

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.т.н. проф., Здеб В.Б.¹, інженер, Яцук Ю.В.²

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

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

Анотація

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

У сучасній вимірювальній техніці кібер-фізичні системи як розпорошені інтелектуальні системи на основі взаємодіючих мереж фізичних та обчислювальних компонентів забезпечують нові функціональні можливості щодо покращення якості процесів вимірювань. Запропоновано здійснювати автоматизоване оперативне налаштування метрологічних параметрів цифрових вимірювачів різниці температур в процесі експлуатації. Вторинний прилад пропонується реалізовувати на основі програмованих на чіпі структур з використанням кодокерованих багатозначних мір напруги. Показано, що під час розміщення обох термоелектричних перетворювачів в середовищах із відомими значеннями температури можна скоригувати похибки, зумовлені інструментальними похибками сенсорів. Окрім того з допомогою зміни кодів керування кодокеровані міри напруги запропоновано визначати коефіцієнт перетворення вторинного приладу в даний момент часу та в даних умовах експлуатації.

Обговорено також можливості практичної реалізації цифрових вимірювачів різниці температур з автоматичним налагодженням в робочих умовах експлуатації.

Abstract

The accuracy of temperature difference meters depends on technological parameters of controlled processes. The meters of temperature difference can be constructed for operation in a wider temperature range. Their accuracy is determined by the non-identity of the sensors transformation functions.

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 coded multi-valued voltage measures. 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.

Operative debugging of a digital temperature difference meter is proposed that consists in the alternating installation 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 fed into a code proportional to the code of the known temperature values. It is proved that in this way it becomes possible to adjust the errors caused by instrumental errors of the temperature sensors of both measuring channels. Changing the codes of control of the voltage measure, we can determine the conversion factor of the secondary device at the given temporal and operating conditions. A detailed analysis of the errors is performed during the execution of the procedures for adjusting the parameters of both measuring channels.

Ключові слова

Вимірювач різниці температур, термоелектричний сенсор, кібер-фізичні системи, коригування похибок, кодокеровані міри, автоматичне самоналаштування

Keywords

Temperature Difference Meter, Thermoelectric Sensor, Cyber-Physical System, Error Adjustment, Code-Controlled Measure, Automatic Settings.

1. 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 вимірювальний засіб, не ідентичність функцій перетворення сенсорів в якому визначає їх обмежувальні метрологічні властивості. В традиційних вимірювачах різниці температур (ВРТ) зазвичай використовуються стандартні температурні сенсори із забезпеченням їх заданих метрологічних характеристик конструктивно-технологічними методами в процесі виготовлення. Під час подальшої експлуатації проводиться їх періодична перевірка або ж калібрування з прийняттям рішення про можливість і доцільність їх подальшого використання. Під час експлуатації здебільшого в ручному режимі проводиться повторне налаштування вторинного ВРТ, при цьому з огляду на велику трудомісткість не аналізується характер дрейфу метрологічних характеристик, тому й не реєструються та не опрацьовуються результати цих випробувань. Останнім часом щораз швидше в усі галузі впроваджуються кібер-фізичні системи (КФС) як розпорошені інтелектуальні системи на основі взаємодіючих мереж фізичних та обчислювальних компонентів. У вимірювальній техніці вони забезпечують нові функціональні можливості щодо покращення якості процесів вимірювань, шляхом використання даних сенсорів. На основі влаштованого програмного забезпечення КФС дозволяють якнайшвидше і якнайточніше сигналізувати про зміну як вимірювальних, так і неінформативних параметрів робочого середовища з подальшим виконанням адекватних дій.

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

2. Недоліки

Для вимірювання різниці температур на практиці здебільшого використовують термоелектричні, терморезистивні, напівпровідникові та мікроелектронні сенсори [6-8]. Мікроелектронні сенсори температури щораз ширше використовуються у практичній термометрії, однак через технологічні обмеження мають відносно вузький діапазон застосування та назагал недостатню для практичного застосування точність, зумовлену розкидом параметрів сучасних компонентів [7, 8]. Спроби підвищення точності напівпровідникових сенсорів спряжені із суттєвим ускладненням процедури налагодження усього комплексу ВРТ [9]. Терморезистивні сенсори дають можливість досягнення потенційно найвищої точності вимірювання різниці температур в діапазоні середніх температур, однак при цьому слід враховувати їх індивідуальні статичні характеристики перетворення (СХП) [2, 3, 5]. Окрім цього слід коригувати похибки, зумовлені впливом нестабільних параметрів з'єднувальних дротів, шляхом використання чотири дрового підключення сенсорів, що суттєво ускладнює структуру усього ВРТ [2].

До переваг термоелектричних перетворювачів (ТП) відносять великий температурний діапазон вимірювання від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1800\text{--}2500\text{ }^{\circ}\text{C}$, простоту схемотехнічного та конструктивного виконання, дешевизну та надійність (їх можна використовувати навіть при високих рівнях іонізуючих випромінювань, наприклад, на атомних реакторах). Якщо робочий спай ТП поміщається в середовище з однією із вимірюваних температур θ_{x1} , в той час як його вільні кінці розміщені в середовищі з іншою вимірюваною температурою θ_{x2} , то отримується найпростіша структура ВРТ [10]. Такий спосіб вимірювання різниці температур є до певної міри обмеженим і може застосовуватись для великорозмірних вимірюваних об'єктів, які визначаються розмірами пристрою вирівнювання температури обох вільних кінців ТП. В традиційних вимірювачах різниці температур, які складаються із двох зустрічно сполучених ТП, робочі злоти яких знаходяться в середовищах з різними вимірюваними температурами θ_{x1} та θ_{x2} важко буде досягти точності понад 1°C через суттєвий вплив неідентичності СХП обидвох ТП, зміни температури вільних кінців в місцях їх підключень до вторинного ВРТ [11]. Зменшувати точність можуть також подовжувальні термоелектродні дроти, якщо вони застосовуються, наприклад, у випадку проведення вимірювань в місцях неприпустимих для наявності оператора, або мікроелектронних засобів вимірювань. В моменти зняття показів ВРТ, необхідно виключити проходження струмів через обидва ТП, так як їх проходження завдяки ефекту Пельтьє може охолоджувати гарячі спаї і розігрівати холодні, або навпаки залежно від напрямку його протікання. Нелінійність СХП ТП спричиняє появу похибок ВРТ в широкому діапазоні перетворювання. Виникнення термоелектричної неоднорідності в

результаті різких перепадів температур, механічних напружень, корозії і хімічних процесів в провідниках призводить до зміни градієнтної характеристики і зростання похибок до 5 К. У випадку великої довжини термопарних і подовжувальних проводів існуючі природні та техногенні електромагнітні поля можуть викликати наведення співмірні, або й набагато більші від інформативного сигналу диференціально увімкнених ТП.

Для зменшення похибок від неідентичності СХП обидвох ТП виготовляється диференційний сенсор ВРТ з двох термоелектродних дрітків, які посередині електрично з'єднуються для створення робочого спаю, який поміщається в середовище з однією із вимірюваних температур, в той час як інші чотири виводи обох ТП (вільні кінці сенсора ВРТ) поміщаються в середовище з іншою вимірюваною температурою [12]. Оскільки під час вимірювання малих значень різниць температур починають суттєво впливати адитивні похибки, завади і шуми вторинного приладу ВРТ, то пропонується використовувати масштабний вимірювальний підсилювач з коригуванням адитивних зміщень усього підсилювального тракту шляхом модуляції-підсилення-демодуляції 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 е.р.с 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 в ручному режимі стає на заваді автоматизації процесу налагодження та оперативного контролювання протікання вимірювальних процесів та суттєво утруднює побудову вимірювальних каналів КФС для різниці температур у широкому діапазоні зміни температури вільних кінців.

3. Мета роботи

Метою роботи є дослідження можливостей підвищення точності вимірювання різниці температур термоелектричними перетворювачами для кібер-фізичних систем з урахуванням їх сучасного метрологічного та програмного забезпечення.

4. Матеріали та методи

Автоматизація є характерною рисою сучасного виробництва і реалізується, у першу чергу, 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. На сьогодні мова йде вже не стільки про необхідність інтелектуалізації окремих приладів, а про можливість побудови розпорошених вимірювальних систем, склад яких і місце розташування окремих її частин можуть гнучко змінюватись (як в 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 в робочих умовах експлуатації.

Біля 15% всіх технічних вимірювань складають вимірювання температури, а приблизно 60% температурних вимірювань – це вимірювання з допомогою ТП.

6.1. 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 дрітків ТД, клемної колодки для під'єднання ТД до входу вторинного вимірювача різниці температур (ВРТ) (рис. 1). Робочі з'єднання ТП1 та ТП2 знаходяться в 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 загалом є неоднаковими, як і температури клемної колодки в місцях підключення ТД θ_{H11} та θ_{H12} і θ_{H21} та θ_{H22} .

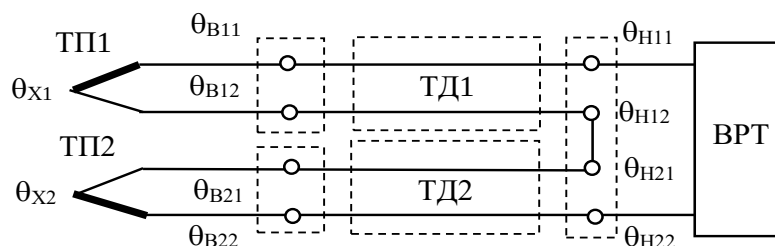


Рис. 1. – Структурна схема термоелектричного вимірювача різниці температур
Fig.1 - Structural scheme of thermoelectric meter temperature difference

Вихідна напруга для кожного з вимірювальних каналів подається співвідношеннями:

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

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

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-е.р.с. ТП1 при температурі робочого з'єднання θ_{X1} та вільних кінців θ_{B11} і при температурі робочого з'єднання $\theta_{B12}-\theta_{B11}$ 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-е.р.с. ТД1 при температурі зі сторони робочого з'єднання θ_{B11} та зі сторони ВРТ θ_{H11} , при температурі зі сторони робочого з'єднання $\theta_{B11}-\theta_{B12}$ та зі сторони ВРТ 0°C і при температурі зі сторони робочого з'єднання $\theta_{H12}-\theta_{H11}$ і 0°C зі сторони ВРТ; $e_{X2}(\theta_{X2}, \theta_{B21})$, $e_{X2}(\Delta\theta_{B22}, 0)$ - відповідно, вихідна термо-е.р.с. ТП2 при температурі робочого з'єднання θ_{X2} та вільних кінців θ_{B21} і при температурі робочого з'єднання $\theta_{B22}-\theta_{B21}$ 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-е.р.с. ТД2 при температурі зі сторони робочого з'єднання θ_{B21} та зі сторони ВРТ θ_{H21} , при температурі зі сторони робочого з'єднання $\theta_{B22}-\theta_{B21}$ та зі сторони ВРТ 0°C і при температурі зі сторони робочого з'єднання $\theta_{H22}-\theta_{H21}$ і 0°C зі сторони 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, зумовлена різним характером температурних залежностей ТП1 та ТД1 і градієнтами температури в з'єднувальних колодках в 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, зумовлена різним характером температурних залежностей ТП2 та ТД2 і градієнтами температури в з'єднувальних колодках в колі перетворення сигналу з ТП2; a_1 , a_2 , g_1 , g_2 - мультиплікативні коефіцієнти перетворення, відповідно, ТП1 та ТД1 і ТП2 та ТД2; $\Delta u_{BH} = e_{X1}(\Delta\theta_{B12}, 0) - e_{X2}(\Delta\theta_{B22}, 0)$.

З метою спрощення подання матеріалу для відносно невеликих значень вимірюваних різниць температури функція перетворення ТП може бути апроксимована квадратним поліномом. Тоді вираз (4) може бути поданий як:

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

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 в основному визначається метрологічними характеристиками вимірювального кола. Адитивна складова похибки, зумовлена градієнтами температур в з'єднувальних колодках, позірно не може бути скоригованою в структурі ВРТ протягом довгих проміжків часу та під час змін умов довкілля. Мультиплікативна складова похибки визначається інструментальними похибками ТП, а нелінійна складова повинна враховуватись в прецизійних ВРТ.

6.2. Розроблення структури інтелектуальних каналів вимірювання різниці температур

Сучасні інтелектуальні пристрої збирання та опрацювання інформації про різницю температур найдоцільніше реалізувати на основі програмованих систем на чіпі (ПСЧ) (рис. 2). Особливістю таких мікросхем є відносно високі метрологічні характеристики при однополярному живленні, що змушує використовувати в системі схеми зміщення рівня (в деяких мікросхемах, наприклад, фірми Cypress Semiconductor, є вбудованими). Розроблена структура цифрового ВРТ (рис. 2) побудована з максимальним використанням аналогових елементів, які є на чіпі, зокрема операційних підсилювачів (ОП) та ЦАП VDAC1. На рис. 2 значком «синя стрілка» позначено аналогові вводи-виводи ПСЧ; чорним кольором позначено зовнішні елементи; синім кольором

позначено внутрішні елементи ПСЧ. Напруга зміщення шкали перетворення внутрішнього диференціального АЦП формується внутрішнім ЦАП VDAC2 (на схемі не показаний) і її значення вибирається

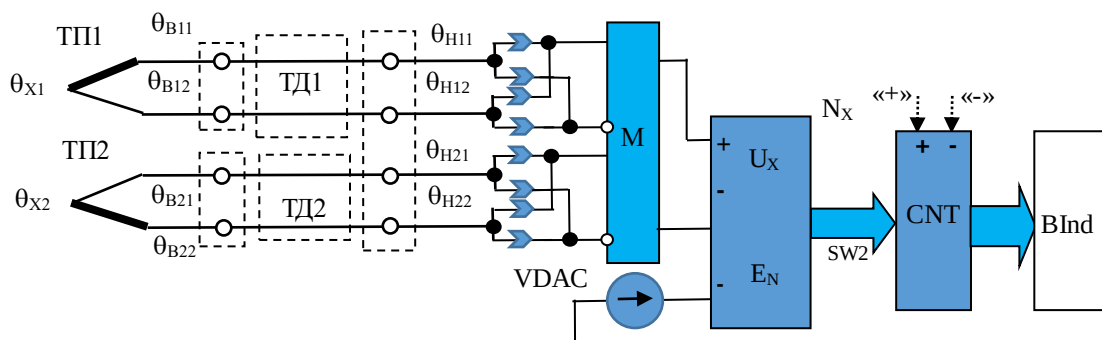


Рис. 2. Структурна схема цифрового термоелектричного вимірювача різниці температур (➤ аналогові

виводи)

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

приблизно рівним половині напруги живлення ПСЧ. Для коригування еквівалентної напруги зміщення АЦП вимірювання здійснюється за методом комутаційного інвертування, при цьому операція комутаційного інвертування здійснюється програмним чином шляхом активізації відповідних виводів мікросхеми ПСЧ. Відповідно й виводи мікросхем програмним способом можуть бути з'єднані 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) в 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-е.р.с. та градієнтами температури (з'єднувальні колодки, ТД), які призначені для коригування методичних похибок ТП, то реалізувати метод комутаційного інвертування в такому колі виглядає практично нездійсненним без суттєвого ускладнення та здорожчання структури цифрового ВРТ.

6.3. Розроблення процедури налагодження інтелектуальних каналів вимірювання різниці температур

Для оперативного контролювання крупних спеціалізованих термометричних вимірювальних інформаційних систем вони забезпечуються 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 в них найширше ТП, які віддалені від вимірювального обладнання до 100 метрів, використовувати спеціальні імітатори сигналів ТП, які являють собою традиційне джерело опорної напруги з повторювачем напруги на базі операційного підсилювача та вихідним масштабним подільником, та підключаються до контрольних входів системи [13].

Структура цифрового ВРТ як реалізованого на ПСЧ дозволяє практично довільно програмним чином під'єднувати велику сукупність виводів мікросхеми до внутрішніх елементів. Тому для налаштування цифрового ВРТ до його окремих входів можна підключити кодокеровану міру напруги-імітатор сигналів ТП (ККМН) і програмним чином змінювати конфігурацію системи. Для налагодження ВРТ пропонується поміщати спочатку ТП1 в 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 вимірювального каналу за методом комутаційного інвертування вимірюється різниця вихідних сигналів ТП1 і ККМН і отримується код $N_{\theta K1}$:

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

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-е.р.с. ТП1 при температурі θ_1 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; n - коефіцієнт пропорційності між значенням температури θ_1 та кодом $n\theta_1$, який подається до входу ККМН; Δe_{lek} - еквівалентне значення похибок, зумовлених неоднаковістю функцій перетворення та температур в місцях з'єднання виводів ТП1, ТД1.

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

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

З рівнянь (6) та (7) можна визначити значення мультиплікативного коефіцієнту в умовах довкілля та в момент

здійснення налагодження першого вимірювального каналу:

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

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

$$\begin{aligned} N_{\theta K1} &\cong 2k_{AD}m a_H \theta_1 \left[\left(1 + \delta_{a1} + \frac{b_1}{a_H} \theta_1 \right) - \left(1 + \delta_p + \delta_E + \delta_\mu \right) \frac{p_H n E_{NH}}{a_H N_m} \right] + 2k_{AD}m \Delta e_{1ek} = \\ &= 2k_{AD}m a_H \theta_1 \left[\left(1 - \frac{p_H n E_{NH}}{a_H N_m} \right) + \left(\delta_{e1} - \delta_{KKM} \frac{p_H n E_{NH}}{a_H N_m} \right) \right] + 2k_{AD}m \Delta e_{1ek} \end{aligned} \quad (9)$$

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 може бути поданий 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.

За 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. Враховуючи, що еквівалентне значення похибок, зумовлених неоднаковістю функцій перетворення та температур в 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 в першому наближенні його можна не враховувати. Оскільки похибки ККМН можуть бути значно меншими від похибок ТП $\delta_{KKM} < \delta_{e1}$, то із врахуванням викладеного можна визначити відносну похибку ТП1 під час вимірювання температури θ_1 :

$$\delta_{e1} = \delta_{a1} + \frac{b_1}{a_H} \theta_1 = \frac{N_{\theta K1}}{2k_{AD}m a_H \theta_1} = \frac{N_{\theta K1}}{N_{\theta K1} - N_{\theta K11}} \cdot \frac{h p n E_N}{a_H N_m}. \quad (10)$$

Під час налагодження другого вимірювального каналу ТП2 поміщається в середовище з відомою температурою θ_2 , значення якої бажано вибирати близьким до значення θ_1 , а до входу першого каналу підключається ККМН, до входу керування якого подаються коди $N_{\theta 2} = n \theta_2$ та $N_{\theta 22} = (1 + h) n \theta_2$ за методом комутаційного інвертування вимірюється різниця вихідних сигналів ТП1 і ККМН і отримується код $N_{\theta K2}$:

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

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

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-е.р.с. ТП2 при температурі 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, зумовлених неоднаковістю функцій перетворення та температур в місцях з'єднання виводів ТП1, ТД1.

Із врахуванням умов, аналогічних під час налагодження першого вимірювального каналу та умови, що похибки ККМН можуть бути значно меншими від похибок ТП $\delta_{KKM} < \delta_{e2}$, то із врахуванням викладеного можна визначити відносну похибку ТП2 під час вимірювання температури θ_2 :

$$\delta_{e2} = \delta_{a2} + \frac{b_2}{a_H} \theta_2 = \frac{N_{\theta K2}}{2k_{AD}m a_H \theta_2} = \frac{N_{\theta K2}}{N_{\theta K2} - N_{\theta K12}} \cdot \frac{h p n E_N}{a_H N_m}. \quad (12)$$

Результат вимірювання різниці температур після налагодження обох каналів подається співвідношенням:

$$\begin{aligned} N_X = N_{X1} - N_{X2} &= 2k_{AD}m(e_1 - e_2) + 2k_{AD}m(\Delta e_{1ek} - \Delta e_{2ek}) = 2k_{AD}m a_H (\theta_{X1} - \theta_{X2}) + \\ &+ 2k_{AD}m a_H \left[\theta_{X1} \left(\delta_{a1} + \frac{b_1}{a_H} \theta_{X1} \right) - \theta_{X2} \left(\delta_{a2} + \frac{b_2}{a_H} \theta_{X2} \right) \right] + 2k_{AD}m (\Delta e_{1ek} - \Delta e_{2ek}). \end{aligned} \quad (13)$$

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 $2k_{AD}m a_H$, після перетворень отримаємо таке співвідношення:

$$\begin{aligned} n_X &= (\theta_{X1} - \theta_{X2}) + \theta_{X1} \left[\left(\delta_{a1} + \frac{b_1}{a_H} \theta_{X1} \right) + \frac{b_1}{a_H} (\theta_{X1} - \theta_1) \right] - \theta_{X2} \left[\left(\delta_{a2} + \frac{b_2}{a_H} \theta_{X2} \right) + \frac{b_1}{a_H} (\theta_{X2} - \theta_2) \right] \cong \\ &\cong (\theta_{X1} - \theta_{X2}) + \left(\frac{N_{\theta K1} \theta_{X1} / \theta_1 - N_{\theta K2} \theta_{X2} / \theta_2}{2k_{AD}m a_H} \right) + \frac{b_H}{a_H} [\theta_{X1} (\theta_{X1} - \theta_1) - \theta_{X2} (\theta_{X2} - \theta_2)] \end{aligned} \quad (14)$$

де $n_X = N_X / (2k_{AD} m a_H) =$; θ_{X1} , θ_{X2} – значення температур, різницю між якими вимірюється; b_H – номінальне значення квадратичного коефіцієнта перетворення ТП.

Із співвідношення (14) визначається вимірюване значення різниці температур:

$$\theta_{X1} - \theta_{X2} = N_X \frac{p_H n E_{NH} \theta_1}{(N_{\theta K1} - N_{\theta K11}) a_H N_m} - \frac{N_{\theta K1} \theta_{X1} / \theta_1 - N_{\theta K2} \theta_{X2} / \theta_2}{2k_{AD} m a_H} - \frac{b_H}{a_H} [\theta_{X1}(\theta_{X1} - \theta_1) - \theta_{X2}(\theta_{X2} - \theta_2)] \quad (14)$$

Як показує аналіз виразу (14) друга її складова є меншою 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.

5. Результати і обговорення

Виходячи з прикладних аспектів роботи КФС для температурних вимірювань їх слід забезпечувати підсистемами оперативного температурного контролю та необхідно розробляти або окремі засоби вимірювань, в тому числі, разових застосувань, або ж підсистеми автоматизованого оперативного метрологічного стану. Використання з цією метою переносних кодокерованих багатозначних мір напруги є обґрунтованим з огляду на конкурентоспроможні їх технічні та метрологічні характеристики. Насамперед, якщо вибрати контролер вимірювальної системи ВРТ достатньої швидкодії та із задовільними обчислювальними можливостями, то калібратор сигналів ТП може бути реалізований програмним способом всередині ПСЧ з подальшим виведенням аналогової інформації з допомогою буферних аналогових елементів та масштабних подільників напруги.

Враховуючи невелику собівартість сучасних ЦАП, калібратор напруги сигналів ТП може бути реалізований 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 віддати калібраторам напруги з автоматичним коригуванням адитивних зміщень для різних встановлюваних значень кодів керування [14]. Експериментальні дослідження макету такого калібратора напруги показали його працездатність та можливість отримання нескоригованого значення адитивних зміщень не більше від ± 1 мкВ. Таке мале значення нескоригованого значення адитивної складової похибки не перевищуватиме 0,1 К навіть для найменш чутливих ТП з номінальною статичною характеристикою перетворення ПП(S).

Однією із основних проблем побудови прецизійних ВРТ з термоелектричними перетворювачами є мала чутливість, яку традиційно можна підвищити шляхом використання включення їх як термобатарей.

Повністю автоматизувати процес налагодження термоелектричного ВРТ виглядає дуже складною операцією через необхідність розміщення ТП в 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 ємності з малим температурним градієнтом та прецизійним вимірювачем температури. Під час використання в обох випадках цифрових засобів не буде великої проблеми в передаванні результатів через стандартні інтерфейси.

Отже, наявність різних кібер-фізичних систем вимагає розроблення як апаратури, так і алгоритмів функціонування для оперативного метрологічного контролювання, оскільки для забезпечення великої достовірності отримуваної вимірювальної інформації зазвичай необхідно опрацьовувати значну, переважно надлишкову, кількість даних.

6. Висновки

Метрологічно надійна робота каналів вимірювання різниці температур кібер-фізичних систем базується на коректній організації операції налагоджування обох термоелектричних вимірювальних каналів з допомогою кодокерованих мір напруги. Під час налагодження встановлюється дійсне значення коефіцієнта перетворення вторинного приладу в даних умовах налагодження та в даний момент часу. За умови вимірювання температури в місцях встановлення термоелектричних перетворювачів окремими прецизійними засобами вимірювання можуть бути скориговані похибки обох вимірювальних каналів для знаходження різниці температур.

Подяка

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

Конфлікт інтересів

Під час виконання роботи не існувало будь-яких фінансових, організаційних або інших можливих конфліктів, що стосується цієї роботи.

Список літератури

1. Matthias Nau. Elektrische Temperaturmessung /Matthias Nau. – JUMO GmbH & Co. KG // ISBN-13:978-3-935742-06-1. – 156 p.
2. Олесків Т. Метрологічне забезпечення вимірювачів різниці температур на основі платинових термоперетворювачів з дводротовою лінією зв'язу / Т. Олесків, 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. Поліщук Є.С. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, Б.І. Стадник, О.В. Івахів, Т.Г. Бойко, А. Ковальчик; за ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Вид-во «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. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. – Київ: Наукова думка, 1979. – 766 с.
11. Линеверг Ф. Измерение температуры в технике: Справочник. / Ф. Линеверг; перевод с нем; под ред. Л.А. Чарихова – Москва: 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 термонары, 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. Матвійів Р.О. Аналіз частотних характеристик коригування адитивних зміщень у калібраторах постійної напруги / Р.О. Матвійів, В.О. Яцук // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2017. - №78. – С. 15-18.

References

- [1] N. Matthias. Elektrische Temperaturmessung, JUMO GmbH & Co. [On-line]. Available: <https://www.jumo.net/attachments/JUMO/attachmentdownload?id=5116>.
- [2] T. Oleskiv, V. Yatsuk, “Metrological support of temperature difference meters on the basis of platinum thermocouples with a two-line communication line”, *Measuring equipment and metrology*, Lviv Polytech. Nat..Univ., Ukraine, no.74, p.25-28, 2013.
- [3] Yu. Strileckij, G. Vynnychuk, O. Sereduik, “Metrological examination of the device for precision measurement of temperature difference”, *Information processing systems*, no.2, p.100-103, 2015.
- [4] O. Kucherenko, M. Jermolenko, “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, *Methods and systems of optical-electronic and digital signal processing*, Series Appliance development, NTUU “KPI”, no.47(1), p.72-78, 2014.
- [5] V. Latenko, “Method of application of a pair of resistive sensors to measure temperature difference”, *Measuring and computing engineering in technological processes*. Ukraine, no.4, p. 68-73, 2014.
- [6] Ye. Polischuk, M/ Dorozhovets, B. Stadnyk, O. Ivakhiv, T. Bojko, A. Kovalchuk, *Means and methods of measuring non-electric quantities*, Lviv, Ukraine: Beskyd-Bit, 2008.
- [7] *Smart Sensor Systems*, edited by G. Mejer, John Wiley & Sons, 2008.
- [8] V. Osadchuk, O. Osadchuk, N. Kravchuk. *Microelectronic temperature sensors with frequency output*. Vinnytsa, Ukraine: Universum-Vinnytsa, 2007.
- [9] Kh Vasylykha, Yu. Yatsuk, V. Zdeb, V. Yatsuk, “Experimental studies of temperature channel efficiency for solar energy systems”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol.3/8 (87), p.10-16, 2017.
- [10] L. Anatychuk. *Thermoelements and thermoelectric devices*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 1979.
- [11] F. Lineveg. *Temperature measurement in engineering* [Russian translation], Moskow, USSR: Metallurgia, 1980.

- [12] Yu. Skrypnyk, O. Dubrovij, P. Chefranov, "Thermoelectric device for measuring temperature difference", Pat. Ukraine, no.53288A, MPK G01K 7/14, Jan. 15, 2003.
- [13] .V. Shevchuk, "Thermocouple signal simulator", Pat. RF, no.RU2324908C2, June 22, 2006.
- [14] R. Matviyiv, V. Yatsuk, "Analysis of frequency characteristics of correction of additive displacements in constant voltage calibrators", *Measuring equipment and metrology*, no.8, p.15-18, 2017.