

УДК 658.562; 621.317.73; 681.7.08; 536.6.081

DOI: 10.15587/1729-4061.2017.100908

Розроблено пропозиції щодо вдосконалення обладнання для теплових випробувань сонячних колекторів. Встановлено, що в радіометрах з електричним заміщенням доцільно використовувати високочутливі напівпровідникові сенсори, зокрема досліджувані типи транзисторів. Розроблено структуру цифрового вимірювача різниці температур та методик калібрування таких термометрів у двох температурних точках. Запропоновано методику коригування нелінійної складової похибки у всьому вимірювальному діапазоні

Ключові слова: сонячний колектор, напівпровідниковий перетворювач температури, вимірювач різниці температури, калібрування термометрів

Разработаны предложения относительно усовершенствования оборудования для тепловых испытаний солнечных коллекторов. Установлено, что в радиометрах с электрическим замещением целесообразно использовать высокочувствительные полупроводниковые сенсоры, в частности исследуемые типы транзисторов. Разработана структура цифрового измерителя разности температур и методика калибровки таких термометров в двух температурных точках. Предложена методика корректировки нелинейной составляющей погрешности во всем измерительном диапазоне

Ключевые слова: солнечный коллектор, полупроводниковый преобразователь температуры, измеритель разности температур, калибровка термометров

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕМПЕРАТУРНИХ КАНАЛІВ ДЛЯ СОНЯЧНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Х. В. Василюха

Аспірант*

E-mail: serkez.kristina5@gmail.com

Ю. В. Яцук

Кандидат технічних наук, доцент**

E-mail: jazuk.jurij@gmail.com

В. Б. Здеб

Кандидат технічних наук, асистент**

E-mail: zvb@lp.edu.ua

В. О. Яцук

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: vyatsuk@lp.edu.ua

*Кафедра метрології,
стандартизації та сертифікації***

**Кафедра комп'ютеризованих
систем автоматизації***

***Національний університет

«Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

1. Вступ

Суттєве і постійне здорожчання природних вуглецевих енергоносіїв та значний негативний вплив на довкілля під час їх використання призвели до інтенсивного розроблення та широкого практичного впровадження альтернативних джерел енергії. В провідних країнах світу питома вага альтернативної енергетики в найближчі роки повинна збільшитися до декількох десятків процентів. В Україні ж уряд схвалив розпорядження «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року», яким передбачено до 2020 року досягнення частки енергії з відновлюваних джерел в кінцевому енергоспоживанні не нижче від 11 % [1]. Серед альтернативних джерел особливо привабливим через екологічну чистоту та практично необмежену потужність є сонячне випромінювання. На сьогодні активно розвиваються два напрями його практичного використання – сонячні елементи та колектори. Незаперечними перевагами сонячних елементів є відносно малі габарити та маса, можливість автономної роботи з використанням акумуляторів. Недоліками – невелика питома потужність, що на

практиці призводить до значного зростання габаритів сонячних енергосистем порівняно з традиційно використовуваними. Коефіцієнт корисної дії сучасних напівпровідникових сонячних елементів є невеликим, в найкращому випадку може сягати декілька десятків відсотка. Через розігрів під час зростання сонячної радіації спостерігається його суттєве зменшення. Причиною цього є негативний температурний коефіцієнт, що призводить до помітного зменшення вихідної напруги названих елементів. Сонячні фототермічні перетворювачі (колектори) широко застосовуються для енергозабезпечення в побутовій сфері. Їх ефективність у першу чергу залежить від питомої густини сонячної радіації та повноти її перетворення в температуру вторинного рідинного енергоносія. Тому актуальним є завдання створення різного виду сонячних установок, в яких при найменших затратах потік енергії сонячного випромінювання найефективніше перетворюється в потрібний споживачеві вид енергії (теплоту, електроенергію тощо).

Сьогодні сонячні батареї та колектори широко впроваджуються в побуті як джерела екологічно чистої й безкоштовної енергії з практично необмеженим

ресурсом. На ринку України пропонується велика кількість сонячних батарей і колекторів різних виробників і для коректного вибору їх типу необхідні прості методи-ки та обладнання для проведення їх випробувань.

Випробувального обладнання для визначення теплотехнічних і експлуатаційних характеристик сонячних колекторів (СК) і водонагрівальних установок на сьогодні в Україні майже немає. Оскільки ринок геліотехнічного обладнання потребує паспортизації та сертифікації СК, то очевидно є актуальність розроблення державних або гармонізації міжнародних нормативних документів для випробувань. Це водночас стримує розроблення нових конструкцій СК і сонячних батарей українського виробництва. Внесення змін і доповнень в існуючі стандарти щодо теплових випробувань і визначення теплотехнічної ефективності СК можливе тільки після апробації і відпрацювання методик. В удосконаленні стандартах передбачається використання метрологічно надійного випробувального обладнання.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Теорія роботи та дослідження сонячних колекторів детально подана в [2]. Однак приведені там математичні моделі є достатньо складними до практичного використання. Стандартизовані міжнародні методи-ки (ISO 9806-2, EN 12975) під час сертифікації використовують лінійні [3] або квадратичні апроксимації коефіцієнта ефективності сонячного колектора (СК) [4]. Теоретичні дослідження і досвід практичного впровадження показує переваги інженерних методик визначення ефективності СК на основі квадратичних математичних моделей [5]. Випробування та дослідження сонячних колекторів і вимірювання параметрів сонячної енергії базується на низці міжнародних стандартів, частково гармонізованих в Україні:

- ДСТУ ISO 9060:2008;
- ДСТУ ISO 9806-1:2005;
- ДСТУ ISO 9806-2:2005;
- ДСТУ ISO 9806-3:2005;
- ДСТУ ISO 9846:2006;
- ДСТУ ISO 9847:2007;
- ДСТУ ISO 9459-1:2005;
- ДСТУ ISO/TR 9901:2006.

У цих стандартах наведено методи випробування та процедури обчислювання, спрямовані на визначення теплових характеристик сонячних колекторів під час експлуатування. Аналіз показує, що вимоги, поставлені в міжнародних стандартах до контролю-вимірювальної апаратури, є достатньо високими. Наприклад, зміна чутливості приймачів сонячного випромінювання в діапазоні довжин хвиль (0,3...3) мкм не повинна перевищувати $\pm 1\%$ протягом календарного року за періодичного калібрування на сонячну чутливість (за стандартами ISO 9846 та ISO 9847). За стандартом ISO 9806-3:2005: похибка вимірювання температури рідинного теплоносія $\Delta T_x \leq \pm 0,1$ °C; роздільна здатність $\pm 0,02$ °C; мінімальне значення різниці вимірюваних температур не повинно бути меншим $\Delta T_{x_{\min}} \geq 2$ °C; абсолютна похибка вимірювання різниці температур $\Delta \Delta T_x \leq \pm 0,1$ °C (бажано $\pm 0,02$ °C); відносна

похибка – $\delta \Delta T_x \approx \pm 5\%$. Це призводить до трудомної та тривалої процедури їх калібрування.

Відомо, що основний параметр СК коефіцієнт ефективності залежить від співвідношення температур колектора, теплоносія і довкілля. Випробування СК можуть проводитись як із сонячними імітаторами, так і при безпосередньому сприйнятті сонячної радіації [5]. Дослідження за сприйняття прямої сонячної радіації повинні проводитись за певних кутів падіння, значення яких суттєво впливає на їх теплову потужність [6]. Це збільшує вимоги до швидкодії засобів вимірювання параметрів прямої сонячної радіації, які зазвичай динамічно змінюються на практиці. Окрім цього, аналітично і експериментально доведено, що динамічна зміна вхідної температури СК дає можливість усунути деякі похибки під час вимірювань та досягнути точності випробувань на рівні десяти відсотків [7]. Оцінка коефіцієнта ефективності здійснюється на основі багаточленної лінійної регресії і при цьому необхідні додаткові затрати для зміни кута освітлювання СК. Експериментальні дослідження СК різних конструкцій з використанням закритих сонячних симуляторів показали, що стандартна методика знаходження основних характеристик СК може бути реалізована з похибками до десятків відсотків [8]. Аналіз показав [9], що відносна похибка експериментального знаходження коефіцієнта ефективності СК практично визначається відносними похибками вимірювання різниці температур ΔT_x та загальної поверхневої густини потоку випромінювання δ_c . Під час вимірювання поверхневої густини потоку сонячного випромінювання доцільно застосовувати лабораторні методи з використанням імітаторів сонячного випромінювання. Це дає змогу зменшити витрати, збільшити точність досліджень та кількість контрольованих впливних чинників і продуктивність випробувань незалежно від погодних умов [5, 10]. На практиці використовуються переважно квазістаціонарні методи з використанням динамічних моделей з усередненими значеннями температури і теплоємності СК [5, 11]. Відомо, що найвищу точність та нескладну процедуру вимірювання параметрів сонячного випромінювання забезпечують відкалібровані радіометри з електричним замощенням (калориметри) [12]. В таких радіометрах по чергово порівнюються енергії оптичного випромінювання та електрична з використанням термічного способу порівняння. Оскільки в обох випадках компаратор розігріватиметься до однакового значення температури, то інформативним сигналом можна вважати різницю температур приймача випромінювання і довкілля [13]. Традиційно як швидкодіючий компаратор використовується тонка металева пластина з вимірюванням її температури малоінерційними термоелектричними перетворювачами. З огляду на їх малу чутливість пластину доводиться достатньо сильно нагрівати, що загалом зменшує швидкодію радіометра. Тому вдосконалення компаратора температур на основі сучасних температурних сенсорів сприятиме покращанню метрологічних характеристик усього радіометра.

В комерційних геліосистемах є необхідність в прецизійному обліку кількості відданого споживачу тепла. Дійсно, за мінімального значення різниці вимірюваних температур $\Delta T_{\min} \geq 1,5$ °C та абсолютної похибки

$\Delta\Delta T \leq \pm 0,1$ °C, відносна похибка вимірювання становитиме $\delta\Delta T \approx \pm 6,7$ % [9]. За умови зменшення похибок $\delta\Delta T$, δ_G вимірювання різниці температур (температури) та густини потоку випромінювання сумарна відносна похибка визначення коефіцієнта ефективності СК може не перевищувати одиниць відсотків [14, 15].

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка обладнання для теплових вимірювань з використанням напівпровідникових сенсорів в радіометрі з електричним заміщенням. Це дасть змогу підвищити точність та спростити процедуру лабораторних випробувань сонячних колекторів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- теоретично обґрунтувати доцільність вибору температурних сенсорів для подальшого застосування в радіометрах з електричним заміщенням;
- провести експериментальні дослідження напівпровідникових транзисторних діодів з метою визначення розкиду характеристик між сенсорами для трьох різних значень вимірювальних струмів;
- розробити структуру цифрового вимірювача різниці температур з досліджуваними сенсорами та опрацювати методику його калібрування з метою коригування адитивних і мультиплікативних складових похибки;
- дослідити методику калібрування цифрових термометрів у двох температурних точках та методику коригування нелінійної складової похибки.

4. Обґрунтування вибору типу сенсора

Аналіз шляхів зменшення похибок вимірювання різниці температур в радіометрі з електричним заміщенням показав, що маса термічного компаратора повинна бути якомога меншою. З огляду на досягнення максимальної швидкодії він повинен нагріватися на мінімально можливу температуру. Традиційно використовувані термоелектричні перетворювачі мають низьку чутливість та значні інструментальні похибки (до декількох кельвінів). Тому вони з'єднуються в термобатареї і їх сигнали опрацьовуються спеціальними інформаційно-вимірювальними системами із оптимальним алгоритмом знаходження середньо інтегральної температури [16]. Це ускладнює конструкцію та зменшує швидкодію і практично унеможливує використання такого перетворювача в радіометрах. Резистивні термоперетворювачі повинні бути плівковими, мати високу чутливість та малі значення інструментальної похибки та похибки від самонагрівання. Сучасні малогабаритні плівкові термоперетворювачі опору (ТО) виготовляються класу А з початковим значенням опору 1000 Ом та типовим значенням розсіюваної потужності 0,1 мВт. При цьому максимальне значення вимірювального струму не повинно перевищувати $I_{доп} \leq 0,3$ мА. Значення спадку напруги на ТО буде рівне $U_{ТО} = 0,3$ В, а чутливість за напругою сигналу – $\Delta U_{ТО} = 1,2$ мВ/К. Послідовне увімкнення вже десяти плівкових ТО збільшує чутливість такого сенсора до 12 мВ/К. Основними недоліками у цьому випадку є достатньо великі масогабаритні показники та вартість [17].

Оскільки практично усі параметри напівпровідникових переходів залежать від температури, то відразу після розроблення електронних пристроїв окрім методів коригування розвивалися й методи їх використання як термометрів. Однак, через суттєві обмеження, головним чином технологічного характеру, вона реалізовувалась надто повільно. Завдяки бурхливому розвитку напівпровідникової техніки з'явилися реальні мікроелектронні елементи для створення високоточних цифрових термометрів. До незаперечних переваг напівпровідникових перетворювачів температури (НПТ) належать [18]:

- висока чутливість;
- довгочасна стабільність;
- мала інерційність;
- відносно невелика не лінійність;
- доволі широкий температурний діапазон використання;
- можливість точкових вимірювань температури;
- мала вартість;
- простота виготовлення.

До певної міри розкид параметрів сучасних НПТ можна скоригувати конструктивно-технологічними методами під час їх виготовлення, а також структурно-алгоритмічними способами корекції похибок, які реалізуються переважно у вторинному приладі [19]. Основна ідея при цьому полягає в статистичному усередненні передавальних характеристик НПТ в структурах вимірювачів температури та різниці температур. Авторами проведено попередні дослідження, які показали можливість зменшення технологічного розкиду НПТ до значень декількох десятків кельвіна з використанням транзисторів для поверхневого монтажу [20]. Тому подальший аналіз спрямований на встановлення граничних можливостей використання НПТ під час випробувань СК.

5. Опис експериментальної устави для дослідження сенсорів

На рис. 1 подана структурна схема експериментальної устави для дослідження напівпровідникових температурних сенсорів VD_x , яка містить:

- рідинний термостат;
- джерело напруги живлення $U_{ж}$;
- генератори вимірювальних струмів I_1, I_2, I_3 ;
- перемикачі вимірювальних струмів S_{12} ;
- зразкові резистори R_{N1}, R_{N1}, R_{N1} для контролювання встановлюваних значень вимірювальних струмів;
- перемикачі зразкових резисторів S_{11} ;
- прецизійний вольтметр V для вимірювання спадків напруг на НПТ та зразкових резисторах.

У вимірювальній схемі на рис. 1 передбачено низку заходів із забезпечення завадозахищеності та завадостійкості перетворення [18].

З метою коректного порівняння розкиду характеристик декілька НПТ послідовно включаються в коло генераторів струму та розміщуються в цифровому прецизійному рідинному термостаті типу ТСР-0105 НО (Україна). Технічні характеристики термостата: діапазон термостатування (0...+100) °C; дискретність задання значень температури 0,01 °C; межа допустимих значень основної похибки вимірювання та відтворення тем-

пературі $\pm 0,02^\circ\text{C}$. Генератори струму побудовані за схемою струмозадавальних двополюсників, значення струмів яких можуть контролюватись. За необхідності вони можуть встановлюватись в заданих межах, що сприяє коректному порівнянню між собою параметрів НПТ досліджуваних на протязі тривалих проміжків часу. Спадків напруги на НПТ та зразкових резисторів вимірювались цифровим мультиметром Picotest M3511A (Тайвань). Діапазони вимірювань – р 0,1 В, 1 В та 10 В, точність 0,012 % за 1 рік та одиниця молодшого розряду в режимі усереднення 1 мкВ.

Конструктивно НПТ являли собою п'ять послідовно сполучених транзисторних діодів. Як НПТ використовувались транзистори для поверхневого монтажу типів BC858C, BC859B, BCW61C (p-n-p типу) та BC849B, BC849C, BC850BE (n-p-n типу) (Малайзія). З метою захисту транзисторів в рідині НПТ були вкриті термоусаджувальною плівкою (рис. 2).

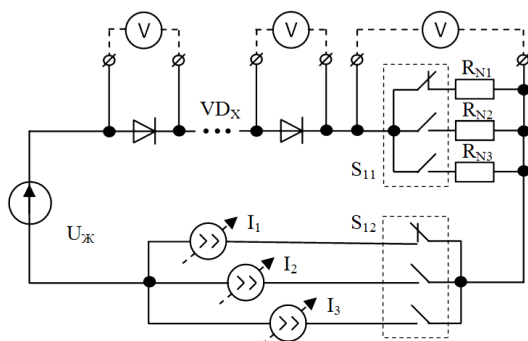


Рис. 1. Структурна схема експериментальної устави для дослідження напівпровідникових температурних сенсорів



Рис. 2. Зовнішній вигляд транзисторних сенсорів температури

Досліджувані сенсори поміщались в термостат, в якому встановлювались задані значення температури від 0°C до $+80^\circ\text{C}$ з дискретністю 10°C . Для коректного вибору вимірювальних струмів були задані такі їх номінальні значення 0,1 мА, 1 мА та 1,9 мА.

6. Опрацювання результатів експериментальних досліджень

Проведені дослідження показали доцільність використання в НПТ транзисторів типу BCW61C (Малайзія) з найменшим розкидом значень спадків напруг від зразка до зразка: $\pm 0,49 \text{ мкВ}$ ($\pm 0,049^\circ\text{C}$) (табл. 1, 2). Через НПТ чергово пропускали три різні вимірювальні

струми $I_1=1 \text{ мА}$, $I_2=0,1 \text{ мА}$ та $I_3=1,9 \text{ мА}$, а значення спадків напруг на них фіксувались мультиметром.

Таблиця 1

Експериментальні значення спадків напруг при $I_1=1 \text{ мА}$ для сенсорів типу BCW61C в діапазоні вимірювання $(0...+80)^\circ\text{C}$

№	$U_{\text{bei}}, \text{В}$				
	Темп. 0°C	Темп. 20°C	Темп. 40°C	Темп. 60°C	Темп. 80°C
1	3,42138	3,21386	3,00465	2,79343	2,58004
2	3,42091	3,21345	3,0043	2,7931	2,57965
3	3,42162	3,21428	3,00519	2,79404	2,58057
4	3,42081	3,21347	3,00456	2,79339	2,57997
5	3,42133	3,21394	3,0049	2,79378	2,58033
6	3,42122	3,21382	3,00473	2,79358	2,58004
7	3,42124	3,21382	3,00487	2,79383	2,58038
8	3,42124	3,21381	3,00469	2,79349	2,57998
9	3,42132	3,21391	3,00494	2,79361	2,58008
$U_{\text{сеп.bei}}, \text{В}$	3,42123	3,21382	3,00476	2,79358	2,58011

Методика дослідження полягала у вимірюванні спадків напруги на НПТ із зміненням полярності підключення вольтметра та усередненні декількох результатів перетворення. Це дозволило зменшити випадкову та адитивну (зумовлену контактними е.р.с.) складові похибки, їх значення не перевищувало еквівалентно $\pm 0,02^\circ\text{C}$. Експериментально встановлений розкид значень спадків напруги на НПТ ΔU_{bei} визначався співвідношенням (1):

$$\Delta U_{\text{bei}} = U_{\text{bei}} - \Delta U_{\text{сеп.bei}} \quad (1)$$

де U_{bei} – спадки напруги на p-n переходах НПТ i-того сенсора; $U_{\text{сеп.bei}}$ – середнє значення спадків напруги на p-n переходах НПТ i-того сенсора.

Таблиця 2

Експериментально встановлені розкиди спадків напруг для сенсорів типу BCW61C при $I_1=1 \text{ мА}$ в діапазоні вимірювання $(0...+80)^\circ\text{C}$

№	ΔU_{bei}									
	Темп. 0°C		Темп. 20°C		Темп. 40°C		Темп. 60°C		Темп. 80°C	
	мВ	$^\circ\text{C}$	мВ	$^\circ\text{C}$	мВ	$^\circ\text{C}$	мВ	$^\circ\text{C}$	мВ	$^\circ\text{C}$
1	0,15	0,015	0,04	0,004	-0,11	-0,011	-0,16	-0,016	-0,08	-0,008
2	-0,32	-0,032	-0,37	-0,037	-0,46	-0,046	-0,48	-0,048	-0,47	-0,047
3	0,39	0,039	0,46	0,046	0,43	0,043	0,46	0,046	0,45	0,045
4	-0,42	-0,042	-0,35	-0,035	-0,2	-0,02	-0,19	-0,019	-0,14	-0,014
5	0,1	0,01	0,12	0,012	0,15	0,015	0,2	0,02	0,21	0,021
6	-0,01	-0,001	0,005	0,0005	-0,03	-0,003	0	0	-0,08	-0,008
7	0,01	0,001	0,005	0,0005	0,11	0,011	0,25	0,025	0,27	0,027
8	0,01	0,001	-0,005	-0,0005	-0,07	-0,007	-0,1	-0,01	-0,14	-0,014
9	0,09	0,009	0,09	0,009	0,18	0,018	0,03	0,003	-0,03	-0,003

6. 1. Оцінювання можливостей практичної реалізації вимірювачів різниці температур

Аналіз результатів вимірювань спадків напруг на кожному із дев'яти сенсорів типу BCW61C (Малайзія) при протіканні трьох вимірювальних струмів (0,1 мА, 1 мА та 1,9 мА) показав, що розкиди цих середніх значень є практично температурно незалежні. Для усіх встановлюваних значень вимірювальних струмів розкид знаходився у межах $\pm 0,004^\circ\text{C}$.

Також експериментально встановлено, що максимальний розкид температурних залежностей НПТ не перевищує $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ у всьому вимірювальному діапазоні від $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+80 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 3). При цьому значення розкидів не залежить від значень вимірювальних струмів.

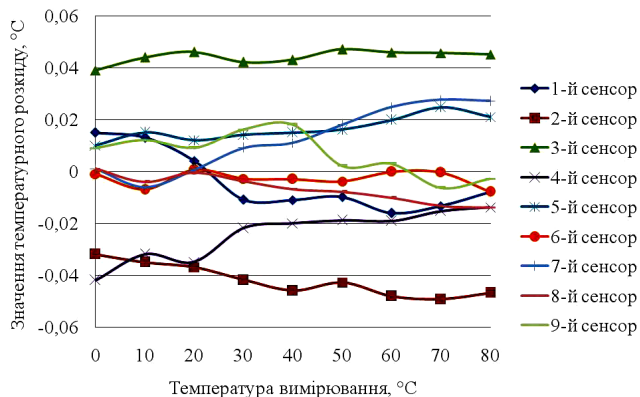


Рис. 3. Розкид між характеристиками дев'яти сенсорів типу BCW61C (Малайзія) в залежності від температури вимірювання для $I_1=1 \text{ mA}$

Це дає підстави в структурі цифрового вимірювача різниці температур передбачити калібрування нульових показів. Наприклад, помістивши обидва сенсори в середовище з однаковою температурою, запам'ятавши показ приладу, та увівши його як поправку до результатів вимірювання (рис. 4).

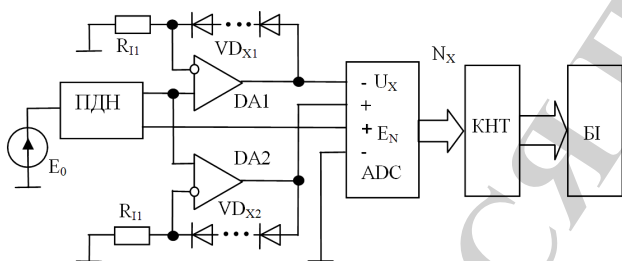


Рис. 4. Структурна схема цифрового вимірювача різниці температур: ПДН – подільник напруги; КНТ – контролер; Бі – блок індикації

Під час калібрування вимірювача різниці температур коригуватимуться наступні похибки:

- зумовлені розкидом температур обох НПТ;
- інструментальні похибки обох струмозадавальних резисторів R_{11} та R_{12} ;
- через напруги зміщення обох операційних підсилювачів DA1 та DA2 за даних умов експлуатації.

Як показує аналіз залежностей на рис. 3, після калібрування значення похибки вимірювання різниці температур в температурному діапазоні $(20 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ не перевищуватиме $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$.

6. 2. Коригування похибок під час вимірювання температури

Аналіз результатів експериментальних досліджень також показав, що похибка взаємозамінності НПТ є найменшою для струму 1 mA. У всьому вимірювальному діапазоні від $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+80 \text{ }^\circ\text{C}$ її значення не перевищує $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 3). Під час практичної реалізації цифрових термометрів (ЦТ) впливатимуть також ін-

струментальні адитивні та мультиплікативні похибки використаної елементної бази. Окрім того, НПТ властива й нелінійність, значення якої можна оцінити на рівні декількох десятих градуса [13, 17–20]. Тому в широкому вимірювальному діапазоні доцільно провести калібрування ЦТ, шкала яких проградуїрована в градусах Цельсія, при двох значеннях температури.

Очевидно, що за перше калібрувальне значення доцільно прийняти температуру топлення льоду $0 \text{ }^\circ\text{C}$, яке достатньо просто та точно реалізується на практиці, навіть в переносних засобах для метрологічного забезпечення ЦТ. Друге калібрувальне значення доцільно прийняти близьким до максимального значення вимірюваної температури. За нелінійної функції перетворення приладу рекомендується вибрати калібрувальне значення з коефіцієнтом приблизно рівним 0,82 від максимального значення вимірюваної температури [18].

Запропоновано таку методику калібрування термометрів. Для кожного із сенсорів та кожного із вимірювальних струмів визначаються спадки напруг U_{i0} та U_{iclb} при встановлених в термостаті калібрувальних температурах $\theta_0=0 \text{ }^\circ\text{C}$ та $\theta_{clb}=70 \text{ }^\circ\text{C}$ та обчислюються різниці напруг (2):

$$\Delta U_{iclb} = U_{i0} - U_{iclb} \tag{2}$$

Калібрувальні коефіцієнти α_{iclb} визначаються як відношення (3):

$$\alpha_{iclb} = \frac{\Delta U_{iclb}}{\theta_{clb}} \tag{3}$$

Експериментально встановлені значення похибок від нелінійності характеристики перетворення $\Delta_{инл}$ подаються співвідношеннями (4):

$$\Delta_{инл} = \frac{\Delta U_{ix}}{\alpha_{iclb}} - \theta_{jx} \tag{4}$$

де ΔU_{ix} – різниця між спадками напруг за поточної температури θ_{jx} та $0 \text{ }^\circ\text{C}$; θ_{jx} – значення встановлюваного в термостаті значення температури.

Похибки вимірювання температури при калібруванні дев'яти транзисторів типу BCW61C (Малайзія), представлені на рис. 5. В діапазоні вимірюваних температур від $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+80 \text{ }^\circ\text{C}$, за умови, що значення другої калібрувальної температури становить $+70 \text{ }^\circ\text{C}$. З аналізу поданої графічної залежності (рис. 5) стає очевидним, максимальні значення похибки від нелінійності є посередині між обома калібрувальними температурами та за максимального значення вимірюваної температури. З метою коригування її значення запропоновано апроксимувати цю залежність функцією властивою для p-n переходів, визначити параметри за експериментальними даними та увести її до результатів вимірювання як поправку. Оскільки сучасні ЦТ можна реалізувати на базі контролерів із значними обчислювальними можливостями, то розрахунок такої поправки не є складною технічною задачею.

Температурну залежність похибки від нелінійності у вимірювальному діапазоні пропонуємо апроксимувати логарифмічною залежністю з урахуванням умов

рівності нулю її значень для обох калібрувальних температур (5):

$$\Delta_{\text{нл}} = m\eta \left[\frac{\theta_x}{\theta_{\text{clb}}} \cdot \frac{kT_{\text{clb}}}{q} \cdot \ln \frac{T_{\text{clb}}}{T_0} - \frac{kT_x}{q} \cdot \ln \frac{T_x}{T_0} \right], \quad (5)$$

де k , q – стала Больцмана та заряд електрона відповідно; $T_0=273,15$ К – температура першої точки калібрування; $T_{\text{clb}}=343,15$ К – температура другої точки калібрування; T_x – поточна температура в термостаті; η_i – коефіцієнт неідеальності НПТ; m – кількість транзисторних діодів в НПТ.

З рівняння (5) апроксимаційної залежності похибки від нелінійності $\Delta_{\text{нл}}$ знаходимо значення коефіцієнта η_i за експериментальними даними при 30 °С (6):

$$\eta_i = \frac{\Delta_{\text{нл}}}{5 \left[\frac{\theta_x}{\theta_{\text{clb}}} \cdot \frac{kT_{\text{clb}}}{q} \cdot \ln \frac{T_{\text{clb}}}{T_0} - \frac{kT_x}{q} \cdot \ln \frac{T_x}{T_0} \right]}. \quad (6)$$

Для перевірки отриманих результатів знайшли різницю між розрахованою та експериментально визначеною похибкою від нелінійності. Ця різниця виявилась нульовою для усіх встановлюваних в термостаті значень температури в усьому діапазоні (0–+80) °С, що свідчить про коректність запропонованої методики коригування похибки від нелінійності НПТ.

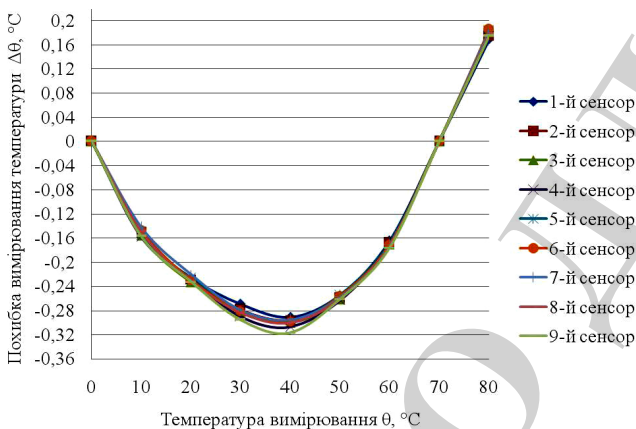


Рис. 5. Графічна залежність похибки вимірювання температури для дев'яти напівпровідникових перетворювачів при вимірювальному струмі $I_1=1$ мА

7. Обговорення результатів експериментальних досліджень ефективності температурних каналів

Експериментально підтверджена доцільність послідовного сполучення транзисторів в сенсорі, що забезпечує суттєве збільшення чутливості. При цьому спадки напруг на сенсорах не перевищували значення 4 В, що дає можливість їх легкого узгодження з мікроелектронними компонентами для побудови термометрів. Це дозволяє реалізацію цифрових вимірювачів різниці температур з досліджуваними сенсорами без використання прецизійних масштабуючих компонентів.

Запропоновані методики калібрування цифрових вимірювачів можуть бути реалізовані програмними способами. Апаратно при цьому може використовуватися

лише декілька клавiш для введення інформації про ознаку калібрувальної величини.

Проведені дослідження дають також змогу реалізації прецизійних цифрових термометрів в діапазоні вимірювання від 0 °С до +100 °С. Результати досліджень показали, що метрологічні характеристики цифрових термометрів з калібруванням можуть бути кращими ніж в термометрах з використанням модуляції вимірювальних струмів. Розроблені цифрові вимірювачі температури та різниці температур можуть використовуватись як переносні прилади в комунальній сфері, сільському господарстві, у харчовій промисловості тощо.

Вузкий температурний діапазон проведених експериментальних досліджень і дещо громіздка методика калібрування цифрових термометрів можна віднести до недоліків отриманих результатів. Вирішення названих проблем є основною задачею подальших досліджень.

8. Висновки

1. Для покращення комплексу технічних характеристик в радіометрах з електричним заміщенням запропоновано використовувати високочутливі напівпровідникові сенсори. На підставі експериментальних досліджень вибрано тип планарних транзисторів та розроблено конструкцію сенсорів, які можуть використовуватись в температурних каналах пристроїв для досліджень сонячних систем. Послідовне сполучення декількох транзисторних діодів дає можливість збільшення чутливості за одночасного зменшення технологічних розкидів та спрощення вторинних приладів.

Конструктивно НПТ являли собою п'ять послідовно сполучених транзисторних діодів. Як НПТ використовувались транзистори для поверхневого монтажу типів BC858C, BC859B, BCW61C (p-n-p типу) та BC849B, BC849C, BC850BE (n-p-n типу) (Малайзія). З метою захисту транзисторів в рідині НПТ були вкриті термоусаджувальною плівкою

2. Експериментально встановлено, що максимальний розкид характеристик дев'яти досліджених напівпровідникових транзисторних діодів не перевищує $\pm 0,06$ °С. І у всьому вимірювальному діапазоні від 0 °С до +80 °С це значення практично не залежить від вимірювальних струмів від 0,1 до 2 мА.

3. Розроблено структуру цифрового вимірювача різниці температур з досліджуваними сенсорами. Її новизною є відсутність окремого прецизійного підсилювального елемента, що дозволяє створювати точні переносні прилади в базисі сучасних мікроелектронних компонентів. Запропоновано здійснювати калібрування цього вимірювача за довільної температури в діапазоні вимірювання за умови забезпечення однаковості температур обох сенсорів. Після калібрування оцінюване значення похибки вимірювача різниці температур не перевищуватиме $\pm 0,1$ °С у всьому вимірювальному діапазоні.

4. Запропоновано методику калібрування цифрових термометрів у двох температурних точках. При 0 °С визначається адитивна похибка термометра, яка в подальшому використовується як поправка до усіх результатів перетворень. Значення мультиплікатив-

ного коефіцієнта запропоновано визначати в околі максимальної вимірюваної температури як відношення номінального та отриманого значення коду, який відповідає калібрувальній температурі.

5. Розроблено методику коригування нелінійної складової похибки у всьому вимірювальному діапазоні, в основу якої покладено визначення параметрів апроксимаційних залежностей сенсорів на основі експериментальних даних. Запропоновано логарифмічну апроксимаційну температурну залежність напівпровідникових сенсорів, значення якої рівне нулеві при обох значеннях калібрувальних температур.

6. Теоретично оцінено, що після калібрування межа допустимих похибок цифрових термометрів в діапазоні вимірювання від 0 °C до +100 °C не перевищуватиме $\pm 0,1$ °C.

Подяки

Наукові результати, подані в цій статті, були отримані в рамках виконання проекту 0115U000446, 01.01.2015-31.12.2017, за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України.

Література

1. До 2020 року в Україні 11 % енергії вироблятиметься з відновлюваних джерел [Електронний ресурс]. – EcoTown. – Режим доступу: <http://ecotown.com.ua/news/Do-2020-roku-v-Ukrayini-11-enerhiyi-vyroblyatymetsya-z-vidnovlyuvanykh-dzherel/>
2. Duffie, J. A. Solar Engineering of Thermal Processes [Text] / J. A. Duffie, W. A. Beckman. – Chichester John Wiley & Sons Ltd., 2013. – 910 p. doi: 10.1002/9781118671603
3. Paul, G. The Complexities of Solar Collector Testing [Electronic resource] / G. Paul // Evaluation Engineering. Schreier. – 2010. – Available at: <https://www.evaluationengineering.com/the-complexities-of-solar-collector-testing>
4. A guide to the standard EN 12975. Quality Assurance in solar thermal heating and cooling technology – keeping track with recent and upcoming developments [Text]. – QAISt. – 2012. – Available at: http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/projects/QAISt/QAISt_results/QAISt%20D2.3%20Guide%20to%20EN%2012975.pdf
5. Мисак, Й. С. Сонячна енергетика: теорія та практика [Текст]: монографія / Й. С. Мисак, О. Т. Возняк, О. С. Дацько, С. П. Шаповал. – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2014. – 340 с.
6. Topic report for WP2 Solar thermal collectors. Performance testing of evacuated tubular collectors [Text] / S. Fischer, T. Osorio, M. Carvalho, U. Fritzsche, P. Kovacs et. al. (Eds.) // QAISt. – 2012. – Available at: <http://www.estif.org/solarkeymarknew/images/downloads/QAISt/qaist%20d2.1%20r2.1%20performance%20testing%20of%20evacuated%20tubular%20collectors.pdf>
7. Seene, G. Optimization of the Quasi Dynamic Method for Solar Collector Testing [Text] / G. Seene, P. Ollas. – Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012. – 94 p. – Available at: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/162910.pdf>
8. Allan, J. Performance testing of thermal and photovoltaic thermal solar collectors [Text] / J. Allan, Z. Dehouche, S. Stankovic, L. Mauricette // Energy Science & Engineering. – 2015. – Vol. 3, Issue 4. – P. 310–326. doi: 10.1002/ese3.75
9. Столярчук, П. Г. Розробка математичної моделі ефективності сонячних перетворювачів [Текст] / П. Г. Столярчук, В. О. Яцук, М. М. Микійчук, М. С. Міхалева, О. І. Шпак, Т. М. Олеськів // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 5, № 8 (71). – С. 30–36. doi: 10.15587/1729-4061.2014.27856
10. Solar Simulation. Oriel Product Training [Electronic resource]. – Available at: <https://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/12298.pdf>
11. Osorio, T. Testing of Solar Thermal Collectors Under Transient Conditions [Text] / T. Osorio, M. J. Carvalho // Energy Procedia. – 2012. – Vol. 30. – P. 1344–1353. doi: 10.1016/j.egypro.2012.11.148
12. Назаренко, Л. А. Развитие прецизионной фотометрии и радиометрии [Текст]: IV міжнар. наук.-техн. конф. / Л. А. Назаренко, Е. П. Тимофеев // Сучасні проблеми світлотехніки. – Харків, 2011. – С. 15–17.
13. Серкез, Х. В. Покращення характеристик приймачів сонячного випромінювання з електричним заміщенням [Текст] / Х. В. Серкез, В. О. Яцук, Ю. В. Яцук // Вісник Нац-ного ун-ту «Львівська політехніка». – 2013. – Вып. 753. – С. 25–30.
14. Test Report: KTB Nr. 2006-39-a-en. Collector test according to EN 12975-1,2:2006 [Text]. – Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems ISE, 2012. – Available at: http://www.twl-technologie.de/files/3669/upload/CE/Pruefbericht_Fraunhofer_TWL_Technologie_FK200.pdf
15. Eurofins Product Testing – Solar collectors and thermal systems. Conformity tests for certification in accordance with EN 12975 – EN 12976 [Electronic resource]. – Available at: <http://www.eurofins.com/consumer-product-testing/services/testing/solar-collectorsphotovoltaics/solar-collectors-and-thermal-systems/>
16. Бондаренко, Л. І. Модифікація конструкції блока термоіндикації абсолютного радіометра енергетичної освітленості [Текст]: наук.-техн. конф. / Л. І. Бондаренко, Л. В. Грищенко, Л. А. Назаренко, В. І. Полевой // Метрологія та вимірювальна техніка. – Харків, 2006. – С. 59–63.
17. Яцук, В. Можливості вдосконалення метрологічного забезпечення систем індивідуального обліку тепла [Текст] / В. Яцук, П. Бугайцова, Ю. Яцук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 5, № 9 (65). – С. 6–10. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/18445/16192>

18. Поліщук, Є. С. Вимірювальні перетворювачі (сенсори) [Текст]: підр. / Є. С. Поліщук, В. М. Ванько, В. О. Яцук, М. М. Дорожовець, Ю. В. Яцук. – Львів, 2015. – 584 с.
19. Серкез, Х. В. Метрологическое обеспечение измерений энергетических параметров солнечного излучения при испытаниях солнечных коллекторов [Текст] / Х. В. Серкез, В. А. Яцук // Устойчивое развитие. – 2013. – № 7. – С. 45–49.
20. Серкез, Х. В. Дослідження діодних сенсорів температури для застосування в абсолютному радіометрі з електричним заміщенням [Текст]: Х міжнар. наук.-техн. конф. / Х. В. Серкез, В. О. Яцук // Метрологія та вимірювальна техніка. – Харків, 2016. – С. 125.

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ

