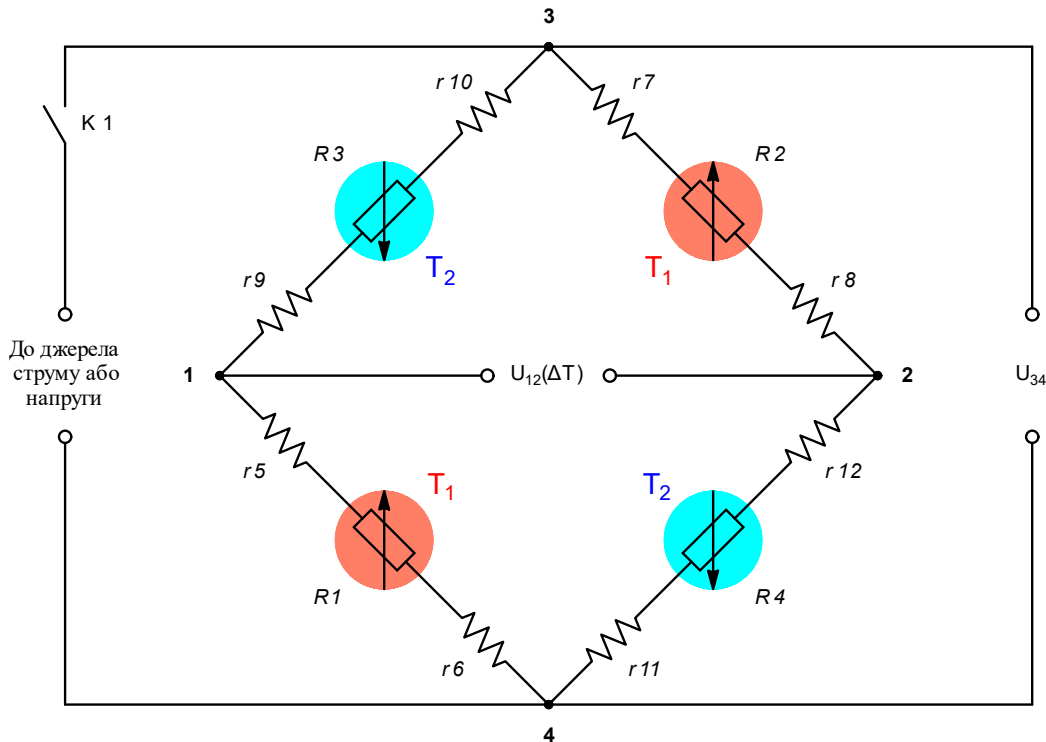


Рис. 1. Схема з'єднання 4-х RTD для оцінки порівняно малих різниць температур та, при використанні джерела струму, середньої температури.

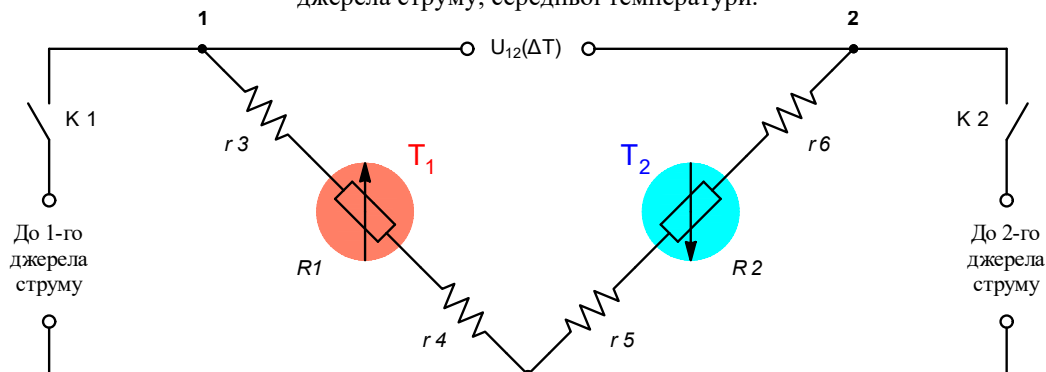


Рис. 2. Схема з'єднання 2-х RTD для оцінки різниць температур.

комп'ютеризованою системою. RTD, який тестувався був прикріплений безпосередньо до датчика температури TMP117. Обидва датчика розміщувалися в об'ємі, в якому температура з часом поступово змінювалася. Опір RTD, який тестувався вимірювався (визначався) з використанням двох мультиметрів (для реєстрації сили струму і напруги) з функцією збору (реєстрації) даних MS8218 та комп'ютера. Для поставлення у відповідність (зіставлення) отриманих з різних вимірювачів експериментальних даних використовувалася функція Excel «перегляд» («LOOKUP»). Результати вказаного спрощеного тестування представлені на рис. 3. та рис. 4. Наближена залежність електричного опору одного з RTD разом з його з'єднувальними провідниками (що тестувалися) від температури RTD (графік цієї наближеної до експериментальних даних функції на рис. 3. та рис. 4 відображений зеленим кольором) була отримана в Wolfram Mathematica з використанням функцій «FindFormula» та «Fit». Приблизний вираз цієї наближеної залежності наведений в описах до рисунків 3 та 4.

В цій роботі використовувалися стабілізовані джерела електричного струму (зокрема, для збудження RTD). Приклад результатів тестування одного з цих джерел наведений на рис. 5 (сила струму та напруга при цьому реєструвалися з використанням мультиметрів MS8218).

З врахуванням того, що результати оцінки змін різниць та різниць температур при використанні схем рис. 1 та рис. 2 залежать, зокрема, від значень напруг  $U_{12}$  була здійснена спрощена оцінка нестабільності значень напруг  $U_{12}$  при використанні схем рис. 1 та рис. 2 з вказаними вище RTD при кімнатних температурах. При цьому для створення умов, в яких би на протязі тривалого часу різниці температур між окремо взятими RTD могли б мати стабільні значення

(з практичного погляду) вказані RTD були розміщені на невеликих відстанях один від одного в мідному циліндричному стакані з зовнішнім діаметром приблизно 14 мм, внутрішнім діаметром приблизно 10 мм, внутрішньою довжиною вздовж осі приблизно 40 мм, який, в свою чергу, був розміщений в теплоізолюваному об'ємі. Для збудження двох RTD згідно із схемою рис. 2 використовувалися два стабілізовані джерела електричного струму з приблизно однаковими значеннями сили струму приблизно 1 мА. Для збудження чотирьох RTD згідно із схемою рис. 1 використовувалися ті ж два стабілізовані джерела електричного струму, які були з'єднані паралельно (використовувалися джерела струму, які призначені для такого з'єднання) так, що сумарне значення сили струму становило приблизно 2 мА. Напруги  $U_{12}$  на схемах рис. 1 та рис. 2 при цьому реєструвалися з використанням мультиметра MS8218. Одним з факторів, які можуть впливати на результати вимірювання напруг  $U_{12}$  є можлива нестабільність джерела/джерел електричного струму збудження RTD. На рис. 6 представлені результати вказаної оцінки. З рис. 6 видно, що нестабільність напруги  $U_{12}$  при використанні 4-х RTD, які з'єднані за мостовою схемою рис. 1 значно менша ніж нестабільність напруги  $U_{12}$  при використанні 2-х RTD згідно із схемою рис. 2.

Далі в цій роботі при використанні схеми рис. 1 для оцінки (визначення) зміни різниці та різниці температур в окремо взятому експерименті спрощено будемо вважати силу струму, який генерує джерело струму  $I$  постійною величиною.

Відомо, що для визначення електричного опору платинових RTD для інтервалу температур від  $0^{\circ}\text{C}$  до  $850^{\circ}\text{C}$  можуть використовувати вираз [8]:

$$R_{t,(Pt)} = R_{0,(Pt)} \cdot \left( 1 + 3.9083 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \cdot t - 5.775 \cdot 10^{-7} \frac{1}{(^{\circ}\text{C})^2} \cdot t^2 \right), \quad (4)$$

де  $t$  – температура датчика в  $0^{\circ}\text{C}$ ;  $R_{t,(Pt)}$  – опір платинового RTD при температурі  $t$ ;  $R_{0,(Pt)}$  – опір платинового RTD при температурі  $0^{\circ}\text{C}$ .

Для визначення температури  $t$  платиновими RTD, які при  $0^{\circ}\text{C}$  мають опір  $1000 \Omega$  на основі (4) отримаємо (після розв'язування квадратного рівняння):

$$t \approx 0.08658 \cdot \left( 39083 - 3.31662 \cdot \sqrt{1.59862 \times 10^8 - 21000 \cdot R_{t,(Pt,1000\Omega)} \frac{1}{\Omega}} \right)^{\circ}\text{C}, \quad (5)$$

де  $R_{t,(Pt,1000\Omega)}$  – опір платинового RTD, який при  $0^{\circ}\text{C}$  має опір  $1000 \Omega$ , при температурі  $t$ .

Припустимо, що платиновий RTD при  $0^{\circ}\text{C}$  має

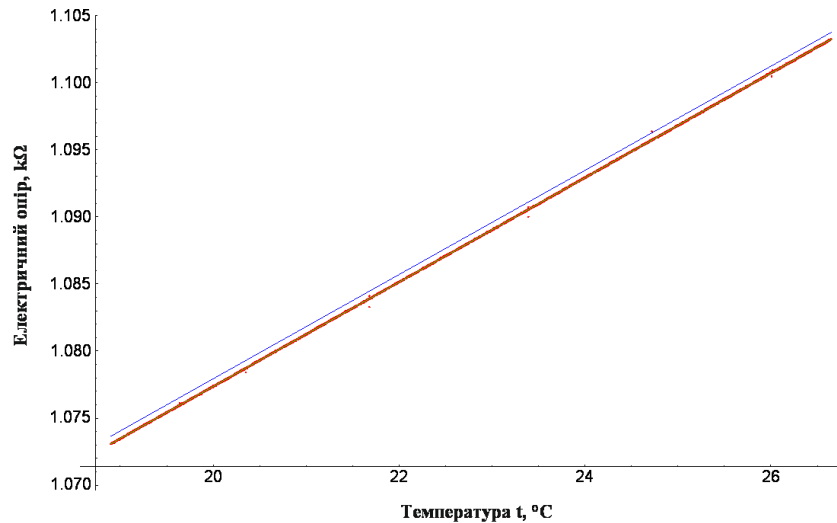
опір  $1000 \Omega$ . Якщо використати вираз (4), тоді опір такого датчика при температурі  $100^{\circ}\text{C}$   $R_{100,(Pt,1000\Omega)}$  буде мати значення:

$$R_{100,(Pt,1000\Omega)} \approx 1385.055\Omega \quad (6)$$

Якщо ж продиференціювати (4), отримаємо:

$$\frac{dR_{t,(Pt)}}{dt} = R_{0,(Pt)} \cdot \left( 3.9083 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^{\circ}\text{C}} - 1,155 \cdot 10^{-6} \left( \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right)^2 \cdot t \right) \quad (7)$$

$$\frac{dR_{t,(Pt,1000\Omega)}}{dt} = 1000\Omega \cdot \left( 3.9083 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^{\circ}\text{C}} - 1,155 \cdot 10^{-6} \left( \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right)^2 \cdot t \right) \quad (8)$$

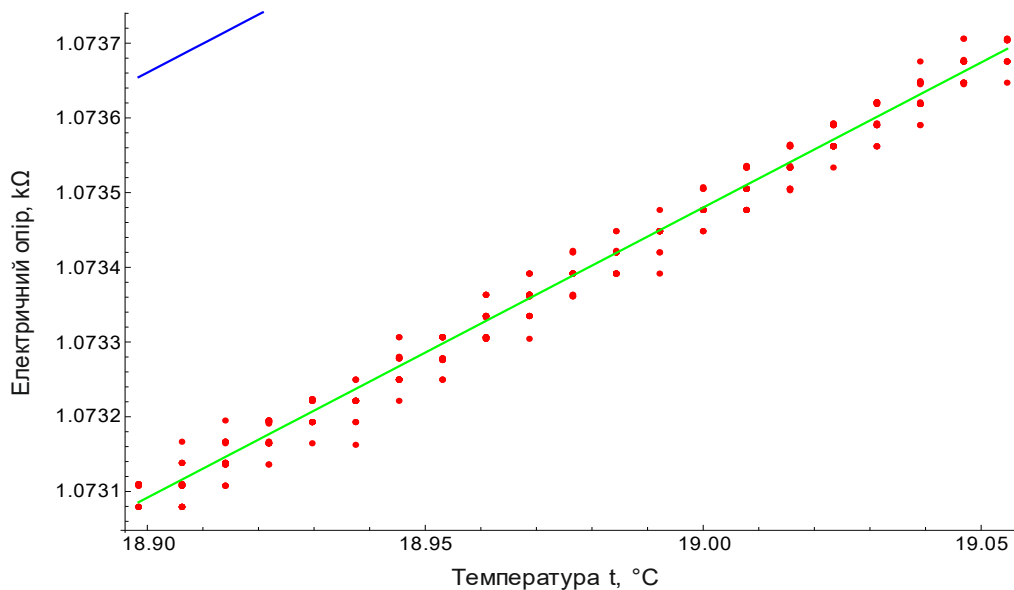


**Рис. 3.** Результати спрощеного тестування одного з RTD разом з його з'єднувальними провідниками: червоним кольором відображені експериментальні значення електричного опору RTD разом з його з'єднувальними провідниками, що поставлені у відповідність значенням температури RTD, які визначалися за даними датчика TMP117; синім кольором відображений графік наближеної залежності, яку можуть використовувати для платинових RTD, які при температурі 0°C мають електричний опір 1kΩ

$$R_{t,(Pt,1k\Omega)} = 1k\Omega \cdot 1 + 3.9083 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ C} \cdot t - 5.775 \cdot 10^{-7} \frac{1}{(^\circ C)^2} \cdot t^2, \text{ де } R_{t,(Pt,1k\Omega)} - \text{наближене значення}$$

електричного опору вказаного платинового RTD при температурі  $t$ , яка виражена в 0°C [8]; зеленим кольором відображений графік наближеної залежності для одного з RTD разом з його з'єднувальними провідниками (що тестувалися), якій приблизно відповідає залежність

$$R_t = 1k\Omega \cdot (0.99998 + 3.8528 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ C} \cdot t + 8.1138 \cdot 10^{-7} \frac{1}{(^\circ C)^2} \cdot t^2, \text{ де } R_t - \text{наближене значення електричного опору RTD разом з його з'єднувальними провідниками при температурі RTD } t, \text{ яка виражена в } 0^\circ C.$$



**Рис. 4.** Частина результатів спрощеного тестування одного з RTD разом з його з'єднувальними провідниками: червоним кольором відображені експериментальні значення електричного опору RTD разом з його з'єднувальними провідниками, що поставлені у відповідність значенням температури RTD, які визначалися за даними датчика TMP117; синім кольором відображений графік наближеної залежності, яку можуть використовувати для платинових RTD, які при температурі 0°C мають електричний опір 1kΩ

$$R_{t,(Pt,1k\Omega)} = 1k\Omega \cdot 1 + 3.9083 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ C} \cdot t - 5.775 \cdot 10^{-7} \frac{1}{(^\circ C)^2} \cdot t^2, \text{ де } R_{t,(Pt,1k\Omega)} - \text{наближене значення}$$

електричного опору вказаного платинового RTD при температурі  $t$ , яка виражена в 0°C [8]; зеленим кольором відображений графік наближеної залежності для одного з RTD разом з його з'єднувальними провідниками (що тестувалися), якій приблизно відповідає залежність

$$R_t = 1k\Omega \cdot (0.99998 + 3.8528 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ C} \cdot t + 8.1138 \cdot 10^{-7} \frac{1}{(^\circ C)^2} \cdot t^2, \text{ де } R_t - \text{наближене значення електричного опору RTD разом з його з'єднувальними провідниками при температурі RTD } t, \text{ яка виражена в } 0^\circ C.$$

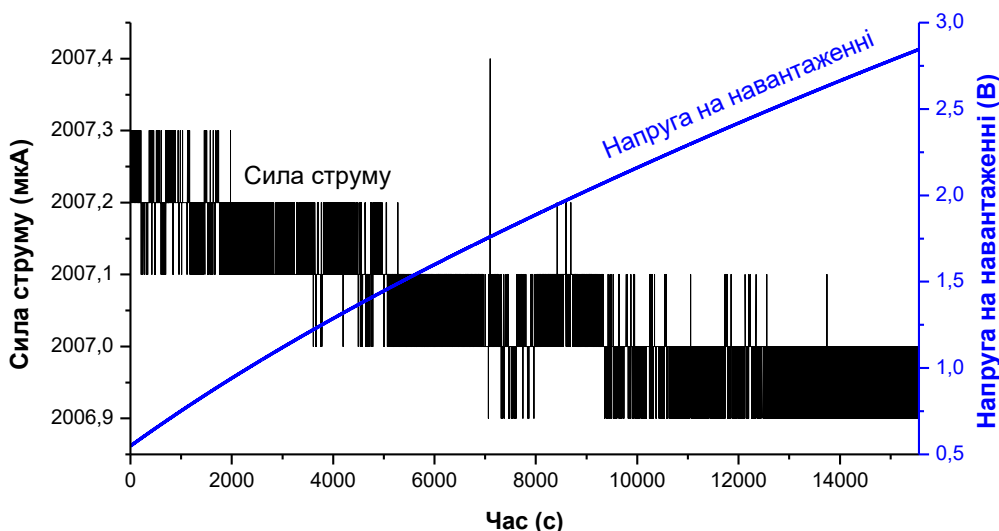


Рис. 5. Залежності сили струму через послідовно з'єднані стабілізоване джерело струму і його навантаження та напруги на навантаженні від часу.

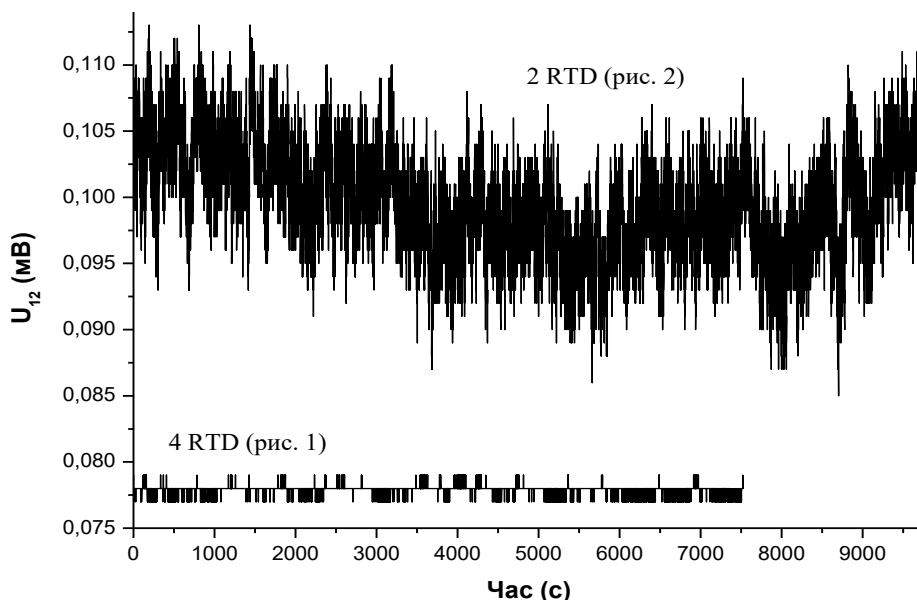


Рис. 6. Залежності напруг  $U_{12}$  на схемах рис. 1 та рис. 2 від часу (експерименти з використанням 4-х RTD (рис. 1) та 2-х RTD (рис. 2) здійснювалися не одночасно).

На рис. 7 представлений графік залежності (8).

З врахуванням результатів описаного вище тестування одного з RTD далі у цій роботі для визначення порівняно малих різниць температур та змін різниць температур з використанням схеми рис. 1 при визначених значеннях середньої температури, вираженої в  $0^{\circ}\text{C}$   $t_{av}$  спрощено використовувалися фіксовані значення  $\frac{dR_{t,(Pt,1000\Omega)}}{dt}$  із залежності (8) і графіка рис. 7 для цих значень  $t_{av} \left( \frac{dR_{t,(Pt,1000\Omega)}}{dt} \right)_{t=t_{av}}$ . Зміна різниці температур спрощено визначалася за

формулою:

$$\varphi \approx \frac{(U_{12})_A - (U_{12})_B}{\left( \frac{dR_{t,(Pt,1000\Omega)}}{dt} \right)_{t=t_{av}} \cdot 0.5I}, \quad (9)$$

де  $(U_{12})_A$  – напруга  $U_{12}$  за умов  $A$ ;  $(U_{12})_B$  – напруга  $U_{12}$  за умов  $B$ ;  $(U_{12})_A - (U_{12})_B$  – зміна напруги  $U_{12}$ .

Середня температура  $t_{av}$  при використанні схеми рис. 1 спрощено визначалася за виразом, який можна отримати з (5):

$$t_{av} \approx 0.08658 \cdot \left( 39083 - 3.31662 \cdot \sqrt{1.59862 \times 10^8 - 21000 \cdot \frac{(U_{34})_A + (U_{34})_B}{2I} \cdot \frac{1}{\Omega}} \right) ^{\circ}\text{C}, \quad (10)$$

де  $(U_{34})_A$  – напруга  $U_{34}$  за умов  $A$ ;  $(U_{34})_B$  – напруга  $U_{34}$  за умов  $B$ ;  $\frac{(U_{34})_A + (U_{34})_B}{2}$  – середнє значення напруги  $U_{34}$ .

## II. Приклад застосування описаної методики для оцінки зміни різниці температур на протилежних теплообмінних поверхнях TEM

Описана вище методика із застосуванням 4-х RTD згідно із схемою рис. 1 була використана для оцінки зміни різниці температур на протилежних теплообмінних поверхнях TEM (на протилежних зовнішніх поверхнях керамічних пластин TEM). RTD  $R1$  та  $R2$  були прикріплені до однієї зовнішньої поверхні керамічної пластини TEM з маркуванням TEC1-12706, а RTD  $R3$  та  $R4$  були прикріплені до іншої (протилежної) зовнішньої поверхні керамічної пластини цього ж TEM (для створення відповідних теплових контактів). Для збудження RTD використовувалося те ж саме стабілізоване джерело струму, результати тестування якого наведені вище на рис. 5 з тим же значенням сили струму (приблизно 2 мА). Для порівняно малої зміни різниці температур

у часі на протилежних теплообмінних поверхнях TEM використовувалося інше стабілізоване джерело струму (до якого у певний момент часу під'єднувався TEM) із значенням сили струму приблизно 50 мкА. Сила струму, який протікав через TEM реєструвалася з використанням мультиметра MS8218. Напруги  $U_{12}$ ,  $U_{34}$  та напруга на TEM реєструвалися з використанням мультиметрів MS8218. Результати відповідного експерименту представлені на рис. 8 – рис. 11.

Зміна напруги  $U_{12}$  на графіку рис. 8 відображена по відношенню до мінімального значення напруги  $U_{12}$  в інтервалі часу від 0 с до 7.5 с, коли струм через TEM був відсутній (рис. 9). Якщо припустити, що при мінімальних значеннях напруги  $U_{12}$  в цьому інтервалі часу  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ , тоді зміну різниці температур на графіку рис. 8 можна вважати різницею температур. Зміна різниці температур розраховувалася за формулою (9). При цьому для  $t_{av}$  спрощено приймалося значення приблизно  $24.461^\circ\text{C}$  (рис. 11), а для  $I$  спрощено приймалося значення 2007 мкА.

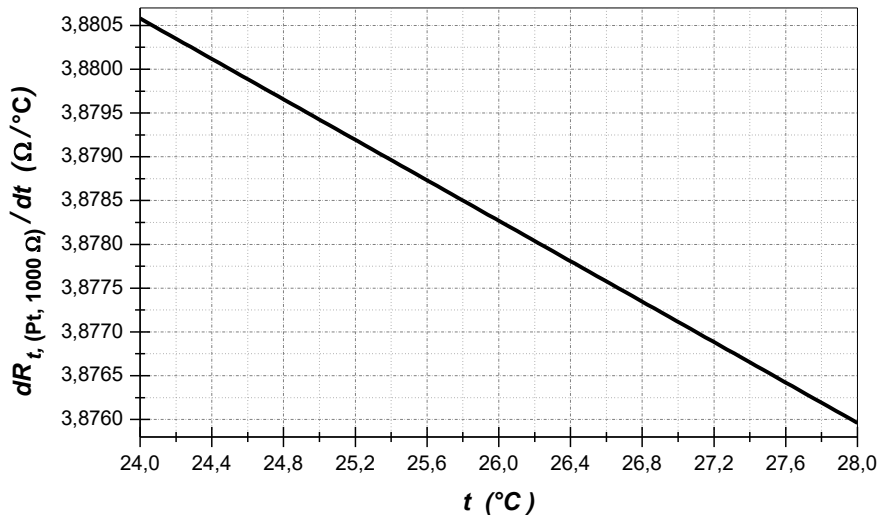


Рис. 7. Графік залежності  $\frac{dR_t(Pt, 1000\Omega)}{dt}$  від  $t$ , який отриманий на основі виразу (8) (для платинових RTD, опір яких при  $0^\circ\text{C}$  має значення  $1000\Omega$ ).

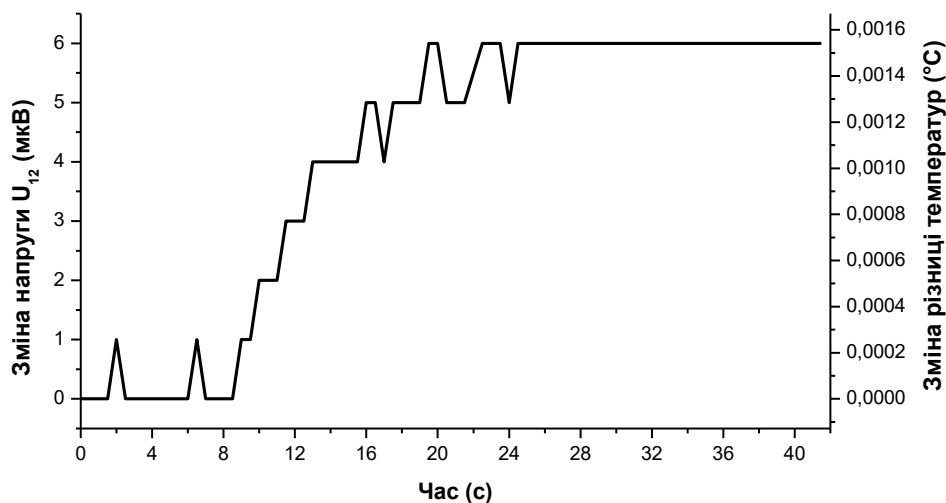


Рис. 8. Залежність зміни різниці температур (яка визначалася, зокрема, за зміною напруги  $U_{12}$  (рис. 1)) на протилежних зовнішніх поверхнях керамічних пластин TEM під дією зміни сили струму через TEM (рис. 9) від часу.

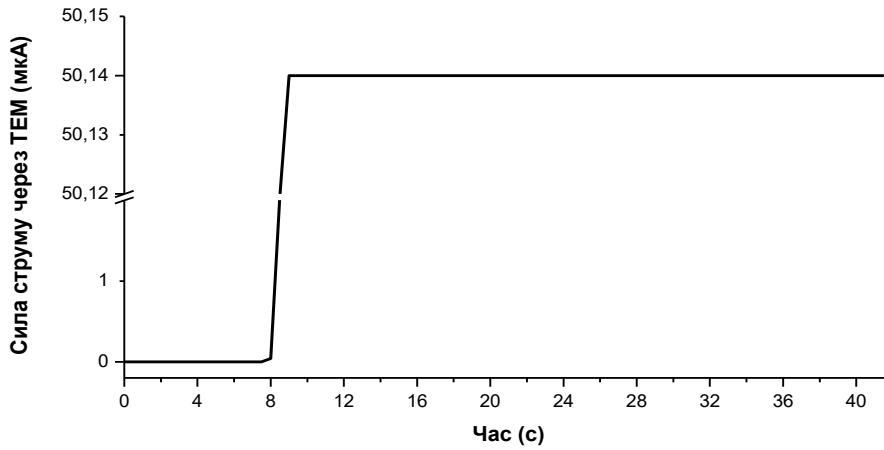


Рис. 9. Залежність сили струму через TEM від часу.

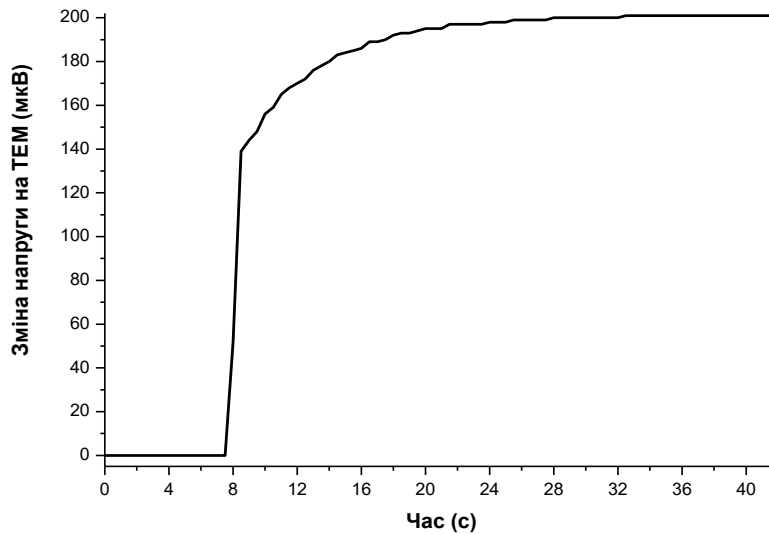


Рис. 10. Залежність зміни напруги на TEM при зміні сили струму через цей модуль (рис. 9) від часу.

### III. Приклад тестування чутливості схеми рис. 1

Для тестування чутливості схеми рис. 1 був здійснений наступний експеримент. Використовувалися ті ж RTD і в тих же просторово-теплових умовах, що і в описаній вище спрощеній оцінці нестабільності значень напруг  $U_{12}$  при використанні схем рис. 1 та рис. 2 (результати якої відображені на рис. 6). В цьому експерименті для збудження RTD використовувалося стабілізоване джерело струму із значенням сили струму приблизно 3 мА. Відокремлено від 4-х RTD на відстані повітряного проміжку в декілька міліметрів знаходився нагрівник (як нагрівник використовувався інший RTD подібних розмірів). Нагрівник був задіяний приблизно на 3 – 4 секунди. Потужність нагрівника при цьому становила приблизно 2.5 мВт.

Експериментальні дані про зміну напруги  $U_{12}$  були отримані реєстратором напруги з входним опором приблизно 10 М $\Omega$  на основі, зокрема, 32-розрядного аналого-цифрового перетворювача.

На рис. 12 відображений результат цього експерименту.

Зміна напруги  $U_{12}$  на графіку рис. 12 відображена по відношенню до середнього значення напруги  $U_{12}$  в інтервалі часу від 0 секунд до 25 секунд на цьому ж графіку рис. 12.

Значення еквівалентної зміни різниці температур на рис. 12 тотожні значенням  $\varphi$ , що розраховані за формулою (9). При цьому для  $\left(\frac{dR_{t,(Pt,1000\Omega)}}{dt}\right)_{t=t_{av}}$  спрощено приймалося значення  $3.88 \frac{\Omega}{^\circ C}$  (рис. 7), а для  $I$  спрощено приймалося значення 3000 мкА.

Якщо припустити, що на протязі всього експерименту температури RTD  $R1$  та  $R2$  були однакові (рис. 1) і також однакові були температури RTD  $R3$  та  $R4$  (рис. 1), тоді еквівалентну зміну різниці температур на рис. 12 можна вважати зміною різниці температур. Реальні значення температур RTD  $R1 - R4$  під час експерименту – невідомі.

Якщо додатково до попереднього припущення ще припустити, що температури всіх 4-х RTD (рис. 1) при не задіяному нагрівникові (за відсутності нагрівання приблизно на протязі перших 25 секунд на графіку рис. 12) однакові (наприклад, у випадку, коли всі 4 RTD є однакові і знаходяться в однакових умовах теплообміну з навколишнім для них середовищем), тоді можна вважати, що еквівалентна зміна різниці температур на рис. 12 є різницею температур.

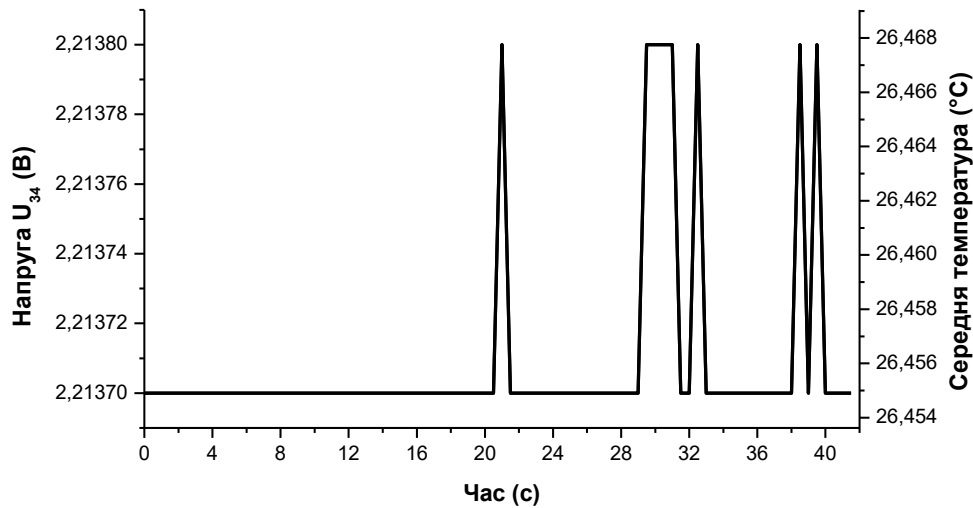


Рис. 11. Залежність середньої температури  $t_{av}$ , (яка визначалася, зокрема, за значенням напруги  $U_{34}$  (рис. 1)) на протилежних зовнішніх поверхнях керамічних пластин ТЕМ від часу.

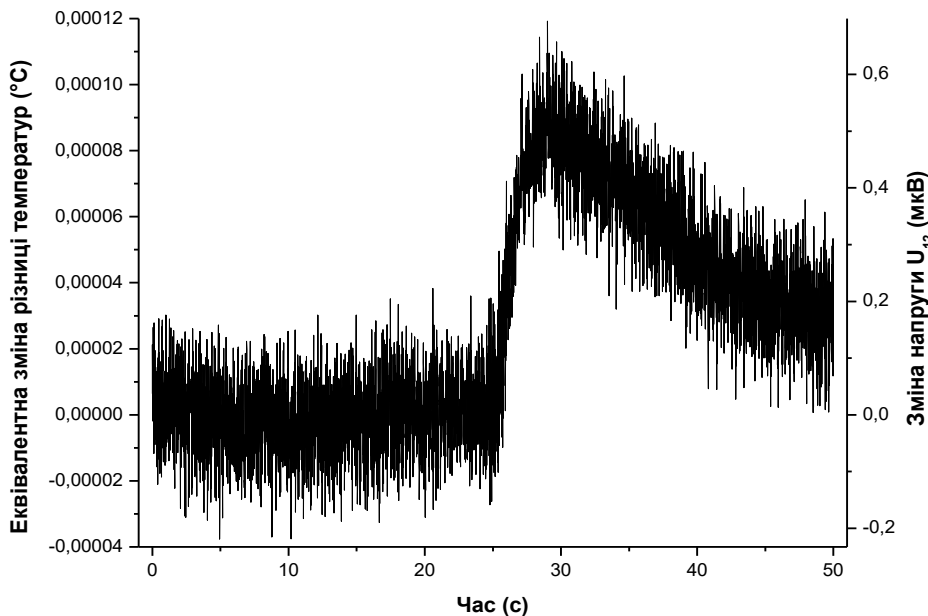


Рис. 12. Залежність зміни напруги  $U_{12}$  (рис.1;  $I \approx 3 \text{ mA}$ ) та еквівалентної зміни різниці температур від часу (зокрема, при дії нагрівника на протязі приблизно 3 – 4 секунд).

#### IV. Коротка інформація про фактори, які можуть впливати на результати оцінки та особливості застосованого методу оцінки

Результати оцінки є результатом взаємодії об'єкта дослідження та оціночної системи. На результати оцінки можуть впливати в більшій чи в меншій мірі наступні фактори:

- процеси теплообміну (теплопровідністю, конвекційного, випромінюванням), які пов'язані з використанням оціночної системи, зокрема, RTD;
- процеси масообміну, які пов'язані з використанням оціночної системи, зокрема, RTD (за наявності; наприклад, повітряні потоки);
- властивості (параметри, характеристики) RTD;
- властивості (параметри, характеристики)

джерела/джерел струму чи напруги, яке/які використовуються/використовуються для збудження RTD;

опори (зокрема, їх температурні залежності) провідників, які використовуються для з'єднань RTD у відповідній схемі;

тепло Джоуля, яке виділяється при протіканні струму збудження через RTD;

термоелектричні явища (за наявності, з практичного погляду);

властивості та особливості теплових контактів між RTD та досліджуванним об'єктом;

особливості розташування RTD та досліджуваного об'єкту;

властивості, параметри, характеристики, особливості вимірювачів (вимірювальних приладів), наприклад, вхідний електричний опір, дрейф, шуми, нелінійність;

особливості використання вимірювачів



(вимірювальних приладів);

перехідні процеси у досліджуваній системі, в яку входять об'єкт дослідження та оціночна система (зокрема, у вимірювачах);

електромагнітні збурення, перешкоди, завади, наведення;

гальванічні чи сигнальні зв'язки (за наявності) між вимірювачами (вимірювальними приладами);

особливості синхронізації вимірювачів (вимірювальних приладів);

особливості поставлення у відповідність (зіставлення) даних з різних вимірювачів чи вимірювальних приладів;

особливості математичної обробки експериментальних даних.

Зменшити вплив тепла Джоуля, яке виділяється при протіканні струму збудження через RTD (і, зокрема, може зумовлювати зміну температур RTD та досліджуваного об'єкту) на досліджувану систему і відповідно на результати оцінки можна, якщо вимірювання здійснювати при короткочасних імпульсах струму збудження RTD (створювати які при використанні схеми рис. 1 можна, наприклад, з використанням комутуючого елементу  $K1$ ). Використання короткочасних імпульсів струму збудження RTD може також сприяти підвищенню чутливості оціночної (вимірювальної) системи.

Зменшити вплив параметрів RTD на результати оцінки можна, якщо здійснити калібрування кожного окремо взятого датчика (як варіант, разом з його з'єднувальними провідниками) та підбір RTD (як варіант, разом з їх з'єднувальними провідниками) за параметрами. Також зменшити похибку оцінки, пов'язану з параметрами RTD можна, якщо використати окремі апроксимаційні поліноми для кожного окремо взятого датчика (як варіант, разом з його з'єднувальними провідниками) для застосовуваного інтервалу температур.

На рис. 1 RTD  $R1$  та  $R2$  мають однакову температуру. В реальній ситуації температури цих датчиків можуть дещо відрізнятись внаслідок їх різного просторового розміщення, можливо різних їх параметрів, теплових умов, струмів збудження. Те ж можна сказати і про RTD  $R3$  та  $R4$ . Зменшити похибку оцінки, пов'язану з цим фактором можна, якщо спроектувати, виготовити та використовувати відповідно спеціалізовані RTD, наприклад, такі датчики, в яких би два окремо взятих RTD з наближеними до однакових параметрами мали б між собою покращений тепловий контакт і були б розміщені в одному корпусі на мінімізованій один відносно одного відстані (наприклад, електрично ізолювані один відносно одного резистивні елементи

конструктивно були б розміщені в одному корпусі один над іншим або один поруч з іншим).

На результати оцінки змін різниць температур, різниць температур та температур можуть впливати і інші фактори.

Звичайно ж, для повної висвітленої з практичного погляду оцінки результуючої можливої похибки оцінки змін різниць температур, різниць температур та температур потрібно враховувати всі фактори, які з практичного погляду можуть впливати на результат відповідних досліджень.

## Висновок

Використання 4-х RTD згідно із схемою рис. 1 потребує використання лише одного джерела електричного струму для збудження RTD. Натомість використання 2-х RTD згідно із схемою рис. 2 потребує використання двох джерел електричного струму для збудження RTD.

Використання 4-х RTD згідно із схемою рис. 1 у порівнянні з використанням 2-х RTD згідно із схемою рис. 2 може суттєво зменшити нестабільність напруги  $U_{12}$  (рис. 6). Зокрема з використанням значень напруги/напруг  $U_{12}$  здійснюється оцінка порівняно малих різниць температур.

При незмінній температурній чутливості використання 4-х RTD згідно із схемою рис. 1 у порівнянні з використанням 2-х RTD згідно із схемою рис. 2 збільшує приблизно в 2 рази виділення тепла Джоуля в датчиках, які мають тепловий контакт з об'єктом дослідження.

Використання 4-х RTD згідно із схемою рис. 1 при використанні джерела струму у порівнянні з використанням 2-х RTD може зменшити похибку визначення середньої температури при одночасному з цим визначенні різниці температур або спростити технічну реалізацію «паралельного», при використанні 2-х RTD не одночасного визначення середньої температури та різниці температур.

Може виникнути потреба в розробці, створенні та використанні спеціалізованих для використання в схемі рис. 1 RTD.

Описані вище дослідження мають оціночний (певною мірою наближений) характер. Тому для отримання більш точних експериментальних результатів можуть знадобитися інші дослідження.

**Кшевецький О.С.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри термоелектрики та медичної фізики.

[1] O.S. Kshevetsky, *Estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer processes between heat pumps and moving substance, part 1*, Journal of Thermoelectricity, (6), 39 (2017).

[2] O.S. Kshevetsky, *Estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer processes between heat pumps and moving substance, part 2*, Journal of Thermoelectricity, (2), 56 (2018).

[3] O.S. Kshevetsky, O.V. Orletskyi, *Estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer processes between heat pumps and moving substance, part 3*, Journal of Thermoelectricity, (4), 40 (2019).

- [4] O.S. Kshevetsky, R.G. Cherkez, Yu.I. Mazar, *Estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer processes between heat pumps and moving substance. Part 4*, Journal of Thermoelectricity, (4), 64 (2023); <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2023-4-64-75>
- [5] O. Kshevetsky, *About some of the possibilities of using heat pumps in processes that involve the movement of substance*, Thermophysics and Thermal Power Engineering, 41(3), 70 (2019); <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.10>.
- [6] S. Bhattacharya, H.J. Goldsmid, *Determination of the thermoelectric figure of merit through the maximum temperature depression using the peltier cooling effect*, Journal of Thermoelectricity, (1), 26 (2018).
- [7] S. Shantanu, *Platinum RTD sensor based multi-channel high-precision temperature measurement system for temperature range  $-100^{\circ}\text{C}$  to  $+100^{\circ}\text{C}$  using single quartic function*, Cogent Engineering, 5(1), 1558687 (2018); <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1558687>.
- [8] L. Piechowski, A. Muc, J. Iwaszkiewicz, *The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence*, Energies, 14, 8214 (2021); <https://doi.org/10.3390/en14248214>.
- [9] A. Idzkowski, Z. Warsza, *Temperature difference measurement with using two RTD sensors as example of evaluating uncertainty of a vector output quantity*, Robotic Systems and Applications, 1(2), 53, (2021); <https://doi.org/10.21595/rsa.2021.22143>.
- [10] L. Anatychuk, R. Kobylanskyi, V. Lysko, A. Prybyla, I. Konstantynovych, A. Kobylanska, M. Havrylyuk, V. Boychuk, *Method of calibration of thermoelectric sensors for medical purposes*. Journal of Thermoelectricity, (3), 37, (2023); <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2023-3-37-49>.
- [11] L. Anatychuk, R. Kobylanskyi, I. Konstantynovych, Y. Rozver, V. Tiumentsev, *Calibration bench for thermoelectric converters of heat flux*, Journal of Thermoelectricity, (5), 65 (2016).
- [12] L. Anatychuk, R. Kobylanskyi, I. Konstantynovych, O. Nitsovych, R. Cherkez, *Technology for manufacturing thermoelectric microthermopiles*, Journal of Thermoelectricity, (6), 49 (2016).
- [13] R. Kobylanskyi, A. Prybyla, I. Konstantynovych, V. Boychuk, *Results of experimental research on thermoelectric medical heat flow sensors*, Journal of Thermoelectricity, (3–4), 68 (2022); <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2022-3-4-68-81>.
- [14] R. Kobylanskyi, V. Lysko, A. Prybyla, I. Konstantynovych, A. Kobylanska, N. Bukharayeva, V. Boychuk, *Technological modes of manufacturing medical purpose thermoelectric sensors*, Journal of Thermoelectricity, (4), 49 (2023); <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2023-4-49-63>.
- [15] R. Kobylanskyi, K. Przystupa, V. Lysko, J. Majewski, L. Vikhor, V. Boichuk, O. Zadorozhnyy, O. Kochan, M. Umanets, N. Pasyechnikova, *Thermoelectric Measuring Equipment for Perioperative Monitoring of Temperature and Heat Flux Density of the Human Eye in Vitreoretinal Surgery*, Sensors, 25(4), Article number: 999 (2025); <https://doi.org/10.3390/s25040999>.

O.S. Kshevetskyi

## Estimation of relatively small temperature differences with the use of resistive temperature sensors. Part 1

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, [kshevos@gmail.com](mailto:kshevos@gmail.com)

The method of estimating relatively small temperature differences using 4 resistive temperature sensors electrically connected in a bridge circuit is described. An example of experimental estimation of the temperature difference on the opposite outer surfaces of ceramic plates of a thermoelectric module and examples of testing some elements of the estimation system are described. Factors that may affect the results of the specified estimation are considered.

**Keywords:** temperature difference measurement, resistive temperature sensors, thermoelectric module.