

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ТЕПЛОВИХ ВЕЛИЧИН

ГРАНИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР З АВТОМАТИЧНИМ НАЛАШТУВАННЯМ

LIMITS OF THERMOELECTRIC TEMPERATURE DIFFERENCE MEASUREMENT TOOLS WITH AUTOMATIC ADJUSTMENT

Яцук В. О.¹, д-р техн. наук, проф., Здеб В. Б.¹, інженер, Яцук Ю. В.²

¹Національний університет «Львівська політехніка», кафедра інформаційно-вимірвальних технологій,
Україна; e-mail: yatsuk.vasyl@gmail.com;

²Національний університет «Львівська політехніка»,
кафедра комп'ютеризованих систем автоматики, Україна

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.01.039>

Анотація. У багатьох галузях сучасної техніки використовуються вимірвачі різниці температур, від точності вимірювання якої залежать інші технологічні параметри контрольованих процесів, наприклад, у метеорології, вимірюванні витрат спожитої теплової енергії тощо. На основі термоелектричних перетворювачів можуть бути побудовані вимірвачі різниці температури для роботи в ширшому діапазоні температур порівняно з іншими типами сенсорів. Загалом точність вимірювання різниці температур визначається неідентичністю функцій перетворення сенсорів, значення якої забезпечується конструктивно-технологічними методами під час виготовлення. Її значення важко ідентифікувати в робочих умовах експлуатації та практично неможливо врахувати в структурах вторинних приладів для вимірювання різниці температур.

У сучасній вимірвальній техніці кіберфізичні системи як розпорошені інтелектуальні системи на основі мереж фізичних та обчислювальних компонентів, які взаємодіють, забезпечують нові функціональні можливості щодо покращення якості процесів вимірювань. Запропоновано здійснювати автоматизоване оперативне налаштування метрологічних параметрів цифрових вимірвачів різниці температур під час експлуатації. Вторинний прилад запропоновано реалізувати на основі програмованих на чипі структур з використанням кодокерованих багатозначних мір напруги. Показано, що під час розміщення обох термоелектричних перетворювачів у середовищах із відомими значеннями температури можна скоригувати похибки, спричинені інструментальними похибками сенсорів. Окрім того, за допомогою зміни кодів керування кодокерованими мірами напруги запропоновано визначати коефіцієнт перетворення вторинного приладу в певний момент часу та в заданих умовах експлуатації.

Обговорено також можливість практичної реалізації цифрових вимірвачів різниці температур з автоматичним налагодженням у робочих умовах експлуатації.

Ключові слова: вимірвач різниці температур, термоелектричний сенсор, кіберфізичні системи, коригування похибок, кодокерувані міри, автоматичне самоналаштування.

Annotation. The temperature differences meters are used in many branches of modern technology. Their accuracy is depending on other technological parameters of controlled processes, for example, in meteorology, measurement of the consumption of heat energy, etc. On the basis of thermoelectric converters, meters of temperature difference can be constructed for operation in a wider range of temperatures than other types of sensors. In general, the accuracy of difference temperature measuring is determined by the not identity of the sensors transformation functions. Its value is provided by structural and technological methods in the manufacturing process. It is difficult to identify this spread value under operating conditions and it is virtually impossible to take into account in the secondary devices for measuring the temperature difference.

In modern measuring technique, cyber-physical systems as scattered intelligent systems based on interacting networks of physical and computing components provide new functionalities for improving the quality of measurement processes. It is proposed to carry out automated operational setup of metrological parameters of digital meters of temperature difference during operation. The secondary device is offered to be implemented on the basis of chip-based programmable structures using codon-valued multi-valued voltage measures. It is shown that the outputs of both temperature sensors and outputs of the code controlled voltage measure can be connected to different inputs of the measuring device, with their switching and activation being carried out programmatically without additional hardware costs.

The method of operative debugging of a digital temperature difference meter is proposed, which consists in the alternating placement of each of the thermoelectric transducers in media with known temperature values. At the same time, another source of differential input of the meter is connected to the output voltage of the code-controlled voltage measure, which is fed into a code proportional to the code of the known temperature values. It is proved that in this way it is possible to correct the errors caused by instrumental errors of the temperature sensors of both measuring channels. In addition, by changing the codes of control of the coded voltage measure, it is proposed to determine the conversion factor of the secondary device at the given time and in the given operating conditions.

A detailed analysis of the errors was performed during the execution of the procedures for adjusting the parameters of both measuring channels. It shows how to identify corrective elements and how to use them in the process of counting the corrected result of measurement. It is noted that the nonlinear component of the uncorrected error value due to the nonlinearity of the sensors

will determine the width of the range of measured temperature differences over the entire range of temperature sensor changes.

Also discussed are the possibilities of practical implementation of digital temperature differential meters with automatic adjustment in working conditions of operation.

Key words: temperature difference meter, thermoelectric sensor, cyber-physical systems, error adjustment, code-controlled measure, automatic settings.

Вступ

Точність вимірювання різниці температур визначає основні метрологічні властивості низки засобів вимірювання, таких як радіометри з електричним заміщенням, тепловізори, лічильники спожитої теплової енергії, засоби вимірювань метеорологічних параметрів тощо [1–5]. Загалом для вимірювання різниці температур повинен використовуватись диференціальний вимірвальний засіб, неідентичність функцій перетворення сенсорів у якому визначає їх обмежувальні метрологічні властивості. В традиційних вимірвачах різниці температур (ВРТ) зазвичай використовують стандартні температурні сенсори із забезпеченням їхніх заданих метрологічних характеристик конструктивно-технологічними методами під час виготовлення. Упродовж подальшої експлуатації періодично їх перевіряють або ж калібрують, приймаючи рішення про можливість і доцільність їх подальшого використання. Під час експлуатації здебільшого в ручному режимі здійснюють повторне налаштування вторинного ВРТ, хоч з огляду на велику трудомісткість не аналізують характер дрейфу метрологічних характеристик, тому й не реструють та не опрацьовують результати цих випробувань. Останнім часом щораз швидше в усі галузі впроваджуються кіберфізичні системи (КФС) як розпорошені інтелектуальні системи на основі мереж фізичних та обчислювальних компонентів, що взаємодіють. У вимірвальній техніці вони забезпечують нові функціональні можливості щодо покращення якості процесів вимірювань, використовуючи ці сенсори. На основі влаштованого програмного забезпечення КФС дають змогу якнайшвидше і якнайточніше сигналізувати про зміну і вимірвальних, і неінформативних параметрів робочого середовища з подальшим виконанням адекватних дій.

Тому актуальним питанням сьогодні є необхідність розроблення методів, алгоритмів і методик вимірювання різноманітних фізичних величин, які достатньо просто можна було б реалізувати у вимірвальних каналах КФС. Це насамперед стосується засобів вимірювань з використанням стандартних сенсорів, особливо температурних сенсорів, метрологічні характеристики яких покращуються надто повільно через принципові нині обмеження щодо застосовуваних термочутливих матеріалів [6].

Недоліки

Для вимірювання різниці температур на практиці здебільшого використовують термоелектричні, терморезистивні, напівпровідникові та мікроелектронні сенсори [6–8]. Мікроелектронні сенсори температури щораз ширше застосовують у практичній термометрії, однак через технологічні обмеження у них порівняно вузький діапазон застосування та назагал недостатня для практичного застосування точність, зумовлена розкидом параметрів сучасних компонентів [7, 8]. Спроби підвищення точності напівпровідникових сенсорів супроводжуються істотним ускладненням процедури налагодження усього комплексу ВРТ [9]. Терморезистивні сенсори уможливають досягнення потенційно найвищої точності вимірювання різниці температур у діапазоні середніх температур, однак необхідно враховувати їхні індивідуальні статичні характеристики перетворення (СХП) [2, 3, 5]. Окрім цього, треба коригувати похибки, спричинені впливом нестабільних параметрів з'єднувальних дротів, з використанням чогиридротового підключення сенсорів, що істотно ускладнює структуру усього ВРТ [2].

До переваг термоелектричних перетворювачів (ТП) належить великий температурний діапазон вимірювання від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1800\text{--}2500\text{ }^{\circ}\text{C}$, простота схемотехнічного та конструктивного виконання, дешевизна та надійність (їх можна використовувати навіть за високих рівнів іонізуючих випромінювань, наприклад, на атомних реакторах). Якщо робочий спай ТП поміщають у середовище з однією із вимірюваних температур θ_{x1} , тоді як його вільні кінці розміщені в середовищі з іншою вимірюваною температурою θ_{x2} , то отримують найпростішу структуру ВРТ [10]. Такий спосіб вимірювання різниці температур певною мірою обмежений і може застосовуватись для великорозмірних вимірюваних об'єктів, які визначаються розмірами пристрою вирівнювання температури обох вільних кінців ТП. У традиційних вимірвачах різниці температур, які складаються із двох зустрічно сполучених ТП, робочі злоти яких містяться в середовищах з різними вимірюваними температурами θ_{x1} та θ_{x2} , важко буде досягти точності понад $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ через істотний вплив неідентичності СХП обидвох ТП, зміни температури вільних кінців у місцях їх підключень до вторинного ВРТ [11]. Зменшувати точність можуть також подовжувальні

Термоелектродні дроти, якщо їх застосовують, наприклад, у випадку проведення вимірювань в місцях, де не може перебувати оператор, або мікроелектронних засобів вимірювань. В моменти зняття показів ВРТ, необхідно унеможливити проходження струмів через обидва ТП, оскільки їх проходження завдяки ефекту Пельтьє може охолоджувати гарячі спаї та розігрівати холодні, або навпаки залежно від напрямку його протікання. Нелінійність СХП ТП спричиняє появу похибок ВРТ у широкому діапазоні перетворювання. Виникнення термоелектричної неоднорідності унаслідок різких перепадів температур, механічних напружень, корозії та хімічних процесів у провідниках призводить до зміни градувальної характеристики і зростання похибок до 5 К. За великої довжини термопарних і подовжувальних проводів існуючі природні та техногенні електромагнітні поля можуть спричинити наведення співмірних або й набагато більших від інформативного сигналу диференціально увімкнених ТП.

Для зменшення похибок від неідентичності СХП обидвох ТП виготовляють диференційний сенсор ВРТ з двох термоелектродних дротів, які посередині електрично з'єднуються для створення робочого спаю, який поміщають у середовище з однією із вимірюваних температур, тоді як інші чотири виводи обох ТП (вільні кінці сенсора ВРТ) поміщають у середовище з іншою вимірюваною температурою [12]. Оскільки під час вимірювання малих значень різниць температур починають істотно впливати адитивні похибки, завади і шуми вторинного приладу ВРТ, то запропоновано використовувати масштабний вимірювальний підсилювач з коригуванням адитивних зміщень усього підсилювального тракту, модуляцією–підсиленням–демодуляцією вихідного сигналу диференційних сенсорів ВРТ. Якщо через другу пару вільних кінців диференційної ТП пропускати вимірювальний струм зворотного зв'язку, то в робочому з'єднанні виникатиме додаткова ЕРС Пельтьє, яка сприятиме збільшенню чутливості перетворення усього ВРТ [12]. Однак метрологічні властивості цього пристрою не будуть високими через використання електромеханічних ключів для модуляції-демодуляції сигналу та перетворювача напруги на струм Пельтьє без коригування адитивних зміщень. Окрім того, підбір параметрів масштабувальних елементів у ручному режимі стає на заваді автоматизації налагодження та оперативного контролювання протікання вимірювальних процесів та істотно утруднює побудову вимірювальних каналів КФС для різниць температур у широкому діапазоні зміни температури вільних кінців.

Мета роботи

Мета роботи – дослідити можливості підвищення точності вимірювання різниці температур термоелектричними перетворювачами для кіберфізичних систем з урахуванням їхнього сучасного метрологічного та програмного забезпечення.

Матеріали та методи

Автоматизація є характерною рисою сучасного виробництва і реалізується, насамперед, з використанням засобів цифрової вимірювальної та обчислювальної техніки. З насиченням ринку мікроелектронних виробів доступними за ціною і малогабаритними однокристальними мікро-ЕОМ з широкими функціональними можливостями якісно змінюється підхід до проектування і використання засобів вимірювань. Сьогодні мова ведеться вже не стільки про необхідність інтелектуалізації окремих приладів, а про можливість побудови розпорозаних вимірювальних систем, склад яких і місце розташування окремих їх частин можуть гнучко змінюватись (як у часі, так і в просторі) залежно від зміни структури і обсягів виробництва. В таких засобах вимірювальної техніки ЗВТ доцільно забезпечувати якомога ширший діапазон вимірювань і задану точність у робочих умовах експлуатації.

Близько 15 % всіх технічних вимірювань – це вимірювання температури, а приблизно 60 % температурних вимірювань – вимірювання за допомогою ТП.

1. Аналіз метрологічних властивостей класичних вимірювачів різниці температур

Узагальнена структурна схема класичного термоелектричного вимірювача різниці температур складається з двох ТП1 та ТП2, двох клемних колодок для підключення вільних кінців з температурами θ_{B1} та θ_{B2} , двох пар подовжувальних термоелектродних дротів ТД, клемної колодки для під'єднання ТД до входу вторинного вимірювача різниці температур (ВРТ) (рис. 1). Робочі з'єднання ТП1 та ТП2 містяться у середовищах з вимірюваними температурами θ_{X1} та θ_{X2} , а їх вільні кінці під'єднані до клемних колодок, температури θ_{B11} та θ_{B12} і θ_{B21} та θ_{B22} в яких в робочих умовах експлуатації назагал є неоднаковими, як і температури клемної колодки в місцях під'єднання ТД θ_{H11} та θ_{H12} і θ_{H21} та θ_{H22} .

Вихідна напруга для кожного з вимірювальних каналів подається співвідношеннями:

$$u_{X1} = e_{X1}(\theta_{X1}, \theta_{B11}) + e_{TD1}(\theta_{B11}, \theta_{H11}) + e_{TD1}(\Delta\theta_{B12}, 0) + e_{TD1}(\Delta\theta_{H12}, 0) + e_{X1}(\Delta\theta_{B12}, 0) + e_{X1}(\Delta\theta_{B12}, 0), \quad (1)$$

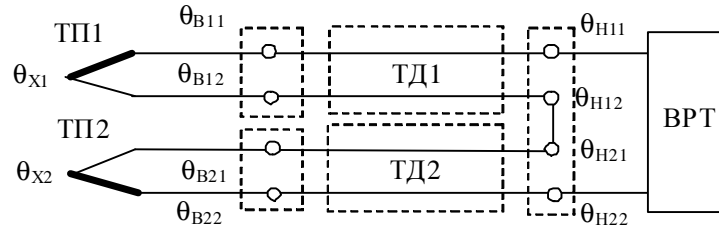


Рис. 1. Структурна схема термоелектричного вимірювача різниці температур

Fig.1. Structural scheme of thermoelectric meter temperature difference

$$u_{X2} = e_{X2}(\theta_{X2}, \theta_{B21}) + e_{TD2}(\theta_{B21}, \theta_{H21}) + e_{TD2}(\Delta\theta_{B22}, 0) + e_{TD2}(\Delta\theta_{H22}, 0) + e_{X2}(\Delta\theta_{B22}, 0) + e_{X2}(\Delta\theta_{B22}, 0), \quad (2)$$

де u_{X1} , u_{X2} – вихідні напруги для кожного з вимірювальних каналів температури; $e_{X1}(\theta_{X1}, \theta_{B11})$, $e_{X1}(\Delta\theta_{B12}, 0)$ – відповідно, вихідна термо-ЕРС ТП1 за температури робочого з'єднання θ_{X1} та вільних кінців θ_{B11} і за температури робочого з'єднання θ_{B12} - θ_{B11} та вільних кінців 0°C ; $e_{TD1}(\theta_{B11}, \theta_{H11})$, $e_{TD1}(\Delta\theta_{B12}, 0)$, $e_{TD1}(\Delta\theta_{H12}, 0)$ – відповідно, термо-ЕРС ТД1 за температури з боку робочого з'єднання θ_{B11} та з боку ВРТ θ_{H11} , за температури з боку робочого з'єднання θ_{B11} - θ_{B12} та з боку ВРТ 0°C і за температури з боку робочого з'єднання θ_{H12} - θ_{H11} і 0°C з боку ВРТ; $e_{X2}(\theta_{X2}, \theta_{B21})$, $e_{X2}(\Delta\theta_{B21}, 0)$ – відповідно, вихідна термо-ЕРС ТП2 за температури робочого з'єднання θ_{X2} та вільних кінців θ_{B21} і за температури робочого з'єднання θ_{B22} - θ_{B21} та вільних кінців 0°C ; $e_{TD2}(\theta_{B21}, \theta_{H21})$, $e_{TD2}(\Delta\theta_{B21}, 0)$, $e_{TD2}(\Delta\theta_{H21}, 0)$ – відповідно, термо-ЕРС ТД2 за температури з боку робочого з'єднання θ_{B21} та з боку ВРТ θ_{H21} , за температури з боку робочого з'єднання θ_{B22} - θ_{B21} та з боку ВРТ 0°C і за температури з боку робочого з'єднання θ_{H22} - θ_{H21} і 0°C з боку ВРТ.

Відповідно вихідний сигнал N_X ВРТ визначатиметься різницею напруг u_{X1} , u_{X2} :

$$N_X = k_{AD} \{ [e_{X1}(\theta_{X1}, 0) - e_{X2}(\theta_{X2}, 0)] + \Delta e_{TD2} + \Delta e_{TD1} + \Delta u_{BH} \}, \quad (3)$$

де k_{AD} – коефіцієнт перетворення ВРТ; $\Delta e_{TD1} \approx (a_1 - g_1)(\theta_{B11} - \theta_{H11}) - g_1(\theta_{B11} - \theta_{B12}) - g_1(\theta_{H11} - \theta_{H12})$ – похибка, спричинена різним характером температурних залежностей ТП1 та ТД1 і градієнтами температури в з'єднувальних колодках у колі перетворення сигналу з ТП1; $\Delta e_{TD2} \approx (a_2 - g_2)(\theta_{B21} - \theta_{H21}) - g_2(\theta_{B21} - \theta_{B22}) - g_2(\theta_{H21} - \theta_{H22})$ – похибка, спричинена різним характером температурних залежностей ТП2 та ТД2 і градієнтами температури в з'єднувальних колодках у колі перетворення сигналу з ТП2; a_1 , a_2 , g_1 , g_2 – мультиплікативні коефіцієнти перетворення, відповідно, ТП1 та ТД1 і ТП2 та ТД2; $\Delta u_{BH} = e_{X1}(\Delta\theta_{B12}, 0) - e_{X2}(\Delta\theta_{B22}, 0)$.

Щоб спростити подання матеріалу для порівняно невеликих значень вимірюваних різниць температури, функцію перетворення ТП можна

апроксимувати квадратним поліномом. Тоді вираз (4) можна подати як:

$$N_X \approx k_{AD} k_H \left\{ (\theta_{X1} - \theta_{X2}) \left[1 + b_H (\theta_{X1} + \theta_{X2}) \right] + \Delta a_X + \Delta b_X + \Delta e_{TD21} + \Delta u_{BH} + \Delta a_{AD} \right\}, \quad (4)$$

де k_H , b_H – відповідно, номінальні значення мультиплікативного та квадратичного коефіцієнтів функції перетворення ТП1 та ТП2; $\Delta a_X = \Delta a_1 \theta_{X1} - \Delta a_2 \theta_{X2}$, $\Delta b_X = \Delta b_1 \theta_{X1}^2 - \Delta b_2 \theta_{X2}^2$ – еквівалентні мультиплікативна та квадратична складові похибки вхідного кола; Δa_1 , Δa_2 , Δb_1 , Δb_2 – абсолютні похибки, відповідно, мультиплікативного та квадратичного коефіцієнтів функції перетворення ТП1 та ТП2.

Аналіз виразу (4) показує, що похибка вимірювання різниці температур визначається передусім метрологічними характеристиками вимірювального кола. Адитивну складову похибки, спричинену градієнтами температур у з'єднувальних колодках, неможливо скоригувати в структурі ВРТ протягом довгих проміжків часу та під час змін умов довкілля. Мультиплікативна складову похибки визначається інструментальними похибками ТП, а нелінійна складову повинна враховуватись у прецизійних ВРТ.

2. Розроблення структури інтелектуальних каналів вимірювання різниці температур

Сучасні інтелектуальні пристрої збирання та опрацювання інформації про різницю температур найдоцільніше реалізувати на основі програмованих систем на чипі (ПСЧ) (рис. 2). Особливість таких мікросхем – порівняно високі метрологічні характеристики за однополярного живлення, що змушує використовувати в системі схеми зміщення рівня (у деяких мікросхемах, наприклад, фірми Cypress Semiconductor, є вбудованими. Розроблену структуру цифрового ВРТ (рис. 2) побудовано з максимальним використанням аналогових елементів, які є на чипі, зокрема операційних підсилювачів (ОП) та ЦАП VDAC1. На рис. 2 значком «синя стрілка» позначено аналогові вводи-виводи ПСЧ; чорним кольором – зовнішні елементи; синім кольором – внутрішні

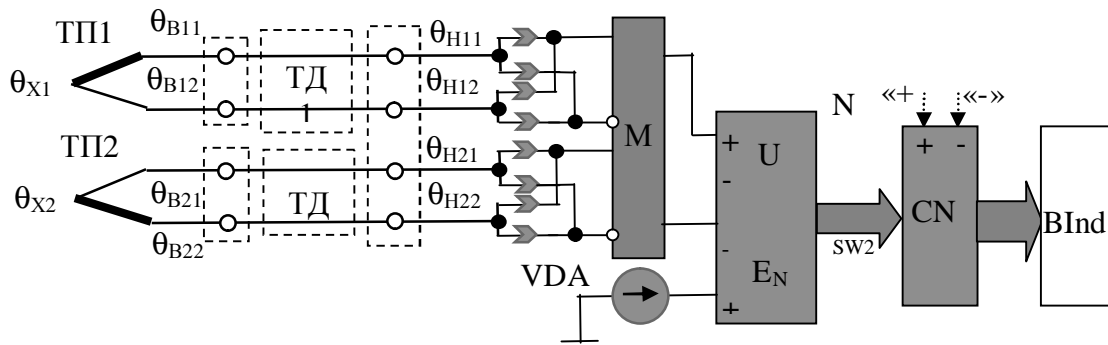


Рис. 2. Структурна схема цифрового термоелектричного вимірювача різниці температур (➤ – аналогові виводи)

Fig. 2. Structural diagram of digital thermoelectric temperature difference meter (➤ – an analog input-output pins)

елементи ПСЧ. Напряга зміщення шкали перетворення внутрішнього диференціального АЦП формується внутрішнім ЦАП VDAC2 (на схемі не показано) і її значення вибирають таким, що приблизно дорівнює половині напруги живлення ПСЧ. Для коригування еквівалентної напруги зміщення АЦП вимірювання здійснюється за методом комутаційного інвертування; операція комутаційного інвертування здійснюється програмно активізацією відповідних виводів мікросхеми ПСЧ. Відповідно й виводи мікросхем програмним способом можна з'єднати з певним доступним елементом ПСЧ. У цій структурі виводи ПСЧ під'єднуються до входів диференціального масштабувального перетворювача М. Цифровий код N_X результату вимірювання подається співвідношенням (5):

$$N_X = N_X^+ - N_X^- \cong 2k_{AD}k_H m \left\{ (\theta_{X1} - \theta_{X2}) \left[1 + b_H (\theta_{X1} + \theta_{X2}) \right] + \Delta a_X + \Delta b_X + \Delta e_{TD21} + \Delta u_{BH} \right\}, \quad (5)$$

де N_X^+ , N_X^- – відповідно, коди АЦП для додатної та від'ємної входних напруг ВРТ; k_{ADC} – коефіцієнт перетворення АЦП; m – коефіцієнт перетворення диференціального масштабувального перетворювача. Як показує аналіз виразу (5), у запропонованій структурі цифрового ВРТ коригуватиметься адитивна складова похибки (АСП) тільки вторинного приладу. Оскільки в структурі входного кола термоелектричного вимірювача різниці температур є низка термометричних елементів з малими термо-ЕРС та градієнтами температури (з'єднувальні колодки, ТД), які призначені для коригування методичних похибок ТП, то реалізувати метод комутаційного інвертування в такому колі практично нездійсненно без істотного ускладнення та збільшення структури цифрового ВРТ.

3. Розроблення процедури налагодження інтелектуальних каналів вимірювання різниці температур

Для оперативного контролювання великих спеціалізованих термометричних вимірювальних інформаційних систем їх забезпечують автоматизованими засобами метрологічного контролю. Наприклад, під час теплових випробувань авіаційної техніки кількість ТП може сягати тисяч одиниць. Для отримання достовірних даних про параметри температурних полів у них найширше ТП, віддалені від вимірювального обладнання встановлено на відстань до 100 м, використовують спеціальні імітатори сигналів ТП, що являють собою традиційне джерело опорної напруги з повторювачем напруги на основі операційного підсилювача, вихідним масштабним подільником та під'єднуються до контрольних входів системи [13].

Структура цифрового ВРТ як реалізованого на ПСЧ дає змогу практично довільно програмно під'єднувати велику сукупність виводів мікросхеми до внутрішніх елементів. Тому для налаштування цифрового ВРТ до його окремих входів можна під'єднати кодокеровану міру напруги-імітатор сигналів ТП (ККМН) і програмно змінювати конфігурацію системи. Для налагодження ВРТ пропонується поміщати спочатку ТП1 у середовище з відомою вимірюваною температурою θ_1 , сигнал з якого подавати до першого вимірювального входу ВРТ, а до другого входу підключати вихідний сигнал ККМН, на який подається код $n\theta_1$, пропорційний до значення температури θ_1 , вимірювати різницевий сигнал, за результатами якого визначати певні коригувальні коефіцієнти першого каналу. Після цього пропонується поміщати другий ТП2 в середовище з відомою вимірюваною температурою θ_2 , сигнал з якого подавати до другого вимірювального входу ВРТ, а до першого входу підключати вихідний сигнал ККМН, на який подається код $n\theta_2$,

пропорційний до значення температури θ_2 , вимірювати різницевий сигнал, за результатами якого визначати певні коригувальні коефіцієнти другого каналу.

Під час налагоджування першого вимірвального каналу за методом комутаційного інвертування вимірюється різниця вихідних сигналів ТП1 і ККМН і отримується код $N_{\theta K1}$:

$$N_{\theta K1} = 2k_{AD}m \left\{ e(\theta_1) - \frac{pnE_N\theta_1}{N_m} + \Delta e_{1ek} \right\}, \quad (6)$$

де $e(\theta_1) = a_1\theta_1 + b_1\theta_1^2$, $a_1 = a_H(1 + \delta_{a1})$, $b_1 = b_H(1 + \delta_{b1})$ – термо-ЕРС ТП1 за температури θ_1 , мультиплікативний та квадратичний коефіцієнти її функції перетворення; E_N , p – значення вихідної напруги джерела опорної напруги ККМН та коефіцієнт її перетворення відповідно; N_m – максимальне значення коду, який можна подати до ККМН; n – коефіцієнт пропорційності між значенням температури θ_1 та кодом $n\theta_1$, який подається до входу ККМН; Δe_{1ek} – еквівалентне значення похибок, спричинених неоднаковістю функцій перетворення та температур у місцях з'єднання виводів ТП1, ТД1.

Значення коду керування, який подається до входу ККМН, збільшується і встановлюється його значення $(1+h)n\theta_1$, значення температури θ_1 залишається незмінним. Отримуємо код $N_{\theta K11}$:

$$N_{\theta K11} = 2k_{AD}m \left\{ e(\theta_1) - \frac{(1+h)pnE_N\theta_1}{N_m} + \Delta e_{1ek} \right\}. \quad (7)$$

З рівнянь (6) та (7) можна обчислити значення мультиплікативного коефіцієнта в умовах довкілля та в момент налагодження першого вимірвального каналу:

$$2k_{AD}m = \frac{(N_{\theta K1} - N_{\theta K11})N_m}{phnE_N\theta_1}. \quad (8)$$

З урахуванням похибок елементів схеми співвідношення (6) подамо у вигляді:

$$\begin{aligned} N_{qK1} &\cong 2k_{AD}ma_Hq_1 \left[\left(1 + d_{a1} + \frac{b_1}{a_H}q_1 \right) - \right. \\ &\left. - \left(1 + d_p + d_E + d_m \right) \frac{p_H n E_{NH}}{a_H N_m} \right] + 2k_{AD}m \Delta e_{1ek} = \\ &= 2k_{AD}ma_Hq_1 \left[\left(1 - \frac{p_H n E_{NH}}{a_H N_m} \right) + \right. \\ &\left. + \left(d_{e1} - d_{KKM} \frac{p_H n E_{NH}}{a_H N_m} \right) \right] + 2k_{AD}m \Delta e_{1ek}, \quad (9) \end{aligned}$$

де $p = p_H(1 + \delta_p)$, $E_N = E_{NH}(1 + \delta_E)$; E_{NH} , p_H , δ_p , δ_E – номінальне значення вихідної напруги джерела опорної напруги ККМН, її коефіцієнта поділу та їх відносні похибки, відповідно; μ_1 , $\delta_{\mu 1}$ – відносне значення коду, який можна подати до ККМН, та його

відносна похибка; $\delta_{e1} = \delta_{a1} + b_1\theta_1/a_H$ – відносна похибка ТП1; $\delta_{KKM} = \delta_p + \delta_E + \delta_{\mu 1}$ – відносна похибка ККМН.

У разі виконання умови $p_H n E_{NH}/a_H N_m = 1$, тобто забезпечення однаковості коефіцієнтів передавання обох каналів, вираз (9) буде пропорційним до значення похибки ВРТ. Оскільки еквівалентне значення похибок, спричинених неоднаковістю функцій перетворення та температур у місцях з'єднання виводів ТП1, ТД1 повинно бути якомога меншим і залежить лише від конструктивно-технологічного виконання вхідних кіл ВРТ, то під час розгляду алгоритму налагодження ВРТ у першому наближенні його можна не враховувати. Оскільки похибки ККМН можуть бути значно меншими від похибок ТП $\delta_{KKM} \ll \delta_{e1}$, то із урахуванням викладеного можна визначити відносну похибку ТП1 під час вимірювання температури θ_1 :

$$\begin{aligned} \delta_{e1} &= \delta_{a1} + \frac{b_1}{a_H} \theta_1 = \frac{N_{\theta K1}}{2k_{AD}ma_H\theta_1} = \\ &= \frac{N_{\theta K1}}{N_{\theta K1} - N_{\theta K11}} \cdot \frac{phnE_N}{a_H N_m}. \quad (10) \end{aligned}$$

Під час налагодження другого вимірвального каналу ТП2 поміщають у середовище з відомою температурою θ_2 , значення якої бажано вибирати близьким до значення θ_1 , а до входу першого каналу підключають ККМН, до входу керування якого подають коди $N_{\theta 2} = n\theta_2$ та $N_{\theta 22} = (1+h)n\theta_2$. За методом комутаційного інвертування вимірюють різницю вихідних сигналів ТП1 і ККМН, отримуючи код $N_{\theta K2}$:

$$N_{\theta K2} = 2k_{AD}m \left\{ e(\theta_2) - \frac{pnE_N\theta_2}{N_m} + \Delta e_{2ek} \right\}, \quad (11)$$

$$N_{\theta K22} = 2k_{AD}m \left\{ e(\theta_2) - \frac{(1+h)pnE_N\theta_2}{N_m} + \Delta e_{2ek} \right\}, \quad (12)$$

де $e(\theta_2) = a_2\theta_2 + b_2\theta_2^2$, $a_2 = a_H(1 + \delta_{a2})$, $b_2 = b_H(1 + \delta_{b2})$ – термо-ЕРС ТП2 за температури θ_2 та мультиплікативний і квадратичний коефіцієнти її функції перетворення; E_N , p – значення вихідної напруги джерела опорної напруги ККМН та коефіцієнт її перетворення відповідно; N_m – максимальне значення коду, який може бути поданий до ККМН; Δe_{2ek} – еквівалентне значення похибок, спричинених неоднаковістю функцій перетворення та температур у місцях з'єднання виводів ТП1, ТД1.

Із урахуванням умов, аналогічних під час налагодження першого вимірвального каналу та умови, що похибки ККМН можуть бути значно меншими від похибок ТП $\delta_{KKM} \ll \delta_{e2}$, беручи до уваги викладене, можна визначити відносну похибку ТП2 під час вимірювання температури θ_2 :

$$\delta_{e2} = \delta_{a2} + \frac{b_2}{a_H} \theta_2 = \frac{N_{\theta K2}}{2k_{AD}ma_H\theta_2} =$$

$$= \frac{N_{\theta K2}}{N_{\theta K2} - N_{\theta K12}} \cdot \frac{hp_n E_N}{a_H N_m} \quad (13)$$

Результат вимірювання різниці температур після налагодження обох каналів подається співвідношенням:

$$N_x = N_{x1} - N_{x2} = 2k_{AD}m(e_1 - e_2) + 2k_{AD}m(\Delta e_{1ek} - \Delta e_{2ek}) = 2k_{AD}ma_H(q_{x1} - q_{x2}) + 2k_{AD}ma_H \left[q_{x1} \left(d_{a1} + \frac{b_1}{a_H} q_{x1} \right) - q_{x2} \left(d_{a2} + \frac{b_2}{a_H} q_{x2} \right) \right] + 2k_{AD}m(\Delta e_{1ek} - \Delta e_{2ek}). \quad (14)$$

Нехтуючи в першому наближенні похибками від неідентичності вхідних кіл через недосконале конструктивно-технологічне виконання вхідних кіл ВРТ та виділяючи у виразі (13) складові похибок ТП1 і ТП2, що подаються виразами (10) і (12), та розділивши обидві частини (13) на коефіцієнт $2k_{AD}ma_H$, після перетворень отримуємо таке співвідношення:

$$n_x = (q_{x1} - q_{x2}) + q_{x1} \left[\left(d_{a1} + \frac{b_1}{a_H} q_{x1} \right) + \frac{b_1}{a_H} (q_{x1} - q_1) \right] - q_{x2} \left[\left(d_{a2} + \frac{b_2}{a_H} q_{x2} \right) + \frac{b_2}{a_H} (q_{x2} - q_2) \right] \cong (q_{x1} - q_{x2}) + \left(\frac{N_{qK1}q_{x1}/q_1 - N_{qK2}q_{x2}/q_2}{2k_{AD}ma_H} \right) + \frac{b_H}{a_H} [q_{x1}(q_{x1} - q_1) - q_{x2}(q_{x2} - q_2)], \quad (15)$$

де $n_x = N_x / (2k_{AD}ma_H)$; θ_{x1} , θ_{x2} – значення температур, різницю між якими вимірюють; b_H – номінальне значення квадратичного коефіцієнта перетворення ТП.

Зі співвідношення (14) знаходимо вимірюване значення різниці температур:

$$q_{x1} - q_{x2} = N_x \frac{p_H n E_{NH} q_1}{(N_{qK1} - N_{qK11}) a_H N_m} - \frac{N_{qK1}q_{x1}/q_1 - N_{qK2}q_{x2}/q_2}{2k_{AD}ma_H} - \frac{b_H}{a_H} [q_{x1}(q_{x1} - q_1) - q_{x2}(q_{x2} - q_2)]. \quad (16)$$

Як показує аналіз виразу (14), друга її складова менша в декілька разів від основної першої складової, а третя складова визначає нелінійну складову похибки ВРТ. За значенням цієї нелінійної складової для заданих метрологічних властивостей можна розраховувати ширину діапазону вимірювання ВРТ.

Результати і обговорення

Беручи до уваги прикладні аспекти роботи КФС для температурних вимірювань, їх необхідно забезпечувати підсистемами оперативного температурного контролю та розробляти або окремі засоби вимірювань, зокрема разових застосувань, або ж підсистеми автоматизованого оперативного метрологічного стану. Використання з цією метою переносних кодокерованих багатозначних мір напруги обґрунтоване з огляду на конкурентоспроможні їхні технічні та метрологічні характеристики. Насамперед, якщо вибрати контролер вимірювальної системи ВРТ достатньої швидкодії та із задовільними обчислювальними можливостями, то калібратор сигналів ТП можна реалізувати програмним способом всередині ПСЧ з подальшим виведенням аналогової інформації за допомогою буферних аналогових елементів та масштабних подільників напруги.

Враховуючи невелику собівартість сучасних ЦАП, калібратор напруги сигналів ТП можна реалізувати як кодокерований подільник напруги. У цьому випадку необхідно використовувати окреме прецизійне та стабільне джерело зразкової напруги і засоби для коригування адитивних зміщень у вихідному колі калібратора напруги. Перевагу тут доцільно надати калібраторам напруги з автоматичним коригуванням адитивних зміщень для різних встановлених значень кодів керування [14]. Експериментальні дослідження макета такого калібратора напруги показали його працездатність та можливість отримання нескоригованого значення адитивних зміщень, не більшого від ± 1 мкВ. Таке мале значення нескоригованого значення адитивної складової похибки не перевищуватиме 0,1 К навіть для найменш чутливих ТП із номінальною статичною характеристикою перетворення ПП(S).

Однією із основних проблем побудови прецизійних ВРТ з термоелектричними перетворювачами є низька чутливість, яку традиційно можна підвищити, використовуючи ввімкнення їх як термобатарей.

Повністю автоматизувати налагодження термоелектричного ВРТ видається дуже складною операцією через необхідність розміщення ТП у середовищах з різною точно відомою і стабільною температурою з передаванням її значень до ВРТ. Для цього можна використовувати або прецизійні термостати з регульованим встановлюванням значень температури, або термостабілізовані ємкості з малим температурним градієнтом та прецизійним вимірювачем температури. Якщо в обох випадках використати цифрові засоби, не виникатиме проблеми з передаванням результатів через стандартні інтерфейси.

Отже, наявність різних кіберфізичних систем потребує розроблення як апаратури, так і алгоритмів функціонування для оперативного метрологічного контролювання, оскільки для забезпечення належної достовірності отриманої вимірювальної інформації зазвичай необхідно опрацювати велику, переважно надлишкову, кількість даних.

Висновки

Метрологічно надійна робота каналів вимірювання різниці температур кіберфізичних систем ґрунтується на коректній організації операції налагодження обох термоелектричних вимірювальних каналів за допомогою кодокерованих мір напруги. Під час налагодження встановлюється дійсне значення коефіцієнта перетворення вторинного приладу в конкретних умовах налагодження та в конкретний момент часу. За умови вимірювання температури в місцях встановлення термоелектричних перетворювачів окремими прецизійними засобами вимірювання можна скоригувати похибки обох вимірювальних каналів для знаходження різниці температур.

Подяка

Автори висловлюють вдячність колективу кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка», Україна, за допомогу та всебічне сприяння у підготовці статті.

Конфлікт інтересів

Під час виконання роботи не виникало жодних фінансових, організаційних або інших можливих конфліктів стосовно цієї роботи.

Список літератури

1. Matthias Nau. *Elektrische Temperaturmessung* / Matthias Nau. – JUMO GmbH & Co. KG. – 156 p.
2. 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.
3. Стрілецький Ю. Й. Метрологічні дослідження пристрою для прецизійного вимірювання різниці температур / Ю. Й. Стрілецький, А. Г. Винничук, О. Є. Середюк // *Системи обробки інформації*. – 2015. – № 2. – С. 100–103.
4. Кучеренко О. К., Ермоленко М. А. Влияние излучательной способности модели абсолютно черного тела на измерение эквивалентной шуму разности температур тепловизора // *Методи і системи оптично-електронної та цифрової обробки сигналів*. – Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2014. – Вип. 47(1). – С. 72–78.
5. Латенко В.І. Методика застосування пари резистивних сенсорів для вимірювання різниці температур // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – № 4. – 2014. – С. 68–73.

6. Полищук Є. С. *Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: підручник* / Є. С. Полищук, М. М. Дорожжовець, Б. І. Стадник, О. В. Івахів, Т. Г. Бойко, А. Ковальчик; за ред. проф. Є. С. Полищука. – Львів: Бескид-біт, 2008. – 618 с.

7. *Smart Sensor Systems*, edited by G. Mejer, John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 385 p.

8. Осадчук В. С. *Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом: монографія* / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 163 с.

9. Vasylykha Kh. *Experimental studies of temperature channel efficiency for solar energy systems* / Kh. Vasylykha, Yu. Yatsuk, V. Zdeb, V. Yatsuk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* (ISSN 1729-3774). – 3/8 (87), 2017. – P. 10–16.

10. Анатыйчук Л. И. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства: справочник*. – К.: Наукова думка, 1979. – 766 с.

11. Линеваг Ф. *Измерение температуры в технике: справочник* / Ф. Линеваг; перевод с нем.; под ред. Л. А. Чарихова. – М.: Металлургия, 1980. – 544 с.

12. Ю. О. Скрипник, О. А. Дубровний, П. В. Чефранов. Патент 53288А Україна, МПК G01K 7/14. *Термоелектричний пристрій для вимірювання різниці температур* / заявник і власник Київський національний університет технологій і дизайну. – № 2002043266, заявл. 19.04.2002; опубл. 15.01.2003, Бюл. №1.

13. Имитатор сигнала терморпары, Патент. Google patent/RU2324908C2. В. В. Шевчук (RU). – Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»), Priority date 2006-06-22.

14. Матвіїв Р. О. Аналіз частотних характеристик коригування адитивних зміщень у калібраторах постійної напруги / Р. О. Матвіїв, В. О. Яцук // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2017. – № 78. – С. 15–18.

References

1. Matthias Nau. *Elektrische Temperaturmessung* / Matthias Nau. – JUMO GmbH & Co. KG. – 156 p.
2. Oleskiv T. *Metrological support of temperature difference meters on the basis of platinum thermocouples with a two-line communication line* / T. Oleskiv, V. Yatsuk // *Measuring equipment and metrology*. – 2013. – No. 74. – P. 25–28.
3. Strileckyj Yu. J. *Metrological examination of the device for precision measurement of temperature difference* / Yu. J. Strileckyj, A. G. Vynnychuk, O. Je. Sereduik // *Information processing systems*. – 2015. – No. 2. – P. 100-103.
4. Kucherenko O. K. *Influence of the emissivity of the model of an absolutely black body on the measurement of the noise equivalent to the difference in the temperature of the thermal imager* / O. K. Kucherenko, M. A. Jermolenko // *Methods and systems of optical-electronic and digital signal processing*. – Issue NTUU “KPI”. Series APPLIANCE DEVELOPMENT. – 2014. – No. 47(1). – P. 72–78.
5. Latenko V. I. *Method of application of a pair of resistive sensors to measure temperature difference* // *Measuring and computing engineering in technological processes*. – No. 4. – 2014. – P. 68–73.
6. Polischuk Je. S. *Means and methods of measuring non-electric quantities: textbook* / Je. S. Polischuk, M. M. Dorozhovets, B. I. Stadnyk, O. V. Ivakhiv, T. G. Bojko, A. Kovalchuk; under red. prof. Je. S. Polischuk. – Lviv: Beskyd-bit, 2008. – 618 p.

7. *Smart Sensor Systems*, edited by G. Mejer, John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 385 p.

8. Osadchuk V. S. *Microelectronic temperature sensors with frequency output: monograph* / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, N. S. Kravchuk. — Vinnytsa: Universum- Vinnytsa, 2007. – 163 p.

9. Vasylykha Kh. *Experimental studies of temperature channel efficiency for solar energy systems* / Kh. Vasylykha, Yu. Yatsuk, V. Zdeb, V. Yatsuk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies (ISSN 1729-3774)*. –3/8 (87), 2017. – P. 10–16.

10. Anatyshuk L. I. *Thermoelements and thermoelectric devices: Directory*. - Kyiv: Naukova dumka, 1979. - 766 p.

11. Lineveg F. *Temperature measurement in engineering: Directory*. / F. Lineveg; translate from Germ.; under red. L. A. Charykhova – Moscow: Metallurgia, 1980. – 544 p.

12. Ju. O. Skrypnyk, O. A. Dubrovij, P. V. Chefranov. Patent. 53288A Ukraine, MPK G01K 7/14. *Thermoelectric device for measuring temperature difference* / applicant and owner Kyiv National University of Technology and Design. – No. 2002043266, appl. 19.04.2002; publ. 15.01.2003, Bul. No. 1.

13. *Thermocouple signal simulator*, Patent. Google patent/RU2324908C2. V. V. Shevchuk (RU). – Federal State Unitary Enterprise «Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N. E. Zhukovskij» (FGUE «TAGM»), Priority date 2006-06-22.

14. Matviyiv R. O. *Analysis of frequency characteristics of correction of additive displacements in constant voltage calibrators* / R. O. Matviyiv, V. O. Yatsuk // *Measuring equipment and metrology*. – 2017. – No. 78. – P. 15–18.