

Ю. Скрипник, Г. Юрчик, П. Мокренко

Київський національний університет технологій та дизайну,
Національний університет "Львівська політехніка"

УДК 536.53

ВИСОКОЧАСТОТНИЙ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ВИМІРЮВАЧ МАЛИХ РІЗНИЦЬ ТЕМПЕРАТУР

© Скрипник Ю., Юрчик Г., Мокренко П., 2003

Розглянуто цифровий термоелектричний вимірювач малих різниць температур, в якому підвищення точності результату вимірювання досягається збільшенням його чутливості, а також співвідношення "корисний сигнал/завада".

We have considered a digital thermoelectrical measurer of insignificant temperature differences, in which the increase of accuracy of the result of the measurement is being reached thanks to its sensibility and increase of the correction "useful signal - interference".

Постановка проблеми та її зв'язок із практичними завданнями

Однією з найважливіших умов розвитку будь-якої галузі народного господарства є зростаючий обсяг достовірної інформації про теплофізичні властивості речовин і матеріалів. На практиці часто виникає задача динамічного вимірювання температури в процесі її зміни протягом певного часу. При визначенні теплових потоків, зокрема втрат тепла з нагрітих поверхонь, потрібне вимірювання різниць температур в кількох точках в просторі і в часі. В останні роки значно зросли вимоги до контролю і регулювання профілю температурних потоків і полів інших фізичних величин, що впливають на процеси передачі і поглинання тепла.

У зв'язку з цим більш жорсткими стали вимоги до точності вимірювання малих різниць температур і градієнтів полів, а також малих змін теплоємності, теплопровідності, температуропровідності і інших теплофізичних параметрів, що характеризують технологічні середовища і якість промислових виробів. Проблема розробки нових способів та пристроїв вимірювання малих різниць температур з підвищеною точністю і чутливістю в наш час дуже актуальна в зв'язку з сертифікацією багатьох виробів, яка передбачає якісну і кількісну оцінку їхніх теплофізичних властивостей [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для вимірювання різниці температур в широкому діапазоні на практиці часто застосовують автоматичні електронні пристрої з термоелектричними перетворювачами температури. Відомий вимірювач різниці температур, в якому робочий кінець первинного термоелектричного перетворювача розташовується в точці з температурою T_1 , а його вільні кінці – при іншій температурі T_2 , мілівольтметр або автоматичний потен-

ціометр, підключений до вільних кінців перетворювача, вимірює термоелектрорушійну силу (ТЕРС), значення якої функціонально пов'язане з різницею цих температур [2]:

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

Проте, при вимірюванні малих значень різниці температур ($\Delta T < 10$ К) ТЕРС на вільних кінцях перетворювача досить мала (на рівні кількох мікрвольт) і її вимірювання здійснюється з великими похибками. Існують термоелектричні вимірювачі з диференційним увімкненням двох первинних термоелектричних перетворювачів, що забезпечує вимірювання різниці термоелектрорушійних сил, пропорційних температурам у вибраних точках досліджуваного поля [3]. При малих різницях температур непостійність температур вільних кінців двох перетворювачів істотно спотворює результати вимірювання, тому що термоелектричні потенціали вільних кінців сумірні з термоелектричними потенціалами двох робочих кінців перетворювача. Крім того, неминучі похибки, обумовлені неідентичністю характеристик двох перетворювачів, не дозволяють виявити і виміряти перепади температур, менші за 1...2 К. У відомому термоелектричному пристрої [4] здійснюється автокомпенсація похибок вимірювання, обумовлених поступовою зміною в процесі експлуатації неідентичності градувальних характеристик первинних перетворювачів і відповідним прогресуючим дрейфом нуля схеми диференційного увімкнення двох термоперетворювачів. У цьому пристрої автокомпенсація згаданих похибок здійснюється шляхом балансування мостової вимірювальної схеми з диференційно увімкненими термоелектричними перетворювачами за допомогою реверсивного мікродвигуна, механічно з'єднаного з пересувними контактами реохорда потенціометра цієї схеми. Основним недоліком цього пристрою є залишкова похибка, обумовлена кінцевою величиною порогу чутливості реверсивного мікродвигуна.

Відомий також термоелектричний пристрій для вимірювання різниці температур [5], до складу якого входять два електроди із різних термоелектричних матеріалів, диференційний підсилювач із симетруючим потенціометром, фільтр нижніх частот і вольтметр, під'єднаний до виходу фільтра нижніх частот, а також загальна заземлена шина. Крім того, цей пристрій містить блок компенсації напруг вільних кінців термоперетворювача, джерело стабільної опорної напруги, компенсаційний резистор і допоміжний напівпровідниковий сенсор температури, з'єднаний з блоком компенсації, а два електроди із різних термоелектричних матеріалів створюють робочий і вільні кінці термоперетворювача.

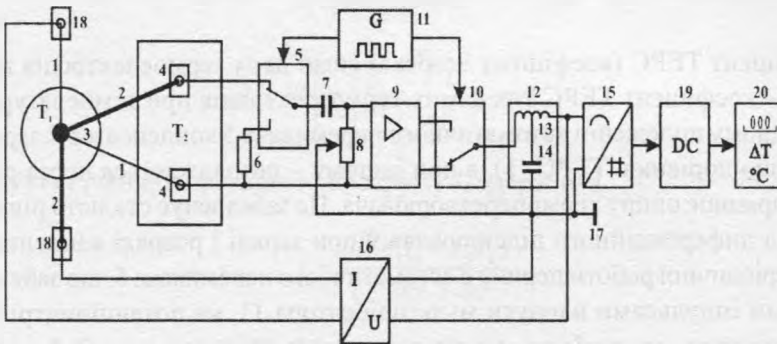
Оскільки вихідна напруга термоперетворювача дуже мала (мікрвольти), то послаблення завад досягається застосуванням диференційного підсилювача із симетричними входами, які з'єднуються з вільними кінцями термоперетворювача, а також фільтра нижніх частот. Внаслідок застосування підсилювача вихідна напруга пристрою досягає 10 мВ/К, що дозволяє як вихідний прилад використати вольтметр, який менше піддається завадам. Проте при вимірюванні малих різниць температур вхідний сигнал підсилювача стає одного порядку з його власними шумами і значенням напруги дрейфу нуля, приведеним до входу підсилювача. Тільки підвищенням коефіцієнта підсилення диференційного підсилювача не можна покращити співвідношення "корисний сигнал/завада"

на виході підсилювача, тому що одночасно підсилюються корисний сигнал і завада і тим самим неможливо підвищити чутливість і точність вимірювання малих різниць температур.

Завдання статті полягає у проведенні аналізу методу вимірювання і принципу дії запропонованого термоелектричного вимірювача малих різниць температур з такою функцією вимірювального перетворення, яка дозволяє усунути недоліки розглянутих вище пристроїв шляхом суттєвого підвищення як чутливості вимірювача, так і точності контролю малих перепадів температур різних технологічних середовищ.

Принцип дії і функція перетворення вимірювача різниці температур

На рисунку подано функціональну схему термоелектричного вимірювача малих різниць температур.



Функціональна схема термоелектричного вимірювача малих різниць температур

Функціональна схема термоелектричного вимірювача малих різниць температур: 1,2 – термоелектроди, механічно з'єднані своїми серединами, що створюють два термоперетворювачі із спільним робочим кінцем 3; 4,18 – мідні колодки на вільних кінцях першого і другого термоперетворювачів; 5, 10 – перший і другий автоматичні перемикачі; 6 – низькоомний резистор; 7 – конденсатор; 8 – симетруючий потенціометр; 9 – диференційний підсилювач; 11 – мультивібратор; 12 – фільтр нижніх частот, який складається з дроселя 13 і конденсатора 14; 15 – аналого-цифровий перетворювач; 16 – перетворювач постійної напруги в постійний струм; 17 – спільна заземлена шина; 19 – дешифратор; 20 – цифровий індикатор різниці температур.

Термоелектричний вимірювач складається з термоелектродів 1 і 2, з'єднаних своїми серединами механічно (зваркою), які створюють два термоелектричні перетворювачі із спільним робочим кінцем 3. Вільні кінці першого термоперетворювача розміщені на двох однакових мідних колодках 4, які з'єднані з входами першого автоматичного перемикача 5; одна колодка з'єднана безпосередньо, а інша – через низькоомний резистор 6. Вихід автоматичного перемикача 5 через конденсатор 7 і симетруючий потенціометр 8 під'єднаний до входів диференційного підсилювача 9, паразитні виходи якого під'єднані до входів другого автоматичного перемикача 10. Керовані входи автоматичних перемикачів 5 і 10 під'єднані до виходів мультивібратора 11. Вихід другого автоматичного перемикача 10 через фільтр 12 нижніх частот, що складається

з дроселя 13, до середньої точки якого під'єднаний конденсатор 14, з'єднаний з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) 15 і перетворювачем 16 постійної напруги в постійний струм. Другі затискачі конденсатора 14, АЦП 15 і перетворювача 16 з'єднані зі спільною заземленою шиною 17, до якої під'єднаний також рухомий контакт симетруючого потенціометра 8. Виходи перетворювача 16 з'єднані з вільними кінцями другого термоперетворювача, що розміщені на двох мідних колодках 18. Дешифратор 19 з цифровим індикатором 20 під'єднані до виходу АЦП 15.

Принцип дії термоелектричного вимірювача різниці температур є таким.

Спільний робочий кінець 3 двох термоперетворювачів розміщують в технологічній зоні з температурою T_1 , а вільні кінці першого термоперетворювача, що розміщені на колодках 4, – в зоні температури T_2 , різницю температур яких необхідно виміряти. ТЕРС на затискачах колодок 4 при цьому буде дорівнювати:

$$E = \epsilon_1 T_1 - \epsilon_2 T_2, \quad (2)$$

де ϵ_1 – коефіцієнт ТЕРС (коефіцієнт Зеєбека) спаю двох термоелектродів при температурі T_1 ; ϵ_2 – коефіцієнт ТЕРС тих самих термоелектродів при температурі T_2 .

При одному положенні автоматичного перемикача 5 конденсатор 7 заряджається до напруги, що дорівнює ТЕРС (1), а при іншому – розряджається через резистор 6, опір якого дорівнює опору термоперетворювача. Це забезпечує сталість рівня вхідних шумів і завад диференційного підсилювача 9 при заряді і розряді конденсатора 7. У результаті періодичної роботи першого автоматичного перемикача 5, що забезпечується прямокутними імпульсами напруги мультівібратора 11, на потенціометрі 8 виникає напруга, змінна складова якої має частоту перемикання конденсатора 7. Змінна напруга підсилюється диференційним підсилювачем 9 і розщеплюється на його виході на дві протифазні напруги, які надходять на інший перемикач 10. Оскільки частота перемикань перемикачів 5 і 10 однакова, то на вхід фільтра 12 нижніх частот надходять напівхвилі напруги однієї полярності. Після згладжування на фільтрі 12 нижніх частот на вхід АЦП 15 подається напруга постійного струму

$$U = k(\epsilon_1 T_1 - \epsilon_2 T_2), \quad (3)$$

де k – коефіцієнт підсилення диференційного підсилювача 9.

Завдяки синхронній роботі автоматичних перемикачів 5 і 10 постійна складова на виході фільтра 12 створюється тільки із ТЕРС (2), яка перетворюється комутованим конденсатором 7 в змінну напругу з частотою перемикань. Зовнішні завади і власні шуми диференційного підсилювача не створюють постійної складової напруги на виході другого автоматичного перемикача і тому усереднюються до нуля фільтром 12 нижніх частот, який для підвищення коефіцієнта передачі виконаний на дроселі 13 і конденсаторі 14.

Вихідна постійна напруга (3) перетворюється в перетворювачі 16 в пропорційний її значенню струм

$$I = Sk(\epsilon_1 T_1 - \epsilon_2 T_2). \quad (4)$$

де S – крутизна перетворення напруги в постійний струм, А/В. Струм (4) надходить на затискачі мідних колодок 18, протікає по електродах другого термоперетворювача і через спільний з першим перетворювачем робочий кінець 3, в результаті чого в ньому внаслідок термоелектричного ефекту Пельтьє виділяється або поглинається (залежно від напрямку струму) теплота, яка додатково підвищує (або зменшує) температуру робочого кінця 3 на величину [1]:

$$\Delta T = \pm \frac{II}{\alpha F}, \quad (5)$$

де $\Pi = (dE/dT)T$ – коефіцієнт Пельтьє робочого кінця термоперетворювачів; α і F – коефіцієнт тепловіддачі і площа поверхні робочого кінця термоперетворювача відповідно.

При додатковому нагріванні робочого кінця 3 струм (4) збільшується і буде дорівнювати

$$I = Sk \left[\epsilon_1 \left(T_1 + \frac{II}{\alpha F} \right) - \epsilon_2 T_2 \right]. \quad (6)$$

Розв'язуючи рівняння (6) відносно струму I , одержимо

$$I = \frac{Sk(\epsilon_1 T_1 - \epsilon_2 T_2)}{1 - Sk\epsilon_1 \frac{II}{\alpha F}}. \quad (7)$$

Якщо різниця температур $(T_1 - T_2) \ll T_1$ невелика, то можна вважати, що $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$. Тоді вираз для струму (7) набуде вигляду

$$I = \frac{Sk\epsilon(T_1 - T_2)}{1 - Sk\epsilon \frac{II}{\alpha F}}. \quad (8)$$

Напругу (3), що вимірюється, враховуючи (5) і (8), подамо так

$$U = k\epsilon \left(T_1 - T_2 + \frac{II}{\alpha F} \right). \quad (9)$$

Підставляючи значення струму I з виразу (8) у (9), одержимо

$$U = k\epsilon \left(1 + \frac{kS\epsilon II}{\alpha F - kS\epsilon II} \right) (T_1 - T_2). \quad (10)$$

Якщо у виразі (10) різниця $\alpha F - kS\epsilon II \ll kS\epsilon II$, то одиницею в цьому виразі можна знехтувати, і функція перетворення вимірювача різниці малих температур набуде такого вигляду

$$U = \frac{k^2 \epsilon^2 S II}{\alpha F - kS\epsilon II} (T_1 - T_2). \quad (11)$$

З одержаного виразу видно, що вимірювана напруга при додатковому нагріванні постійним струмом робочого кінця термоперетворювача пропорційна квадрату коефіцієнта підсилення диференційного підсилювача і квадрату термоелектричного коефіцієнта, що значно підвищує чутливість запропонованого вимірювача малих різниць температур. Чутливість вимірювача можна ще більше підвищити, якщо забезпечити мінімізацію різниці $(\epsilon F - k\epsilon\eta) > 0$ відповідним вибором конструкції подвійного термоперетворювача і матеріалів його термоелектродів.

При вимірюванні від'ємних різниць температур ($T_1 < T_2$) змінюється полярність ТЕРС на колодках 4 першого термоперетворювача і відповідно змінюється полярність випрямленої напруги на виході фільтра 12 нижніх частот. Відповідно змінюється полярність струму на виході перетворювача 16 і напрям струму через другий термоперетворювач і робочий кінець 3 (який в цьому випадку охолоджується внаслідок реверсивності ефекту Пельтьє), а від'ємна різниця вимірюваних температур збільшується за абсолютним значенням. Зростання ТЕРС на виході першого термоперетворювача суттєво підвищує відношення "сигнал/завада" на виході підсилювача 9.

Дослідження запропонованого вимірювача, в якому використовувалися первинні термоелектричні перетворювачі типу ТХК, малозумний диференційний підсилювач з коефіцієнтом підсилення 1000, магнітокеровані перемикачі, мультівібратор з частотою генерації імпульсів 75 Гц показали, що при вимірюванні температур $T_1 - T_2 = 5\text{K}$ одержана чутливість порядку 0,01 К. Через додаткове нагрівання робочого кінця термоперетворювачів теплотою Джоуля при будь-якому напрямі протікання струму чутливість до додатної різниці температур ($T_1 > T_2$) виходить більш високою, ніж при від'ємній різниці ($T_1 < T_2$). Мідні колодки на вільних кінцях термоперетворювачів забезпечують стабільність їх температури при пропусканні через другий термоперетворювач постійного струму.

Висновки

Запропонований вимірювач порівняно з відомими термоелектричними вимірювачами малих різниць температур відрізняється підвищеним коефіцієнтом чутливості функції його вимірювального перетворення, що досягається використанням в його вимірювальній схемі додатного зворотного зв'язку для додаткового нагрівання (охолодження) робочого кінця первинного перетворювача за рахунок реверсивного термоелектричного ефекту Пельтьє. Введення зворотного зв'язку разом з тим дозволяє суттєво збільшити співвідношення "корисний сигнал/завада" на виході диференційного підсилювача і тим самим підвищити точність вимірювання малих різниць температур різних технологічних середовищ.

1. Головка Б.Д., Дубровский В.О., Скрипник Ю.О., Химичева Г.И. Високоточні вимірювання багатофункціональними термосенсорами: Навчальний посібник. – К: Либідь, 2000. – 302 с.
2. Термoeлементы и термоэлектрические устройства: Справочник /Л.И. Анатоличук. – К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
3. Линеверг Ф. /Измерение температур в технике: Справочник. – М.: Металлургия, 1980. – 544 с.
4. Скрипник Ю.А., Химичева А.И., Юрчик Г.В. Термоэлектрические измерители разности температур // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 1992. – №5–6. – С. 96–103.
5. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. с англ. // Под. ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. – М.: Мир, 1992. – 420 с.