

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ ГЕЛІОСИСТЕМ

METROLOGICAL SUPPORT OF THE MEASUREMENT of TEMPERATURE DIFFERENCE AND TEMPERATURE IN SOLAR SYSTEMS

Яцук В. О., д-р техн. наук, проф.

Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail: yatsuk.vasyl@gmail.com

Олесків Т. М., провідний інженер з метрології

ПАТ «Концерн Галнафтогаз», Україна; e-mail: taras_oleskiv@ukr.net

Yatsuk V., Dr. Sc., Prof.

Lviv Polytechnic National University, Ukraine; e-mail: yatsuk.vasyl@gmail.com

Oleskiv T., leading metrology engineer

PJSC Concern Galnaftogaz, Ukraine; e-mail: taras_oleskiv@ukr.net

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.04.054>

Аногація. Зазначено, що для істотного зростання ефективності перетворювачів сонячної енергії необхідно точно вимірювати температуру та різницю температур. Вимоги міжнародних нормативних документів перевищують метрологічні параметри найкращих стандартизованих сенсорів температури. Зазначено, що в таких умовах для вирішення цієї проблеми підвищення точності необхідне розроблення термометрів та вимірювачів різниці температур з коригуванням похибок за нескладною та практично придатною процедурою. Показано доцільність реалізації прецизійних термометрів на основі платинових термоперетворювачів опору та багаторозрядних спеціалізованих інтегральних мікросхем. Розроблено структуру прецизійного цифрового термометра, висвітлено особливості його реалізації залежно від характеристики сенсора та без віднімання початкового значення опору в аналоговій формі. На підставі аналізу похибок цифрового термометра запропоновано методику його налаштування з коригуванням адитивної та мультиплікативної складових похибки.

Наголошено на складності реалізації точних цифрових вимірювачів різниці температур через необхідність забезпечення інваріантності до впливів чотиридротових з'єднувальних ліній та вимірювальних струмів за істотного зменшення їх порога чутливості. Запропоновано структуру та методику коригування похибок прецизійних вимірювачів різниці температур із різночасовим перетворенням сигналів з обох сенсорів та визначенням результату вимірювання в цифровій формі. Це уможливило уніфікацію схемотехнічних рішень під час побудови як прецизійних термометрів, так і точних і чутливих вимірювачів різниці температур.

Ключові слова: сонячний перетворювач, метрологічне забезпечення, вимірювання температури і різниці температур, коригування похибок.

Abstract. It is noted that for the efficiency enhancement of solar energy converters it becomes necessary to measure exactly the temperature and temperature difference. The requirements of normative documents exceed the metrological parameters of the standardized temperature sensors. Therefore, the challenge of thermometers and temperature difference meters accuracies can be solved by errors correction within simple and practically suitable procedure.

The expediency of the implementation of precision thermometers based on platinum resistance thermoconverters and multi-valued specialized integrated schemes are shown. The structure of the precise digital thermometer is developed. The features of its realization are shown, depending on the sensor. Basing on analyzing the digital thermometer errors, the method for its adjustment is considered. It consists in correcting their additive and multiplicative error components.

It is emphasized on the complexity of the implementation of accurate digital temperature difference meters because of the need to ensure the invariance to the effects of four-wire connecting lines and measuring currents after significantly reducing their sensitivity threshold. The structure and errors correction method of precision temperature difference meters with time-varying signals from two sensors and determination of the measurement result in digital form are proposed. It becomes possible to unify the scheme design of precision thermometers as well as sensitive temperature difference meters.

To ensure the effectiveness of measurements in dispersed information-measuring devices of solar energy converters, it is also proposed to develop the structures of intellectual thermometers and temperature difference meters for purposes of IoT or information-measuring channels of cyber-physical systems.

Key words: Solar converter, Metrological support, Measurement of temperature and temperature difference, Error adjustment.

Вступ

Використання засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) є одним із найважливіших заходів для забезпечення якості та конкурентоспроможності продукції, товарів, послуг. Адже собівартість продук-

ції сьогодні суттєво залежить від вартості енергоносіїв з урахуванням мінімізації шкідливих впливів на довкілля. В умовах перманентного здорожчання мінеральних енергоносіїв провадяться інтенсивні дослідження альтернативних джерел енергії з метою комплексного покращення їхніх

технічних параметрів, розроблення нових їх видів, встановлення їхніх оптимальних споживчих властивостей, кращих умов використання та експлуатації. Все більшу увагу дослідників привертають перетворювачі сонячної енергії, яка є фактично невичерпним джерелом. Фундаментом забезпечення високої якості альтернативних джерел енергії є автоматизація процесів вимірювання і регулювання багатьох параметрів технологічних процесів та метрологічного забезпечення під час їх виготовлення та експлуатації у реальному масштабі часу в умовах інтенсивної дії дестабілізуювальних факторів [1, 2]. Забезпечення необхідних співвідношень між точністю підтримування параметрів технологічних процесів та точністю їх контролю безпосередньо впливають на конкурентоспроможність продукції, економію паливно-енергетичних ресурсів, матеріалів, рівень впровадження ресурсозберігальних технологій у сучасних виробництвах [1, 3, 4]. Можливості сучасних мікроелектронних технологій та засобів обчислювальної техніки стають основою чергової четвертої промислової революції, основаної на широкому впровадженні засобів інтернету речей та кіберфізичних систем (КФС) з автоматичним коригуванням методичних, інструментальних та випадкових складових похибок [4, 5]. У вимірювальних каналах (ВК) КФС виникають систематичні похибки зазвичай великих значень та важкоконтрольовані на практиці через значні часові та температурні дрейфи [4–6]. З огляду на це сучасні нормативні документи рекомендують впроваджувати такі системи керування вимірюваннями, які забезпечують придатність вимірювального обладнання та методів вимірювання до використання за призначенням та заданий рівень ризиків отримання невірних результатів вимірювання [3].

Тому в багатьох країнах Європейського Союзу та світу питома вага альтернативної енергетики в майбутньому повинна збільшитися до декількох десятків процентів [7–11]. Потреба значного зменшення негативного впливу на довкілля під час спалювання природних вуглецевих енергоносіїв за умови забезпечення сталого економічного розвитку привела до інтенсифікації зусиль насамперед щодо підвищення енергетичної ефективності традиційних та широкого практичного впровадження альтернативних джерел енергії [11–16]. В Україні передбачено зростання питомої ваги альтернативних джерел енергії до 11 % до 2020 р. [17].

Випробування, дослідження сонячних колекторів і вимірювання параметрів перетворювачів сонячної енергії (ПСЕ) ґрунтується на низці міжнародних стандартів, частково гармонізованих в Україні (ДСТУ ISO 9806-1:2005, ДСТУ ISO 9806-

2:2005, ДСТУ ISO 9806-3:2005, ДСТУ ISO 9059:2006, ДСТУ ISO 9846:2006, ДСТУ ISO 9847:2007, ДСТУ ISO/TR 9901:2006, ДСТУ ISO 9060:2008, ДСТУ 4034-2001, ДСТУ ISO 9459-1:2005, EN 12975, EN 12976). Ці стандарти встановлюють необхідність вимірювання температури рідини на вході та виході сонячних колекторів, термоелементів та температури навколишнього повітря під час дослідження перетворювачів сонячної енергії з доволі високими метрологічними вимогами. Похибка вимірювання вхідної температури рідинного теплоносія не повинна перевищувати $\pm 0,1$ °C з роздільною здатністю до $\pm 0,02$ °C. Похибка вимірювання різниці температур рідинного теплоносія на виході та на вході колектора (ΔT близько $1 \dots 10$ °C) не повинна перевищувати $\pm 0,1$ °C, що зумовлюватиме достатньо велику відносну похибку під час визначення коефіцієнта корисної дії сонячних перетворювачів $\pm (1 \dots 10)$ % [18]. Окрім цього, під час комерційних розрахунків за поставлений геліосистемами енергоресурс потрібно забезпечити точне вимірювання їх кількості та якості із урахуванням сучасних тарифів на постачання гарячої води та опалення [19]. Під час вимірювання температури і різниці температур у геліосистемах відносна похибка вимірювання кількості подаваної теплової енергії з урахуванням істотного зменшення ризику споживача повинна відповідати класу точності сучасних колективних теплотічильників та не перевищувати $\pm (2 \dots 4)$ % (абсолютна похибка менша від $\pm 0,01$ °C для вимірюваних різниць температур). Такі вимоги дуже високі, оскільки похибки сучасних стандартизованих перетворювачів температури – в межах декількох десятих часток градуса.

Для практичної реалізації вказаних метрологічних характеристик необхідні вимірювачі температури та різниці температур із калібруванням на місці експлуатації. Для забезпечення заданої метрологічної надійності такі вимірювачі повинні перевірятися в спеціальних лабораторіях та розміщатися безпосередньо на вимірювані об'єкти.

Недоліки

Застосовувати для вимірювання температури та різниці температур під час дослідження ПСЕ стандартизовані термоелектричні перетворювачі (ТП) або термоперетворювачі опору (ТО) без додаткових заходів практично неможливо через їхні великі похибки. Справді, межі допустимих значень похибки для найточніших ТП становлять ± 1 °C, а для ТО навіть класу А – декілька десятих кельвіна [20]. Використання напівпровідникових сенсорів температури пов'язано з необхідністю введення додаткових

елементів у структуру термометра для зменшення насамперед їх технологічного розкиду і є достатньо громіздким [21–26]. З метою зменшення впливу похибок ТО запропоновано використовувати методи усереднення, підстроювання та уведення поправок (калібрування) [18]. Очевидно, що із урахуванням порівняно великої вартості платинових ТО практичне використання методу усереднення недоцільне. Реалізація методу адитивного та мультиплікативного підстроювання функції перетворення цифрових вимірювачів температури (ЦВТ) або цифрових вимірювачів різниці температур (ЦВРТ) в аналоговій формі або уведення поправок (калібрування) можлива в спеціальних вимірювальних лабораторіях. Із урахуванням рівня розвитку мікроелектронних та інформаційних технологій практично доцільно використовувати метод уведення поправок (калібрування) із застосуванням сучасних контролерів, які мають достатньо широкі функціональні можливості та є порівняно недорогими. В багатьох практичних випадках ручне коригування похибок технічно складне і дороге через необхідність налагодження метрологічних характеристик ЦВТ і ЦВРТ на місці експлуатації ВК КФС. Під час оперативного контролювання похибок ЦВТ і ЦВРТ зазвичай потрібно встановити декілька значень зразкових перевірюваних температур, рівномірно розподілених у діапазоні вимірювання. Через зміни адитивних складових похибки (АСП) на місці експлуатації ЦВТ і ЦВРТ із вхідними сигналами низького рівня потрібно коригувати їх АСП для всіх встановлюваних значень температури. Унаслідок цього обслуговування триває доволі довго і процедура оперативного контролювання метрологічного стану ВК ЗВТ істотно ускладнюється та дорожчає. Автоматизація цього процесу підвищує продуктивність оперативного контролювання параметрів ЦВТ і ЦВРТ та уможливує їх побудову як ВК КФС. З урахуванням досягнень сучасних мікроелектронних та інформаційних технологій ЦВТ і ЦВРТ, особливо переносні, повинні мати схемотехніку, придатну для виготовлення у вигляді інтегральної мікросхеми або на мікросхемах великого ступеня інтеграції, наприклад, програмованих системах на чипі.

Отже, вдосконалення і впровадження методів і засобів для оперативного контролювання ЦВТ і ЦВРТ на місці експлуатації у широкому діапазоні зміни неінформативних параметрів довкілля є актуальним завданням.

Мета роботи

Мета роботи – дослідити можливості вдосконалення і впровадження методів і засобів для підвищення точності вимірювання температури і

різниці температур під час дослідження перетворювачів сонячної енергії на місці експлуатації в широкому діапазоні зміни неінформативних параметрів довкілля.

1. Розвиток метрологічного забезпечення вимірювання температури і різниці температур

З метою автоматизації процесів дослідження параметрів ПСЕ під час їх розроблення та експлуатації доцільно реалізувати ЦВТ і ЦВРТ на основі мікроелектронних виробів з використанням доступних за ціною і малогабаритних однокристалних мікро-ЕОМ з широкими функціональними можливостями. Це якісно змінює підхід до проектування і використання ЦВТ і ЦВРТ та уможливує їх реалізацію як ВК КФС. Для розпорощених геліосистем йдеться про можливість побудови розпорощених вимірювальних систем, склад і місце розташування яких можуть гнучко змінюватись (як в часі, так і в просторі) залежно від зміни структури і обсягів виробництва гарячої води або теплоносія. В таких засобах вимірювальної техніки доцільно забезпечувати в діапазоні вимірювань температури і різниці температур необхідну точність у робочих умовах експлуатації.

1.1. Аналіз шляхів побудови прецизійних цифрових вимірювачів температури. Під час досліджень та експлуатації ПСЕ необхідно використовувати стаціонарні та переносні цифрові вимірювачі температури в діапазоні від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ з межею допустимих значень похибки $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ та одиницею молодшого розряду (ОМР), у декілька разів меншою від допустимих значень похибки $(0,02\dots 0,05)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це означає, що перед лінеаризацією загальної функції перетворення ЦВТ максимальна кількість розрізняваних градацій вимірюваної величини повинна перевищувати 5000. Для перетворюваного опору ТО максимальна кількість розрізняваних градацій повинна бути збільшена в $R_{0\text{max}}/R_0 \approx 1,4$ рази і АЦП повинен мати роздільну здатність близько 14 двійкових розрядів. З'єднувальні лінії між ТО та ЦВТ не повинні бути дуже довгими (від декількох метрів до декількох десятків метрів), а їх опір не має перевищувати 0,1 Ом. Під час використання ТО з номінальною статичною характеристикою перетворення (НСХ) 100П похибка від їх впливу становитиме близько $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ і необхідно використовувати чотиридротову з'єднувальну лінію.

Важливою сучасною вимогою до побудови ВК є їхня функціональна завершеність, що дає виробам

низку технічних переваг із забезпеченням низької собівартості під час виготовлення та експлуатації.

Поданим вимогам відповідають серійно виготовлювані інтегральні АЦП з комплексом добрих метрологічних та технічних характеристик, наприклад, типу AD7793 [27]. АЦП має вбудований генератор струму, значення якого не спричиняє помітної похибки від нагрівання ТО. За умови послідовно сполучених ТО з чотиридротовою з'єднувальною лінією та зразкового резистора і подавання спадків напруги на ТО та на зразковому резисторі на окремі диференціальні входи АЦП у вимірювальній схемі ЦВТ забезпечуватиметься інваріантність до значення вимірювального струму (рис. 1).

Вхідна напруга АЦП визначатиметься різницею напруг, що подаються на підсумовувальний та віднімальний входи:

$$U_{IN1} = U_{IN1}^+ - U_{IN1}^- = I_1 R_q + I_1 (R_{L4} + R_N) M_{CM} + e_{12} + \Delta U_P M_{PCM}, \quad (1)$$

де $R_\theta = R_0(I + W_\theta)$ – опір ТО; R_0 – опір ТО за 0°C ; W_θ – чутливість ТО; U_{IN1}^+ , U_{IN1}^- – відповідно напруги, що подаються на підсумовувальний та віднімальний входи АЦП; R_N – опір зразкового резистора, на якому формується опорна для АЦП напруга; I_1 – вихідний струм першого вбудованого в АЦП джерела струму IOUТ1; $e_{12} = e_{1e} - e_{2e}$ – еквівалентна вхідна напруга зміщення АЦП; $e_{1e} = e_1 + I_{IN1}^+ (R_{L2} + R_q + R_{L4} + R_N)$ – еквівалентна напруга зміщення неінвертувального входу АЦП; $e_{2e} = e_2 + I_{IN1}^- (R_{L3} + R_{L4} + R_N)$ – еквівалентна напруга зміщення інвертувального входу АЦП; R_{L1} , R_{L2} , R_{L3} , R_{L4} – опори з'єднувальних ліній; $e_{12} = (e_1 - e_2) + (I_{IN1}^+ - I_{IN1}^-)(R_{L4} + R_N) + I_{IN1}^+(R_{L2} + R_q) - I_{IN1}^- R_{L3}$; M_{CM} – коефіцієнт послаблення синфазної складової першого входу АЦП; M_P – коефіцієнт послаблення зміни напруги

живлення АЦП; ΔU_P – допустима зміна напруги живлення АЦП.

Вихідний код АЦП N_U до лінеаризації загальної функції перетворення ЦВТ подається співвідношенням:

$$N_U = k_{AD} k_M \frac{U_{IN1}}{U_N} = k_{AD} k_M \frac{I_1 R_q + I_1 (R_{L4} + R_N) M_{CM} + e_{12} + \Delta U_P M_{PCM}}{I_1 R_N + e_N}, \quad (2)$$

де e_N – еквівалентна напруга зміщення входу опорної напруги АЦП.

Після подання кожної із величин співвідношення (2) через їхні номінальні значення і відносні похибки та після перетворень з нехтуванням величинами другого та вищих порядків малості можна записати код перетвореного опору $N_{U\theta}$ ТО у вигляді:

$$N_{U\theta} = k_{ADH} k_{MH} \frac{R_{0H}}{R_{NH}} (1 + d_0 + W_{qH} q + W_{qH} q d_q), \quad (3)$$

де k_{ADH} , k_{MH} – номінальні значення коефіцієнтів, відповідно, перетворення АЦП та вбудованого масштабного підсилювача; $d_0 = d_{R0} + d_{AD} + d_M + d_{e12} - d_{eN}$ – еквівалентна відносна похибка під час вимірювання початкового опору ТО; $d_q = d_w + d_{R0} + d_{AD} + d_M - d_{RN} - d_{eN}$ – еквівалентна відносна похибка під час вимірювання зміни опору ТО від початкового значення; d_{R0} , d_{AD} , d_M , d_{RN} , $d_{CM} = M_{CM} (R_{L4} + R_{NH}) / R_{NH}$, $d_{e12} = (e_{12} + \Delta U_P M_P) / I_1 R_{NH}$, $d_{eN} = e_N / I_1 R_{NH}$ – відповідно, відносні похибки початкового опору ТО, АЦП, вбудованого в АЦП масштабного підсилювача, зразкового резистора, коефіцієнта послаблення синфазної складової, еквівалентного адитивного зміщення інформаційних входів та входу опорної напруги АЦП.

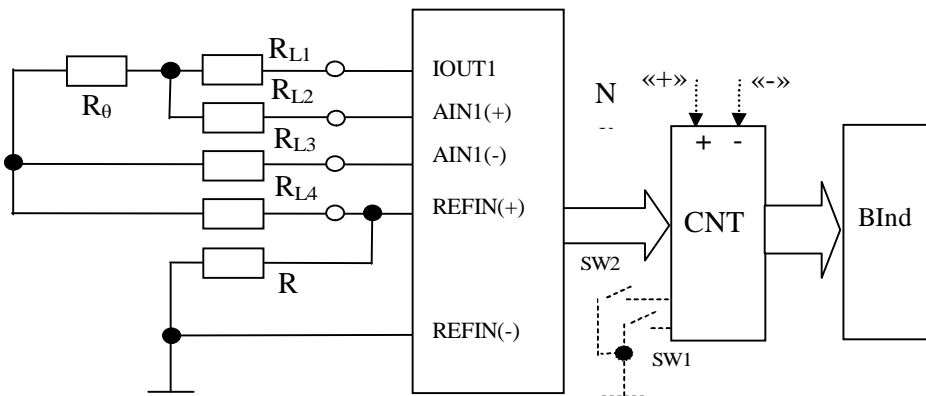


Рис. 1. Структурна схема цифрового вимірювача температури з термонеперетворювачем опору

Fig. 1. The block diagram of a digital temperature meter with a thermoresistive transducer

Для визначення коду температури від коду $N_{U\theta}$ необхідно в цифровій формі відняти код, пропорційний до початкового опору ТО $N_{Uq0} = k_{ADH} k_{MH} R_{0H} / R_{NH}$:

$$N_q = N_{Uq} - N_{Uq0} = k_{ADH} k_{MH} \frac{R_{0H}}{R_{NH}} (d_0 + W_{qH} q + W_{qH} q d_q). \quad (4)$$

Аналіз співвідношення (4) показує, що похибка ЦВТ визначатиметься передусім похибкою підганяння ТО та інструментальною похибкою зразкового резистора. Для ТО класу А за значення інструментальної похибки зразкового резистора $\pm 0,05$ % абсолютна похибка ЦВТ становитиме під час вимірювання температури $0^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$ та температури $+100^\circ\text{C} - \pm 0,55^\circ\text{C}$. Такі великі значення похибки потребують коригування похибок термометра.

1.2. Обґрунтування вибору параметрів прецизійних цифрових термометрів. Аналіз технічних характеристик АЦП AD7793 показує, що його коефіцієнт перетворення залежить від коефіцієнта підсилення вбудованого підсилювача. Якщо для коефіцієнта підсилення вбудованого підсилювача $k_M=1$ роздільна здатність становить 19 біт, то за $k_M=128$ роздільна здатність зменшується вже до 16 біт [28]. Таке зменшення коефіцієнта перетворення АЦП від коефіцієнта підсилення вбудованого підсилювача в першому наближенні можна апроксимувати функцією $1/\sqrt{k_M}$. Тоді для нормованого значення опорної напруги АЦП $E_N=2,5$ В, ТО НСХ 1000П, діапазону вимірювання $(-50...+100)^\circ\text{C}$, максимальне значення перетворюваного опору становитиме $R_{\theta_{max}} = R_0(1 + W_{\theta} \theta_{max}) \approx 1400$ Ом, максимальне значення перетворюваної напруги $U_{\theta_{max}} = I_I R_{\theta_{max}} \approx 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1400 \approx 0,28$ В і коефіцієнт підсилення вбудованого підсилювача необхідно вибрати найближчими меншими серед можливих значень для АЦП $k_{M \leq} (E_N) / U_{\theta_{max}} \approx 2,5 / 0,28 \approx 8,9$, отже, $k_M = 2^3 = 8$. Тоді коефіцієнт перетворення АЦП становитиме $k_{AD} \approx N_{max} / E_N \sqrt{k_M} \approx 2^{19} / 2,5 \cdot \sqrt{8} \approx 7,41 \cdot 10^4$ імпульсів, які відповідають максимальному значенню перетворюваного опору, становитиме $N_{max} \approx 1,7 \cdot 10^5$, його початкове значення $N_0 \approx 1,2 \cdot 10^5$ та інформативний параметр $N_{\theta} \approx 1,7 \cdot 10^5 - 1,2 \cdot 10^5 \approx 5 \cdot 10^4$. Звідси чутливість перетворення ЦВТ становитиме близько 4 імпульсів/ $0,01^\circ\text{C}$, що навіть з урахуванням лінеаризації загальної функції перетворення задовольнятиме сформульовані вище вимоги до ЦВТ.

Детальніший аналіз показує певні особливості побудови ЦВТ на основі інтегральних АЦП. Зі зменшенням початкового опору ТО для діапазону

вимірювання температур під час дослідження ПСЕ $(-50...+100)^\circ\text{C}$ від 1000 до 100 Ом чутливість перетворення зменшується в $2,8$ рази. У цьому ж діапазоні вимірювання температур (як і в максимально можливому $(200...+850)^\circ\text{C}$ для ТО класу точності А) під час віднімання початкового опору ТО в аналоговій формі (на вході АЦП) чутливість зростає в $1,4$ рази. Винятком є використання ТО з НСХ 1000П, для яких як у вузькому, так і в широкому діапазонах вимірювання температури чутливість є незмінною.

1.3. Коригування похибок прецизійних цифрових термометрів. Оскільки похибка термометра визначається як похибкою ТО, так і похибкою ЦВТ, які є співмірними, то коригування необхідно здійснювати для усього термометра з використанням таких методів. Як зразковий елемент у термометрі можуть бути використані прецизійні засоби вимірювання температури або прецизійний регульований термостат, наприклад, типу ТСР-НО, або нерегульований термостат без автоматичного підтримання необхідного значення температури з малим градієнтом температури та вимірюванням температури прецизійним термометричним омметром [28, 29]. Очевидно, спочатку треба скоригувати адитивне зміщення термометра. Спосіб уведення адитивних поправок у структуру ЦВТ (як показано на рис. 1) сьогодні вже морально застарів, тому набагато простіше запам'ятовувати код цього зміщення N_{q0} в енергонезалежній пам'яті контролера CNT термометра:

$$N_{q0} = k_{ADH} k_{MH} d_0 \frac{R_{0H}}{R_{NH}}, \quad (5)$$

який як поправку потрібно додавати до кодів N_{q1x} поточних результатів перетворення температури:

$$N_{q1x} = N_q - N_{q0} = k_{ADH} k_{MH} \frac{R_{0H}}{R_{NH}} W_{qH} q (1 + d_q). \quad (6)$$

Для коригування мультиплікативної складової похибки (МСП) ТО необхідно розмістити в другій калібрувальній температурі θ_{2k} , знайти код термометра за цієї температури та обчислити коригувальний коефіцієнт:

$$k_{q2k} = \frac{N_{q2k}}{N_{q1x}} = \frac{q_{2k}}{q_{1x} (1 + d_q)}, \quad (7)$$

на який потрібно домножувати поточні значення кодів перетворення термометра. З урахуванням підстроювань скориговане значення результатів вимірювання термометром визначатиметься як:

$$N_{q12x} = (N_q - N_{q0}) k_{q2k} = k_{ADH} k_{MH} \frac{R_{0H}}{R_{NH}} W_{qH} q_{1x}. \quad (8)$$

Як показує аналіз співвідношення (8), після коригувань цифрового термометра в двох температурних точках його можна використовувати для дослідження ПСЕ в діапазоні $(-50...+100)^\circ\text{C}$ з межею допустимих значень похибки $\pm 0,1^\circ\text{C}$ та ОМР $0,01^\circ\text{C}$. Для коригування поточних значень вимірюваних кодів термометра доцільно розробити спеціальну підпрограму визначення кодів результатів вимірювання. Періодичність підстроювань цифрового термометра визначатиметься стабільностями ТО та зразкового резистора.

На основі сучасних контролерів можна реалізувати практично будь-які типи інтерфейсів, зокрема й із бездротовими комунікаціями, що дає можливість використовувати такий цифровий термометр як пристрій промислового інтернету речей або ж як окремий вимірювальний температурний канал КФС. Такі термометри разом з елементами керування та індикації можна реалізувати на основі програмованих систем на чипі, наприклад, фірми Cypress Semiconductor [30]. Крім цього, запропонована методика корекції похибок термометрів не є трудомісткою, виконується без додаткових апаратних чи людських ресурсів. Скориговане значення похибок термометра не перевищуватиме половини ОМР використовуваних під час підстроювань прецизійних засобів вимірювання.

1.4. Шляхи побудови прецизійних цифрових вимірювачів різниці температур.

З огляду на функціональну завершеність та можливість уніфікації з ЦВТ цифрові вимірювачі різниці температур бажано реалізувати на основі інтегральних АЦП. В АЦП AD7793 дві пари диференціальних входів, сигнали з яких різночасово можуть перетворюватися на код, та два генератори вимірювальних струмів, неоднаковість яких не перевищує 1 %, а її дрейф не перевищує $2 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$, що в діапазоні робочих температур $(+5...50)^\circ\text{C}$ дає можливість забезпечити значення відносної похибки не більшим лише від $\pm 3 \cdot 10^{-4}$, або $\pm 0,03\%$ (рис. 2).

Якщо різницю температур $\pm 20^\circ\text{C}$ необхідно вимірювати в температурному діапазоні $(-50...+100)^\circ\text{C}$, то коефіцієнт перетворення АЦП матиме такі самі значення, як і для ЦВТ. В одному із циклів на код перетворюється напруга, подана на перший вхід АЦП:

$$N_{1U} = k_{AD} k_M \frac{U_{IN1}}{U_N} = k_{AD} k_M \frac{I_1 R_{q1} + I_1 (R_{1L4} + R_N) M_{CM1} + e_{121} + \Delta U_P M_{PCM}}{(I_1 + I_2) R_N + e_N}, \tag{9}$$

$$N_{2U} = k_{AD} k_M \frac{U_{IN2}}{U_N} = k_{AD} k_M \frac{I_2 R_{q2} + I_2 (R_{L4} + R_N) M_{CM2} + e_{122} + \Delta U_P M_{PCM}}{(I_1 + I_2) R_N + e_N}, \tag{10}$$

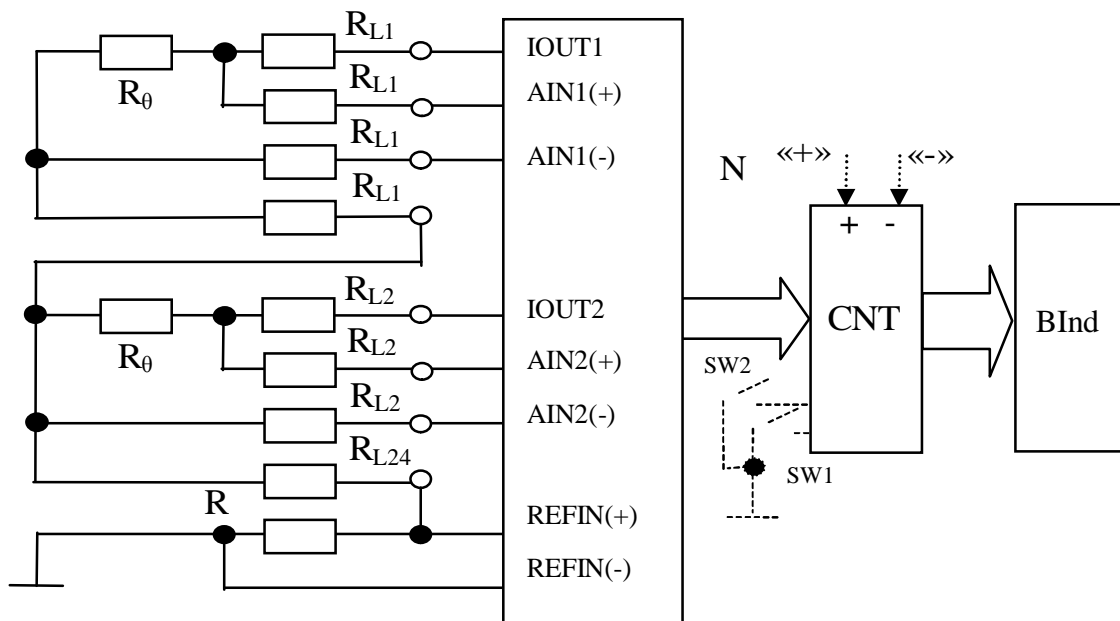


Рис. 2. Структурна схема цифрового вимірювача різниці температур із термоперетворювачами опору

Fig. 2. The block diagram of a digital temperature difference meter with thermoresistive transducers

де $R_{\theta 1}=R_{01}(I+W_{\theta 1})$, $R_{\theta 2}=R_{02}(I+W_{\theta 2})$ – відповідно, опори першого ТО1 та другого ТО2; R_{01} , R_{02} – опори ТО1 та ТО2 за 0°C ; $W_{\theta 1}$, $W_{\theta 2}$ – чутливості ТО1 та ТО2; U_{IN1}^+ , U_{IN1}^- , U_{IN2}^+ , U_{IN2}^- – відповідно напруги, що подаються на перший і другий підсумовувальний та віднімальний входи АЦП; R_N – опір зразкового резистора, на якому формується опорна для АЦП напруга; I_1 , I_2 – відповідно, вихідний струм першого і другого вбудованих в АЦП джерел струму IOUТ1 та IOUТ2; $e_{I21}=e_{11e}-e_{12e}$, $e_{I22}=e_{21e}-e_{22e}$ – відповідно, еквівалентні вхідна напруги зміщення першого і другого входів АЦП;

$$e_{11e} = e_{11} + I_{IN1}^+(R_{1L2} + R_{q1} + R_{1L4} + R_N),$$

$$e_{21e} = e_{21} + I_{IN2}^+(R_{2L2} + R_{q2} + R_{2L4} + R_N) -$$

відповідно, еквівалентні напруги зміщення першого та другого неінвертувальних входів АЦП;

$$e_{12e} = e_{12} + I_{IN1}^-(R_{1L3} + R_{1L4} + R_N),$$

$$e_{22e} = e_{22} + I_{IN2}^-(R_{2L3} + R_{2L4} + R_N) -$$

відповідно, еквівалентні напруги зміщення першого та другого інвертувального входів АЦП; R_{1L1} , R_{1L2} , R_{1L3} , R_{2L4} , R_{2L1} , R_{2L2} , R_{2L3} , R_{2L4} – відповідно, опори з'єднувальних ліній ТО1 та ТО2; M_{CM1} , M_{CM2} – коефіцієнти послаблення синфазної складової першого та другого входів АЦП; M_P – коефіцієнт послаблення зміни напруги живлення АЦП; ΔU_P – допустима зміна напруги живлення АЦП.

Кожну із величин співвідношень (9) та (10) необхідно подати через їхні номінальні значення та відносні похибки та після перетворень з нехтуванням величинами другого та вищих порядків малості можна записати код перетворюваної різниці температур $N_{\Delta\theta X}=N_{1U}-N_{2U}$ у вигляді:

$$N_{\Delta\theta X} = k_{ADH} k_{MH} \frac{R_{0H}}{2R_{NH}} \{d_{A12} + W_{qH}(q_1 - q_2) + W_{qH}(q_1 d_1 - q_2 d_2)\}, \quad (11)$$

де $\delta_{A12}=\delta_{A1}-\delta_{A2}$; $d_{A1}=d_{01}+d_{AD}+d_M+d_{CM12}-d_{RN}+d_{e12E}+d_{I12}-d_{eN}$, $d_{A2}=d_{01}+d_{AD}+d_M+d_{CM12}-d_{RN}+d_{e21E}+d_{I12}-d_{eN}$ – відповідно, еквівалентні відносні похибки під час вимірювання температур $\theta_1=\theta_2=0$; $d_1=d_{W1}+d_{01}+d_{AD}+d_M-d_{RN}-d_{eN}+d_{I21}+d_{Iin1}$, $d_2=d_{W2}+d_{02}+d_{AD}+d_M-d_{RN}-d_{eN}+d_{I12}+d_{Iin2}$ – еквівалентні відносні похибки під час вимірювання температур θ_1 та θ_2 ; d_{01} , d_{02} , d_{AD} , d_M , d_{RN} , $d_{CM12}=d_{CM1}-d_{CM2}$,

$$d_{CM1} = M_{CM1}(R_{1L4} + R_{NH})/R_{NH},$$

$$d_{CM2} = M_{CM2}(R_{2L4} + R_{NH})/R_{NH};$$

$$d_{CM1} = M_{CM1}(R_{1L4} + R_{NH})/R_{NH};$$

$$d_{I12} = 0,5(d_{I1} - d_{I2});$$

$$d_{I21} = 0,5(d_{I2} - d_{I1});$$

$$d_{eN} = e_N/I_1 R_{NH}; \quad d_{Iin1} = I_{in1}^+/(I_1 + I_2),$$

$d_{Iin2} = I_{in2}^+/(I_1 + I_2)$ – відповідно, відносні похибки початкового опору ТО1 та ТО2, АЦП, вбудованого в АЦП масштабного підсилювача, зразкового резистора, коефіцієнта послаблення синфазної складової, еквівалентного адитивного зміщення інформаційних входів та входу опорної напруги АЦП, та різниць задання струмів обох генераторів струмів та похибок від вхідних струмів обох входів АЦП.

Аналіз співвідношення (11) показує, що АСП ЦВРТ визначатиметься в основному інструментальними похибками підганяння початкового опору δ_{01} та δ_{02} обох ТО1 і ТО2, зразкового резистора та розкиду значень струмів обох генераторів струмів. Для ТО класу точності А, $\delta_{RF}\leq\pm 0,02\%$, $\delta_{I12}\leq\pm 1\%$, її граничне значення може сягати $\pm 3,0^\circ\text{C}$. Однак, враховуючи малі значення температурного дрейфу розкиду значень струмів обох генераторів струмів $\Delta\delta_{I12}\leq\pm 2\cdot 10^{-5} 1^\circ\text{C}$ та стабільних зразкових резисторів (такого самого порядку величини), після налаштування функції перетворення ЦВРТ зміна значень його показів не перевищуватиме лише $\pm 0,01^\circ\text{C}$ на кожен градус зміни температури довкілля. Це дає змогу скоригувати порівняно великі значення похибок ЦВРТ під час його налаштування та забезпечити їх порівняно незначну зміну під час експлуатації.

1.5. Коригування похибок прецизійних цифрових вимірювачів різниці температур. Код результату вимірювання різниці температур (11) матиме адитивну складову похибки, пропорційну до різниці похибок $\delta_{A12}=\delta_{A1}-\delta_{A2}$, та мультиплікативну складову, значення якої залежить від похибок та значень вимірювання температур обома каналами ЦВРТ. З метою коригування похибок ЦВРТ обидва ТО необхідно розмістити в середовищах із різними за значеннями, але стабільними температурами, значення яких може змінюватись вздовж усього діапазону вимірювання температури. Це можуть бути або регульовані рідинні термостати, або нерегульовані з малим значенням градієнта температури.

Контроль температури в термостатах необхідно здійснювати прецизійними термометрами і після встановлення їхніх значень потрібно подати ці коди до ЦВРТ та запам'ятати в його оперативній пам'яті. Враховуючи, що результат вимірювання різниці температур визначається різночасово як різниця результатів перетворення обох каналів АЦП, то для коригування їх АСП та МСП ці канали перетворення температури можна налаштувати лише у двох температурних точках θ_1, θ_2 . Під час налаштування ЦВРТ потрібно передбачити запам'ятовування результатів перетворення температури обох вимірювальних каналів. ТО1 та ТО2 необхідно одночасно поміщати в середовища зі стабільними та точно відомими температурами θ_1, θ_2 . У цьому випадку можна подати таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} N_{q11} = k_H (1 + d_{A1} + W_{qH}q_1 + W_{qH}q_1d_1) \\ N_{q21} = k_H (1 + d_{A2} + W_{qH}q_1 + W_{qH}q_1d_2) \\ N_{q12} = k_H (1 + d_{A1} + W_{qH}q_2 + W_{qH}q_2d_1) \\ N_{q22} = k_H (1 + d_{A2} + W_{qH}q_2 + W_{qH}q_2d_2) \end{cases}, \quad (12)$$

де $k_H = k_{ADH}k_{MH} \frac{R_{0H}}{R_{NH}}$; θ_1, θ_2 – значення температур,

встановлюваних у термостатах; $N_{\theta11}, N_{\theta21}, N_{\theta12}, N_{\theta22}$ – коди результатів перетворень першого та другого вимірювальних каналів АЦП під час перетворення температури, відповідно, θ_1 та θ_2 .

Із системи рівнянь визначають поправкові множники, на які необхідно домножувати коди перетворень обох вимірювальних каналів АЦП для коригування їх МСП:

$$k_{d1} = \frac{1}{1 + d_1} = \frac{k_H W_{qH} (q_2 - q_1)}{N_{q21} - N_{q11}}, \quad (12)$$

$$k_{d2} = \frac{1}{1 + d_2} = \frac{k_H W_{qH} (q_2 - q_1)}{N_{q22} - N_{q21}}. \quad (13)$$

Код адитивної поправки, яка підсумовується із поточним значенням вимірюваної різниці температур, знаходять за співвідношенням:

$$N_A = N_{q22}k_{d2} - N_{q21}k_{d1} \cong k_H (d_{A1} - d_{A2}). \quad (14)$$

Скориговане значення вимірюваної різниці температур подається як:

$$\begin{aligned} N_{\Delta qK} &= N_{\Delta qX} - N_A = \\ &= k_H \{W_{qH} (q_1 - q_2) + W_{qH} (q_1d_1k_{d1} - q_2d_2k_{d2})\} = . \quad (15) \\ &= k_{ADH}k_{MH} \frac{R_{0H}W_{qH}}{2R_{NH}} (q_1 - q_2). \end{aligned}$$

2. Результати і обговорення

Розглянуто можливості побудови прецизійних цифрових термометрів та вимірювачів різниці

температур для дослідження перетворювачів сонячної енергії під час їх виготовлення та експлуатації. В основу побудови прецизійних термометричних вимірювачів покладено використання високоомних платинових термоперетворювачів опору та інтегральних багаторозрядних АЦП. Розроблено структуру прецизійного цифрового термометра в діапазоні вимірювання від -50 до $+100$ °С з можливістю забезпечення одиниці молодшого розряду $0,01$ °С та межі допустимих значень похибки $\pm 0,1$ °С. Оскільки навіть найточніші платинові термоперетворювачі опору класу А у вказаному діапазоні вимірювання можуть мати похибки в межах декількох десятих градуса Цельсія, то запропоновано методику їх налаштування, яка дає можливість скоригувати похибки термометра до значень, менших від однієї десятої градуса Цельсія. Максимальне значення похибки налаштування ЦВТ залежатиме від похибки вимірювання та стабільності температури під час здійснення експериментів, диференціальної та інтегральної нелінійності термометра, значень декількох похибок дискретності під час визначення результату вимірювання температури, похибок АЦП. Під час використання еталонного цифрового омметра ОЦ-0103 похибку вимірювання температури в діапазоні від -50 до $+100$ °С можна забезпечити не більшою від $\pm 0,02$ °С [29]. Нерівномірність температурного поля щодо центра робочого об'єму в місці розташування термоводів ТО за умови використання термостатів рідинних типу ТСП-0105 не перевищуватиме $\pm 0,03$ °С [29]. Інтегральна нелінійність АЦП AD7793 не перевищує декількох тисячних відсотка, а диференціальна нелінійність лише $0,0002$ % [27]. Диференціальну нелінійність під час реалізації цифрової лінеаризації загальної функції перетворення ЦВТ з відрізково-лінійною апроксимацією можна забезпечити на рівні декількох тисячних відсотка. Похибка дискретності підрахунку результату вимірювання визначається дискретністю отриманої вимірювальної інформації та, як показує проведений аналіз, завдяки використанню багаторозрядних АЦП не є більшою від декількох тисячних відсотка у всьому діапазоні вимірювання. Отже, результуюча похибка налаштування цифрового термометра не перевищуватиме декілька сотих градуса ($\leq \pm 0,06$ °С).

Це дає підстави стверджувати про можливість побудови прецизійних термометрів у діапазоні вимірювання від -50 до $+100$ °С із можливістю забезпечення одиниці молодшого розряду $0,01$ °С та межі допустимих значень похибки $\pm 0,1$ °С. Подібні

викладки підтверджують можливість побудови прецизійних цифрових вимірювачів різниці температур у межах ± 20 °C в діапазоні вимірювання від -50 до $+100$ °C з одиницею молодшого розряду $0,01$ °C та межею допустимих значень похибки $\pm 0,06$ °C. У розробленій структурі забезпечено схемотехнічну можливість уніфікації прецизійних ЦВТ та ЦВРТ, а також апаратури та методик їх уніфікації.

Враховуючи невелику собівартість сучасних АЦП та контролерів, прецизійні ЦВТ та ЦВРТ можна застосовувати як недорогі автономні (або переносні) вимірювальні канали КФС.

Висновки

Метрологічно надійна робота прецизійних каналів вимірювання температури та різниці температур кіберфізичних систем ґрунтується на коректній організації оперативного налаштування вимірювальних каналів за допомогою розробленої структури вимірювачів та методики їх налаштування. Під час оперативного налаштування встановлюється дійсне значення коефіцієнта перетворення цифрових термометрів або вимірювальних засобів різниці температур у заданих умовах налагодження та в заданий момент часу.

Подяки

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

Конфлікт інтересів

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

Література

- [1] Placko D., *Metrology in Industry. The Key for Quality*. John Wiley & Sons Inc. 2013.
- [2] Орнатский П. П., *Теоретические основы информационно-измерительной техники*. 2-е изд., перераб. и дополн. К.: Вища школа. 1983. (In Russian).
- [3] ISO 10012:2003 *Measurement management systems – Requirements for measurement processes and measuring equipment*.
- [4] *Data-Acquisition-Handbook. A Reference for DAQ and Analog & Digital Signal Conditioning*. 3-rd ed. 2012. Available: <http://www.mccdaq.com/pdfs/anpdf/Data-Acquisition-Handbook.pdf>.
- [5] Yatsyshyn S., Stadnyk B., ed. *Cyber-Physical Systems. Metrological Issues*. International Frequency Sensor Association Publishing, S. L. 2016.
- [6] Yatsuk Yu., Mykyjchuk M., Zdeb V., Yanovych R. “Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part II. Remote Error Correction of Measuring Channel”, *Sensors & Transducers*, vol. 192, is. 9, pp. 22–29, 2015.
- [7] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC Text with EEA relevance OJ L 315, 14.11.2012, p. 1–56: available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>
- [8] Editor responsible Stefan Scheuer, *EU Energy Efficiency Directive (2012/27/EU) Guidebook for Strong Implementation, Second edition with revisions in the introduction, checklist, chapters I.2–I.5, section II.1.2, chapter II.6 and Annex A*. Available: <http://eedguidebook.energycoalition.eu/images/PDF/EED.pdf>
- [9] 19/06/2018 – Energy Efficiency Directive deal: First stepping stone for attractive Energy Union: available: <http://energycoalition.eu/eed-deal>.
- [10] Canevari C., Article 8 of the Energy Efficiency Directive on Energy Audits, Energy Workshop Energy Community Vienna, 23 November 2017, 28 p. Available: www.cepi.eu/index.php?mact=Profile,cntnt01
- [11] *Energy Perspectives 2018, Long-term macro and market outlook*, available: <https://www.equinor.com/content/dam/statoil/documents/energy-perspectives/energy-perspectives-2018.pdf>
- [12] Sreekanth K. J., *Energy Policy: Perspectives, Challenges and Future Directions*, Nova Science Publisher, Safat, Kuwait, 2018, June. 190 p.
- [13] Worrell, E., Bernstein L., Roy J., Price L., Harnisch J., *Industrial energy efficiency and climate change mitigation, Energy Efficiency (2009) 2:109–123 DOI 10.1007/s12053-008-9032-8*.
- [14] Cagno, E., Trianni, A., Spallina, G. et al. *Energy Efficiency (2017) 10: 855*. <https://doi.org/10.1007/s12053-016-9488-x>
- [15] *Priority directions of the improvement of energy management at the enterprise*, Galina Dyakova et al 2017 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 90 012218.
- [16] Sudhakar I T., Anjaneya Prasad B., Prahlada Rao K., *Analysis of Process Parameters to Improve Power Plant Efficiency, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, vol. 14, is. 1 Ver. II (Jan. – Feb. 2017), PP 57-64*.
- [17] До 2020 року в Україні 11 % енергії вироблятиметься з відновлюваних джерел [Електронний ресурс]. EcoTown. Режим доступу: URL: <http://ecotown.com.ua/news/Do-2020-roku-v-Ukrayini-11-enerhiyi-vyroblyaty-metsya-z-vidnovlyuvanykh-dzhereh/>. – 09.10.2014 р.
- [18] П. Г. Столярчук, М. М. Микійчук, В. О. Яцук, М. С. Міхалева, О. І. Шпак, Т. М. Олесків, «Розробка математичної моделі ефективності сонячних перетворювачів», *Східно-Європейський журнал передових технологій*, № 5/8(71), с. 30–36, 2014.
- [19] Про затвердження Правил користування системами централізованого комунального водопостачання та водовідведення в населених пунктах України. Наказ

Міністерства з питань житлово-комунального господарства України від 27.06.2008 № 190 (зі змінами та доповненнями). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0936-08>.

[20] Т. Олесків, В. Яцук, «Метрологічне забезпечення вимірювачів різниці температур на основі платинових термоперетворювачів з дводротовою лінією зв'язку», *Вимірювальна техніка та метрологія*, вип. 74, с. 25–28, 2013.

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

[22] Х. В. Василюха, *Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів: автореф. дис... канд. техн. наук* : 05.01.02, Л.: Нац. унів. «Львівська політехніка», 20 с. 2017.

[23] В. М. Василюк, «Принципи побудови високоточних температурних сенсорів на основі рп-переходу», *Вимірювальна техніка та метрологія*, № 53, с. 70–76, 1998.

[24] О. Капουν, Н.-Р. Tränkler *Kalibrationsfreie Temperaturmessung durch Parameterextraktion aus der Strom-Spannungskennlinie von рп-Übergängen*, *Technisches Messen*, vol. 68, № 9, p. 442–448, 2003.

[25] Vivek Shankar Kannan, Julie Chen. AN60590. PSoC® 3, PSoC 4, and PSoC 5LP – Temperature Measurement with a Diode. available: <https://www.cypress.com/documentation/application-notes/an60590-psoc-3-psoc-4-and-psoc-5lp-temperature-measurement-diode>.

[26] Yu. M. Shwarts, V. L. Borblik, N. R. Kulich, E. F. Venger, V. N. Sokolov, «Shwarts Limiting characteristics of diode temperature sensors», *Sensors and actuators*. – 86(2000). – 2000. – P. 197-205.

[27] AD7792/AD7793, 3-Channel, Low Noise, Low Power, 16-/24-Bit $\Sigma\text{-}\Delta$ ADC with On-Chip In-Amp and Reference, Analog device [Text]: available: <http://www.acdcshop.gr/content/AD7793BRUZ.pdf>

[28] Термоміст рідинний TCP-0105HO-100. ТзОВ «Термомір». Настанова з експлуатації [Текст]. Режим доступу: <http://thermomir.com.ua/images/files/nast/tsr-0105no-100.pdf>.

[29] Омметр цифровий еталонний ОЦ – 0103. ТзОВ «Термомір». [Текст]. Режим доступу: <https://thermomir.com/p16543680-ommetr-tsifrovij-etallonij.html>.

[30] CY8CKIT-059 PSoC® 5LP Prototyping Kit with Onboard Programmer and Debugger, Last Updated: Apr 02, 2018. Available: <http://www.cypress.com/documentation/development-kitsboards/cy8ckit-059-psoc-5lp-prototyping-kit-onboard-programmer-and>.

References

[1] D. Placko. *Metrology in Industry. The Key for Quality*. John Wiley & Sons Inc., 2013.

[2] P. Ornatskiy. *Theoretical basis of information and measurement technology*. Kyiv, Ukraine: Vyscha shkola. 1983. (In Russian).

[3] ISO 10012:2003. *Measurement management system. Requirements for measurement processes and measuring equipment*. 2003.

[4] *Data Acquisition Handbook, A Reference for DAQ and Analog & Digital Signal Conditioning. Measurement Computing Corporation*, 2012.

[5] *Cyber-Physical Systems: Metrological Issues*. S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, (Eds). IFSA Publishing, Barcelona, 2016.

[6] Yu. Yatsuk, M. Mykyjchuk, V. Zdeb, R. Yanovych, “Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part II. Remote Error Correction of Measuring Channel”, *Sensors & Transducers*, vol. 192, iss. 9, p. 22–29, 2015.

[7] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 Oct.2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC Text with EEA relevance OJ L 315, 14.11.2012, p. 1–56: available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>

[8] EU Energy Efficiency Directive (2012/27/EU) Guidebook for Strong Implementation. [On-line]. Available: <http://eedguidebook.energycoalition.eu/images/PDF/EED.pdf>

[9] Energy Efficiency Directive deal: First stepping stone for attractive Energy Union, 2018. [On-line]. Available: <http://energycoalition.eu/eed-deal>.

[10] C. Canevari, Art. 8 of Energy Efficiency Directive on Energy Audits, Energy Workshop Energy Community, Vienna, 23 Nov. 2017. [On-line]. Available: www.cepi.eu/index.php?mact=Profile,cntnt01

[11] Energy Perspectives 2018, Long-term macro and market outlook. [On-line]. Available: <https://www.equinor.com/content/dam/statoil/documents/energy-perspectives/energy-perspectives-2018.pdf>

[12] K. Sreekanth, *Energy Policy: Perspectives, Challenges and Future Directions*, Kuwait: Nova Science Publisher, 2018.

[13] E. Worrell, L. Bernstein, J. Roy, L. Price, J. Harnisch, “Industrial energy efficiency and climate change mitigation”, *Energy Efficiency*, vol. 2, p.109–123, 2009.

[14] E. Cagno, A. Trianni, G. Spallina et al. *Energy Efficiency*, vol.10, p.855, 2017. [On-line]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12053-016-9488-x>

[15] G. Dyakova G. et al, “Priority directions of the improvement of energy management at the enterprise”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 90 012218, 2017.

[16] T. Sudhakar, P. Anjaneya, R. Prahlada, “Analysis of Process Parameters to Improve Power Plant Efficiency”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 14, iss. 1, ver. II, p. 57–64, 2017.

[17] By 2020, 11 % of energy in Ukraine will be produced from renewable sources. 2014. [On-line]. Available: <http://ecotown.com.ua/news/Do-2020-roku-v-Ukrayini-11-enerhiyivyrobyaty-metsya-z-vidnovlyuvanykh-dzherel/>.

[18] P. Stolyarchuk, M. Mykyychuk, V. Yatsuk, M. Mikhaleva, O. Shpack, T. Oleskiv, “Development of a mathematical model of efficiency solar converters”, *East-Europ. Journ. Adv. Techn.*, no. 5/8(71), p. 30–36, 2014.

[19] Order of Ministry of Housing and Communal Services of Ukraine, 27.06.2008, no.190. On approval of the Rules for the use of centralized municipal water supply and sewage systems in settlements of Ukraine. [On-line]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0936-08>.

[20] T. Oleskiv, V. Yatsuk, “Metrological support of temperature difference meters on the basis of platinum thermocouples with two-wire communication line”, *Measuring equipment and metrology*, no.74, p.25-28, 2013.

[21] Kh. Vasylykha, Yu. Yatsuk, V. Zdeb, V. Yatsuk, “Experimental studies of temperature channel efficiency for solar

energy systems”, *East.-Europ. Journ. Enterprise Techn.*, no. 3/8 (87), p. 10–16, 2017.

[22] Kh. Vasylykha. *Improvement of the normative and technical basis of tests of solar transducers*. Autoref. PhD dys., Lviv Polytech. Nat. Univ, 2017.

[23] V. Vasylyuk, “Principles of construction of high-precision temperature sensors based on pn-junction”, *Measuring equipment and metrology*. no. 53, p. 70–76, 1998.

[24] O. Kanoun. „Kalibrationsfreie Temperaturmessung durch Parameterextraktion aus der Strom-Spannungskennlinie von pn-Übergängen“, *Technisches Messen*, vol. 68, no. 9, p. 442–448, 2003.

[25] S. Vivek, J. Chen, AN60590 - PSoC® 3, PSoC 4, and PSoC 5LP - *Temperature Measurement with a Diode*. Last Updated:

Sep 16, 2018, [On-line]. Available: <https://www.cypress.com/documentation/application-notes/an60590-psoc-3-psoc-4-and-psoc-5lp-temperature-measurement-diode>.

[26] Yu. Shwarts et al. “Limiting characteristics of diode temperature sensors”, *Sensors and actuators*, vol.86, p. 197–205, 2000.

[27] AD7792/AD7793, 3-Channel, Low Noise, Low Power, 16-/24-Bit Σ - Δ ADC with On-Chip In-Amp and Reference, Analog device. [On-line]. Available: <http://www.acdcshop.gr/content/AD7793BRUZ.pdf>

[28] Thermostat liquid TCP-0105HO-100. *Instruction on operation*. JLE “Termomir”. [On-line]. Available: <http://thermomir.com.ua/images/files/nast/tsr-0105no-100.pdf>.

[29] Ohmmeter digital reference OC – 0103. JLE “Termomir”. [On-line]. Available: <https://thermomir.com/p16543680-ommetr-tsfrovij-etallonij.html>.

[30] CY8CKIT-059 PSoC® 5LP Prototyping Kit with Onboard Programmer and Debugger, Last Updated: Apr 02, 2018. [On-line]. Available: <http://www.cypress.com/documentation/development-kitsboards/cy8ckit-059-psoc-5lp-prototyping-kit-onboard-programmer-and>