

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВАСИЛИХА ХРИСТИНА ВАСИЛІВНА

УДК 681.7.08; 536.6.081

ДИСЕРТАЦІЯ

ВДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНОЇ БАЗИ ВИПРОБУВАНЬ
СОНЯЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

05 «Технічні науки»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Василь І.В. Василюха
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник –
Яцук Василь Олександрович
доктор технічних наук, професор
кафедри ІВТ

Ідентичність всіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ:
Учений секретар спеціалізованої
вченої ради

Григорук



Львів – 2017

АНОТАЦІЯ

Василиха Х.В. Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка», Львів, 2017.

Зміст дисертації. Тема дослідження присвячена вдосконаленню існуючих нормативних документів та контрольно-вимірювальної апаратури, які використовуються під час випробувань сонячних перетворювачів. Внесення змін і доповнень в існуючі стандарти щодо теплових випробувань і визначення теплотехнічної ефективності сонячних колекторів можливе тільки після апробації і відпрацювання методик. Запропоновано шляхи вдосконалення радіометра (калориметра) з електричним заміщенням для теплових випробувань і визначення ефективності сонячних колекторів. Для покращення комплексу технічних характеристик такого обладнання запропоновано застосовувати напівпровідникові термочутливі діоди, які різночасово використовуються як сенсори температури під час сприйняття сонячного опромінення та як нагрівачі. Розроблено структуру цифрового вимірювача різниці температури з досліджуваними сенсорами. Вдосконалено методику випробувань сонячних перетворювачів стосовно визначення теплових характеристик у закритих приміщеннях із застосуванням імітаторів потоку сонячного випромінювання та радіометрів з електричним заміщенням.

У першому розділі «*Аналіз існуючих методів, засобів та нормативної документації випробувань сонячних перетворювачів*» розглянуто доцільність та ефективність використання сонячних установок зважаючи на високий потенціал сонячної енергії в Україні. Встановлено, що використання енергії сонячного випромінювання в паливно-енергетичному балансі України є важливим напрямом реалізації політики енергозбереження і одним з пріоритетів у створенні високоефективної, екологічно чистої енергетики. Для розвитку сонячної енергетики

в Україні повинні поєднуватися два основні нероздільних напрямки: створення сонячних установок для виробництва теплової та електричної енергії, а також створення могутнього науково-виробничого комплексу для проведення прикладних наукових досліджень.

У підрозділі 1.1 «Основні технічні параметри сонячних перетворювачів» проведено аналіз основних технічних параметрів сонячних перетворювачів, які впливають на визначення ефективності таких установок. Ефективність сонячних колекторів в першу чергу залежить від питомої густини сонячної радіації, що потрапляє на поверхню установки та повноти її перетворення в температуру вторинного рідинного енергоносія. В свою чергу ефективність сонячних модулів, приладів для перетворення сонячного випромінення в електричну енергію за допомогою явища внутрішнього фотоефекту – визначається властивостями напівпровідникових матеріалів, конструктивними особливостями фотоелементів та залежить від потужності падаючого сонячного випромінення, з урахуванням міжнародних і європейських стандартів.

У підрозділі 1.2 «Сучасний стан нормативного забезпечення випробувань сонячних елементів та колекторів» розглянуті основна нормативна база документів, які стосуються випробувань сонячних перетворювачів. Встановлено, що через трудомісткість та складність процедур калібрування контрольно-вимірювальної апаратури суттєво стримується широке впровадження геліотехнічного обладнання.

У підрозділі 1.3 «Сучасна технічна база випробувань сонячних перетворювачів та перспективи її автоматизації» розглянуто стан та напрямки досліджень обладнання, яке використовується під час вимірювання сонячного та теплового випромінення і температури. Зазначено доцільність розробки приймачів сонячного випромінювання, які б з високою точністю і чутливістю вимірювали енергетичні параметри оптичного випромінювання.

У підрозділі 1.4 «Формування напрямків подальших теоретичних і експериментальних досліджень» визначені основні завдання для досягнення поставленої мети дослідження, а саме удосконалення нормативно-технічної бази та контрольно-вимірювальної апаратури, які застосовуються для лабораторних

випробувань сонячних колекторів: 1) висунуто пропозиції щодо покращення методик випробувань сонячних колекторів. Для цього пропонується визначати і враховувати значення всіх суттєвих похибок, які впливають на кінцевий результат вимірювань параметрів сонячних колекторів; 2) досліджено використання абсолютного радіометра (калориметра) з електричним замінням, побудованого на основі прецизійних температурних сенсорів; 3) проведено експериментальні дослідження взаємозамінності напівпровідникових сенсорів температури з метою визначення розкиду характеристик між сенсорами від зразка до зразка; 4) розроблено структуру вимірювача різниці температур з досліджуваними сенсорами та запропоновано методику його налаштування з метою коригування адитивних і мультиплікативних складових похибки.

У другому розділі *«Покращення методів та методик випробувань сонячних елементів і колекторів»* описані наукові методи дослідження та розглянута послідовність їхнього застосування.

У підрозділі 2.1 *«Аналіз методів випробувань сонячних перетворювачів»* викладені особливості проведення випробувань сонячних перетворювачів в умовах близьких до експлуатаційних під час їх опромінення сонцем або в лабораторних умовах з використанням імітаторів відповідно до чинних нормативних документів з метою сертифікації та паспортизації. Зазначено, що одним з найважливіших параметрів, що визначають ефективність сонячних перетворювачів є розрахунок коефіцієнту корисної дії, який потребує використання спеціалізованого випробувального обладнання та удосконалення і спрощення процедури вимірювання зі зменшеними економічними затратами.

У підрозділі 2.2 *«Вимоги нормативних документів до метрологічних характеристик величин під час випробувань сонячних колекторів»* розглядалися основні вимоги нормативних документів до вимірювання сонячного і теплового випромінення, вимірювання температури та різниці температур, вимірювання швидкості потоку рідини в колекторі, швидкості вітру, вимірювання тиску, вимірювання площі колектора та вмісту рідини в колекторі. Аналіз показує, що вимоги поставлені в міжнародних стандартах до вимірювання сонячного

випромінення і температури є достатньо високими і регламентують трудомістку та тривалу процедуру їх калібрування

У підрозділі 2.3 «Дослідження можливостей еталонування випромінювальної здатності випромінювача та приймача сонячного випромінювання» проведений аналіз показав, що для досягнення зазначених у нормативних документах вимог доцільним є еталонування випромінювальної здатності випромінювача або приймача сонячного випромінювання. При цьому для практичного вдосконалення процедури вимірювань енергетичних параметрів оптичного випромінювання зручніше використовувати відкалібрований радіометр з електричним заміщенням (калориметр) на основі прецизійних температурних сенсорів.

У підрозділі 2.4 «Теоретичні дослідження можливостей вдосконалення абсолютного радіометра з електричним заміщенням» встановлено, що найвищу точність та нескладну процедуру вимірювання параметрів сонячного випромінення забезпечують відкалібровані радіометри з електричним заміщенням (калориметри), інформативним сигналом якого можна вважати різницю температур приймача випромінювання і довкілля. Запропоновано структуру вдосконаленого абсолютного радіометра, в якому з метою покращання метрологічних характеристик використано елементи, які різночасово використовуються як нагрівачі, так і температурні сенсори.

У третьому розділі «**Покращення засобів контролю технічних параметрів сонячних перетворювачів**» визначено, що для покращення комплексу технічних характеристик в радіометрах з електричним заміщенням запропоновано використовувати високочутливі температурні сенсори. Основними критеріями при виборі типу сенсора для вимірювання різниці температур в таких приладах є: вартість, точність, масо-габаритні показники, велика швидкодія і діапазон вимірюваних температур. Представлені результати експериментальних досліджень напівпровідникових температурних сенсорів, які засвідчують доцільність використання досліджуваних сенсорів для вимірювання температури та різниці температур в радіометрах, із врахуванням вимог міжнародних стандартів до їх точності та чутливості.

У підрозділі 3.1 «Шляхи вдосконалення вимірювачів різниці температур» теоретично обґрунтовано доцільність вибору транзисторних діодів як температурних сенсорів для подальшого застосування в радіометрах з електричним заміщенням.

У підрозділі 3.2 «Виконання експериментальних досліджень та їх аналіз» подано результати проведених експериментальних досліджень напівпровідникових транзисторних діодів з метою визначення розкиду характеристик між сенсорами для трьох різних значень вимірювальних струмів та розроблено конструкцію сенсорів, які можуть використовуватись в температурних каналах пристроїв для досліджень сонячних систем.

У підрозділі 3.3 «Розроблення структури цифрових термометричних вимірювачів для досліджень сонячних перетворювачів» розроблено структуру цифрового вимірювача різниці температур з досліджуваними сенсорами та запропоновано методику його калібрування з метою коригування адитивних і мультиплікативних складових похибки. Запропоновано процедуру коригування нелінійної складової похибки у всьому вимірювальному діапазоні, в основу якої покладено визначення параметрів апроксимаційних логарифмічних залежностей сенсорів на основі експериментальних даних.

У четвертому розділі «**Математичне моделювання та впровадження результатів роботи**» наголошено, що основною проблемою побудови прецизійних та метрологічно надійних напівпровідникових сенсорів температури є забезпечення взаємозамінності їх характеристик, тому на підставі зробленого аналізу показано практичну доцільність використання методу попереднього відбору транзисторів та статистичного усереднення їх характеристик завдяки послідовному сполученню з подальшим коригуванням їх похибок в декількох температурних точках і врахуванням їх індивідуальних характеристик у вторинному приладі (апаратним чи програмним способом).

У підрозділі 4.1 «Модель функції перетворення сенсора температури на основі *pn*-переходу» встановлено, що уточнена математична модель температурного сенсора, який складається з послідовно сполучених транздіодів, враховує всі основні

фізичні процеси рп-переходу і може бути використана для теоретичного аналізу і подальшого вдосконалення сенсорів.

У підрозділі 4.2 «Функція перетворення вдосконалених цифрових вимірювачів різниці температур для випробувань сонячних перетворювачів» запропоновано налаштувати функцію перетворення прецизійних вимірювачів різниці температур в двох температурних точках, однією з яких може бути довільна температура всередині допустимого температурного діапазону вимірювань, а другою температура, значення якої відрізняється від температури першої точки приблизно на максимальне значення діапазону вимірювання різниці температур.

У підрозділі 4.3 «Шляхи покращення метрологічних характеристик каналів вимірювання температури для випробувань сонячних колекторів» після запропоновано використовувати метод уніфікації функцій перетворення цифрових напівпровідникових термометрів, оснований на знаходженні коду результату вимірювання як різниці кодами при поточному вимірюваному значенні температури та зразковій температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та її домножування на поправковий мультиплікативний коефіцієнт, значення якого розраховане за кодом, що відповідає другому зразковому значенню температури, яке знаходяться всередині діапазону вимірювань в околі її максимальних значень. Запропоновано процедуру коригування нелінійної складової похибки прецизійних цифрових вимірювачів температури, яка полягає у використанні поправки до поточних вимірюваних значень температури, значення параметрів якої розраховується за логарифмічною функцією та з використанням третього зразкового значення температури.

У підрозділі 4.4 «Бюджет непевностей під час випробувань сонячних перетворювачів» проаналізовано джерела виникнення, складено бюджет непевності та розроблено методику оцінювання непевності результату вимірювання енергетичної освітленості в радіометрах з електричним заміщенням.

У підрозділі 4.5 «Результати практичного виконання» вдосконалено методику випробувань сонячних перетворювачів стосовно визначення теплових характеристик у закритих приміщеннях із застосуванням імітаторів потоку сонячного випромінювання та радіометрів з електричним заміщенням.

Ключові слова: сонячний колектор, радіометр з електричним заміщенням, напівпровідниковий перетворювач температури, вимірювач різниці температури, калібрування термометрів, метод уніфікацій, методика випробувань сонячних перетворювачів.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Серкез Х.В. Покращення характеристик приймачів сонячного випромінення з електричним заміщенням / Х.В. Серкез., В.О. Яцук, Ю.В. Яцук // Вісник Нац-ного ун-ту «Львівська політехніка» «Автоматика, вимірювання та керування». – Львів, Вид-во НУ “ЛП”, 2013. - Вип. 753.– С. 25 – 30.

2. Василюха Х.В. Вдосконалення цифрових термометричних засобів для досліджень сонячних колекторів / Х.В. Василюха, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук, В.Б. Здеб // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія» (ISSN 0368-6418) – Львів, Вид-во НУ “ЛП”, – №77, – 2016. – С. 70 – 79.

Стаття у науковому періодичному виданні України, що включене до міжнародної наукометричної бази

1. 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.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

1. Серкез Х.В. Метрологическое обеспечение измерений энергетических параметров солнечного излучения при испытаниях солнечных коллекторов / Х.В. Серкез, В.А. Яцук // Международный журнал «Устойчивое развитие» (ISSN 1314-4138), техн. ун-т Варна, Болгарія, май, 2013. – №7. – С. 45-49.

2. Serkez Kh. Metrological assurance of the sun energy collector testing / V. Yatsuk, P. Stolyarchuk, M. Mykyjchuk, Kh. Serkez, R. Dyak, T. Oleskiv // Pomiar, Automatyka, Kontrola. — Vol. 59. — Nr 9/2013. — Pp. 901-905.

Тези конференцій

1. Серкез Х.В. Метрологічне забезпечення вимірювань різниці температур під час випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної та студентської конференції за напрямком «Проблеми розвитку та впровадження системи управління стандартизації, сертифікації, метрології в регіонах України», 24-26 травня 2011 р. – Донецьк : Дон. НТУ, 2011. – 344 с. – С. 251-254.

2. Серкез Х.В. Шляхи вдосконалення блоку вимірювання різниці температур абсолютного радіометра енергетичної освітленості./ Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Збірник тез доповідей 69-тої студентської науково-технічної конференції Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, 17-21 жовтня 2011 р. – Львів: НУ «ЛП», 2011. – С. 55-57.

3. Серкез Х.В. Метрологічне забезпечення температурних вимірювань під час випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної та студентської конференції за напрямком «Проблеми розвитку та впровадження системи управління стандартизації, сертифікації, метрології в регіонах України», 3-5 травня 2012 р.– Донецьк : Дон. НТУ, 2012. – С. 80-82.

4. Серкез Х.В. Особливості вимірювання різниці температур під час випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук, Т.М. Олесків // Матеріали VII Міжнародної конференції «Стратегія якості у промисловості і освіті», 8-15 червня 2012 р. Том II. – Дніпропетровськ-Варна, 2012. – С. 186-188.

5. Серкез Х.В. Покращення характеристик приймачів сонячного випромінювання з електричним заміщенням / Х.В. Серкез, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 22-24 травня 2013 р. – Львів : НУ «ЛП», 2013. – С. 252-254.

6. Серкез Х.В. Метрологічне забезпечення випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук, П.Г. Столярчук, М.М. Микийчук, Р.П. Дяк, Т.М. Олесків // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Термографія і

термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань», 23-27 травня 2013 р. – Львів: НУ «ЛП», 2013. – С. 150.

7. Серкез Х.В. Оцінювання непевності вимірювання енергетичної освітленості методом електричного заміщення / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // збірник матеріалів Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2015», 2- 6 лютого 2015 р. – Київ: Академія метрології України, 2015. – С. 101-102.

8. Серкез Х.В. Стан і тенденції розвитку прецизійних вимірювачів температури під час випробувань сонячних колекторів /Х.В. Серкез, В.О. Яцук, Ю.А. Лапченко // Збірник тез доповідей II Міжнар. наук.-практ. конф. «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 28-30 травня 2015 р. – Львів : НУ «ЛП», 2015. – С. 217-219.

9. Серкез Х.В. Аналіз системи виявлення та запобігання вторгнень для роботи з радіометрами / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Збірник матеріалів IV Міжнар. наук.-практ. конф. «Захист інформації і безпека інформаційних систем», 04-05 червня 2015 р. –Львів: Українська академія друкарства, 2015. – С. 201.

10. Серкез Х.В. Дослідження взаємозамінності характеристик напівпровідникових сенсорів для вимірювання різниці температур під час випробувань сонячних перетворювачів / Х.В. Серкез, Ю.В. Яцук, А.Г. Павельчак // .Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2016», 1- 5 лютого 2016 р.– Київ: Академія метрології України, 2016. – С. 70-71.

11. Серкез Х.В. Дослідження діодних сенсорів температури для застосування в абсолютному радіометрі з електричним заміщенням / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка», 5- 7 жовтня 2016 р. – Харків, 2016. – С. 125.

12. Василюха Х.В. Експериментальні дослідження напівпровідникових сенсорів для цифрових вимірювачів різниці температур / Х.В. Василюха, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук, В.Б. Здеб // Збірник тез доповідей III Міжнар. наук.-практ. конф. пам'яті проф.

П. Столярчука «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 11-12 травня 2017 р. – Львів: НУ «ЛП», 2017. – С. 150-151.

ANNOTATION

Vasylykha Kh.V. Improvement of the normative and technical basis of tests of solar converters. - On the rights of manuscript.

The thesis for a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences by specialty 05.01.02 - Standardization, Certification and Metrological Assurance. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2017.

The content of the dissertation. The research topic is devoted to the improvement of existing normative documents and control equipment, which are used during the testing of solar converters. Only after approbation and working out of the methods it is possible to make changes and additions to the existing standards concerning thermal tests and determination of heat engineering efficiency of solar collectors. The methods to improve the thermal test radiometer (calorimeter) with electric substitution and determine the efficiency of solar collectors are proposed. To improve the performance specifications of such equipment, it is proposed to use semiconductor thermosensitive diodes, which are used simultaneously as temperature sensors in the perception of solar radiation and as heaters. The structure of a digital temperature difference meter with the studied sensors is designed. The method of tests of solar converters for the determination of thermal characteristics in enclosed spaces with the use of solar radiation simulators and radiometers with electrical substitution is improved.

In the first chapter *"Analysis of existing methods, tools and normative documentation for tests of solar converters"* the feasibility and efficiency of using solar installations taking into account the high potential of solar energy in Ukraine is considered. The use of solar energy in the fuel and energy balance of Ukraine is an important direction in implementing energy conservation policies and one of the priorities in creating a highly efficient, environmentally friendly energy sector. For the development of solar energy in Ukraine, two main indivisible directions must be combined: the creation

of solar installations for the production of thermal and electric energy, and the creation of a powerful scientific and production complex for conducting applied scientific research.

In section 1.1 *"The main technical parameters of solar converters"* an analysis is made of the main technical parameters of solar converters, which affect the determination of the efficiency of such installations. The efficiency of solar collectors depends on the specific density of solar radiation entering the surface of the installation and the completeness of its transformation into the temperature of the secondary liquid energy carrier. In turn, the efficiency of solar modules, devices for converting solar radiation into electrical energy through the phenomenon of internal photoelectric effect - is determined by the properties of semiconductor materials, the design features of photocells and depends on the power of incident solar radiation, taking into account international and European standards.

Section 1.2 *"The current state of normative assurance testing of solar cells and collectors"* the main regulatory framework for documents relating to tests of solar converters is considered. It is established that, because of the laboriousness and complexity of procedures for calibrating instrumentation, the widespread introduction of helio-technical equipment is greatly hampered.

In section 1.3 *"Modern technical base of tests of solar converters and prospects for its automation"*, the state and directions of research of equipment used in the measurement of solar and thermal radiation and temperature are considered. The expediency of the development of solar radiation receivers is indicated, which would measure the energy parameters of optical radiation with high accuracy and sensitivity.

In section 1.4 *"Forming directions for further theoretical and experimental research"*, the main tasks for achieving the stated goal of the research are determined, namely, the improvement of the regulatory and technical base and instrumentation used for laboratory tests of solar collectors: 1) proposals have been put forward to improve the test procedures for solar collectors. For this purpose, it is proposed to determine and take into account the significance of all the significant errors that affect the final result of measurements of the solar collector parameters; 2) The use of an absolute radiometer (calorimeter) with electric substitution based on precision temperature sensors was

investigated; 3) experimental studies of the interchangeability of semiconductor temperature sensors have been carried out in order to determine the distribution of characteristics between sensors from sample to sample; 4) the structure of the temperature difference meter with the sensors under investigation has been developed and a method for its adjustment has been proposed with the aim of correcting the additive and multiplicative components of the error.

In the second chapter "*Improvement of methods and techniques of testing solar cells and collectors*" the scientific methods of research are described and the sequence of their application is considered.

Section 2.1. "*Analysis of test methods for solar converters*" describes the peculiarities of tests of solar converters in conditions close to their operational during sun exposure or in laboratory conditions, using simulators in accordance with current normative documents for the purpose of certification and certification. It is noted that one of the most important parameters determining the efficiency of solar converters is the calculation of the efficiency, which requires the use of specialized testing equipment and the improvement and simplification of the measurement procedure with reduced economic costs.

Section 2.2. "*Requirements of normative documents for metrological characteristics of quantities during solar collector tests*" considered the main requirements of normative documents for measuring solar and thermal radiation, measuring temperature and temperature difference, measuring the speed of the flow of liquid in the collector, wind speed, measuring pressure, measuring area collector and liquid contents in the collector. The analysis shows that the requirements set in international standards for the measurement of solar radiation and temperature are sufficiently high and regulate the laborious and lengthy procedure of their calibration.

In the section 2.3 "*Investigation of the ability to standardize the emanation radiation and solar receiver*", the analysis showed that in order to achieve the requirements specified in the regulatory documents, it is expedient to standardize the radiating power of the radiator or receiver of solar radiation. In this case, for a practical improvement of the procedure for measuring the energy parameters of optical radiation, it is more convenient

to use a calibrated radiometer with an electrical substitution (calorimeter) based on precision temperature sensors.

In section 2.4 *"Theoretical studies of the possibilities of improving the absolute radiometer with electrical substitution"* it has been established that the highest accuracy and simple procedure for measuring solar radiation parameters provide calibration of radiometers with electrical substitution (calorimeters). The informative signal of radiometer is the difference temperature of the receiver of radiation and the environment. A structure of an improved absolute radiometer was proposed, in which, for the purpose of improving metrological characteristics, elements used at different times as heaters and temperature sensors were used.

In the third chapter *"Improving the means of controls the technical parameters of solar converters"* it was determined that high-sensitivity temperature sensors were suggested to improve the complex of technical characteristics in radiometers with electrical substitution. The main criteria for choosing the type of sensor to measure the temperature difference in such devices are: cost, accuracy, mass-dimensional indicators, high speed and range of measured temperatures. The results of experimental studies of semiconductor temperature sensors, which prove the expediency of using the sensors used to measure temperature and temperature difference in radiometers, are presented, taking into account the requirements of international standards to their accuracy and sensitivity.

In section 3.1 *"Ways to improve temperature difference meters"*, it is theoretically justified to select transistor diodes as temperature sensors for further use in radiometers with electrical substitution.

Section 3.2 *"Experimental research and their analysis"* presents the results of experimental studies of semiconductor transistor diodes in order to determine the variation of characteristics between sensors for three different values of the measuring currents and the design of sensors that can be used in the temperature channels of devices for studying solar systems is developed.

In section 3.3 *"Development of the structure of digital thermometric meters for the research of solar converters"*, the structure of the digital meter of the temperature difference with the sensors under investigation has been developed and a method of its

calibration was proposed with the aim of adjusting the additive and multiplicative components of the error. The procedure of correction of the nonlinear component of the error in the entire measuring range, which is based on the determination of parameters of approximation logarithmic dependences of sensors on the basis of experimental data, is proposed.

In the fourth chapter "*Mathematical modeling and implementation of the results of work*" it was noted that the main problem of constructing precision and metrologically reliable semiconductor temperature sensors is to ensure the interchangeability of their characteristics. The practical expediency of using the method of preliminary selection of transistors and statistical averaging of their characteristics due to the serial connection with subsequent correction of their errors at several temperature points and taking into account their individual characteristics in the secondary device (hardware or software) is shown therefore on the basis of the analysis.

In section 4.1 "*Model of the function of transforming the temperature sensor on the basis of the p-n junction*" it is established that the refined mathematical model of the temperature sensor, which consists of series-connected transdiodes, takes into account all the basic physical processes of the p-n junction and can be used for theoretical analysis and further improvement of the sensors.

In section 4.2 "*The function of transforming improved digital temperature difference meters for tests of solar converters*" is proposed to adjust the function of converting precision temperature difference meters at two temperature points, one of which can be an arbitrary temperature within the permissible temperature range of measurements, and the second temperature, the value of which differs from of the temperature of the first point by approximately the maximum value of the temperature difference measuring range.

In section 4.3 "*Ways to improve the metrological characteristics of the channels for measuring the temperature for the tests of solar collectors*" it was suggested to use the method of unification of the functions of transforming digital semiconductor thermometers, based on finding the code of the measurement result as the difference in the codes at the current measured value of temperature and the reference temperature of 0 ° C and its multiplication to the corrective multiplicative coefficient, the value of which is

calculated by the code, which corresponds to the second exemplary temperature value that is within the range of measurements in the vicinity of its maximum values. The procedure for correcting the nonlinear error component of precision digital temperature meters is proposed, which consists in using the correction to the current measured temperature values, the values of the parameters being calculated by the logarithmic function and using the third reference temperature value.

Section 4.4 "*Budget of uncertainties during the tests of solar converters*" analyzed sources of origin, the budget of uncertainty was compiled and a method for estimating the uncertainty of the measurement result of energy illumination in radiometers with electrical substitution was developed.

In Section 4.5 "*Results of practical implementation*", the testing procedure of solar converters has been improved with respect to the determination of thermal characteristics in enclosed spaces using solar radiation simulators and radiometers with electrical substitution.

Keywords: solar collector, radiometer with electrical substitution, semiconductor temperature converter, temperature difference meter, thermometer calibration, unification method, test procedure for solar converters.

LIST OF PUBLICATIONS BY THE SUBJECT OF DISSERTATION

Articles in scientific professional editions of Ukraine

1. Serkez Kh.V. Improvement of the characteristics of solar radiation receivers with electrical substitution / Kh.V. Serkez., V.A. Yatsuk, Yu.V. Yatsuk // Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic "Automation, Measurement and Control". – Lviv, Edition NU "LP", 2013. – Issue. 753. – P. 25-30.

2. Vasylykha Kh.V. Improvement of digital thermometric means for researches of solar collectors / Kh.V. Vasylykha, V.A. Yatsuk, Yu.V. Yatsuk, V.B. Zdeb // Interdepartmental scientific and technical collection "Measuring equipment and metrology" (ISSN 0368-6418) – Lviv, Edition NU "LP", – № 77, – 2016. - P. 70 - 79.

**Article in the scientific periodical publication of Ukraine included in the
international science-based database**

1. 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.

Articles in scientific periodicals of other states

1. Serkez Kh. V. Metrological assurance of measurements of energy parameters of solar radiation during tests of solar collectors / Kh.V. Serkez, V.A. Yatsuk // International Journal "Sustainable Development" (ISSN 1314-4138), Techn. University of Varna, Bulgaria, May, 2013. – №7. – P. 45-49.

2. Serkez Kh. Metrological assurance of the sun energy collector testing / V. Yatsuk, P. Stolyarchuk, M. Mykyjchuk, Kh. Serkez, R. Dyak, T. Oleskiv // Pomiary, Automatyka, Kontrola. – Vol. 59. – № 9/2013. – Pp. 901-905.

Abstracts of conferences:

1. Serkez Kh.V. Metrological assurance of measurements of temperature difference during tests of solar collectors / Kh.V. Serkez, V.A. Yatsuk // Materials of the I All-Ukrainian scientific-practical and student on the direction " Problems of development and implementation of the management system for standardization, certification, metrology in the regions of Ukraine", May 24-26, 2011. – Donetsk: Don. NTU, 2011. – 344 p. – P. 251-254.

2. Serkez Kh.V. Ways of improving the unit for measuring the temperature difference of an absolute radiometer of energy illumination / Kh.V. Serkez, V.A. Yatsuk // Collected theses of the reports of the 69th student scientific and technical conference of the Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology, October 17-21, 2011. – Lviv: NU "LP", 2011. – P. 55-57.

3. Serkez Kh.V. Metrological assurance of temperature measurements during tests of solar collectors / Kh.V. Serkez, V.A. Yatsuk // Materials of the 2nd All-Ukrainian scientific-practical and student conference on the direction "Problems of development and implementation of the management system for standardization, certification, metrology in the regions of Ukraine", 3-5 May 2012. – Donetsk Don. NTU, 2012. – P. 80-82.

4. Serkez Kh.V. Features of measuring the temperature difference during the tests of solar collectors / Kh.V. Serkez, V.A. Yatsuk, T.M. Olesk // Materials of the VII International conference "Quality strategy in industry and education", 8-15 June 2012. Volume II in. – Dnepropetrovsk-Varna, 2012. – P. 186-188.

5. Serkez Kh.V. Improvement of the characteristics of solar radiation receivers with electrical substitution / Kh.V. Serkez, V.A. Yatsuk, Yu.V. Yatsuk // Collected theses of the reports of the International scientific and practical conference "Quality management in education and industry: experience, problems and prospects", May 22-24, 2013. – Lviv: NU "LP", 2013. – P. 252-254.

6. Serkez Kh.V. Metrological assurance of tests of solar collectors / Kh.V. Serkez, V.A. Yatsuk, P.G. Stolyarchuk, M.M. Mykyjchuk, R.P. Dyak, T.M. Oleskiv // Materials of the International scientific and practical conference "Thermography and thermometry, metrological assurance of measurements and tests", May 23-27, 2013. – Lviv: NU "LP", 2013. – P. 150.

7. Serkez Kh.V. Estimation of the uncertainty of measurement of energy illumination by the method of electric substitution / Kh.V. Serkez, V.A. Yatsuk // Collection of materials of the All-Ukrainian scientific and technical conference of young scientists in the field of metrology "Technical Using of Measurement -2015", February 2-6, 2015. – Kyiv: Academy of Metrology of Ukraine, 2015. – P. 101-102.

8. Serkez Kh.V. The state and trends of the development of precision temperature meters during the tests of solar collectors / Kh.V. Serkez, V.A. Yatsuk, Yu.A. Lapchenko // Collected theses of the reports of the II International scientific and practical conference "Quality management in education and industry: experience, problems and prospects", May 28-30, 2015. – Lviv: NU "LP", 2015. – P. 217-219.

9. Serkez Kh.V. Analysis of the system for detecting and preventing intruders for working with radiometers / Kh.V. Serkez, V.A. Yatsuk // Compilation of Materials of IV International sci. pract. conf. "Information security and information systems security", June 04-5, 2015. – Lviv: Ukrainian Academy of Printing, 2015. – P. 201.

10. Serkez Kh.V. Investigation of the interchangeability of the characteristics of semiconductor sensors for measuring the temperature difference during the tests of solar

converters / Kh.V. Serkez, Yu.V. Yatsuk, A.G. Pavelchak // Collection of materials of the All-Ukrainian scientific and technical conference of young scientists in the field of metrology "Technical Using of Measurement-2016", February 1-5, 2016. – Kyiv: Academy of Metrology of Ukraine, 2016. – P. 70-71.

11. Serkez Kh.V. Investigation of diode temperature sensors for use in an absolute radiometer with electric substitution / Kh.V. Serkez, V.A. Yatsuk // Scientific proceedings of the Xth International scientific and technical conference " Metrology and Measuring Technology", October 5-7, 2016. - Kharkiv, 2016. - P. 125.

12. Vasylykha Kh.V. Experimental studies of semiconductor sensors for digital temperature difference meters / Kh.V. Vasylykha, V.A. Yatsuk, Yu.V. Yatsuk, V.B. Zdeb // Collection of abstracts III International. sci. pract. conf. memory of prof. P. Stolyarchuk "Quality Management in Education and Industry: Experience, Problems and Prospects", May 11-12, 2017. - Lviv: NL "LP", 2017. - P. 150-151.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	23
ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ, ЗАСОБІВ ТА НОРМАТИВНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ВИПРОБУВАНЬ СОНЯЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	33
1.1. Основні технічні параметри сонячних перетворювачів	33
1.1.1. Характеристики сонячних батарей.....	36
1.1.2. Характеристики сонячних колекторів.....	43
1.1.3. Комбіновані теплофотоелектричні модулі.....	49
1.2. Сучасний стан нормативного забезпечення випробувань сонячних елементів та колекторів	54
1.3. Сучасна технічна база випробувань сонячних перетворювачів та перспективи її автоматизації	59
1.4. Формування напрямків подальших теоретичних і експериментальних досліджень	64
1.5. Висновки до розділу 1	65
РОЗДІЛ 2. ПОКРАЩЕННЯ МЕТОДІВ ТА МЕТОДИК ВИПРОБУВАНЬ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І КОЛЕКТОРІВ	66
2.1. Аналіз методів випробувань сонячних перетворювачів	66
2.2. Вимоги нормативних документів до метрологічних характеристик величин під час випробувань сонячних колекторів.....	79
2.3. Дослідження можливостей еталонування випромінювальної здатності випромінювача та приймача сонячного випромінювання	82
2.4. Теоретичні дослідження можливостей вдосконалення абсолютного радіометра з електричним заміщенням.....	88
2.5. Висновки до розділу 2.....	98
РОЗДІЛ 3. ПОКРАЩЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....	100
3.1. Шляхи вдосконалення вимірювачів різниці температур	100
3.1.1. Використання сучасних термопар і термобатарей	100

3.1.2. Використання сучасних болометрів і термісторів.....	102
3.1.3 Аналіз можливостей використання сучасних напівпровідникових сенсорів.....	103
3.1.4. Використання плівкових платинових термоперетворювачів опору.....	109
3.2. Виконання експериментальних досліджень та їх аналіз.....	113
3.2.1. Аналіз можливостей застосування транзисторів з об'ємними виводами.....	113
3.2.2. Розроблення методики дослідження взаємозамінності характеристик транзисторних діодів для поверхневого монтажу.....	116
3.2.3. Вдосконалення конструкції напівпровідникових сенсорів температури для цифрових вимірювачів різниці температур.....	121
3.3. Розроблення структури цифрових термометричних вимірювачів для досліджень сонячних перетворювачів.....	126
3.3.1. Розроблення структури цифрових вимірювачів різниці температур.....	126
3.3.2. Розроблення структури цифрових вимірювачів температури.....	128
3.4. Висновки до розділу 3.....	133
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.....	134
4.1. Модель функції перетворення сенсора температури на основі p-n переходу.....	134
4.2. Функція перетворення вдосконалених цифрових вимірювачів різниці температур для випробувань сонячних перетворювачів.....	142
4.3. Шляхи покращення метрологічних характеристик каналів вимірювання температури для випробувань сонячних колекторів.....	143
4.3.1. Функція перетворення каналів вимірювання температури для випробувань сонячних колекторів.....	143
4.3.2. Коригування похибок термометра із змінюванням двох значень вимірювальних струмів.....	145
4.3.3. Шляхи забезпечення в термометрах інваріантності до значень опорів ліній зв'язку.....	146

4.4. Бюджет непевностей під час випробувань сонячних перетворювачів.....	148
4.5. Результати практичного виконання	154
4.6. Висновки до розділу 4.....	156
ВИСНОВКИ	158
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	160
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи.....	174
Додаток Б. Проект Національного стандарту України «Методика випробувань сонячних перетворювачів стосовно визначення теплових характеристик за усталеного режиму з імітатором потоку сонячного випромінення».....	178
Додаток В. Протокол лабораторних досліджень десяти послідовно з'єднаних серійно виготовлюваних транзисторів типу КТ3107Ж та КТ315Б з метою визначення їх граничних можливостей як температурних сенсорів за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005.....	189
Додаток Г. Протокол лабораторних досліджень взаємозамінності характеристик напівпровідникових сенсорів для вимірювання температури і різниці температур за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005	192
Додаток Д. Протокол лабораторних досліджень напівпровідникових сенсорів температури для цифрових вимірювачів різниці температур за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005	196
Додаток Е. Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес	202
Додаток Ж. Акт про використання результатів дисертації при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи	203

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АР – абсолютний радіометр;
- АСП – адитивна складова похибки;
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
- АЧТ – абсолютно чорне тіло;
- ВАХ – вольт-амперна характеристика;
- ДОН – джерела опорної напруги;
- ЕЗ – електричне заміщення;
- ЗВ – засіб вимірювання;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- МЕК – Міжнародна електротехнічна комісія (International Electrotechnical Commission);
- МСП – мультиплікативна складова похибки;
- НТП – напівпровідниковий температурний перетворювач;
- ОЕВП – оптико-електричний вимірювальний перетворювач;
- ОП – операційний підсилювач;
- ПВП – первинний вимірювальний перетворювач;
- СБ – сонячна батарея;
- СЕ – сонячний елемент;
- СК – сонячний колектор;
- СУТ – стандартні умови тестувань (Standard Test Conditions);
- ТО – термoperетворювач опору;
- ФЕ – фотоелемент;
- ТЕГ – термоелектричний генератор;
- ФЕП – фотоелектричний перетворювач;
- ФТУ – тестові умови фотоелектричних елементів для інженерних систем використання (Photovoltaics for Utility Systems Applications Test Conditions);
- ЦВТ – цифровий вимірювач температури;
- ЦВРТ цифрових вимірювачів різниці температур;
- АМ – повітряна маса (Air mass).

ВСТУП

Актуальність теми. Через суттєвий вплив на довкілля під час використання традиційних енергоносіїв та постійне зростання їх вартості останнім часом значна увага приділяється альтернативній і поновлюваній енергетиці. На сьогоднішній день серед альтернативних джерел енергії (тепла Землі, енергії вітру, припливів та відпливів, біогазу тощо) провідне місце займає використання сонячної енергії. Це пов'язано з головними перевагами цього виду енергії: загальна доступність, екологічність, практична невичерпність, можливість безпосереднього перетворення сонячної енергії у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі випромінювання у теплову або електричну енергію.

Повна кількість сонячної енергії, що надходить на поверхню Землі лише за тиждень, перевищує енергію всіх світових запасів нафти, газу, вугілля та урану [1]. В Україні існують достатньо сприятливі умови для використання сонячної енергії: річний технічно-досяжний енергетичний потенціал сонячної енергії в Україні еквівалентний 6 млрд. тонн умовного палива, його використання дозволило б замінити біля 5 млрд. м³ природного газу [2]. Сонце щосекунди випромінює $88 \cdot 10^{24}$ кал теплової енергії, що еквівалентно $1,25 \cdot 10^{16}$ т у.п. або $1,02 \cdot 10^{20}$ кВт·год [3]. На Землю потрапляє тільки дуже мала частина цієї енергії – біля $1 \cdot 10^{18}$ кВт·год ($123 \cdot 10^{12}$ т у.п.) за рік, що приблизно в 100 разів перевищує енергетичні ресурси всіх розвіданих горючих копалин на Землі [4]. В провідних країнах світу питома вага альтернативної енергетики постійно зростає і в найближчі роки збільшиться до декількох десятків процентів [5]. За прийнятим урядом України розпорядженням «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року» до 2020 року передбачено зростання частки енергії з відновлюваних джерел в кінцевому енергоспоживанні від 1,5 % до 11 % [6].

Середньорічний потенціал сонячної енергії в Україну ($1235 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$) є досить високим і набагато вищим, ніж, наприклад, у Німеччині – $1000 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ або навіть у Польщі – $1080 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ [7]. Отже, потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для широкого впровадження як тепло-енергетичного,

так і фотоенергетичного обладнання практично в усіх областях. Термін ефективної експлуатації геліоенергетичного обладнання в південних областях України – 7 місяців (з квітня по жовтень), в північних областях 5 місяців (з травня по вересень). Фотоенергетичне обладнання може достатньо ефективно експлуатуватися на протязі всього року [8].

Ефективності та доцільності використання сонячної енергії присвячено багато наукових праць [9–11]. Вагомі результати у цьому напрямку дослідження отримано в Інституті фізики напівпровідників НАН України, у Київському, Одеському, Ужгородському та Чернівецькому університетах, на деяких промислових підприємствах («Пілар», «Квазар») та в багатьох інших українських лабораторіях. Унаслідок зусиль науковців (зокрема, й наших) вартість сонячних елементів вдалося довести до 0,5 – 1,1 євро/Вт. Всі однозначно стверджують, що застосування в Україні альтернативних джерел енергії, передовсім, сонячної енергетики, без сумніву дасть користь [7].

За прогнозними оцінками Національного управління з повітроплавання і дослідження космічного простору [12], потенціал виробництва сонячної енергії України знаходиться в межах тих же значень, що і потенціал США, на територію цих країн припадає фактично однакова кількість сонячного випромінювання. Але в Україні цей потенціал не використовується в повному масштабі через недостатнє фінансування цього напрямку.

Усе це спонукає до інтенсифікації використання сонячної енергії, оскільки вона може ефективно трансформуватись у теплову та електричну і застосовуватись для потреб опалення та гарячого водопостачання. На сьогодні активно розвиваються два напрями її практичного використання – сонячні батареї 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 [13].

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).

На даний час на ринку пропонується велика кількість сонячних батарей і колекторів різних виробників і для коректного вибору їх типу та якості необхідні прості методики та обладнання для проведення їх випробувань. Водночас у міжнародних нормативних документах [14–16] передбачена трудомістка процедура калібрування використовуваної контрольно-вимірювальної апаратури, що суттєво ускладняє випробування таких перетворювачів. Це стримує удосконалення та розроблення нових конструкцій сонячних перетворювачів українського виробництва. Для вирішення цих питань необхідно внести зміни і доповнення в існуючі стандарти щодо теплових випробувань і визначення теплотехнічної ефективності СК. В удосконалених стандартах передбачатиметься використання метрологічно надійного випробувального обладнання та апробованих методик [17].

Тому актуальними є завдання вдосконалення метрологічного забезпечення процесів перетворення сонячного випромінювання, підвищення точності, чутливості та стабільності апаратури для вимірювання температури, різниці температур, енергетичних параметрів та ефективності сонячних перетворювачів. Проведені дослідження сприятимуть ширшому впровадженню сонячних установок в Україні, що дозволить зробити наступний крок у зменшенні енергетичної залежності держави та охороні довкілля.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка»: «Розроблення теоретичних основ і технічних засобів для метрологічного забезпечення і сертифікації випробувань при виробництві і експлуатації промислової продукції». Робота

виконувалась в межах держбюджетної теми Міністерства освіти і науки України ДБ/Кібер «Інтеграція методів і засобів вимірювання, автоматизації, опрацювання та захисту інформації в базисі кібер-фізичних систем», №0115U000446 (термін виконання 01.01.2015 р. – 31.12.2017 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження й удосконалення нормативно-технічної бази та контрольно-вимірювальної апаратури, які застосовуються для лабораторних випробувань сонячних перетворювачів.

Виходячи з поставленої мети визначено наступні завдання у дисертаційній:

1. Проаналізувати сучасні методи, засоби та нормативні документи щодо випробувань сонячних перетворювачів і сформулювати основні аспекти їх вдосконалення із врахуванням можливостей зменшення економічних затрат.

2. Дослідити використання абсолютного радіометра з електричним заміщенням, побудованого на основі прецизійних температурних сенсорів, для вимірювання енергетичних параметрів сонячного випромінювання.

3. На підставі експериментальних досліджень вибрати тип та розробити конструкцію температурних чутливих елементів з необхідними характеристиками, які можуть використовуватись в температурних каналах пристроїв для досліджень сонячних перетворювачів.

4. Розробити та дослідити структуру вимірювача температури з розробленими сенсорами та методику коригування його похибок на місці застосування і під час експлуатації.

5. Розробити та дослідити структуру вимірювача різниці температур з запропонованими сенсорами та опрацювати методику його налагодження з метою коригування адитивних і мультиплікативних складових похибки.

6. Вдосконалити методику випробувань сонячних перетворювачів стосовно визначення теплових характеристик у закритих приміщеннях із застосуванням імітаторів потоку сонячного випромінювання та радіометрів з електричним заміщенням.

Об'єкт дослідження – вимірювання енергетичних параметрів випромінювання, температури і різниці температур під час випробувань сонячних перетворювачів.

Предмет дослідження – методи та засоби покращення нормативно-технічного забезпечення випробувань сонячних перетворювачів.

Методи дослідження. У процесі дослідження використовувались загальнонаукові методи аналізу, порівняння, систематизації, методи збирання та оброблення інформації, метод електричного заміщення для вимірювання електричних параметрів сонячного випромінення, методи оцінювання якості вимірювань і випробувань.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі отримані такі наукові результати:

1. Вперше запропоновано в радіометрі з електричним заміщенням застосовувати напівпровідникові термочутливі діоди, які різночасово використовуються як сенсори температури під час сприйняття сонячного опромінення та як нагрівачі, а потім і сенсори температури під час електричного заміщення, причому в обох випадках сенсори нагріваються відносно температури довкілля на однакове значення, що дає можливість підвищення точності і швидкодії вимірювань.

2. Вдосконалено процедуру коригування похибок цифрового вимірювання різниці температур під час випробувань сонячних перетворювачів, яка полягає у встановленні і запам'ятовуванні нульових показів цифрового термометра під час розміщення обох сенсорів в термостаті при температурі довкілля з подальшим почерговим розміщенням обох сенсорів в термостаті з температурою відмінною від температури довкілля та визначенні і запам'ятовуванні в контролері мультиплікативних коригувальних коефіцієнтів.

3. Вдосконалено структуру цифрових вимірювачів температури з діодними сенсорами, в якій значення вимірювального струму, напруг зміщення і опорної для АЦП формуються від одного джерела зразкової напруги, що дає можливість взаємно незалежного коригування його показів у двох температурних точках, при 0 °С коригується адитивна складова похибки, яка в подальшому використовується як поправка до усіх результатів перетворень, а в околі максимальної вимірюваної температури встановлюється значення мультиплікативного коригувального

коефіцієнта як відношення номінального та отриманого значень кодів, який відповідає цій температурі, що дає змогу підвищити їх точність і метрологічну надійність.

4. Вперше запропоновано коригувати похибку від нелінійності діодних сенсорів в цифрових вимірювачах температури шляхом їх розміщення в термостаті за трьох різних температур, які включають $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та значення приблизно рівні половині і максимальному значенню вимірюваної температури, запам'ятовуванні цих результатів перетворень та процедуру визначення на цій основі параметрів логарифмічних апроксимаційних залежностей сенсорів, які в подальшому використовуються як адитивні поправки до його поточних показів, що забезпечує підвищення їх точності в широкому температурному діапазоні.

Практичне значення одержаних результатів. 1. Проведені експериментальні дослідження підтверджують ефективність застосування запропонованих температурних сенсорів у радіометрі з електричним заміщенням для випробувань сонячних перетворювачів, а також у таких галузях як харчова промисловість, комунальне і сільське господарство тощо.

2. Запропонована методика вимірювання параметрів сонячного випромінення та визначення теплотехнічної ефективності сонячних перетворювачів у закритих приміщеннях із застосуванням імітатора потоку сонячного випромінення стимулюватиме розроблення нових та удосконалення існуючих конструкцій сонячних колекторів та перетворювачів.

3. Розроблені доповнення до існуючих вітчизняних стандартів в частині теплових випробувань сонячних колекторів дають можливість вітчизняним виробникам сонячних колекторів зменшити собівартість випробувань своєї продукції безпосередньо в Україні.

4. Результати роботи мають вагомe наукове значення і можуть бути використані в програмах навчальних курсів кафедри інформаційно-вимірювальних технологій за спеціальністю «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» та за спеціалізаціями: «Метрологічне забезпечення випробувань та якості продукції»; «Якість, стандартизація та сертифікація».

Особистий внесок здобувача. У дисертації використані розробки, ідеї, результати теоретичних і практичних досліджень, що відображені в наукових працях і представлені на конференціях, у роботі яких автор брала безпосередню участь. Зокрема у друкованих працях, написаних у співавторстві, здобувачу належить: [18] – пропозиція у прийमाчах сонячного випромінення з електричним заміщенням використовувати напівпровідникові перетворювачів температури та платинові термоперетворювачів опору; [19] – проведення експериментальні дослідження взаємозамінності напівпровідникових перетворювачів температури з метою створення температурних сенсорів та розрахунок коефіцієнта ідеальності та опору бази транзисторних діодів; [13] – проведення експериментальні дослідження температурних сенсорів та розроблення структуру цифрового вимірювача різниці температур на їх основі; [20] – аналіз нормативної документації випробувань сонячних колекторів та пропозиція використання радіометра з електричним заміщенням побудованого на основі температурних сенсорів; [21] – аналіз основних вимог під час випробувань сонячних колекторів з метою їх удосконалення; [22] – аналіз стану нормативно-технічної документації стосовно випробувань сонячних колекторів; [23] – аналіз та пропозиції удосконалення наявних конструкцій радіометра з електричним заміщенням; [24] – аналіз щодо виявлення недоліків контрольно-вимірювальної апаратури для випробувань сонячних колекторів; [25] – аналіз проблем побудови прецизійних вимірювачів температури та різниці температур; [26] – пропозиція використовувати прецизійні платинові термоперетворювачі з метою підвищення точності і стабільності, а також можливості реалізації усереднювального площинного приймача сонячного випромінення; [27] – аналіз метрологічного забезпечення випробувань сонячних колекторів; [28] – розроблення методики оцінювання непевності вимірювання енергетичної освітленості методом електричного заміщення; [29] – порівняльний аналіз прецизійних вимірювачів температури, виготовлених за різними технологіями, здійснено характеристику їх переваг і недоліків; [30] – пропозиція застосовувати системи виявлення та запобігання вторгнень IDPS для захисту отриманих вимірювальних даних під час метрологічних перевірок або калібрувань

радіометра з електричним заміщенням; [31] – проведення експериментальних досліджень напівпровідникових перетворювачів температури з метою визначення розкиду характеристик між сенсорами від зразка до зразка; [32] – проведення експериментальних досліджень транзисторів для поверхневого монтажу виготовлених в єдиному технологічному циклі; [33] – проведення експериментальних досліджень напівпровідникових сенсорів температури з метою прецизійного вимірювання температури в радіометрі з електричним заміщенням.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та положення роботи були представлені та обговорювались на: I Всеукраїнській науково-практичній та студентській конференції за напрямком «Проблеми розвитку та впровадження системи управління стандартизації, сертифікації, метрології в регіонах України» (м. Донецьк, 2011 р.); 69-тій студентській науково-технічній конференції Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології (м. Львів, 2011 р.); II Всеукраїнській науково-практичній та студентській конференції за напрямком «Проблеми розвитку та впровадження системи управління стандартизації, сертифікації, метрології в регіонах України» (м. Донецьк, 2012 р.); VII Міжнародній конференції «Стратегія якості у промисловості і освіті» (Болгарія, м. Варна, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (м. Львів, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань» (м. Львів, 2013 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2015» (м. Славське, 2015 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (м. Львів, 2015 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Захист інформації і безпека інформаційних систем» (м. Львів, 2015 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2016» (м. Славське, 2016 р.); X Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» (м. Харків, 2016 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції пам'яті проф.

П. Столярчука «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (м. Львів, 2017 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, серед них: 3 статті у фахових виданнях України, з них 1 у виданні України, що включене до міжнародної наукометричної бази SCOPUS, 2 статті у періодичних виданнях інших держав, 12 тез доповідей на міжнародних, всеукраїнських та студентських науково-технічних та науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 123 найменувань та 7 додатків, містить 203 сторінки друкованого тексту, включає 37 рисунки та 8 таблиць.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ, ЗАСОБІВ ТА НОРМАТИВНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ВИПРОБУВАНЬ СОНЯЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

1.1. Основні технічні параметри сонячних перетворювачів

Сонячна енергетика – один із перспективних напрямів використання енергії відновлюваних джерел, що швидко розвивається. З усіх відновлюваних джерел сонячна енергія є найбільш доступним природним енергоресурсом; щодо її використання накопичено багатовіковий історичний досвід. Можливості використання сонячної енергії людству відомі ще до нашої ери, але істотного розвитку цей напрямок зазнав на початку ХІХ ст. Було змонтовано багато експериментальних установок та проведено їх дослідження [34]. У сучасному світі сонячна енергія широко використовується для тепло- та електропостачання, включаючи гаряче водопостачання і опалення, а також для кондиціонування повітря, висушування та в інших технологічних процесах.

Розробки і промислова продукція в цій області на сьогодні дуже активно розвиваються в таких країнах як Німеччина, США, Великобританія, Японія, Корея та Китай і становлять вагомий відсоток енергетичного виробітку в світі [35].

За даними досліджень Міжнародного Енергетичного Агенства (ІЕА) на сьогодні 83% всього ринку сонячної теплоенергетики за встановленою потужністю припадає на СК та СЕ змонтовані у Китаї (309,5 ГВт) та Європі (49,2 ГВт). Решта встановленої потужності розподілилася між Сполученими Штатами та Канадою (18,4 ГВт), Азією без Китаю (11,6 ГВт), Латинською Америкою (11,0 ГВт), країнами МЕНА - Ізраїлем, Йорданією, Ліваном, Марокко, Палестинськими територіями та Тунісом (6,7 ГВт), Австралією та Новою Зеландією (6,4 ГВт), а також країнами Африки на південь від Сахари (1,4 ГВт). Обсяг ринку всіх інших країн оцінюється в 5% від загальної кількості установок (21,8 ГВт) в тому числі Україна [36].

На рисунку 1.1 [37] представлено як співвідноситься Україна в загальному рангу сонячної інсоляції серед європейських країн. З побаченого можна зробити висновок, що сонячна інсоляція на території України в порівнянні з європейськими країнами, що мають високий рівень використання сонячних колекторів, є більш ніж

достатньою для використання різного роду установок для нагріву води, підтримки опалення та забезпечення підігріву басейну.

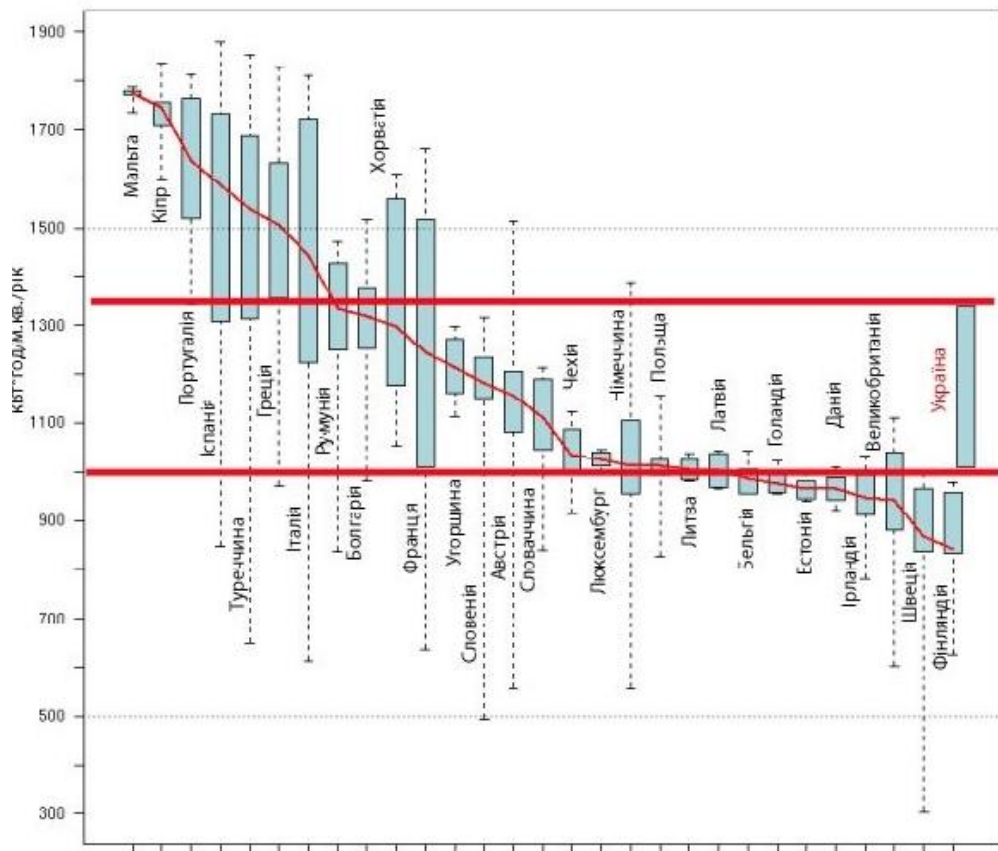


Рисунок 1.1 – Річна кількість сонячної інсоляції для різних держав

Статистичні дані в Україні підтверджують перспективність розвитку сонячної енергетики. Станом на 1 березня 2016 р. встановлена потужність об'єктів «зеленої енергетики» складає 1492 МВт, з них 56 % – це об'єкти сонячної енергетики. У 2016 р. кількість встановлених домогосподарствами сонячних панелей зросла у 11 разів порівняно з 2015 роком. Цьому сприяв прийнятий «зелений» тариф у розмірі 20,03 євроцента за кВт·год [1].

Дослідженню питання використання й перетворення сонячної енергії присвячені праці багатьох вчених, зокрема: О.Т. Возняка, М.Є. Янова, Г.Г. Гелетухи, Т.А. Залізної [7, 38], С.О. Кудрі, Б.Г. Тучинський [8, 39], С. П. Шаповала [9], Л.А. Назаренка [40]. Всі однозначно стверджують, що застосування в Україні альтернативних джерел енергії, передовсім, сонячної енергетики, без сумніву дасть користь. Українські вчені та проектувальники також розглядають

використання сонячної енергетики як один з варіантів підвищення енергоефективності країни і зменшення енергетичної залежності України від імпорту енергоресурсів [5].

В Україні найбільш перспективними є такі напрями використання сонячної енергії:

1) безпосереднє її перетворення в електричну енергію постійного струму шляхом використання внутрішнього фотоэффекту в напівпровідникових фотоелектричних перетворювачах та їх конструкцій – сонячних батарей та модулів з великою активною площею в середньому з ККД 10-15%, хоча існують перспективні розробки з ККД близьким до 30%. Як напівпровідниковий матеріал фотоперетворювачів здебільшого використовується кремній Si, зважаючи на його широку поширеність в природі та найбільш придатні техніко-економічні показники для процесу фотоелектричного перетворення. Одержання електричної енергії в сонячних елементах базується на фотовольтаїчному ефекті в неоднорідних напівпровідникових структурах за умов падіння на них сонячного випромінювання.

2) безпосереднє її перетворення в теплову енергію без попередньої концентрації потоку сонячної радіації для нагрівання теплоносія та подальшої подачі на об'єкти обігріву (пристрої, які використовуються при цьому називають сонячними тепловими колекторами, а як носій у них використовується здебільшого вода) з коефіцієнтом корисної дії (ККД) 45-60%, а в разі застосування концентраторів - 80-85% [7].

Потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для широкого впровадження як теплоенергетичного, так і фотоенергетичного обладнання практично в усіх областях. Термін ефективної експлуатації сонячних водонагрівачів у південних областях України становить 7 місяців (з квітня по жовтень), у північних областях – 5 місяців (з травня по вересень). У кліматометеорологічних умовах України для сонячного тепlopостачання ефективним є застосування як плоских сонячних колекторів, так, у подальшому, і концентруючих, які використовують пряму і розсіяну сонячну радіацію. Фотоенергетичне обладнання може достатньо ефективно експлуатуватися протягом всього року.

1.1.1. Характеристики сонячних батарей

В основі роботи фотоелектричних перетворювачів лежить добре відоме явище фотоефекту – принцип вибивання електронів з металів (із напівпровідникових матеріалів) квантами сонячного світла, - відкритому ще в позаминулому столітті Г. Герцем та дослідженому О. Г. Столетовим.

Слід зазначити, що науковою базою для створення перших сонячних батарей стала розробка теорії й технології напівпровідникових матеріалів і структур з рп-переходом. Для просторового розведення зарядів, а значить і виникнення електричного струму, необхідна наявність внутрішнього електричного поля у напівпровіднику. Таке поле існує в електронно-дірковому рп-переході, в контакті метал-напівпровідник, в контакті двох різних напівпровідників (гетеропереході).

Найпростіша конструкція сонячного елемента (СЕ) – приладу для перетворення світлового випромінювання у видимому та ближньому інфрачервоному спектральному діапазоні у електричний струм за допомогою явища внутрішнього фотоефекту показана на рисунку 1.2 [41].

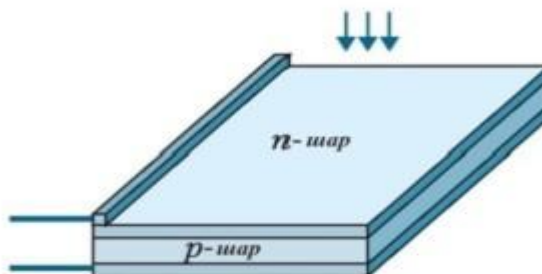


Рисунок 1.2 – Конструкція сонячного елемента

На малій глибині від поверхні кремнієвої пластини р-типу сформований р-п перехід з тонким металевим контактом. На тильну сторону пластини нанесено суцільний металевий контакт. Коли СЕ освітлюється, поглинені фотони генерують нерівноважні електрон-діркові пари. Електрони, що генеруються в р-шарі поблизу рп-переходу, підходять до рп-переходу і існуючим в ньому електричним полем виносяться в n-область. Аналогічно і надлишкові дірки, створені в n-шарі, частково переносяться в р-шар. У результаті n-шар набуває додаткового негативного заряду, а р-шар - позитивний. Знижується первісна контактна різниця потенціалів між р і n-

шарами напівпровідника, і в зовнішньому ланцюзі з'являється напруга Негативному полюсу джерела струму відповідає n-шар, а р-шару – позитивному.

Значення становленої фото–ЕРС [41] при освітленні переходу випромінюванням постійної інтенсивності описується рівнянням вольт-амперної характеристики (ВАХ) (1.1):

$$U = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} - I}{I_s} - 1 \right), \quad (1.1)$$

де I - струм, що протікає через р-n перехід; I_s - струм насичення р-n переходу; I_{ph} – фотострум; k - стала Больцмана; T - абсолютна температура; q - заряд електрона.

Для аналізу і оцінки якості фотоелемента корисна така характеристика, як спектральна залежність струму короткого замикання елемента, розрахована на один квант поглинаючого світла. Ця величина називається ефективним квантовим виходом фотоелемента Q_{ef} (1.2) [3]:

$$Q_{ef} = I_{к.з} \cdot N_0, \quad (1.2)$$

де $I_{к.з}$ – струм короткого замикання; N_0 – кількість квантів, що падають на одиницю поверхні напівпровідника.

Вимірювання струму короткого замикання фотоелемента одночасно з дослідженням спектрального складу і щільності падаючого оптичного випромінювання дозволяє отримати уявлення про ефективність кожної стадії процесу перетворення випромінювання в електричну енергію, який відбувається всередині елемента.

Для ефективної роботи СЕ необхідне дотримання ряду умов [41]:

- оптичний коефіцієнт поглинання активного шару напівпровідника повинен бути достатньо великим, щоб забезпечити поглинання значної частини енергії сонячного світла в межах товщини шару;
- електрони і дірки, що генеруються при освітленні мають ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін активного шару;
- сонячний елемент повинен мати значну висоту бар'єру в напівпровідниковому переході;
- повний опір, включений послідовно з сонячним елементом (виключаючи опір

навантаження), повинен бути малим для того, щоб зменшити втрати потужності (за рахунок перетворення в тепло Джоуля) в процесі роботи;

- структура тонкої плівки повинна бути однорідною по всій активній області сонячного елемента, щоб виключити закорочування і вплив шунтувальних опорів на характеристики елемента.

Основними характеристиками сонячних елементів є [3]:

1) інтегральна чутливість S – значення фотоструму короткого замкнення $I_{к.з.}$, котрий виникає при падінні на напівпровідниковий фотоелемент одиниці потоку променевої енергії Φ , що складається з хвиль різної довжин та такого, що відповідає за своїм спектральним складом випромінюванню вольфрамової лампи, нитка якої розжарена до температури 2840°K (1.3) [3]:

$$S = I_{к.з.} / \Phi. \quad (1.3)$$

2) спектральна чутливість S_λ характеризує значення фотоструму, що виникає під дією одиниці променевого потоку певної довжини хвилі та визначається як співвідношення фотоструму короткого замкнення $I_{к.з.}$ до падаючого на ФЕ потоку монохроматичного випромінювання Φ_λ (1.4) [3]:

$$S_\lambda = I_{к.з.} / \Phi_\lambda. \quad (1.4)$$

3) вольт-амперна характеристика – залежність значення фотоструму від напруги на фотоелементах при постійному значенні світлового потоку; дозволяє визначити оптимальний робочий режим фотоелемента;

4) ККД або коефіцієнт перетворення сонячного випромінювання – відношення електричної потужності фотоелемента до падаючої світлової потужності при номінальному навантаженні.

Енергетичні характеристики сонячних фотоперетворювачів у першу чергу визначаються властивостями напівпровідникових матеріалів та конструктивними особливостями фотоелементів (сонячних елементів).

На основні фотоелектричні параметри сонячних елементів, такі як вольт-амперна характеристика (ВАХ) і спектральна чутливість, впливають і оптичні, і електрофізичні властивості напівпровідника. Тільки детальний аналіз дозволяє визначити, чим викликана недостатньо висока ефективність даного фотоелемента.

Для цього насамперед необхідно виміряти основні його характеристики, що дає можливість зрозуміти причини виникнення, природу і більшість видів втрат [3].

Коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячного елемента визначається як відношення максимальної вихідної потужності до потужності падаючого сонячного світла. Чим більше фотонів сонячного світла поглинається сонячним елементом, тим більшим буде у нього струм. Це може бути досягнуто за рахунок використання напівпровідників з меншою шириною забороненої зони (тоді підвищується доля фотонів в сонячному випромінюванні, які мають енергію вищу ширини забороненої зони напівпровідника). З іншого боку, напруга холостого ходу визначається висотою потенціального бар'єру в р-п переході і буде тим більша, чим більша ширина забороненої зони напівпровідника. Враховуючи розподіл енергії в спектрі сонячного випромінювання, можна підібрати найкращий напівпровідниковий матеріал для створення ефективних сонячних елементів. Такий матеріал повинен мати ширину забороненої зони 1,3–1,5 еВ. Це, насамперед, арсенід галію, теоретична межа максимального коефіцієнту корисної дії сонячних елементів на ньому більша від 31 % [42].

Проте найширшого застосування набули сонячні елементи на основі дешевшого, ніж арсенід галію кремнію, хоча в нього ширина забороненої зони менша від оптимальної (1,1 еВ) і, тому, теоретична межа його максимального коефіцієнту корисної дії менша (до 29 %). На рисунку 1.3 подано фотографію типового промислового сонячного елемента на монокристалічному кремнії розміром 100×100 мм та товщиною 280 мкм.



Рисунок 1.3 – Фотографія приймальної поверхні кремнієвого сонячного елемента

Для практичного використання напівпровідникової сонячної енергетики для

живлення навіть малогабаритної радіоапаратури одного сонячного елемента замало – у нього недостатня напруга та загальна вихідна потужність. Тому із окремих сонячних елементів збирають сонячні батареї (фотомодулі). Типова батарея номінальною потужністю 50 Вт складається із 36 послідовно з'єднаних сонячних елементів 100×100 мм. Така батарея в робочій точці розвиває 17 В при струмі 3 А при освітленні 100 мВт/см² (рисунок 1.4). З'єднуючи такі фотомодулі, можна створювати електричні станції різної потужності, від декількох кіловатт до декількох мегаватт. Вихідна потужність сонячного елемента може бути підвищена також за рахунок збільшення площі сонячного елемента, однак кремнієві елементи з більшою площею (150×150 чи 200×200 мм) ще не так поширені [42].

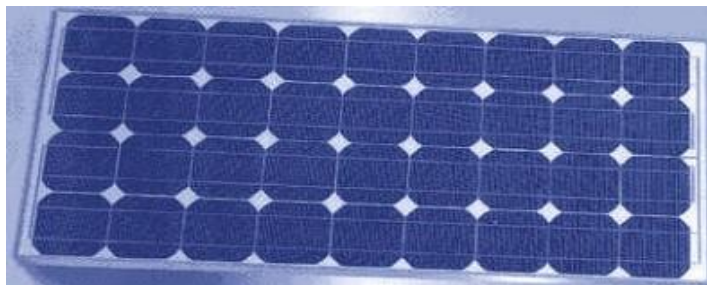


Рисунок 1.4 – Фотографія приймальної поверхні сонячної батареї на номінальну потужність 50 Вт (вага 9 кг, розміри: 1060×485×60 мм)

Сонячні елементи можна класифікувати по інтенсивності збирання світла, по хімічному складу, товщині й кристалічній структурі шарів, кількості сполучених на одній підкладці елементів і т.д [41].

За інтенсивністю збирання світла сонячні елементи розділяються на одиничні й концентраційні. Одиничні СЕ не мають спеціального обладнання для збирання світла й поглинають тільки ту кількість світлового потоку, яка падає на займану ними площу поверхні. Концентраційні сонячні елементи мають спеціальне світлове обладнання, що концентрує (лінзи або дзеркала), які дозволяють збільшувати щільність світлового потоку на поверхні елементів у кілька раз. Як правило, концентраційні елементи виготовляються з дорогих світло поглинаючих матеріалів з найкращими показниками фотовольтаїчного перетворення світла. У позначенні таких сонячних елементів обов'язково вказується коефіцієнт збирання світла,

вимірюваний у сонцях (suns). Коефіцієнт збирання показує, у скільки раз збільшиться щільність потоку падаючого на СЕ випромінювання після його оптичного збирання системами, що концентрують.

За кристалічним складом поглинаючого матеріалу СЕ підрозділяються на монокристалічні, мультикристалічні, полікристалічні, мікрокристалічні, нанокристалічні. Монокристалічні сонячні елементи являють собою сонячні елементи з поглиначем у вигляді цільного кристала напівпровідникової речовини. Мульти-, полі-, мікро- і нанокристалічні СЕ мають у якості поглинаючої речовини суміш напівпровідникових кристалітів з різною орієнтацією, структурою й формою, розмір яких і визначає тип сонячного елемента при розмірах кристалітів від 1 до 100 мм речовину називають мультикристалічною, від 1 до 1000 мкм – полікристалічною, менш 1 мкм – мікрокристалічною, менш 1 нм – нанокристалічною [41].

Відповідно кожний з трьох видів напівпровідникових матеріалів для сонячних батарей має свої переваги і недоліки [43]. Узагальнено їх можна звести їх до таблиці 1.1. Залежно від товщини світлопоглинаючого матеріалу сонячні елементи підрозділяються на тонкоплівкові й товстоплівкові. Тонкоплівкові сонячні елементи мають товщину в декілька мкм, товстоплівкові – у десятки або сотні мкм.

Отже, з вище розглянутого можна виділити такі переваги сонячних фотоенергетичних систем:

- доступність і невичерпність сонячного випромінювання в якості джерела енергії;
- теоретично повна екологічна безпека для навколишнього середовища (існує мала імовірність нагрівання атмосфери над фотоелектростанцією);
- економічність процесу використання ФЕП;
- мінімальний рівень планового технічного обслуговування та висока надійність (близько 25-50 років для якісних фотоелементів, із втратою по потужності до 80% від початкової).

Таблиця 1.1 – Переваги і недоліки різних типів фотоелектричних перетворювачів

Тип ФЕП	Переваги	Недоліки	Область використання
ФЕП на основі монокристалічного кремнію Si	- високий ККД (17-19%); - висока надійність (25-50 р. роботи); - стабільність параметрів протягом тривалого часу (падіння потужності до 80% від максимуму за 25 років експл.).	- вища вартість (2,5-3,3 \$/Вт); - менша технологічність; - вища чутливість до рівня та кута джерела світла; - висока собівартість та енергозатратність виготовлення	1) професійні сонячні енергосистеми; 2) сонячні електростанції; 3) системи живлення космічних апаратів; 4) високоякісні приватні сонячні системи .
ФЕП на основі полікристалічного кремнію	- нижча вартість (2,1-2,8 \$/Вт); - висока технологічність; - стабільність параметрів (падіння потужності до 80% від максимуму за 25 р. експл.).	- дещо нижчий ККД (15-17%); - менша стабільність параметрів.	1) якісні сонячні енергосистеми; 2) малі електростанції; 3) покриття дахів будинків; 4) фотоелектричні побутові пристрої (зарядні пристрої моб. тел., ноутбуків, вимірювальна техніка).
Тонкоплівкові ФЕП на основі аморфного кремнію	- висока технологічність; - низька вартість (1.5-2.4 \$/Вт).	- низький ККД (7-11%); - нестабільність параметрів; - низька надійність (строк служби 5-8 років).	1) більш дешеві приватні сонячні енергосистеми; 2) системи світлодіодного побутового освітлення; 3) побутові пристрої (калькулятори, аудіоплеєри, ліхтарики з сонячними батареями, зарядні пристрої).

Не зважаючи на переваги сонячних фотоелектричних систем, їм притаманна й низка недоліків:

- залежність від погоди, часу доби та пори року, і як наслідок необхідність акумуляції енергії;

- порівняно висока вартість конструкції на сьогоднішній день (до 3-5 \$/1Вт потужності всієї системи), але цей показник постійно знижується, враховуючи широке впровадження ФЕП у сучасному світі;

- необхідність періодичного очищення поверхні від пилу та атмосферних опадів;

Хоча існує деякий ряд недоліків, переваги від процесу отримання сонячної електроенергії значно більше і вони мають більш якісний і кількісний характер, що було оцінено світовими виробниками сучасних технологій та оптоелектроніки. Зараз у світі існує близько 700 компаній виробників сонячних панелей для промислового і побутового секторів.

Підводячи підсумки, можна сказати, що оптимальним з точки зору отримання максимального вироблення електроенергії за допомогою сонячних батарей є комбіноване використання поєднаних ФЕП на базі слідкувальних (трекерних) систем із додатковими встановленими дзеркалами, що збільшують оптичний потік на активну поверхню. Це дозволить отримати максимальне використання енергетичного ресурсу сонячних панелей і як наслідок з економічної точки зору – зменшити строк їх окупності [43].

1.1.2. Характеристики сонячних колекторів

У процесі перетворення сонячної енергії в теплову сонячне випромінювання сприймається сонячним колектором (СК) – це об'ємна конструкція, через яку циркулює теплоносій, а її зовнішня сторона (обернена до джерела випромінювання) має чорну поглинальну поверхню [3]. Сонячні колектори поглинають сонячну енергію у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі випромінювання і в подальшому зазвичай підігрівають воду, яку можна використовувати для господарських потреб. Завдяки конструктивним удосконаленням та високому коефіцієнту абсорбції (95%) сонячні колектори ефективно працюють майже 9 місяців на рік. Скло колекторів ударостійке, та гарантує механічну стійкість до атмосферних опадів (граду), чи попадання твердих предметів. Використання незамерзаючої рідини (розчину гліколю) забезпечує роботу колекторів за низьких температур повітря до -30°C . Системи сонячного теплопостачання, якщо вони правильно розраховані та якісно змонтовані, вважаються одними із найбільш надійних та довговічних.

Одним із найважливіших характеристик, який визначає ефективність сонячного колектора є його коефіцієнт корисної дії [14, 17], що визначають за формулою (1.5):

$$\eta_{ск} = \frac{Q_{кор}}{Q_{пром}}, \quad (1.5)$$

де $Q_{кор}$ – кількість тепла, що отримав сонячний колектор за час t ;

$Q_{пром}$ – кількість променевого тепла, що випромінювалась джерелом на одиницю поверхні теплопоглинача сонячного колектора за цей же час (1.6) [14, 17]:

$$Q_{кор} = \frac{\dot{m} c_f \Delta T}{A_p G}, \quad (1.6)$$

де \dot{m} – масова швидкість потоку рідинного теплоносія; c_f – ефективна теплоємність рідинного теплоносія; A_p – загальна площа колектора або площа абсорбера; ΔT – температура на виході t_e і вході t_{in} СК ($T=t_e-t_{in}$); G – поверхнева густина потоку випромінювання.

Показники, які характеризують $Q_{кор}$, являють собою показники корисності $P_{кор}$. Тоді $Q_{кор}$ запишеться як функція від цих показників, тобто $Q_{кор} = f(P_{кор})$ (1.7) [17]:

$$Q_{пром} = F \cdot E, \quad (1.7)$$

де F – площа теплопоглинача сонячного колектора; E – інтенсивність променевого теплового потоку, що випромінює джерело.

Показники F , E , які характеризують $Q_{пром}$ представимо як показники інтенсивності $P_{инт}$. Тоді $Q_{пром}$ можна буде записати як функцію від показників інтенсивності, тобто $Q_{пром} = f(P_{инт})$. Тоді ККД СК представиться у вигляді залежності від частка двох функцій (1.8) [17]:

$$\eta_{ск} = \frac{f(P_{кор})}{f(P_{инт})} = \frac{\dot{m} c_f \Delta T}{A_p G F E} \quad (1.8)$$

Колектори відрізняються за формою, конструктивними рішеннями, наприклад, за типом конструкції найбільшого поширення в системах сонячного теплопостачання набули плоскі та вакуумні сонячні колектори.

Плоский сонячний колектор – це добре теплоізольована застлана панель, у якій розміщена пластина поглинача сонячного тепла, і встановлені трубки з циркулюючою рідиною, яка відводить отримане тепло (рисунок 1.5) [44]. Пластина поглинача виготовлена з металу, що добре проводить тепло (наприклад міді або

алюмінію). Пластина поглинача оброблена спеціальним високоселективним покриттям, яке краще утримує поглинене сонячне світло. Це покриття складається з дуже міцного тонкого шару аморфного напівпровідника, нанесеного на металеву основу, і відрізняється високою здатністю що поглинає у видимій області спектра і низьким коефіцієнтом випромінювання в довгохвильовій інфрачервоній області. Завдяки склінню (в плоских колекторах зазвичай використовується матове, пропускає тільки світло, скло з низьким вмістом заліза) знижуються втрати тепла. Дно і бічні стінки колектора покривають тепло-ізолюючим матеріалом, що ще більше скорочує теплові втрати [45]. Принцип дії плоского колектора: сонячне світло проходить через скло і потрапляє на поглинаючу пластину, яка нагрівається, перетворюючи сонячну радіацію на теплову енергію. Це тепло передається теплоносію - воді або антифризу, циркулюючому через сонячний колектор. Теплоносій нагрівається і віддає потім теплову енергію через теплообмінник воді у ємкісному водонагрівачі. У ньому гаряча вода знаходиться до моменту її використання.

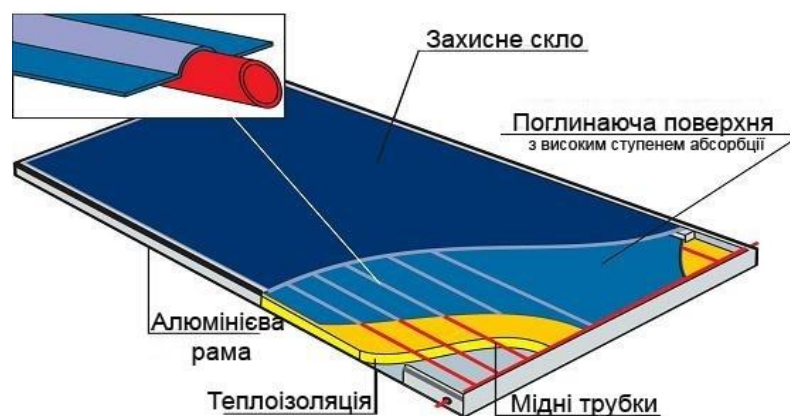


Рисунок 1.5 – Конструкція плоского сонячного колектора

Але незважаючи на це, теплові втрати плоских колекторів із застосованого боку досить значні, особливо в зимову пору року при значній різниці температур теплоносія в колекторі та зовнішнього повітря. Треба звернути увагу на можливість блокування частини малих трубок у плоских колекторах кристалами нерозчинних солей, що створює додаткові «незручності» при експлуатації. Це знижує продуктивність колектора, та ускладнює процес обслуговування - промивання

великої кількості малих паралельних трубок є проблематичним. Тому в зимовий час теплові втрати в такій конструкції не дозволяють її безпечно використовувати воду в якості теплоносія. Через це плоскі сонячні колектори використовують тільки для систем гарячого водопостачання та підігріву води в басейні в теплу пору року.

Вакуумний колектор – комплекс вакуумних трубок, що перетворюють потік сонячного випромінювання в теплову енергію, де здійснюється первинна передача отриманого тепла в накопичувальний резервуар через циркулюючий в системі теплоносій (незамерзаюча рідина) (рисунок 1.6). Він комплектується 10-30 вакуумними трубками, що розташовуються паралельно один одному. Конструкції вакуумного трубчастого колектора мають різні модифікації але в принципі схожі на будову термоса: одна скляна трубка знаходиться в іншій, більшого діаметра (рисунок 1.7) [45].



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд типового вакуумного сонячного колектора



Рисунок 1.7 – Переріз вакуумного трубчастого сонячного колектора

Зовнішня труба зроблена з прозорого надміцного боросилікатного скла, яке витримує удар граду діаметром 25 мм. Внутрішня труба також зроблена з прозорого боросилікатного скла, покритого спеціальним селективним покриттям, що забезпечує поглинання тепла з мінімальним відбиттям. В кожній внутрішній трубці вбудована мідна пластина поглинача з геліотитановим покриттям, це гарантує високий рівень поглинання сонячної енергії й дуже малу емісію теплового випромінювання. Щоб уникнути тепловтрат, з простору між двома трубами викачане повітря і створений вакуум, найкращий теплоізолятор. Під дією сонячного випромінювання вода у трубках нагрівається і підіймається у бойлер, заміщаючись холодною водою з бойлера.

Завдяки циліндричній формі трубок сонячні промені падають на поверхню абсорбера перпендикулярно до осі трубки, але при цьому всі інші промені, не перпендикулярні осі трубки, віддзеркалюються. Кругла форма елементів колекторів не накопичує бруду, стійка до атмосферного впливу. Максимальна робоча температура системи може бути керована завдяки фізичним властивостям рідини у тепловій трубці та спеціальній конструкції накопичувача. Відтак, зникає потреба у складних системах контролю й забезпечується проста та безпечна експлуатація.

Сонячні колектори встановлюються під кутом, який дорівнює куту широти місцевості, на південній стороні. Можливий монтаж прямо на дах. Враховується і кут повороту колектора в напрямку орієнтації на південь.

Конструкції сонячних колекторів постійно вдосконалюються. Для підвищення ефективності сонячних установок концентрацією сонячної енергії проведено багато наукових досліджень [46].

Сонячні колектори забезпечують ефективний збір теплової енергії. До їх основних переваг можна віднести:

- високу екологічність: установки не виділяють в атмосферу забруднюючі речовини. При цьому деякі спеціалісти стверджують, що можливе масове запровадження сонячної енергетики може змінити здатність поверхні Землі відбивати випромінювання.

- ефективно використовується як пряме, так і розсіяне сонячне випромінювання;

- можливість створення установок практично будь-якої потужності;

- доволі великий строк служби установок (до 50 років), початкові затрати на сонячні установки значно менші, ніж приєднання віддаленого населеного пункту до системи теплопостачання або електропостачання, а експлуатаційні затрати з урахуванням строку служби виявляються нижчими, ніж у дизельних електростанціях;

- мінімальні витрати на утримання установок у процесі їх використання;

- окупність пристроїв за 3-5 роки;

- пристрої забезпечують задоволення потреби в гарячій воді та опаленні відповідно на 80% і 50%;

- сонячні колектори достатньо просто підключаються до вже встановленим опалювальним системам;

- матеріали сонячних установок виконують функцію вишуканого будівельного матеріалу, що покращують архітектуру будівель, забезпечують їх водозахист, звукоізоляцію і теплозахист;

- простота контролю режимів геліосистеми, за допомогою індикації на передній панелі сонячного контролера легко контролювати стан геліосистеми, сонячний контролер не потребує постійного налаштування;

- можливість автоматичного регулювання швидкості потоку теплоносія в геліосистемі (управління витратою циркуляційного насоса) в залежності від різниці температур між сонячним колектором та баком-акумулятором геліосистеми (реалізована у всіх моделях сонячних контролерів);

- захист пам'яті при зникненні електричного живлення, у випадку зникнення живлення сонячний контролер зберігає встановлені параметри геліосистеми без змін. При появі напруги сонячний контролер повертається в установлений режим роботи;

- пристроями забезпечується повне або чергове опалення приміщень будь-якої площі;

- їх потужність настільки велика, що дозволяє нагрівати воду навіть у відкритих басейнах;

- в деяких пристроях вбудовані системи знезараження води.

З огляду на вищеперераховані факти можна говорити про доцільність використання сонячного потенціалу, що припадає на територію України. Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що надходить на 1 м^2 поверхні на території України, перебуває в межах: від $1070 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ у північній частині України до $1400 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ і вище на півдні країни [8]. Отже, ми маємо хороші можливості для ефективного використання теплоенергетичного обладнання на території України.

1.1.3. Комбіновані теплофотоелектричні модулі

Використання сонячної енергії для тепло- та електропостачання житлових об'єктів на даний момент здебільшого реалізується шляхом використання окремо теплових сонячних колекторів і кремнієвих фотоелектричних батарей. В свою чергу все більшу увагу привертають нові системи, що використовують одночасно обидва типи перетворень, перехід на такі комбіновані установки дозволить значно підвищити ефективність використання сонячної енергії [47]. Підвищення ефективності використання сонячних установок можливе за рахунок комбінування абсорбера плоского сонячного колектора і фотоелектричної батареї. Монокремнієві сонячні елементи мають плоску конструкцію, їх ККД складає $14\text{...}15\%$ при коефіцієнті поглинання до 95% . При перетворенні сонячного випромінювання 80% енергії йде, в основному, на тепловий нагрів елементів, що тільки погіршує їх якісну роботу. При нагріві ФЕП на один градус більше $25 \text{ }^\circ\text{C}$ він втрачає в напрузі $0,002 \text{ В}$, тобто $0,4\%$ /градус. У яскравий сонячний день елементи нагріваються до $60\text{...}70 \text{ }^\circ\text{C}$, втрачаючи $0,07\text{...}0,09 \text{ В}$ кожен [48]. Це і є основною причиною зниження ККД, що приводить до падіння напруги, генерованої кожним ФЕП. Але, розташувавши сонячні елементи поверх теплового абсорбера геліоколектора, при ефективному теплообміні створюється можливість для збільшення коефіцієнту перетворювання всієї установки. Відведення тепла теплоносієм, циркулюючим по контуру геліосистеми, перешкоджає перегріву фотоперетворювачів і, відповідно,

підвищує сумарне вироблення електричної енергії [49]. Високий коефіцієнт поглинання сонячних елементів дає можливість до 80% сонячного випромінювання використовувати на нагрів приймальної поверхні теплового абсорбера [49].

Комбінований теплофотоелектричний модуль (в літературі його часто називають як комбі-панель /combi-panel/) досить ретельно як теоретично, так і практично досліджується з приблизно 1978 року [50, 51]. За конструкцією модуль нагадує плоский сонячний колектор на верхній поверхні пластин якого встановлено батарею фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), що забезпечують перетворення частини падаючої енергії випромінювання в електричну. З нижнього боку алюмінієвих пластин розміщено трубки, в яких нагрівається рідкий теплоносіє, що циркулює в замкнутому контурі. Однією з переваг такої схеми є не лише отримання теплової енергії додатково до електричної, але і підвищення ефективності власне ФЕП внаслідок зниження їх робочої температури [47].

Дослідженню роботи геліоустановки для спільної генерації електричної та теплової енергії присвячено багато наукових праць [47; 49; 52;53] і деякі з систем подібного типу вже мають промислову стадію розробки. Такі гібридні системи можуть значно підвищити ефективність фотоелектричного перетворення і розширити використання ним сонячного спектра випромінювання. Оскільки серед основних проблем низької ефективності кремнієвих сонячних батарей є те, що вони поглинають сонячне світло з довжиною хвилі до 800 нм, а більшість інфрачервоного випромінювання перетворюється в теплову енергію, призводячи до збільшення температури поверхні.

У роботі [52] представлена гібридна система, що складається з модуля термоелектричного генератора (ТЕГ), модуля фотоелектричного елемента (ФЕ) з кремнію, теплового поглинача з поглинаючим шаром, теплопровідним шаром і шаром ізоляції, що були інтегровані в систему. Мідна фольга була виготовлена у формі чаші, щоб скеровувати тепло до ТЕГ. Чорна полімерна стрічка нанесена на поверхню мідної фольги, була використана в якості поглинаючого шару для поглинання сонячного тепла. Потім ТЕГ був прикріплений до мідної фольги на задній стінці ФЕ, а шар зі спіненого полімеру нанесений на задній частині мідної фольги в

якості ізолюючого шару. Алюмінієві ребра радіаторів були прикріплені до холодної сторони ТЕГ для розсіювання тепла. В такий спосіб розроблено інтегрований колектор тепла між ФЕ і ТЕГ, який складається з оптимізованого поглинаючого шару, провідного шару і шару ізоляції. Поглинаючий шар використовується для збору покращеної на нього сонячної енергії і відбитої енергії від сонячної батареї. Шар ізоляції може запобігти втраті тепла і провідний шар забезпечує ефективну теплопровідність.

Гібридна система працює за таким принципом – сонячне світло падає на поверхні ФЕ і теплового колектора (рисунок 1.8) [52]. ФЕ може поглинути сонячне світло до 800 нм, то невикористаними видиме світло і частини інфрачервоної енергії перетворюються в виділяєме тепло. Інша сонячна енергія поглинається колектором тепла і перетвориться безпосередньо в тепло. Відпрацьоване тепло від ФЕ і поглинене тепло від теплового колектора все передається через мідну фольгу з гарячою боку ТЕГ. Водяне охолодження швидко приймає тепло від холодної боку ТЕГ. Таким чином, була створена значна різниця температур по ТЕГ, щоб дати високу енергетичну ефективність, а робоча температура ФЕ також падає, щоб показати відмінну продуктивність.

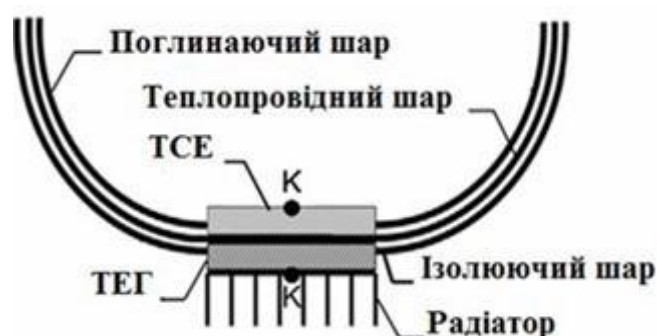


Рисунок 1.8 – Зображення конструкції гібридної системи

Традиційно передбачається, що обидві панелі в системі мають однакову площу. Але автори роботи [53] висловлюють припущення щодо необхідності оптимізації співвідношення між площами двох частин гібридної системи. Очевидно, що наявність ФЕП над сонценагрітним колектором (СНК) зменшує тепловий потік до нього, що призводить до зменшення термічної ефективності колектора. З іншого

боку, спроможність колектора екстрагувати тепло від ФЕП зменшується, коли вода (повітря) всередині нього нагрівається. Тому, оптимальним варіантом буде зробити ФЕП меншої площі аніж площа нагрівного колектора під нею, і розмістити ФЕП поблизу початкової частини колектора (де знаходиться втік холодної води), щоб забезпечити більш ефективне охолодження ФЕП та підвищити ефективність нагрівного колектора.

На рисунку 1.9 розміщено ФЕП (на рисунку позначена як «Сонячний елемент») з площею поверхні A_p над СНК (на рисунку позначена як «Сонячний колектор») з загальною площею A_c таким чином, що ФЕП покриває частину СНК, суміжну з його вхідною областю [53].

У роботі зроблено висновок про необхідність малого значення відношення площ A_p/A_c , як умови для вищої ефективності гібридної системи, що є внеском температурного розподілу вздовж СНК. Оскільки температура СНК, експонованого на сонячному світлі, поступово зростає від граничної області входу в колектор холодної води (у даному випадку ця температура практично дорівнює температурі навколишнього середовища) до свого максимального значення на протилежному кінці колектора. Тому, збільшення площі перекриття фотоелектричною панеллю сонценагрівного колектора буде зменшувати ефект охолодження панелі, таким чином виключаючи головну перевагу комбінації цих двох пристроїв в одну гібридну систему.



Рисунок 1.9 – Схема гібридної системи

Автори для експериментальних досліджень використовували модель СНК (model Powermat) площею 4 м^2 , в якій нагрівним агентом була вода; приблизно 90% площі поверхні контролювалося системою внутрішнього трубопроводу, який

забезпечує ефективний тепловий взаємообмін. Чорний поглинач, який покриває колектор є стійким до ультрафіолетової частини сонячного спектру і має гарантійний термін експлуатації приблизно 20 років; це також забезпечує невелику вагу панелі (приблизно 3 кг в незаповненому стані, та 5 кг в наповненому водою стані). Максимальна оціночна теплова ефективність при використанні моделі Hottel-Whillier (Hottel-Whillier model) [54], була в межах 60÷70%, що відповідає найкращим з відомих колекторів. В експериментальній гібридній системі використовувались та досліджувались ФЕП, збудовані на основі кремнію кристалічного типу (c-Si; зокрема, ми використовували панель виробництва російського заводу “Красное знамя” з площею приблизно 1 м² та генерованою потужністю 100 Вт). Між іншим, в наших експериментах для досягнення ефективного термічного контакту з колектором ми використовували панелі, зроблені з аморфного кремнію (α -Si, ECD Company, Troy, Michigan, USA) та CuInSe₂ (CIS) комерційні панелі виготовлені компанією Siemens, USA. Електрична ефективність усіх використаних ФЕП була приблизно 15%. Установка, розроблена для дослідження режиму сонячного колектора, включала в себе два саморобних електричних цифрових термометри на базі температурних сенсорів LM335 та вимірювач водяного потоку (water flux meter SICASA Delaunet MD-15); усі три пристрої були приєднані до комп'ютеризованої системи збору даних.

Для забезпечення найкращого можливого теплового контакту між панеллю та колектором авторами було зроблено для кожного випадку спеціальний інтерфейс у вигляді мідного радіатора, притиснутого до ФЕП (прямо до матеріалу підкладки з неосвітленого боку сонячних елементів) та до сонячного колектора з іншого боку. Теплопровідність радіатора була визначена експериментально: було приведено радіатор до термічного контакту з алюмінієвою пластиною в певному сенсі щоб гарантувати однаковий тепловий потік через пластину і радіатор, та заміряно зовнішні температури так само, як і температуру в області контакту. Отримане значення показує, що конструкція панелі не відповідає адекватному взаємному теплообміну між панеллю та сонячним колектором.

Таким чином, однією з головних вимог до конструкції ФЕП є забезпечення найкращого з можливих термічних контактів з СНК; таку вимогу можна задовольнити відповідним вибором підкладки матеріалу ФЕП.

Отже, можна зробити висновок, що одним із перспективних шляхів для використання сонячної енергії за рахунок повного поглинання сонячного спектру випромінювання є використання комбінованого теплофотоелектричного модуля. Також така система сприятиме підвищенню ефективності самого ФЕ за рахунок відведення температури з його поверхні, з подальшим перетворенням його в електроенергію.

1.2. Сучасний стан нормативного забезпечення випробувань сонячних елементів та колекторів

Відомо багато закордонних стандартів з дослідження сонячних колекторів та вимірювання сонячної енергії [14-16], а також розроблені стандарти України для випробування сонячних колекторів. Наведемо приклади національних стандартів відповідно до яких на даний час в Україні здійснюється метрологічне забезпечення випробувань сонячних колекторів, у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Нормативна база для випробувань сонячних колекторів

Номер стандарту	Назва стандарту
ДСТУ ISO 9806-1:2005	Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 1. Теплові характеристики та перепад тиску закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-1:1994, IDT)
ДСТУ ISO 9806-2:2005	Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 2. Кваліфікаційні випробування (ISO 9806-2:1995, IDT)
ДСТУ ISO 9806-3:2005	Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 3. Теплові характеристики (лише відчутне теплопередавання) та перепад тиску незаскслених сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-3:1995, IDT)
ДСТУ ISO 9059:2006	Енергія сонячна. Калібрування польових піргеліометрів порівнянням з еталонним піргеліометром (ISO 9059:1990, IDT)

ДСТУ ISO 9846:2006	Енергія сонячна. Калібрування піранометра із застосуванням піргеліометра (ISO 9846:1993, IDT)
ДСТУ ISO 9847:2007	Енергія сонячна. Калібрування польових піранометрів порівнянням з еталонним піранометром (ISO 9847:1992, IDT)
ДСТУ ISO/TR 9901:2006	Енергія сонячна. Польові піранометри. Рекомендації щодо застосування (ISO/TR 9901:1990, IDT)
ДСТУ ISO 9060:2008	Енергія сонячна. Технічні характеристики та класифікація приладів для вимірювання півсферичного й прямого сонячного випромінення (ISO 9060:1990, IDT)
ДСТУ ISO 9488:2010	Енергія сонячна. Словник термінів (ISO 9488:1999, IDT)
ДСТУ 4034-2001	«Енергозбереження. Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії. Колектори сонячні. Методи випробувань»
ДСТУ 3193:1995	«Державна повірочна схема для засобів вимірювань енергетичної освітленості некогерентним випроміненням»
ДСТУ EN 12975-2001	«Системи теплові сонячні та їхні компоненти. Колектори сонячні. Ч. 1. Загальні технічні вимоги»

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 контрольно-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 $\Delta T_{\text{X}} \leq \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$; роздільна здатність $\pm 0,02 \text{ } ^\circ\text{C}$; мінімальне значення різниці вимірюваних температур не повинно бути меншим $\Delta T_{\text{Xmin}} \geq 2 \text{ } ^\circ\text{C}$; абсолютна похибки вимірювання різниці температур $\Delta \Delta T_{\text{X}} \leq \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ (бажано $\pm 0,02 \text{ } ^\circ\text{C}$); відносна похибка – $\delta_{\Delta T} \approx \pm 5\%$. Це призводить до трудоемної та тривалої процедури їх калібрування [13].

В свою чергу нормативне забезпечення випробувань фотоелектричних модулів представлено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Нормативна база для випробувань фотоелектричних модулів

Номер стандарту	Назва стандарту
EN 61215-1:2016	«Наземні фотоелектричні (PV) модулі. Кваліфікація дизайну та затвердження типу. Частина 1. Спеціальні вимоги для тестування кристалічного кремнію фотоелектричних (PV) модулів»
IEC 61646:2008.	«Тонкоплівкові фотоелектричні (PV) наземні модулі. Кваліфікація проекту та узгодження типу»
IEC 61730-2:2004.	«Оцінювання безпеки фотоелектричних модулів. Частина 2. Вимоги до випробувань»
EN 61215-1-1:2016	«Наземні фотоелектричні (PV) модулі. Кваліфікація дизайну та затвердження типу. Частина 1-1. Вимоги до випробувань»
EN 62788-1-2:2016	«Вимірювальні процедури для матеріалів, використовуваних у фотоелектричних модулях. Частина 1-2. Герметики. Вимірювання об'ємного питомого опору фотогальванічних герметиків та інших полімерних матеріалів»
IEC 61215:2005	«Наземні фотоелектричні модулі (PV) на кристалічному кремені. Конструкція і тип. Методи оцінювання»
IEC 60891:2009	«Прилади фотогальванічні. Методики коригування за температурою й освітленістю результатів вимірювання вольт-амперної характеристики»
IEC 60904-1:2006.	«Фотоелектричні прилади. Частина 1. Фотоелектричні вольт-амперні характеристики. Методи вимірювання»
IEC 60904-2: 2009	«Фотоелектричні прилади. Частина 2. Еталонні сонячні елементи. Загальні технічні вимоги»
IEC 60904-3:2008	«Фотоелектричні прилади. Частина 3. Принципи вимірювання параметрів наземних фотоелектричних сонячних приладів зі стандартними характеристиками спектральної щільності інтенсивності падаючого випромінювання»
IEC 60904-5:2011	«Фотоелектричні прилади. Частина 5. Визначення еквівалентної температури елементів фотоелектричних приладів методом напруги розімкнутого кола»
IEC 60904-7:2008	«Фотоелектричні прилади. Частина 7. Визначення похибки внаслідок спектральної невідповідності під час вимірювання характеристик фотоелектричного

	приладу»
IEC 60904-9: 2007	«Фотоелектричні прилади. Частина 9. Вимоги до робочих характеристик імітаторів сонячного випромінювання»
IEC 60904-10: 2009	«Фотоелектричні прилади. Частина 10. Методи вимірювання лінійності»
IEC 61853-1: 2011	«Наземні фотоелектричні (PV) модулі. Визначення робочих характеристик та енергетичної номінальної потужності. Частина 1. Вимірювання робочих характеристик залежно від температури та енергетичної освітленості. Номінальна потужність»

Вимірювання параметрів та випробування сонячних модулів відповідно до міжнародного стандарту IEC 61215 [55] включають в себе наступне:

- двісті термічних циклів від мінус сорока до вісімдесяти п'яти градусів;
- перевірка витривалості до перегрітої плями;
- вплив високою вологістю при високих температурах;
- вплив ультрафіолетового випромінювання;
- випробування на механічну стійкість;
- випробування на удар крижаної кулі (граду).

Сонячні батареї, що використовуються для побутових потреб, мають бути сертифіковані в Україні і мати висновок про відповідність системі стандартів безпеки праці. Згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від 15.07.1998р. №1094 «Про державну експертизу по енергозбереженню» для побутових потреб без отримання яких-небудь дозволів використовуються сонячні батареї, що не є енергоємними, тобто потужність яких складає менше 75 кВт.

Потужність, напруга в різних умовах та інші параметри ефективності роботи сонячних батарей, їх продуктивність в реальних, а не наближених до ідеальних умов, виявляються в ході тестування. Подібні випробування проводять як на виробництві, так і незалежні лабораторії.

Зокрема, в Україні на теперішній час існує лише дві лабораторії – в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (ІФН) та в Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського “ХАІ” (м. Харків), де були створені і на належному рівні атестовані метрологічні бази, які

дозволяють кваліфіковано вимірювати ефективність ФП і зібраних на їх основі сонячні батареї в стандартних умовах [56].

В ІФН створений в 2002 р. єдиний в Україні атестований Державним комітетом України з питань технічного регулювання та споживчої політики Центр випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних. Основою Центру є комплекс сертифікації ФП, фотоелектричних модулів і СБ, в склад якого входять автоматизовані вимірювальні установки: установка для визначення відносної спектральної характеристики фотоперетворювачів, установка фототехнічних випробувань ФП, установка для електричних і фототехнічних випробувань СБ і згадувана вище імпульсна система вимірювання фотоенергетичних параметрів СБ. Всі зазначені установки і еталонні перетворювачі атестовані та повіряються в ННЦ «Інститут метрології» [56].

Отже, дуже важливим фактором для вибору сонячної установки будь-якого типу є наявність повного технічного опису, де вказується значення параметрів оптичного ККД, коефіцієнти теплових втрат і площа пристрою (апертурна і загальна). Саме ці параметри дозволяють оцінити ефективність і розрахувати прогнозовану продуктивність сонячного колектора чи сонячної батареї.

Проведений аналіз існуючого нормативного забезпечення випробувань сонячних колекторів та фотоелектричних модулів встановив, що для визначення ефективності сонячних колекторів, тобто визначення їх ККД, потрібно проводити вимірювання падаючого сумарного сонячного випромінення на площину досліджуваного елемента. При цьому випробування проводять як ззовні приміщення (природне випромінення) так і в середині з використанням імітаторів сонячного випромінення.

Отже, визначення ККД, показника, який характеризує відношення кількості перетвореної теплової енергії теплоносія до кількості отриманої сонячної енергії, згідно з ДСТУ ISO 9806-1:2005 [14] передбачає проведення ряду тривалих та затратних випробувань, проведення яких можуть здійснюватися в умовах спеціалізованих випробувальних лабораторій. Випробувальне обладнання, що дозволяє визначати теплотехнічні і експлуатаційні характеристики СК і сонячних

водонагрівальних установок сьогодні в Україні фактично відсутні. Для випробувань СК вітчизняні виробники змушені звертатися до зарубіжних випробувальних центрів, або вносити в технічну документацію не стандартизовані теплотехнічні показники. Відсутність спеціалізованого випробувального устаткування і відпрацьованих методик випробувань стримує розробки нових конструкцій СК, а також удосконалення існуючих конструкцій. Внесення доповнень в існуючі вітчизняні стандарти в частині теплових випробувань сонячних колекторів також можливе тільки після апробації і відпрацювання таких методик.

Для точних вимірів ККД сонячних елементів необхідно забезпечити повне відтворення стандартних параметрів сонячного випромінювання, таких як щільність потоку, спектральне і кутове розподілення енергії, однорідність і стабільність потоку. У випадку сонячних елементів, то визначення як прямого, так і повного потоку сонячного випромінювання повинне здійснюватись за допомогою піргеліометрів і піранометрів, або за допомогою еталонних сонячних елементів з такою ж селективною спектральною чутливістю, як і у вимірюваних елементах і батареях згідно ІЕС 60904-1:2006 [57]. Тут потрібно вказати, що від відповідності спектральних чутливостей еталонного і вимірюваного сонячних елементів і сонячних батарей буде залежати точність визначення коефіцієнта корисної дії і вихідної потужності фотоенергетичних приладів [3].

1.3. Сучасна технічна база випробувань сонячних перетворювачів та перспективи її автоматизації

Для вимірювання параметрів прямого сонячного випромінювання використовують піргеліометр, поверхня детектора якого орієнтована перпендикулярно до потоку випромінювання (рисунок 1.10).

Прилад складається з металевого циліндра, на дні якого встановлено детектор, системи діафрагм для потрапляння на детектор лише прямого сонячного випромінювання та металевих заслінок. Модифікації приладів передбачають застосування термопар або термобатарей як детекторів. В еталонних піргеліометрах використовуються калориметри, слід зауважити, що однією з найбільших проблем

побудови є необхідність точного (зазвичай, з похибкою порядку декількох сотих кельвіна) вимірювання різниці температур.



Рисунок 1.10 – Загальний вигляд піргеліометра СН 1 для вимірювання прямої сонячної радіації

Для вимірювання параметрів сонячного випромінювання, що потрапляє на горизонтальну поверхню з цілої півсфери в межах кута 2π sr (сумарного сонячного випромінення), використовують піранометр, що представлений на рисунку 1.11. Розрізняють два типи таких приладів – з реєстрацією вертикальної різниці температур між поверхнею детектора та його оточенням або горизонтальної різниці температур між чорною та білою поверхнями елементів детектора, розміщених в одній площині. Основним елементом детектора при цьому є сукупність термопар, з'єднаних у батарею Z- подібного типу. Піранометри другого типу містять зіркоподібний детектор, чутливими елементами якого є пофарбовані у чорний та білий колір термопари. Чорні поверхні поглинають сонячне випромінювання інтенсивніше, ніж білі.

Вимірювання різниці температур між чорними та білими секторами детектора дає змогу оцінити енергію сонячного випромінювання. Прилади обладнано системою температурної стабілізації, оптичної компенсації зміни показань при відхиленнях від вертикального положення, набором широкосмугових спектральних фільтрів. Залежно від чутливості піранометри поділяють на класи: перший ($\pm 0,1\%$); другий ($\pm 0,5\%$) та третій ($\pm 1,0\%$). Слід зазначити, що значення електрорушійної сили, індукованої сонячним випромінюванням на кінцях термопар, не перевищує

10 мВ. Для вимірювання таких величин потрібні чутливі, точні і стабільні прилади, з частковим контролем чистоти поверхні півсфер та наявної рідини між ними.



Рисунок 1.11 – Вигляд піранометра CM 11 для вимірювання сонячної радіації

Піранометри калібрують на сонячну чутливість протягом 12 місяців до початку випробування колектора згідно з процедурою, наведеною в ISO 9846 або ISO 9847 [58, 59]. Будь-які зміни, що перевищують 1 % на рік, потребують частішого калібрування або заміни приладу.

Калібрування піранометрів за зміною чутливості на протязі року не має змісту з декількох причин:

- 1) завжди можна вибрати піранометр вищого класу (вторинний еталон);
- 2) вартість процедури калібрування піранометра на протязі року напевно буде вищою від вартості піранометра вищого класу;
- 3) зміна чутливості на ± 1 % призводить до зміни оцінки значень отриманої сонячної енергії колектором на таке ж відносно невелике значення.

Під час випробування колекторів зовні приміщення зазвичай не зважають на коливання поверхневої густини потоку теплового випромінення.

Проте для визначання поверхневої густини потоку теплового випромінення можна встановлювати піргеометр у площині апертури колектора та біля одного з його боків на висоті, що дорівнює половині висоти колектора. Під час вимірювання зовні приміщення поверхневу густину потоку теплового випромінення можна вимірювати піргеометром, зображення якого подане на рисунку 1.12.

Під час випробування сонячного колектора треба виконати три вимірювання температури: температури рідини на вході колектора, температури рідини на виході

колектора та температури навколишнього повітря. Потрібна точність та умови довкілля для цих вимірювань різняться, отже, перетворювач та допоміжне устаткування так само можуть бути різними.



Рисунок 1.12 – Типовий вигляд піргеометра CG 1 для вимірювання інфрачервоної сонячної радіації

Похибка вимірювання вхідної температури рідинного теплоносія не повинна перевищувати $\pm 0,1$ °C, проте для упевненості в тому, що температура не змінюється з часом, потрібна набагато вища роздільна здатність приладу вимірювання температурного сигналу – до $\pm 0,02$ °C.

Похибка визначення розбіжності між температурами на виході та на вході колектора (ΔT) не повинна перевищувати $\pm 0,1$ K. Застосовуючи сучасні, вдало підібрані та відкалібровані давачі, можна звести похибку вимірювання до 0,02 K і таким чином забезпечити досить точне вимірювання різниці температур рідинного теплоносія порядку 1 K або 2 K. При цьому похибка вимірювання температури навколишнього повітря не повинна перевищувати $\pm 0,5$ °C.

Масові швидкості можна вимірювати безпосередньо або, як варіант, визначати за результатами вимірювань об'ємної швидкості потоку та температури. Похибка вимірювання швидкості потоку рідини не повинна перевищувати $\pm 1,0$ % від вимірюваного значення маси на одиницю часу. Вимірювач потоку має бути відкалібровано відповідно до діапазону швидкостей потоку рідини та температур, які буде застосовано під час випробовування колектора.

Теплові втрати колектора зростають з підвищенням швидкості вітру навколо нього, проте вплив напрямку вітру ще не є досить вивченим. Тому вимірювання

напрямку вітру не виконують під час випробовування колекторів. Зв'язок між метеорологічною швидкістю вітру та швидкістю проходження повітря в колекторі залежить від місця розташування випробувального устаткування. Таким чином, метеорологічна швидкість вітру не є корисним параметром під час випробовування колектора. Вимірюванням швидкості вітру в колекторі можна чітко визначити умови, в яких виконують випробування.

Оцінювання енергетичної ефективності СК здійснюють шляхом визначення його теплового коефіцієнта корисної дії (ККД). Для випробування на визначання ККД сонячного колектора за усталеного режиму імітатор потоку сонячного випромінення повинен мати такі характеристики [14]:

- лампи мають бути придатними для утворення середньої поверхневої густини потоку випромінення на апертурі колектора, що дорівнює щонайменше 800 Вт/м^2 . Для спеціалізованих випробувань можна також застосовувати значення в діапазоні від 300 Вт/м^2 до 1000 Вт/м^2 , а значення поверхневої густини потоку випромінення занесено до протоколу випробування;

- протягом випробувального періоду не повинно бути відхилів середньої поверхневої густини потоку випромінення на апертурі колектора, більших за $\pm 50 \text{ Вт/м}^2$;

- поверхнева густина потоку випромінення в усіх точках апертури колектора не повинна відрізнятися від середньої поверхневої густини потоку випромінення на апертурі більше ніж на $\pm 15 \%$;

- спектральний розподіл імітованого сонячного випромінення повинен бути приблизно еквівалентний спектру сонячного випромінення за повітряної маси 1,5.

- вимірювання спектральних характеристик імітаторів потоків сонячного випромінення треба виконувати у площині колектора в діапазоні довжини хвиль (0,3-3) мкм та визначати у ширині смуги частот 0,1 мкм або менше;

- поверхнева густина потоку теплового випромінення на колекторі не повинна перевищувати ту, що надходить до абсолютно чорної порожнини за температури навколишнього повітря, більше ніж на 50 Вт/м^2 ;

- під час випробовування потрібно контролювати поверхневу густину потоку випромінення, яка протягом випробувального періоду не повинна змінюватися більше ніж на 3 %.

Забезпечення перерахованих вище умов стосовно встановлення СК та вимог до імітатора потоку сонячного випромінення дозволить оперативно та із високим ступенем вірогідності проводити контроль його основних показників якості.

1.4. Формування напрямків подальших теоретичних і експериментальних досліджень

Проведений вище аналіз показав, що існує ряд факторів, що стримує широкомасштабне впровадження та виробництво сонячних установок в Україні. Зокрема – це вимоги поставлені в міжнародних стандартах до контрольно-вимірювальної апаратури для вимірювання сонячного та теплового випромінення і температури, які є достатньо високими і регламентують трудомістку та тривалу процедуру їх калібрування [14-16]. Отже, необхідно розробити удосконалене нормативно-технічне забезпечення випробувань сонячних перетворювачів, а саме проведення вимірювання оптичних параметрів сонячної енергії та температури з використанням відкаліброваного приймача.

Для досягнення поставленої мети слід розв'язати такі задачі:

1. Висунути пропозиції щодо покращення методик випробувань СК. Для цього пропонуватиметься визначити і врахувати всі значення похибок, які виникають під час вимірювань параметрів СК і мають суттєвий вплив на кінцевий результат;
2. Дослідити використання абсолютного радіометра (калориметра) з електричним заміщенням, побудованого на основі прецизійних температурних сенсорів, для вимірювання енергетичних параметрів сонячного випромінювання;
3. Провести експериментальні дослідження взаємозамінності напівпровідникових сенсорів температури з метою визначення розкиду характеристик між сенсорами від зразка до зразка;
4. Розробити структуру вимірювача різниці температур з досліджуваними сенсорами та опрацювати методику його калібрування з метою коригування

адитивних і мультиплікативних складових похибки.

1.5. Висновки до розділу 1

У першому розділі на основі проведеного аналізу встановлено, що:

- доцільно та ефективно є використання сонячних установок, зважаючи на високий потенціал сонячної енергії в Україні та відносно високі основні технічні параметри сонячних перетворювачів;

- сучасний стан нормативного забезпечення, а також наявна контрольно-вимірювальна апаратура для випробувань сонячних елементів та колекторів через трудомісткість та складність процедур суттєво стримує широке впровадження геліотехнічного обладнання;

- ринок геліотехнічного обладнання потребує паспортизації та сертифікації сонячних елементів, що потребує створення стендового обладнання для комплексних випробувань сонячних перетворювачів відповідно до міжнародних та вітчизняних стандартів та апробацію різних методик випробувань, спрямованих на визначення їх теплотехнічної ефективності, надійності та контроль якості виготовлення;

- через вартісність обладнання та трудомісткість процедури випробувальне обладнання сьогодні в Україні фактично відсутнє, тому важливою і актуальною проблемою сучасних випробувальних систем є розробка приймачів сонячного випромінювання, які б з високою точністю і чутливістю вимірювали енергетичні параметри оптичного випромінювання.

РОЗДІЛ 2. ПОКРАЩЕННЯ МЕТОДІВ ТА МЕТОДИК ВИПРОБУВАНЬ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І КОЛЕКТОРІВ

2.1. Аналіз методів випробувань сонячних перетворювачів

На даний час на ринку України пропонується велика кількість сонячних батарей і колекторів різних виробників і для коректного вибору їх типу та якості необхідні прості методики та обладнання для проведення їх випробувань [17].

Для прикладу, відповідно до європейських норм EN 12975-2:2006 [60] сонячні колектори потрібно піддавати випробуванням на:

- внутрішній тиск щодо абсорбера;
- протидію високим температурам;
- опромінення;
- зовнішній тепловий удар (може бути поєднано з випробуванням на протидію високим температурам або з випробуванням на опромінення);
- внутрішній тепловий удар (може бути поєднано з випробуванням на протидію високим температурам або з випробуванням на опромінення);
- проникнення дощу, тільки для закслених колекторів;
- механічне навантаження;
- теплову ефективність;
- протидію замерзанню;
- завершальну перевірку.

Крім того, на даний час існує багато методик дослідження сонячних колекторів, що ґрунтуються на різних математичних моделях [9, 61]. Квазістаціонарні методи досліджень плоских сонячних колекторів ґрунтуються на моделі Хоттеля-Уїллера-Бліса (модель з нульовою ємністю) [62]. У цій моделі нехтують впливом перехідних процесів під час нагрівання та охолодження сонячного колектора на його ефективність. Режим роботи сонячного колектора описується рівнянням енергетично балансу(2.1) [62]:

$$F \left[\left(R_{\text{COA}} \right)_{\text{th}} + \left(R_{\text{COA}} \right)_{\text{dl}} \right] \approx Q_u + Q_l + Q_s, \quad (2.1)$$

де I – густина потоку сонячної енергії (прямого чи розсіяного), що падає на одиницю площі поверхні з довільною орієнтацією, Вт/м²; R – коефіцієнт переходу від густини потоку прямого (b) чи розсіяного (d) випромінювання у площині орієнтації сонячного колектора; (DA) – приведена поглинальна здатність системи покриттів стосовно прямого і розсіяного сонячного проміння; F – площа сонячного колектора, м²; Q_u – тепловий потік, переданий робочій рідині у сонячному колекторі (корисне тепло), Вт; Q_l – тепловтрати колектора у докільля випромінюванням і конвекцією, а також теплопровідністю по опорах поглинальної пластини тощо, Вт; Q_s – потік тепла, що акумулюється колектором, Вт.

Миттєвий ККД сонячного колектора η визначається як відношення його питомої теплопродуктивності до густини потоку сонячної енергії і описується рівнянням (2.2) [63]:

$$\eta = F_R \cdot \left[(DA) - \frac{U_L \cdot (t_{f,i} - t_a)}{I} \right], \quad (2.2)$$

де F_R – коефіцієнт відведення тепла із сонячного колектора; (DA) – приведена ефективна поглинальна здатність сонячного колектора; U_L – повний коефіцієнт тепловтрат, Вт/К; $t_{f,i}$ – температура на вході у сонячний колектор, К; t_a – температура навколишнього середовища, К.

Оскільки натурні дослідження залежать від погодних чинників і супроводжуються багатьма труднощами, пов'язаними із змінними умовами докільля, перспективним є дослідження сонячних колекторів у лабораторних умовах. В лабораторних методах досліджень можуть використовуватись імітатори сонячного випромінювання або випробовування проводяться й без них. У разі досліджень без імітатора сонячного випромінювання сонячний колектор розглядається як звичайний теплообмінник. Тут визначається залежність повного коефіцієнта втрат від температури. Такий метод є простим, але не дає змоги визначити оптичні характеристики сонячного колектора [64].

У комбінованих методах поєднані натурні і лабораторні методи досліджень сонячних колекторів. Так, наприклад, за запропонованою методикою [64], щоб знайти $F/(DA)$ (де F – коефіцієнт ефективності пластини) проводиться натурний

експеримент за $t_m \approx t_a$ (де t_m – середньомасова температура теплоносія, К), а залежність повного коефіцієнта втрат від температури визначається у лабораторних умовах без використання імітатора сонячного випромінення.

Стаціонарні методи, хоч і в математичному плані спрощені, проте мають труднощі під час реалізації експерименту. В їх основу покладена динамічна модель, в яку вводять середню температуру і теплоємність колектора, які належать до одного із елементів [65]. Така одноелементна модель дає можливість розглядати динаміку сонячного колектора як єдиного цілого. Під час вибору як визначальну середньомасову температуру теплоносія ККД сонячного колектора отримують (2.3):

$$\eta = F \cdot \left[DA - U_L \cdot (t_{f,i} - t_a) \right] \frac{C_A}{I} \cdot \frac{dt_m}{d\tau}, \quad (2.3)$$

де C_A – приведена до температури t_m теплоємність сонячного колектора, Дж/(кг·К).

Теорія роботи та дослідження сонячних колекторів детально подана в [66]. Однак приведені там математичні моделі є достатньо складними до практичного використання. Стандартизовані міжнародні методики (ISO 9806-2, EN 12975) під час сертифікації використовують лінійні [67] або квадратичні апроксимації коефіцієнта ефективності сонячного колектора (СК) [68]. Теоретичні дослідження і досвід практичного впровадження показує переваги інженерних методик визначення ефективності СК на основі квадратичних математичних моделей [9].

Також, для випробування колекторів є важливим визначання ККД, що визначає економічну ефективність СК, наприклад, за усталеного режиму зовні приміщення потрібно провести низку кваліфікаційних випробувань колектора, зазначених в ISO 9806-2 [15]. А саме потрібно зробити такі вимірювання:

- a) загальної площі колектора, площі абсорбера та площі апертури;
- b) об'єму рідини;
- c) поверхневої густини загального потоку сонячного випромінення на апертурі колектора;
- d) поверхневої густини розсіяного потоку сонячного випромінення на апертурі колектора;

- e) кута надходження прямого сонячного випромінення (альтернативно цей кут можна визначити обчисленням);
- f) швидкості навколишнього повітря;
- g) температури навколишнього повітря;
- h) вхідної температури рідинного теплоносія в колекторі;
- i) вихідної температури рідинного теплоносія в колекторі;
- j) швидкості потоку рідинного теплоносія.

Щоб визначити ККД колектора, випробування проводять за умов безхмарного неба, застосовуючи весь відповідний діапазон робочих температур. Під час випробування загальна поверхнева густина потоку сонячного випромінення на площині апертури колектора має перевищувати 800 Вт/м^2 . Кут надходження прямого сонячного випромінення на апертуру колектора має бути в діапазоні, за якого модифікатор кута надходження на колектор відрізняється не більше ніж на $\pm 2 \%$ від свого значення у разі перпендикулярного надходження. Середнє значення швидкості навколишнього вітру, зважаючи на просторові зміни навколо колектора і тимчасове змінення протягом випробувального періоду, має бути в межах 2 м/с і 4 м/с . Якщо інше не рекомендовано, то швидкість потоку рідини повинна бути приблизно $0,02 \text{ кг/с}$ на один квадратний метр загальної площі колектора. Це значення треба підтримувати з допустимими відхилами $\pm 1 \%$ встановленого значення протягом кожного випробувального періоду і під час переходу від одного випробувального періоду до іншого воно не повинно коливатися більше ніж на $\pm 10 \%$ від встановленого значення [14].

Відомо, що 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 [9]. Дослідження за сприйняття прямої сонячної радіації повинні проводитись за певних кутів падіння, значення яких суттєво впливає на їх теплову потужність [69]. 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 зменшити деякі похибки під час вимірювань та досягнути точності випробувань на рівні десяти відсотків [70].

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 [71].

Аналіз показав [17], що відносна похибка експериментального знаходження коефіцієнта ефективності СК практично визначається відносними похибками вимірювання різниці температур $\delta_{\Delta T}$ та загальної поверхневої густини потоку випромінювання δ_G . Очевидно, що однією з основних характеристик сонячних колекторів є їх ККД [14, 17], значення якого η може бути встановлено експериментально та розраховане за наступним співвідношенням (2.4):

$$\eta = \frac{v_m t c_f \Delta T}{A_G G}, \quad (2.4)$$

де v_m – масова швидкість потоку рідини; c_f – питома теплоємність рідинного теплоносія; ΔT – різниця температур на вході та на виході; t – час вимірювання; A_G – загальна площа колектора; G – загальна поверхнева густина потоку сонячного випромінювання.

Із співвідношення (2.5) можна визначити межу допустимих значень відносної похибки δ_η обчислювання ККД СК [17]:

$$\delta_\eta = \delta_{v_m} + \delta_t + \delta_c + \delta_{\Delta T} + \delta_{A_G} + \delta_G, \quad (2.5)$$

де δ_{v_m} , δ_t , δ_c , $\delta_{\Delta T}$, δ_{A_G} , δ_G – відносні похибки визначення, відповідно, масової швидкості потоку, часу вимірювання, питомої теплоємності рідинного теплоносія, вимірювання різниці температур, площі СК та загальної поверхневої густини потоку випромінювання.

В нормативному документі [14] подано рекомендації щодо підтримання масової швидкості потоку рідини з похибкою $\delta_{v_m} \leq \pm 1\%$ та допустимого відхилення поверхневої густини потоку сонячного випромінювання $\Delta G \leq \pm 50 \text{ Вт/м}^2$, що при

значенні рекомендованої нормативними документами поверхневої густини потоку сонячного випромінювання $G=800 \text{ Вт/м}^2$ дає можливість оцінювати значення $\delta_G \approx \pm 50/800 \approx \pm 6 \%$. Очевидно, що значення паспортного параметру СК A_G встановлено виробником з похибкою, меншою від $\delta_{A_G} \leq \pm 1 \%$, а значення відносних похибок питомої теплоємності рідинного теплоносія за нормативними документами $\delta_c \leq \pm 0,02 \%$ [14]. Під час використання звичайних побутових хронометрів з абсолютною похибкою вимірювання $\Delta t \leq \pm 1 \text{ с}$ відносна похибка вимірювання рекомендованих нормативними документами проміжків часу $t \geq \pm 15 \text{ хв}$ не перевищуватиме $\delta_t \leq \pm 0,1 \%$. За вимогами нормативних документів мінімальне значення різниці вимірювальних температур не повинно бути меншим $\Delta T_{min} \geq 1,5 \text{ К}$, що із врахуванням абсолютної похибки вимірювання різниці температур $\Delta \Delta T \leq \pm 0,1 \text{ К}$ дає значення її відносної похибки $\delta_{\Delta T} \approx \pm 6,7 \%$. Це значення є співмірним із значенням відносної похибки визначення повної густини потоку сонячного випромінювання і тоді із врахуванням критерію малості межа допустимих значень відносної похибки вимірювання значення ККД можна оцінити як $\delta_\eta \approx \delta_G + \delta_{\Delta T} \approx \pm 13 \%$. У випадку оцінювання ККД сучасних СК, значення якого є невеликим та знаходиться на рівні десятків відсотка (наприклад, $\eta=20 \%$), то абсолютна похибка вимірювання ККД становитиме $\Delta_\eta = \eta \cdot \delta_\eta = 0,2 \cdot 0,13 = \pm 2,6 \%$. Таке велике значення похибки вимірювання ККД практично не дозволяє порівнювати між собою за тепловою ефективністю СК різних виробників, ККД яких можуть відрізнитися лише на декілька відсотків.

Очевидно, що за мінімального значення різниці температур визначення значення теплового ККД за умови, що зменшений температурний перепад $T_i^* = (t_{in} - t_a)/G$ прямує до нуля, де t_{in} , t_a – відповідно, вхідна температура колектора та температура довкілля. Нормативні документи пропонують отримувати залежності поточного ККД як функцію зменшеного перепаду температур T_i^* (2.6) [14, 17]:

$$\eta = \eta_0 - a_1 T_i^* - a_2 (T_i^*)^2, \quad (2.6)$$

де η_0 – ККД СК за умови, що мінімальне значення зменшеного перепаду температур T_i^* прямує до нуля; a_1 , a_2 – сталі, значення яких знаходять за методом найменших квадратів.

З огляду на це пропонується в уставах для випробувань СК передбачити заходи для підвищення точності вимірювання різниці температур СК та температур довкілля, вхідної та вихідної температури колектора.

Крім того 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 [9, 72]. На практиці використовуються переважно квазістаціонарні методи з використанням динамічних моделей з усередненими значеннями температури і теплоємності СК [9, 73].

Відомо, що найвищу точність та нескладну процедуру вимірювання параметрів сонячного випромінювання забезпечують відкалібровані радіометри з електричним заміщенням (калориметри) [74]. В таких радіометрах почергово 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 [18, 19]. Традиційно як швидкодійний 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 [13].

В свою чергу метою паспортизації і сертифікації сонячних елементів, модулів та їх складових частин проводять випробування з дотриманням стандартних умов випробувань STC (Standart Test Conditions), головними з яких є наступні: щільність потоку світла 1000 Вт/м^2 , температура $25 \text{ }^\circ\text{C}$, спектр АМ 1,5 (сонячний спектр на широті 45 °) [75].

Параметри і характеристики ФЕП та СЕ вимірюють при певній величині сонячного випромінювання. Ступінь впливу атмосфери на енергетичну освітленість

від сонячного випромінювання характеризується повітряною масою (AM – Air mass). Важливі значення енергетичної освітленості за різної повітряної маси такі:

AM0 – 1353 Вт/м² – за межами земної атмосфери (нульова повітряна маса).

AM1 – 925 Вт/м² – Сонце в zenіті на екваторі (кут 0°)

AM1,5 – 844 Вт/м² – кут між Сонцем і zenітом 45°

AM2 – 691 Вт/м² – кут між Сонцем і zenітом 60°.

Таким чином, при виборі фотоелектричних модулів дуже важливо розуміти параметри, якими описуються модулі, - потужність, напруга, струм в різних режимах. Але також важливо знати, за яких умов отримані ці значення.

У фотоенергетиці є різні стандарти і тестові умови, при яких визначаються ефективність і продуктивність сонячних панелей. До основних тестів відносяться: Стандартні умови тестування (STC – Standard Test Conditions), Номінальна робоча температура сонячного елемента (NOCT – Normal Operating Cell Temperature), Тестові умови фотоелектричних елементів для інженерних систем використання (PTC – Photovoltaics for Utility Systems Applications Test Conditions), Умови високих температур (HTC – High Temperature Conditions) та Умови низьких температур (LTC – Low Temperature Conditions), Умови низької освітленості (LIC – Low Irradiance Conditions) [75].

Щоб можна було порівняти модулі між собою, виробники домовилися випробовувати їх за певних умов. Спочатку були введені Standard Test Conditions, тобто так звані «стандартні умови тестування» (СУТ).

Параметри СУТ відображають роботу сонячної батареї в ідеальних умовах, які зазвичай досягаються при короткочасному спалаху тестера сонячних панелей в заводських або лабораторних умовах. При цьому освітленість повинна бути 1000 Вт/м² і температура фотоелектричного модуля 25 °С. Повний спектр випромінювання повинен відповідати масі повітря 1,5, а швидкість вітру повинна дорівнювати нулю. Це відповідає рівню освітленості і спектру сонячного світла, що падає на поверхню, орієнтовану на південь, під кутом до горизонту 37 ° при висоті сонця над рівнем горизонту 41,81 °. Ці умови симулюють сонячний південь з поверхнею фотоелемента, направленою перпендикулярно сонячним променям. Для

випробувань за тестами СУТ було прийнято значення маси повітря 1.5. Це деяка середня цифра, що дозволяє оцінити втрати в атмосфері на широтах, відмінних від екватора.

Однак, тестові умови СУТ рідко зустрічаються в реальній умовах експлуатації фотоелектричних модулів. Якщо модуль номінальною потужністю 250 Вт, це ще не означає, що його отримана вихідна потужність становитиме 250 Вт за будь-яких умов. Стандартні тестові умови не відображають ефективність і продуктивність сонячного модуля в реальних умовах. Тому робляться спроби визначити критерії, за яких параметри модуля будуть ближчими до тих, які мають місце в реальних умовах.

Для оцінки впливу реальних умов роботи на вироблення модуля були прийняті додаткові параметри. З'явилося поняття Nominal Operating Cell Temperature, тобто температура модуля при типових умовах експлуатації. Номінальна робоча температура сонячного елемента вимірюється при освітленні фотоелектричного модуля сонячним світлом інтенсивністю 800 Вт/м^2 і температурі повітря $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Електричне коло при цьому розімкнене, кут нахилу модуля 45° з орієнтацією на південь. Чим нижчий значення температури модуля при типових умовах експлуатації, тим краще буде працювати модуль в реальних умовах.

Low Irradiance Conditions використовуються для визначення продуктивності сонячного модуля при низькій освітленості, симулюючи роботу сонячних панелей на високих широтах і взимку. Умови тестування включають освітленість 200 Вт/м^2 , температуру модуля $25 \text{ }^\circ\text{C}$, відсутність вітру і спектр, відповідний АМ 1.5.

High Temperature Conditions – умови високих температур, коли модулі тестуються при високих температурах модуля в $75 \text{ }^\circ\text{C}$, освітленості 1000 Вт/м^2 і спектрі АМ 1.5.

Low Temperature Conditions - умови низьких температур на протигагу умовам високих температур передбачають температуру модуля $15 \text{ }^\circ\text{C}$, освітленість 500 Вт/м^2 , швидкість вітру 0 і спектр при АМ 1.5

Останнім часом все частіше для порівняння модулів замість СУТ застосовуються тестові умови ФТУ (Тестові умови фотоелектричних елементів для

інженерних систем використання, Photovoltaics for Utility Systems Applications Test Conditions).

Параметри випробувань ФТУ показують результати тестів сонячних батарей в умовах, більш наближених до реальних, ніж STC. Умови тестів PTC також включають освітленість в 1000 Вт/м^2 , але температура береться не фотоелектричного елемента, як в СУТ, а навколишнього повітря. Панелі повинні знаходитися на висоті 10 м над рівнем землі, температура повітря повинна бути $20 \text{ }^\circ\text{C}$ і швидкість вітру повинна бути 1 м/с.

Переважає більшість виробників вказують тільки параметри за СУТ, які не відображають реальних можливостей фотоелектричних модулів з вироблення електроенергії. Порівнювати фотоелектричні модулі краще за параметрами ФТУ, так як ціна модуля залежить від його номінальної потужності, по співвідношенню потужностей ФТУ/СУТ. Хороші модулі мають це відношення вище 87%. Якщо коефіцієнт ФТУ/СУТ нижче 87 %, то продуктивність таких сонячних батарей є неефективною [75].

Крім того випробування фотоелектричних модулів потрібно проводити відповідно до міжнародного стандарту IEC 61646:2008 [76], що передбачає такий порядок проведення випробувань для підтвердження відповідності функціональним характеристикам:

- візуальний контроль;
- визначення максимальної потужності;
- випробування ізоляції;
- вимірювання температурних коефіцієнтів;
- вимірювання робочої температури модуля;
- характеристики модуля при стандартних умовах випробування та номінальній робочій температурі визначених виробником;
- характеристики при низькій освітленості;
- натурні випробування;
- випробування на стійкість до часткового затемнення;
- випробування на стійкість до впливу ультрафіолетового

випромінювання;

- термоциклювання;
- термоциклювання при високій вологості;
- випробування на стійкість до вологи та високих температур;
- випробування надійності електричних виводів модуля;
- випробування ізоляції в умовах підвищеної вологості;
- випробування на стійкість до механічного навантаження;
- випробування на стійкість до ударів граду;
- температурні випробування шунтуючого діода;
- фотоіндукована деградація.

Крім того, для точних вимірів ККД сонячних елементів необхідно забезпечити повне відтворення стандартних параметрів сонячного випромінювання, таких як щільність потоку, спектральне і кутове розподілення енергії, однорідність і стабільність потоку. У випадку сонячних елементів, то визначення як прямого, так і повного потоку сонячного випромінювання повинне здійснюватись за допомогою піргеліометрів і піранометрів, або за допомогою еталонних сонячних елементів з такою ж селективною спектральною чутливістю, як і у вимірюваних елементах і батареях згідно ІЕС 60904-1:2006 [57]. Тут потрібно вказати, відповідність спектральних чутливостей еталонного і вимірюваного сонячних елементів і батарей впливає на точність визначення коефіцієнта корисної дії і вихідної потужності фотоенергетичних приладів [3].

Вимірювання струму короткого замикання фотоелемента одночасно з дослідженням спектрального складу і щільності падаючого оптичного випромінювання дозволяє отримати уявлення про ефективність кожної стадії процесу перетворення випромінювання в електричну енергію, який відбувається всередині елемента.

Теорія фотовольтаїчного ефекту в напівпровідниках із р-п переходом, що розробляється та уточнюється на протязі останніх десятиліть, дозволяє описати характеристики фотоперетворювачів, пояснити реально отримувані значення ККД і визначити методи їх удосконалення. Втрати потужності у фотоперетворювачах,

пов'язані з дією фундаментальних законів фізики, привели до виникнення поняття «граничного теоретичного ККД», яке дає можливість визначати можливості фотоелектричного методу перетворення енергії і робити вибір найбільш перспективних напівпровідників. Основні фізичні обмеження ККД пов'язані з наявністю «забороненої» зони напівпровідника E_g і відповідно «червоної» межі фотоелектричного ефекту. Максимально можливий ККД перетворювачів сонячного випромінювання біля поверхні Землі становить біля 28% і відповідає ширині забороненої зони.

Отриманий у даний час ККД сонячних елементів $\sim 15\%$ вважають достатнім для виготовлення енергетичних установок вартістю ~ 1 дол./Вт пікової потужності. ККД визначають як (2.7) [3]:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{in}}, \quad (2.7)$$

де I_{sc} – струм короткого замикання; V_{oc} – напруга холостого ходу; FF – коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики; P_{in} – потужність падаючого випромінювання.

Всі три параметри повинні мати якнайбільші значення. Струм короткого замикання визначається відбиваючою здатністю поверхні сонячного елемента і ефективністю збирання носіїв р-п переходом [3].

На основні фотоелектричні параметри сонячних елементів, такі як вольт-амперна характеристика (ВАХ) і спектральна чутливість, впливають і оптичні, і електрофізичні властивості напівпровідника. Тільки детальний аналіз дозволяє визначити, чим викликана недостатньо висока ефективність даного фотоелемента. Для цього насамперед необхідно виміряти основні його характеристики, що дає можливість зрозуміти причини виникнення, природу і більшість видів втрат.

Важливим моментом роботи сонячних елементів є їх залежність від температури. В яскравий сонячний день СЕ в модулях нагріваються, втрачаючи ККД через падіння напруги на кожному р-п переході. А ККД кремнієвих сонячних елементів, що серійно випускаються сьогодні на Україні, знаходиться в межах до

20%. За умов нагріву сонячного елемента на один градус після 25°C, він втрачає в напрузі 0,002 В, тобто 0,4 % на 1°C. [3].

Через особливості побудови фотоелектричних перетворювачів виникають зниження ефективності сонячних панелей з ростом температури, тому сучасні методики визначення робочих параметрів ФЕП враховують температурний коефіцієнт, що змінюється в залежності від пори року (взимку ближче до 0,7, влітку наближається до 0,5).

Проаналізувавши особливості визначення ККД сонячних колекторів і батарей стає очевидним, що одним із основних параметрів які потрібно вимірювати з високою точністю є значення густини потоку сонячного випромінювання, що падає на приймаючу поверхню. Для цього, згідно [14], слід використовувати спеціалізоване випробувальне обладнання, що описане у розділі 2. Але, оскільки використання такого обладнання потребує значних економічних затрат і тривалої процедури налаштування, вітчизняні виробники змушені звертатися до зарубіжних випробувальних центрів, або вносити в технічну документацію не стандартизовані теплотехнічні показники. Наприклад, часто для визначати кількість сонячної енергії, яка надходить на довільно орієнтовану в просторі поверхню, у будь-який момент часу для заданого регіону, використовують аналітичні залежності, дані із метеорологічних станцій, або ж з відповідної літератури. В таких випадках, пропонується використовувати формулу (2.8) [9]:

$$Q = I_0 \left(0,29 \cdot \cos \varphi + 0,52 \cdot \frac{n_r}{n_p} \right), \quad (2.8)$$

де Q - денна сума сонячної енергії в горизонтальній площині, Вт·год/(м²·день); I_0 - сонячна стала Вт·год/(м²·день); φ - географічна широта, град.; n_r , n_p - дійсна і можлива кількість годин сонячного сяяння за день, год.

Для оцінки сонячної енергії, яка надходить на сонячний колектор протягом дня, можна скористатись залежністю [9] за визначення кута падіння прямої сонячної енергії (2.9):

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \\ & + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \tau + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \tau, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де θ - кут падіння прямої сонячної енергії, що вимірюється між напрямком випромінювання і нормаллю до поверхні; δ - схилення Сонця; φ - географічна широта місцевості; β - кут нахилу поверхні колектора до горизонтальної площини; τ - часовий кут Сонця у певний період часу, відраховується від моменту істинного полудня; γ - азимутальний кут, відхилення нормалі до сонячного колектора від місцевого меридіана (відхилення на схід вважається додатним, на захід – від'ємним).

Проте існують труднощі у визначенні цих значень, особливо статистичним опрацюванням даних про сонячну енергію метеостанцією необхідного регіону, що не завжди можливо. І як висновок, така методика є не відповідає вимогам стандартів щодо вимірювання параметрів сонячного випромінення і не рекомендується.

2.2. Вимоги нормативних документів до метрологічних характеристик величин під час випробувань сонячних колекторів

1. Вимірювання сонячного випромінення:

- діапазон довжин хвиль 0,3 ... 3 мкм;
- відхилення від площі апертури $\leq \pm 1^0$.

Періодичність калібрування на сонячну чутливість протягом календарного року за ДСТУ ISO 9846 та ДСТУ ISO 9847 [58, 59]. Зміни чутливості не повинні перевищувати ± 1 %, в противному разі додаткові частіші калібрування.

2. Вимірювання теплового випромінення:

- діапазон довжин хвиль 1 ... 50 мкм;
- похибка вимірювання $\leq \pm 10$ Вт/м².

3. Вимірювання температури:

а) Вимірювання вхідної температури рідинного теплоносія (t_{in}):

- діапазон вимірювання 0 ... +100 °С;
- похибка вимірювання $\leq \pm 0,1$ °С;
- роздільна здатність $\geq \pm 0,02$ °С.

б) Вимірювання різниці температур рідинного теплоносія (ΔT):

- діапазон вимірювання 0 ... +100 °С;
- похибка вимірювання $\leq \pm 0,1$ °С (бажано $\leq \pm 0,02$ °С).

в) Вимірювання температури довкілля (t_a):

- діапазон вимірювання $0 \dots +50 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- похибка вимірювання $\leq \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

4. Вимірювання швидкості потоку рідини в колекторі:

- діапазон вимірювання - в залежності від типу сонячного колектора;
- похибка вимірювання $\leq \pm 0,1 \text{ } \%$ від масової витрати носія.

5. Швидкість вітру:

- діапазон вимірювання $0 \dots 20 \text{ м/с}$;
- похибка вимірювання $\leq \pm 0,5 \text{ м/с}$.

Значення усереднюються за певний час через рівні проміжки часу

6. Вимірювання тиску:

- похибка вимірювання $\leq \pm 3,5 \text{ кПа}$.

7. Вимірювання площі колектора:

- похибка вимірювання $\leq \pm 0,1 \text{ } \%$.

8. Вміст рідини в колекторі:

- похибка вимірювання $\leq \pm 10 \text{ } \%$.

Під час випробовування загальна поверхнева густина потоку сонячного випромінення на площині апертури колектора має перевищувати 800 Вт/м^2 [14].

Кут надходження прямого сонячного випромінення на апертуру колектора має бути в діапазоні, за якого модифікатор кута надходження на колектор відрізняється не більше ніж на $\pm 2\%$ від свого значення у разі перпендикулярного надходження. Для звичайних закслених пласких колекторів ця умова зазвичай задовольняється, якщо кут надходження прямого сонячного випромінення на апертуру колектора не перевищує 30°C . Проте окремі конструкції потребують значно менших кутів. Щоб визначити робочі характеристики колектора за інших кутів, може бути обчислено модифікатор кута надходження.

Середнє значення швидкості навколишнього вітру, зважаючи на просторові зміни навколо колектора і тимчасове змінення протягом випробувального періоду, має бути в межах 2 м/с і 4 м/с .

Якщо інше не рекомендовано, то швидкість потоку рідини повинна бути приблизно 0,02 кг/с на один квадратний метр загальної площі колектора. Це значення треба підтримувати з допустимими відхилами $\pm 1 \%$ встановленого значення протягом кожного випробувального періоду і під час переходу від одного випробувального періоду до іншого воно не повинно коливатися більш як на $\pm 10 \%$ від встановленого значення [14].

У деяких колекторах рекомендована швидкість потоку рідини може бути близькою до швидкості в перехідній зоні між ламінарним та турбулентним потоками. Це може призвести до нестабільності коефіцієнта внутрішнього теплообміну та, як наслідок, до відхилів вимірюваннях для визначення ККД колектора. Для того щоб схарактеризувати роботу подібного колектора відтворюваним чином, може бути застосована більш висока швидкість потоку, проте це чітко мають засвідчити результати випробування.

Результати вимірювань перепадів температур рідини, що не перебільшують 1,5 К, до результатів випробування, через відповідні проблеми з точністю апаратури, не залучають.

Аналіз показує, що вимоги поставлені в міжнародних стандартах до контрольної-вимірювальної апаратури для вимірювання сонячного та теплового випромінення і температури є достатньо високими і регламентують трудоміну та тривалу процедуру їх калібрування [14-16]. 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 [58, 59].

За вимогами нормативних документів мінімальне значення різниці вимірюваних температур не повинно бути меншим $\Delta T_{xmin} \geq 1,5$ К, що із врахуванням абсолютної похибки вимірювання різниці температур $\Delta \Delta T_x \leq \pm 0,1$ К дає значення її відносної похибки $\delta_{\Delta T} \approx \pm 6,7 \%$. Враховуючи це мінімальне значення температурного перепаду і, наприклад, для доволі великих значень відносної похибки вимірювання різниці температури $\delta_{\Delta T} \leq \pm 2 \%$, абсолютна похибка не повинна перевищувати $\Delta \Delta T_x \leq \pm 0,030$ К, а одиниця молодшого розряду становити $0,01^\circ\text{C}$ [17]. Таке значення

похибки вимірювання різниці температур можна забезпечити тільки проведенням калібрування стандартних температурних сенсорів в термостаті, наприклад, типу ТСР-НО або шляхом підбору пар ТО.

Для зменшення впливу розкиду запропоновано використовувати сенсори у вигляді послідовно з'єднаних НПТ, що одночасно дозволяє ї збільшити їхню чутливість. Наприклад, у випадку використання п'яти НПТ, чутливість вимірювання температури і різниці температур становитиме $\varepsilon_n=10$ мВ/К, і за типового значення технологічних розкидів початкових напруг діодів $\pm(0,5...5)$ % похибка вимірювання різниці температур не перевищуватиме $\Delta U_x \leq \pm(0,5...5)10^{-2} \cdot 5 \cdot 0,6 = \pm(0,015...0,15)$ В $\Delta T_x \leq \pm(1,5...15)$ °С. Таке значення розкиду потребуватиме підстроювання функції перетворення усього термометра [29].

Тому, основною проблемою напівпровідникових температурних сенсорів на сьогодні є забезпечення уніфікації їх характеристик, що значно їх здешевить, а також покращить їх метрологічні характеристики.

2.3. Дослідження можливостей еталонування випромінювальної здатності випромінювача та приймача сонячного випромінювання

Аналіз показує, що для досягнення зазначених вимог у нормативних документах [14-16] доцільним є еталонування випромінювальної здатності випромінювача або приймача сонячного випромінювання. При цьому з практичної точки зору для вдосконалення процедури вимірювань енергетичних параметрів оптичного випромінювання зручніше використовувати відкалібрований неселективний приймач, який буде забезпечувати достатню точність вимірювань у всьому спектрі випромінювання. Тому пошук можливих шляхів подальшого розвитку методів і засобів вимірювання параметрів сонячного випромінювання є актуальним завданням.

Найпридатнішою за спектральною характеристикою випромінювання для імітації сонячного випромінювання є ксенонова лампа, як являє собою газорозрядну колбу, наповнену сумішшю інертних газів, що включають ксенон (рисунок 2.1). Оскільки ця лампа немає нитки розжарення то електрична дуга виникає між двома електродами.



Рисунок. 2.1 – Вигляд ксенонової лампи типової конструкції

Ксенонові лампи випромінюють в два рази більше світла, ніж галогенові лампи і в той же час споживають менше енергії, що знижує навантаження на генератор.

Для визначення ККД сонячного елемента визначають потужність випромінювання: люксометром вимірюють освітленість E в центрі (E_u) і в чотирьох крайніх крапках поверхні (E_1, E_2, E_3, E_4) сонячного елемента й обчислюють її середнє значення E_{cp} , лк. Обчислюється щільність потоку випромінювання W (енергетичну освітленість), використовуючи співвідношення між лк і $Вт/м^2$ для білого світла. Враховуючи площу сонячного модуля (S , $м^2$) визначають потужність випромінювання що падає на його поверхню (2.10):

$$P_{випр} = W \cdot S. \quad (2.10)$$

Отже (2.11):

$$ККД = P_{мод} / P_{вип}, \quad (2.11)$$

де $P_{мод}$ - потужність одного модуля.

Враховуючи значення відносної інтегральної чутливості сонячного модуля спектру випромінювання обраного типу лампи та сонячного випромінювання обчислюється значення ККД сонячного елемента при дії на нього сонячних променів (2.12):

$$ККД_c = \frac{\sum(S_\lambda * \Phi_\lambda)_c}{\sum(S_\lambda * \Phi_\lambda)_л} * ККД. \quad (2.12)$$

Розробка штучних джерел світла – імітаторів Сонця, які за густиною потоку, спектральному та кутовому розподілу енергії, однорідності і стабільності потоку були б найбільш близькими до сонячного випромінювання у космічних чи наземних

умовах, є досить складним завданням.

Проведений аналіз [54] показав, що імітування наземного (AM1,5) Сонця є ще більш складною задачею. Складність полягає в тому, що інтенсивність та спектр сонячного випромінювання на поверхні Землі має складний характер, що залежить від великої кількості факторів: висоти Сонця над горизонтом, висоти місцевості над рівнем моря, а також стану атмосфери. Висота Сонця над горизонтом визначає оптичну довжину шляху променів в атмосфері і характеризується атмосферною масою, яка дорівнює $m = 1$ при нормальному падінні ($\alpha = 90^\circ$, умови AM1), $m = 1,5$ ($\alpha = 49^\circ$, умови AM1,5), $m = 2$ ($\alpha = 30^\circ$, умови AM2). Проходячи крізь атмосферу, сонячне випромінювання селективно поглинається водяною парою, озоном, вуглекислим газом, киснем та ін., а також розсіюється на аерозолях та молекулах газів. Внаслідок цього інтенсивність та спектр сонячних натурних умов суттєво відрізняється від стандартних наземних умов, за які прийнято деякі середні умови AM1,5.

Спектральний склад випромінювання імітаторів наземного Сонця ще в більшій мірі відрізняється від стандартного спектру AM 1,5. Крім того, такі прилади є дуже складними та дорогими навіть для випробувань окремих ФП. Задовольнити вказані вимоги у випадку фотоенергетичних випробувань модулів і батарей ФП, особливо забезпечити прийнятну однорідність потоку на площі, що відповідає габаритним розмірам модуля або СБ, надзвичайно складно. Тому на практиці широке розповсюдження мають імітатори Сонця на основі вольфрамових ламп розжарення. Такі імітатори стабільні, прості, зручні в використанні, мають невисоку вартість. Проте спектральний склад їхнього випромінювання істотно відрізняється від стандартних спектрів AM0 і AM1,5, що може приводити до значних похибок у визначенні фото енергетичних параметрів ФП і БФ.

В ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАН України розроблена автоматизована установка вимірювання фотоенергетичних параметрів ФП і СБ з імітатором неперервної дії на основі галогенових вольфрамових ламп розжарення. Задовільні метрологічні характеристики на цих імітаторах вдалося отримати за допомогою використання спеціально розроблених еталонних ФП і методики. Це дало можливість врахувати і

зменшити похибки вимірювань, пов'язані з недостатньою спектральною корекцією світла для стандартних умов освітлення АМ0 або АМ1,5 [56].

Тому задача розроблення і метрологічної атестації еталонних ФП, виготовлених на основі різних матеріалів (Si, GaAs, багатоперехідні ФП і інш.) є дуже актуальною.

Слід зазначити, що зараз все більш широкого застосування набувають імпульсні системи вимірювання фотоенергетичних параметрів ФП і СБ наземного призначення, які визначені міжнародними стандартами ІЕС 61215:2005 [55] і ІЕС-904-9:2007 [77] в якості основних при проведенні випробувань.

Порівняно з імітаторами неперервної дії на основі ксенонових дугових ламп і галогенових ламп розжарення, імітатори на основі імпульсних ксенонових ламп-спалахів мають ряд суттєвих переваг. Основні з них наступні: спектр випромінювання таких ламп найбільш близько відповідає сонячному, за їх допомогою простіше отримати рівень енергетичної освітленості, що відповідає стандартним умовам АМ0 (1360 Вт/м^2) і АМ1,5 (1000 Вт/м^2) і забезпечити рівень однорідності просторового і часового розподілу енергетичної освітленості $\pm 2 \%$, який відповідає вимогам міжнародного стандарту 904-9:2007 [77] для імітаторів класу А, практично відсутнє нагрівання об'єкта випробувань (ФП або СБ) і самого імітатора, оскільки час спалаху триває декілька мілісекунд.

Разом з тим, імпульсні системи потребують розробки швидкодіючих систем реєстрації вихідних параметрів ФП і СБ, а також швидкодіючих спектрометрів для реєстрації спектрів випромінювання імпульсних ламп.

В ІФН ім. В.Є.Лашкарьова НАН України, розроблена автоматизована система вимірювання фотоенергетичних параметрів СБ з імітатором на основі імпульсної ксенонової лампи-спалаху, яка відповідає вимогам наведених вище стандартів. Система призначена для перевірки працездатності і визначення фотоенергетичних параметрів СБ встановленою потужністю до 320 Вт на різних етапах їх виготовлення і штатної експлуатації. В даний час в завершальній стадії знаходиться розроблення програми метрологічної атестації на неї.

Крім того застосування еталонних імітаторів сонячного випромінювання в останні

роки намітилася тенденція створення еталонів на базі приймачів, що значно спрощує передачу і підвищує точність відтворення одиниць фотометричних величин. У зв'язку з цим, однією з найбільш нагальних і актуальних проблем сучасної метрології є розробка приймачів оптичного випромінювання, здатних вимірювати фотометричні величини в абсолютних одиницях з високою точністю, що дозволяє вирішувати ті складні метрологічні задачі, які існують в сучасній науці і промисловості [78]. Однією з найскладніших проблем при здійсненні світлових і спектрорадіометричних вимірювань є малі рівні потоків випромінювання (10^{-5} Вт у видимій, 10^{-7} Вт в УФ областях спектру). У зв'язку з цим приймачі, що розробляються, повинні мати, крім високої точності, ще й високу чутливість. Отримати приймачі з такими властивостями стало можливим завдяки розвитку в останні роки кріогенної радіометрії. Приймачі, охолоджувані до температури рідкого гелію, завдяки значному поліпшенню теплових характеристик приймальних елементів при охолодженні здатні вимірювати такі потоки випромінювання з похибкою на рівні 0,01%. Однак для цього при розробці необхідно вирішувати цілий ряд задач, таких як оптимізація конструкції приймача, розробка методу подавлення фонового випромінювання, проведення експериментальних і теоретичних досліджень метрологічних характеристик.

Похибки відтворення фотометричних і спектрорадіометричних величин за допомогою МЧТ і абсолютних теплових приймачів з електричним заміщенням, що працюють за умов кімнатних температур, приблизно однакові і складають 0,1%. Однак, якщо порожнинні приймачі з електричним заміщенням охолоджувати до температури рідкого гелію (нижче 5К), то їхні метрологічні характеристики поліпшуються більш ніж на порядок. Радіометри, в якій приймачі охолоджуються рідким гелієм, називаються кріогенними. У кріогенних радіометрах, завдяки значному зниженню при глибокому охолодженні теплових втрат на випромінювання, а також використанню проводів для підводів, із надпровідного сплаву з поганою теплопровідністю, реалізується висока еквівалентність електричного заміщення. Крім того, завдяки різкому зниженню теплоємності міді за умов кріогенних температур, приймачі можуть мати масивні порожнини з високим

коефіцієнтом поглинання і при цьому здатні вимірювати низькі рівні потужностей 10-5 Вт. Усі ці фактори призводять до похибки таких радіометрів на рівні менш ніж 0,01 % [78].

У зв'язку з тим, що криогенний приймач є дорогим приладом і потребує витрати дорогого рідкого гелію, його широке використання стає неможливим. Тому однією з найбільш актуальних проблем є розробка приймачів випромінювання, які могли б бути відкалібровані за криогенним радіометром, і надалі б використовувались замість нього протягом тривалого часу. Такими можуть бути приймачі, виготовлені на основі тонкоплівкової технології, які працюють при кімнатній температурі, неселективні, мають високу чутливість і здатні вимірювати потоки на рівні 10^{-5} – 10^{-6} Вт. Для розв'язання цієї задачі також необхідно при розробці оптимізувати конструкцію приймача, розробити систему подавлення дрейфу фонового сигналу, провести теоретичні й експериментальні дослідження його метрологічних характеристик [78].

Проведено теоретичний і експериментальний аналіз похибок абсолютного приймача, що розділяються на дві групи: інструментальні похибки і похибки, обумовлені нееквівалентністю електричного заміщення. Інструментальні похибки визначаються точністю вимірювань напруги під час визначення потужності електричного заміщення. Похибка вимірювання потужності електричного заміщення за умови використання цифрового вольтметра приблизно дорівнює 0,01%.

Найбільш складним завданням є визначення нееквівалентності електричного заміщення. Тут необхідно виділити кілька основних її джерел: похибка розрахунку поглинальної здатності радіометра; різні градієнти температур у порожнині при електричному заміщенні й опроміненні; теплові втрати по проводах - підводах; похибка, обумовлена термічним опором поглинаючого покриття порожнини приймача; стабільність температури теплостоку.

Отже, для того щоб не використовувати часто криогенний радіометр з'явилася необхідність створення неселективного вакуумного плівкового радіометра, що був би придатний для спектрорадіометричних вимірювань за схемою лампа-

монохроматор-приймач, і який би міг забезпечити вимірювання радіаційного потоку на рівні $5 \cdot 10^{-6}$ Вт. Для приймача подібного типу не потрібно гарантувати еквівалентність електричної і радіаційної потужності, її досить вимірювати шляхом калібрування приймача за кріогенним радіометром, і далі у виді сталості нееквівалентності цей приймач можна використовувати тривалий час, що робить не обов'язковим часте використання кріогенного радіометра.

Тому у світі переважає тенденція створення еталонів на базі абсолютних приймачів, які значно спрощують і підвищують точність відтворення і передачі одиниць фотометричних величин. За допомогою теплових приймачів з електричним заміщенням можна вимірювати потік випромінювання в абсолютних одиницях.

2.4. Теоретичні дослідження можливостей вдосконалення абсолютного радіометра з електричним заміщенням

Однією з найбільш поширених вимірюваних величин в радіометрії некогерентного оптичного випромінювання традиційно вважається енергетична освітленість. Зростаючі вимоги практики до точності вимірювань як на рівні еталонів, так і в технічних вимірюваннях викликали порівняно нові підходи до розробки засобів вимірювання (ЗВ) радіометричних величин, що виразилися в прагненні до створення і використання в різних вимірювальних задачах самокалібрувальних приладів. Основними питаннями при цьому є простежуваність (метрологічно обгрунтований шлях отримання розмірів радіометричних одиниць від еталонів) та стабільність. Більше того, технічно обгрунтовано за допомогою цих ЗВ відтворювати одиниці фізичних величин в радіометрії не тільки в еталонних випромінювачах, але в первинних вимірювальних перетворювачах (ПВП) з використанням принципів самокалібрування. Тому в прецизійній оптичній радіометрії провідне становище починають займати абсолютні радіометри. Різниця між радіометром і абсолютним радіометром полягає в тому, що перший з них для вимірювань потоку або оптичної потужності в абсолютних одиницях вимагає калібрування за допомогою еталонних джерел випромінювання або оптико-

електричного вимірювального перетворювача (ОЕВП). Абсолютний радіометр є приладом, що калібрується за методом електричного заміщення (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Загальна схема радіометра з електричним заміщенням, де i_h є підвищений струм, що подається через нагрівач з опором R , необхідний для підтримки температурної стабільності

При цьому передбачається можливість оцінки рівня падаючого оптичного випромінювання і наступного його порівняння з еквівалентною дією електричного сигналу, що найчастіше називають електричним заміщенням (ЕЗ). Основою концепції ЕЗ є те, що тепловий ефект від заміщеного джерела електричної енергії еквівалентний тепловому ефекту від впливу вимірюваної оптичної потужності, яка вимірюється безпосередньо, тобто теплові ефекти від обох джерел енергії безпосередньо еквівалентні [74].

Однак, тут можливі втрати оптичного випромінювання за рахунок неповного попадання в приймальний елемент, наявність зонної характеристики приймального

елемента і вплив фонові засвітки. Багато з цих джерел похибок можуть бути скориговані шляхом охолодження радіометра та його калібрування за криогенних температур (зокрема за температури рідкого гелію приблизно 4 К), але це є досить дорогим технічним рішенням [74].

Абсолютна радіометрія з електричним заміщенням зазвичай реалізується за допомогою теплових ПВП, тобто перетворювач забезпечується спеціальною обмоткою, в якій виділяється достатньо точно вимірювана потужність (або енергія) постійного (або змінного) струму, що постачається в цю так звану обмотку заміщення стороннім джерелом живлення. З метрологічної точки зору це означає, що в абсолютному радіометрі (АР) реалізується добре зарекомендований в техніці точних вимірювань, методом заміщення, в якому можна мінімізувати систематичні похибки, заснований на заміщенні вимірюваної величини відомою величиною, що відтворюється мірою. Тому такі прилади часто називають (особливо в Північній Америці) електрично каліброваними радіометрами («Electrically Calibrated Radiometers» або «ECR»). У метеорології їх зазвичай називають компенсаційними піргеліометрами («Compensation Pyrheliometer»).

Абсолютні радіометри використовуються для вимірювання потоку (потужності) випромінювання в абсолютних одиницях - ватах. Якщо точно відома площа опромінюваної поверхні, то можна, знаючи вимірний потік, обчислити енергетичну освітленість (опромінення). Падаючий потік випромінювання поглинається, як правило, приймачем теплового ПВП. У результаті поглинання потоку випромінювання підвищується температура приймальної площини і всього чутливого елемента перетворювача, що створює вихідний електричний сигнал і відтворюваний потім за допомогою обмотки заміщення.

З урахуванням факторів, що впливають на результат вимірювання (вони ж є джерелами похибок) визначається значення потоку (потужності) падаючого випромінювання.

Ідеальний вимірювальний процес, що протікає в АР, представлений на рисунку 2.3 а, з якого видно три основні його стадії: перетворення оптичної потужності в тепло; перетворення електричної потужності в тепло; сприйняття і перетворення

теплового потоку в електричний вимірювальний сигнал. В ідеальному АР всі три функції виконує один і той же чутливий елемент, оскільки в ньому шляхи поширення оптичної та електричної потужності від поверхонь їх сприйняття до перетворювача в електричний вимірювальний сигнал однакові, і коефіцієнт заміщення дорівнює одиниці. Під останнім мається на увазі відношення електричних вимірювальних сигналів, що по черзі створені впливом на чутливий елемент АР вимірюваної оптичної та заміщуваної електричної потужностей [79]. Чутливим елементом або сенсором абсолютного радіометра є перша частина в вимірювальному ланцюзі перетворювального елемента, що знаходиться під безпосереднім впливом вимірюваної величини.

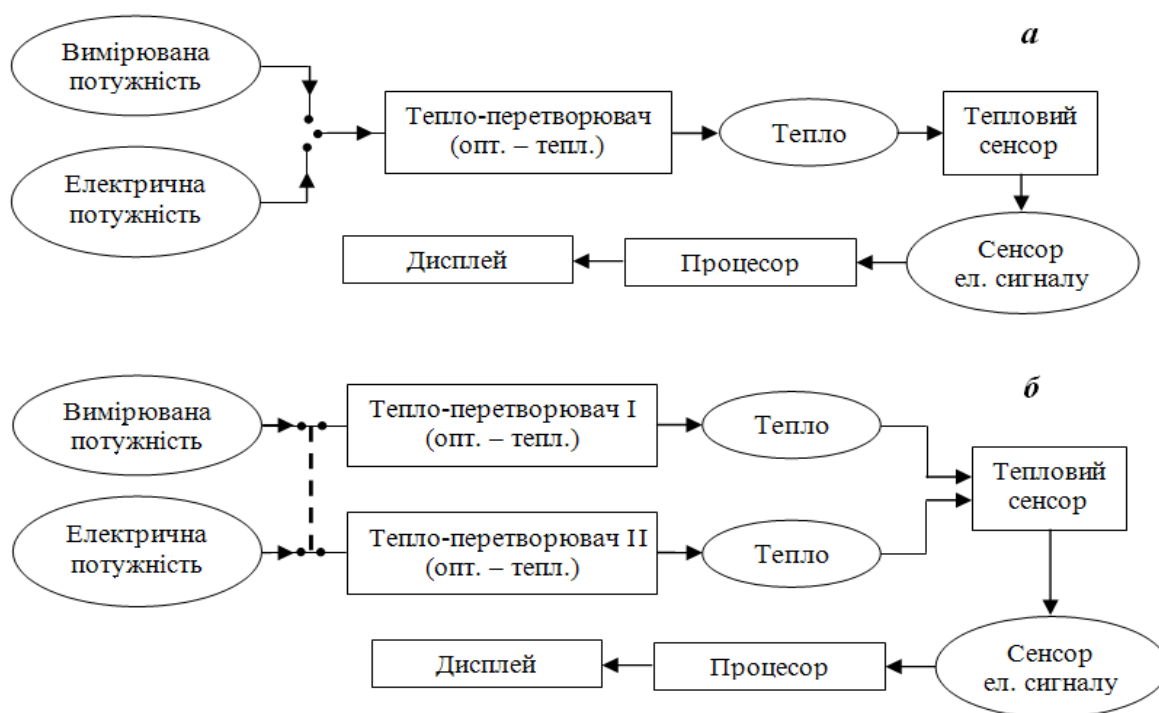


Рисунок 2.3 – Процеси перетворення в абсолютному радіометрі:

а - ідеальний АР; б - реальний АР

У реальному АР (див. рисунок 2.3 б) обидва шляхи неідентичні, це призводить до відмінності коефіцієнта заміщення від одиниці і виникнення нееквівалентності заміщення, що в подальшому викликає похибки приладу.

На рисунку 2.3 б відмінність шляхів розповсюдження потужностей відображається наявністю двох неідентичних перетворювачів I і II в тепло. Крім

відмінності в шляхах поширення тепла, другою причиною, що викликає нееквівалентність заміщення, є різниця між коефіцієнтами перетворення оптичної та електричної потужностей в тепло.

При падінні оптичної потужності на приймальну поверхню спостерігаються процеси поглинання, відбиття, розповсюдження, люмінесценції, фото-електричні ефекти, структурні зміни матеріалу і т. д. В деяких випадках (фотоелектронна емісія на довжинах хвиль вакуумного ультрафіолету, структурні зміни матеріалу під впливом високо інтенсивних пучків) впливами цих процесів і ефектів на ПВП можна знехтувати.

Матеріал, в якому домінує процес перетворення оптичної енергії в теплову енергію називається поглиначем. Для такого непрозорого поглинача справедливе співвідношення (2.13) [79]:

$$a(\lambda) = 1 - \rho(\lambda), \quad (2.13)$$

де $a(\lambda)$ і $\rho(\lambda)$ - спектральні коефіцієнти поглинання і віддзеркалення, відповідно.

Коефіцієнт $a(\lambda)$ можна визначити, як ефективність теплоперетворення поглинача на певній довжині хвилі λ . Для використання в АР рекомендовано вибирати матеріали з високим $a(\lambda)$ і по можливості неселективні. Крім того, матеріал повинен мати високу теплопровідність, а для зменшення термічної інерційності необхідна мала теплоємність. До матеріалу поглинача висуваються також вимоги надійної адгезії з підкладкою, механічної міцності, довготривалої стабільності всіх перерахованих властивостей.

В абсолютних радіометрах набули поширення основні чотири типи приймальних елементів, що розрізняються конструктивною побудовою: порожнинні, дискові, дискові з відбивачами, конічні [79].

Зачорнена поверхня порожнинного приймального елемента з малим вхідним отвором може мати коефіцієнт поглинання порядку 0,999 і більше, причому його відхилення від одиниці розраховуються досить точно [79]. Отже ПВП з таким поглиначем практично неселективні в широкому діапазоні довжин хвиль, що є його головною перевагою. До числа недоліків слід віднести велику теплоємність, нерівномірність зонної характеристики, труднощі забезпечення ідентичності

розподілу теплової потужності, перетвореної з оптичної та електричної потужностей. З іншого боку, тепловий опір поглинаючого шару надає слабкий вплив, так як теплові втрати на теплопровідність і конвекцію малі. Крім того, важливою перевагою приймача з приймальним елементом такого типу дає можливість працювати при криогенних температурах [79].

У дискових приймальних елементах - плоска приймальня поверхня у формі диска, що покривається матеріалом, який поглинає оптичне випромінювання. Вони можуть мати малу теплоємність, але теплопровідності поглинача і підкладки повинні бути гранично великими. Коефіцієнт поглинання залежить, в першу чергу, від геометрії шару поглинаючого матеріалу. Для суттєвого збільшення ефективного коефіцієнта поглинання дискового приймального елемента його поміщають в центрі напівсфери [79].

У конічних приймальних елементах переважно використовуються конус з дзеркальною поверхнею поглинання оптичної потужності. Важливим параметром є радіус кривизни вершини конуса [79]. Велику роль у підвищенні коефіцієнта поглинання приймальної поверхні, у всіх чотирьох типах приймальних елементів, мають матеріали для її затемнення.

Вибір типу теплового сенсора тобто певного типу з чотирьох груп теплових детекторів (термопар, термостовпчики, болометри, термістори), визначається особливостями застосування абсолютного радіометра і допустимим, для його використання за призначенням, значенням шумової еквівалентної потужності зазвичай знаходяться для теплових ОЕВП в діапазоні від декількох мікровоат на квадратний сантиметр до приблизно 100 нВт/см^2 [79].

Оскільки мова йде про тепловий первинний вимірювальний перетворювач, то важливе місце займають джерела похибок, які часто ділять на дві групи: похибки від впливу навколишнього середовища і похибки, що властиві самому приладу, які називають інструментальними чинниками. В першому випадку для мінімізації похибок результату вимірювань слід компенсувати вплив середовища, що оточує систему випромінювач - оптичне коло - радіометр, у другому випадку корекція зводиться до усунення наслідків, що зумовлені розходженням шляхів, по яких

поширюються оптична і електрична потужності. У обох груп є спільні риси, а в кожній з груп - свої підгрупи факторів.

Слід відмітити, що перша група джерел похибок не має безпосереднього відношення до ПВП теплового типу. Фактори першої групи створюють методичні та інструментальні похибки внаслідок їх впливу на процес проходження випромінювання до входу його в ПВП. Отже, їх слід було б враховувати при аналізі точності вимірювань АР, при вирішенні конкретних вимірювальних завдань, що і буде зроблено надалі.

У першій групі чітко помітні наступні фактори:

1) дифракція на діафрагмах оптичного шляху, розташованих між випромінювачем і ПВП радіометра;

2) поглинання випромінювання водяною парою, вуглекислим газом, киснем, що містяться в повітрі (при довжинах хвиль менших 230 нм);

3) скінченна товщина тонких фільтрів в оптичному шляху.

Розглянемо другу групу впливаючих факторів, які названі інструментальними. У першу чергу це відноситься до нееквівалентності заміщення.

Отримання рівних вихідних сигналів теплового ПВП, створених впливом оптичної та електричної потужностей, не означає, що значення оптичної та електричної потужностей точно рівні один одному. По-перше, частина електричної потужності досягає чутливого елемента ПВП по струмопровідних обмоткам заміщення. З іншого боку, не вся оптична потужність повністю поглинається приймальною поверхнею теплового сенсора, невелика частина відбивається. Поверхня навколо вхідної апертури сенсора нагрівається падаючим потоком випромінювання.

Оскільки оптична і електрична потужності не розсіюються однаково в одних і тих же напрямках та місцях чутливого елемента сенсора, то теплові втрати в обох випадках є загалом різними і коригувальний вираз включатиме значення часткових теплових втрат за рахунок нееквівалентності заміщення, а також за рахунок теплопровідності і конвекції з фронтальної поверхні приймача, через просторовий розподіл теплової потужності по освітлюваній поверхні, який зазвичай описується

функцією в полярних координатах з початком в центрі приймальної поверхні.

Крім розглянутих основних впливаючих факторів, що у тій чи іншій мірі впливають на теплові ПВП будь-якого АР, існують й інші джерела похибок, які залежно від використаної елементної бази можуть спотворювати результати вимірювання. Ці похибки виключаються належним конструюванням ПВП і вибором електронної схеми АР, частішими електричними калібруваннями приладу в цілому і його окремих компонентів, ретельним контролем параметрів навколишнього середовища або шляхом їх коригування (в ручному або в автоматичному режимах). До числа можливих впливаючих чинників належать: недосконалість електричної ізоляції чутливого елемента; виникнення паразитних термоЕРС; залежність від температури коефіцієнта перетворення ПВП, коефіцієнта підсилення підсилювача і зсуву нуля; вплив вхідних параметрів підсилювача на характеристики ПВП; шуми та паразитні коливання в колі зворотного зв'язку електронної схеми АР; неточність значення опору еталонного резистора в схемі вимірювання струму в обмотці заміщення; неврахування вхідного опору вольтметра на затискачах резистора і похибка приладу; похибка за рахунок циркуляції паразитних струмів між затискачами кола. Однак ці фактори завдяки скрупульозному конструктивному виконанню можуть істотно не впливати на точність результатів технічних вимірювань, виконуваних з використанням АР. Разом з цим під час виконання еталонних вимірювань, особливо на рівні первинних і вторинних радіометричних еталонів, проводиться ретельний аналіз результатів впливу кожного із факторів, вплив яких не вдалося зкомпенсувати під час конструювання АР [79].

Зміни чутливості приймачів сонячного випромінювання залежать від змін їх поглинальної здатності, викликаних можливим забрудненням поверхні через дифузію матеріалів і їх старіння, а також змін впливаючих факторів, таких як температура, вологість, тиск, швидкість вітру і т.п. Проведений аналіз показав, що інформативним параметром калориметричних радіометрів з електричним заміщенням в кінцевому підсумку можна вважати різницю температур приймача випромінювання і навколишнього середовища, оскільки у випадку незмінності умов довкілля за час вимірювань приймач випромінювання нагрівається до одного значення

температури під час дії різних джерел енергії. Слід зазначити, що зменшення впливу зміни температури навколишнього середовища на покази радіометрів пов'язано з певними технічними труднощами, що обумовлені їх недостатньо високими чутливістю і швидкодією, а також труднощами вимірювання інтегрального значення температури поверхні приймача, які, зазвичай, мають доволі складну конфігурацію [18].

Головним вимірювальним елементом державного еталону енергетичної освітленості є сферичний порожнинний радіометр з одноканальним виходом на вторинний прилад індикації нагріву його приймального елемента. З метою збільшення чутливості в радіометрі здійснюється інтегрування температурного поля, чутливої приймальної поверхні, при цьому її блок термоіндикації є єдиною термобатареею, яка представляє собою N послідовно з'єднаних термоелементів. При цьому набір послідовно з'єднаних термопар необхідно розташувати на поверхні сферичного приймального елемента в площині перпендикулярній до оптичної осі випромінювання. Вихідний сигнал такої термобатарей є пропорційним до середньої температури нагріву приймального елемента радіометра і буде складатися із суми ЕРС усіх термопар і буде враховувати азимутну симетрію як самого приймального елемента, так і потоку опромінення [80].

Недоліком цієї конструкції є мала чутливість, залежність систематичної похибки від оптико-фізичних та геометричних характеристик приймальної порожнини, значення потоку опромінення, а також нестабільності коефіцієнта перетворення термопар. Окрім того під час використання радіометра необхідний трудоемкий і тривалий процес підбору пар термопар з метою знаходження потрібної точності вимірювання температур [80].

На рисунку 2.4 представлено вдосконалену структуру електричної частини радіометра з електричним заміщенням, принцип дії якої полягає у наступному: спочатку із відкритою вхідною діафрагмою для сприйняття сонячного випромінювання нагрівається приймальна поверхня (приблизно на 1–2 К над температурою довкілля), вимірюється різниця її температури та температури довкілля, значення якої фіксується в контролері КНТ; потім відбувається охолодження приймаючої

поверхні радіометра до температури довкілля; в наступному циклі замикається перемикач $S_{\text{НАГР}}$ і через VD_{X1} пропускається струм, який розігріває приймаючу поверхню до зафіксованої температури; після чого вхідна діафрагма для сприйняття сонячного випромінення закривається і приймаюча поверхня охолоджується до температури довкілля. Далі процес повторюється скільки необхідно.

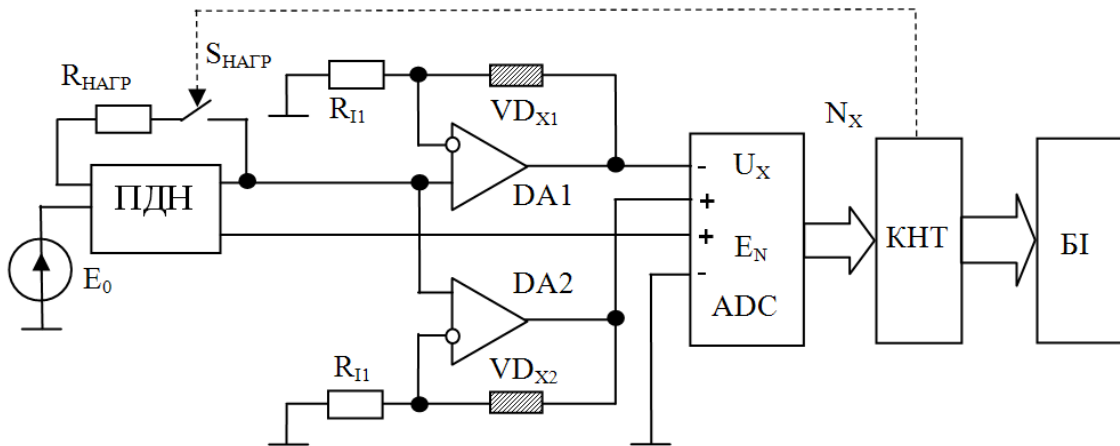


Рисунок 2.4 – Структура електронної частини радіометра з електричним замінням: VD_{X1} – нагрівачі-сенсори температури приймаючої поверхні радіометра; VD_{X2} - сенсори температури довкілля.

Конструктивно у приймачі сонячного випромінення на зовнішній поверхні рівномірно можуть бути розташовані n послідовно з'єднаних термоперетворювачів та нагрівачів, за допомогою яких проводиться електричне заміння в приймачі. Така конструкція приймача разом із затемненою приймальною поверхнею забезпечує його неселективність у широкому спектральному діапазоні та коефіцієнт поглинання близький до одиниці [18, 23].

Сенсори температури запропоновано розміщувати на зовнішній поверхні поглинаючого порожнинного елемента вздовж усієї довжини достатньою кількістю рядами рівномірно по периметру (рисунок 2.5).

Слід відмітити, що поглинач випромінювання можна виконати на основі конусної моделі абсолютно чорного тіла з примусовим зовнішнім водяним охолодженням, це забезпечуватимете краще його поглинання.

Спеціально сконструйована система керування та електричного заміщення випромінювання (виконана на базі блока керування та калібрування, а також блока напруги електричного заміщення) забезпечуватиме перекриття випромінювання, яке подається в приймач, і подачу електричного сигналу заміщення на обмотки нагрівачів заміщення приймача [81].

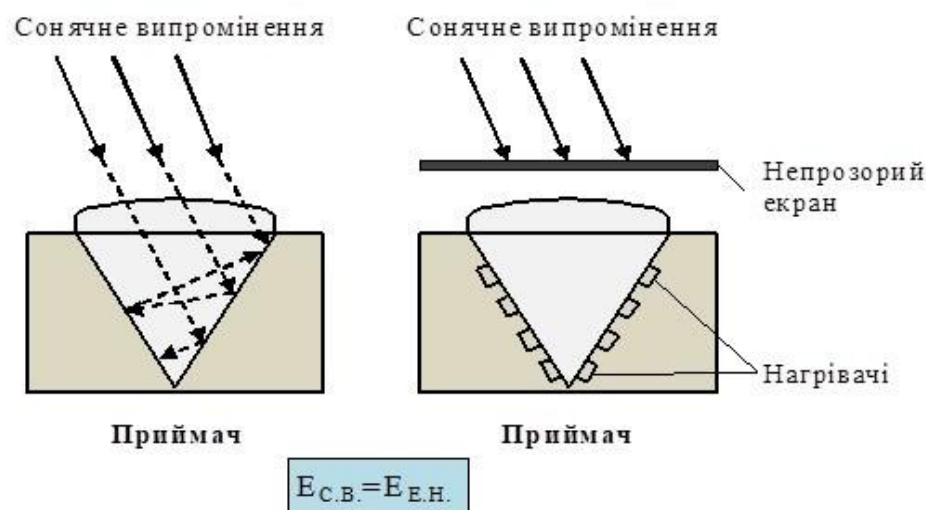


Рисунок 2.5 – Спрощена конструкція приймача сонячного випромінювання з електричним заміщенням

Завдяки наведеним перевагам розглянута конструкція моделі прецизійного високочутливого абсолютного радіометра, може бути ефективно використана як робочий еталон та робочий засіб вимірювання, що дає можливість широкого оснащення нею тих територіальних органів Держспоживстандарту України, які здійснюють незалежну атестацію, перевірку або калібрування засобів вимірювання енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням [80].

2.5. Висновки до розділу 2

У другому розділі:

– викладені особливості проведення випробувань сонячних перетворювачів в умовах близьких до експлуатаційних під час їх опромінення сонцем або в лабораторних умовах з використанням імітаторів відповідно чинним нормативним документам з метою сертифікації та паспортизації.

– зазначено, що одним з найважливіших параметрів, що визначають ефективність СК та СЕ є розрахунок ККД, який потребує використання спеціалізованого випробувального обладнання та потребує удосконалення та спрощення процедури вимірювання зі зменшенням економічних затрат

– проведений аналіз показав, що для досягнення зазначених у нормативних документах вимог доцільним є еталонування випромінювальної здатності випромінювача або приймача сонячного випромінювання. При цьому з практичної точки зору для вдосконалення процедури вимірювань енергетичних параметрів оптичного випромінювання зручніше використовувати відкалібрований радіометр з електричним заміщенням (калориметр) на основі прецизійних температурних сенсорів.

– встановлено, що найвищу точність та нескладну процедуру вимірювання параметрів сонячного випромінювання забезпечують відкалібровані радіометри з електричним заміщенням (калориметри), інформативним сигналом якого можна вважати різницю температур приймача випромінювання і довкілля [13];

- запропоновано структуру вдосконаленого абсолютного радіометра, в якому з метою покращання метрологічних характеристик використано елементи, які різночасово використовуються як нагрівачі, так і температурні сенсори.

РОЗДІЛ 3. ПОКРАЩЕННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

3.1. Шляхи вдосконалення вимірювачів різниці температур

Встановлено, що вибір типу теплового сенсора, принцип дії якого полягає у поглинанні випромінювання та його перетворенні на теплову енергію, визначається подальшими особливостями застосування абсолютного радіометра.

До основних типів теплових детекторів відносяться:

- 1) термопари;
- 2) термостовпчики;
- 3) болометри;
- 4) термістори;
- 5) напівпровідникові перетворювачі температури.

Тому слід провести детальний аналіз застосування таких типів сенсорів у структурі АР, а також дослідити використання напівпровідникових перетворювачів температури (НПТ) з можливістю зменшення їх технологічного розкиду до значень декількох десятих кельвіна з використанням транзисторів для поверхневого монтажу.

3.1.1. Використання сучасних термопар і термобатарей

У термоелементах і термопарах використовується явище нагрівання одного з двох з'єднань різнорідних металевих провідників, які створюють замкнений контур. У цьому контурі генерується термо-ЕРС і виникає електричний струм, сила якого пропорційна різниці температур між нагрітим і холодним з'єднанням [82]. Значення термо-ЕРС залежить від роду металів, з яких складається контур термопари. Загострені кінці провідників замикаються пластиною-смушкою у вигляді тонкої фольги, почорнена поверхня якої служить поверхнею приймача. Зазвичай з'єднання, що підігрівається, закріплюється на зворотній стороні тонкої зачорненої пластини, яка разом із з'єднанням створює чутливий термоелемент. Металевим дзеркалом пучок променів концентрується на зачорненій стороні приймача. Електричний струм, що при цьому виникає можна виміряти за допомогою чутливого гальванометра.

Для вимірювання потужності вузької монохроматичної в'язки, що виходить із щілини спектрального пристрою, чутливій поверхні термоелемента надається форма вузького прямокутника (наприклад, розміром 1×10 мм) [83].

На рисунку 3.1 представлено вимірювання енергетичної освітленості за допомогою термопари, один зі злутів якої нагрівається падаючим випромінюванням Φ . За наявності випромінювання злут нагрівається, тому в колі виникає різниця потенціалів ΔV .

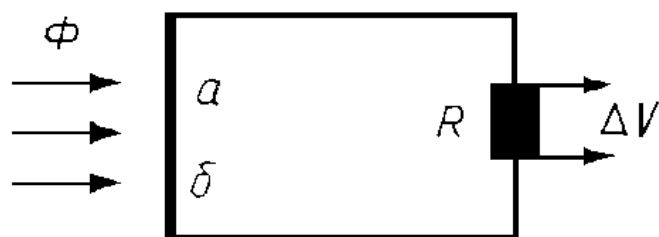


Рисунок 3.1 – Принцип вимірювання енергетичної освітленості термопарою

Термопари, з'єднані послідовно у ряд дають значення чутливості, яка дорівнює сумі чутливостей окремих термопар. Такий пристрій має назву термостовпчика. Конструкції термостовпчиків бувають різноманітними і на рисунку 3.2 показано типову конструкцію термостовпчика [84].



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд термостовпчика

Він зазвичай монтується у пластмасовий корпус на металевому кронштейні, що забезпечує легке кріплення на фотометричному обладнанні. Металеве дзеркало фокусує потік випромінювання на приймальні зачорнені робочі поверхні пластин, які кріпляться до ряду послідовно з'єднаних злутів термопар. Дзеркало може

пересуватися у горизонтальній площині, змінюючи при цьому площу робочої поверхні термостовпчика, що забезпечує зміну його чутливості.

Термостовпчики застосовуються для потреб світлових вимірювань частіше за інші неселективні приймачі, за рахунок простоти та зручності їх використання. Вони добре вивчені і в багатьох випадках мають достатню чутливість. Після фотоелементів термостовпчики знаходяться на другому місці за частотою використання. До недоліків термостовпчиків слід віднести – розкид параметрів від зразка до зразка, збільшення інерційності завдяки збільшенню маси (див. рис. 3.2), збільшення методичних похибок вимірювання температури приймальної поверхні тощо.

3.1.2. Використання сучасних болометрів і термісторів

Болометром називається пристрій для вимірювання потоку випромінювання, поглинання якого змінює електричний опір нейтрального приймача [84].

Опір багатьох матеріалів залежить від температури. Незначне нагрівання, що виникає під дією поглинутого випромінювання і пов'язана з ним зміна опору, може бути виміряна загально відомими методами. Болометри бувають металеві й напівпровідникові.

Металеві болометри – це тонка смуга металу, нанесеного розпиленням у вакуумі на скляну, кварцову або целюлозну основу. Найчастіше як метал обирається платина. Щоб добитися неселективного поглинання, зверху болометр покривається зачорнювачем. Смужка має невеликі розміри: довжина – 1-10 мм, ширина – 0,5-2 мм, товщина шару – близько одного мікрона. Опір смужки знаходиться в межах 10 – 100 Ом.

Напівпровідникові болометри виготовляють з різних окисних напівпровідників (найчастіше суміші окису марганцю і нікелю, а також кобальту). Шляхом витиснення та відпалу отримують смужки на керамічній підкладці. Потім проводять почорніння шляхом нанесення шару золота. Напівпровідникові болометри мають опір порядку 1 МОм [84].

Електрична схема застосування болометра базується на мості Уїтстона і наведена на рисунку 3.3. Найбільшими недоліками при цьому є нелінійність

передавальної характеристики та часова нестабільність опору болометра [83].

Останнім часом широке впровадження отримав особливий вид болометрів, які відрізняються технологією виготовлення - термістори. Це багатоомні опори, що складаються з окислів напівпровідників (суміші окислів нікелю, кобальту, заліза, цинку, магнію та ін.) При кімнатній температурі їх опір складає $(2...4) \cdot 10^6$ Ом, що дає змогу застосовувати їх в електронних підсилювачах. При збільшенні температури на 1 градус опір зменшується в десятки разів [84].

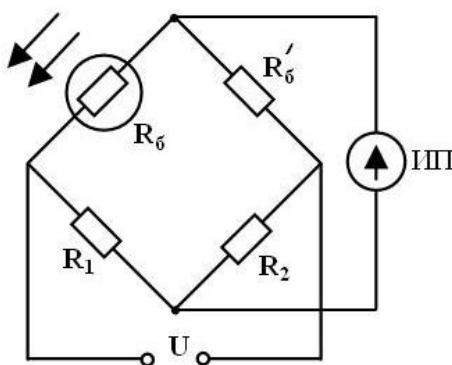


Рисунок 3.3 – Електрична схема застосування болометра

Термістори можуть виготовлятися дуже малого розміру, тому їх інерційність значно менша, ніж у теплових приймачів. Вони широко застосовуються при спектральних вимірюваннях в інфрачервоній області спектра [84]. Але їх відомими суттєвими недоліками є значний розкид характеристик від зразка до зразка (до 20 %), а також значна нелінійність температурної характеристики, що ускладнює проблему фіксації температури перегріву приймальної поверхні.

3.1.3 Аналіз можливостей використання сучасних напівпровідникових сенсорів

Аналіз показав, що зазвичай в промисловості, де зосереджена велика кількість технічних вимірювань температури, найширше використовуються стандартні термоелектричні перетворювачі (ТП) і терморезистивні перетворювачі (ТО), а також термістори. Перевагами яких є без сумніву є широкий температурний діапазон, задовільні точність та стабільність характеристик перетворення, до основних їх недоліків слід віднести: достатньо висока вартість, значна інерційність, суттєвий вплив параметрів ліній зв'язку, великі масо-габаритні показники стримують їх

використання в радіометрах. Проте значення їх похибки для вимірювання різниці температур є достатньо великими для ТП – $\pm (3 \dots 5) \text{ К}$ і ТО – $\pm 0,3 \text{ К}$; для термісторів технологічний розкид їх параметрів може сягати $\pm 20 \%$. Тому в роботі запропоновано застосовувати напівпровідникові перетворювачі (НПТ).

Проведений аналіз показав, що інформативним параметром калориметричних радіометрів з електричним заміщенням в кінцевому підсумку можна вважати різницю температур приймача випромінювання і навколишнього середовища, оскільки у випадку незмінності умов довкілля за час вимірювань приймач випромінювання нагрівається до одного й того ж значення температури під час дії різних джерел енергії [18]. Очевидно, що для забезпечення високої швидкодії вимірювань ця різниця температур повинна бути якомога меншою. Це ж стосується й мінімізації масо-габаритних показників усього приймача. Саме тому вибір типу сенсора є дуже важливим для точного вимірювання різниці температур з великою швидкістю, оскільки основними критеріями при цьому є його вартість, точність і діапазон вимірюваних температур [19].

Слід зазначити, що зменшення впливу зміни температури навколишнього середовища на покази радіометрів пов'язано з певними технічними труднощами, що обумовлені їх недостатньо високими чутливістю і швидкістю, а також труднощами вимірювання інтегрального значення температури поверхні приймача, які, зазвичай, мають доволі складну конфігурацію.

Традиційно як швидкодійний 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 швидкість радіометра. Тому вдосконалення компаратора температур на основі сучасних температурних сенсорів сприятиме покращанню метрологічних характеристик усього радіометра [13].

З метою вдосконалення процедури вимірювань енергетичної освітленості доцільним є використання абсолютного радіометра (калориметра), каліброваного електричним заміщенням, побудованого на основі прецизійних вимірювачів температури та різниці температур з використанням напівпровідникових

перетворювачів температури та платинових термоперетворювачів опору.

Зміни чутливості радіометра залежать від змін параметрів його структурних елементів, викликаних дифузією матеріалів і старінням, а також змін впливаючих факторів, таких як температура, вологість, тиск, швидкість вітру і т.п. Тому, перед нами стоїть завдання розробити високоточний і високочутливий калориметричний радіометр.

Для вирішення поставленого завдання досліджується калориметр спеціальної конструкції, який містить конусний приймальний елемент із збільшеною площею поперечного перерізу, що розміщується в термостатованому корпусі. На зовнішній поверхні приймального елемента рівномірно розташовано на однаковій відстані один від одного декілька рядів прецизійних вимірювачів (малогабаритні напівпровідникові перетворювачі температури) і нагрівачів, за допомогою яких здійснюється електричне заміщення.

За результатами проведеного аналізу пропонується для цих вимірювань використовувати напівпровідникові перетворювачі температури, які в області кімнатних температур мають високу часову стабільність (на рівні кількох сотих кельвіна протягом року) [85]. Причому для забезпечення можливості вимірювання інтегрального значення температури поверхні приймача використовуються в першому наближенні точкові вимірювання з подальшим їх усередненням, використовуючи безкорпусні діодні сенсори або транзисторні діоди. Незаперечними перевагами напівпровідникових перетворювачів температури (НПТ) є висока чутливість, довготривала стабільність, мала інерційність, відносно невелика нелінійність, досить широкий температурний діапазон використання, можливість точкових вимірювань температури, дешевизна і простота виготовлення [86].

Напівпровідникові перетворювачі температури (НПТ) запропоновано розміщено на зовнішній поверхні поглинаючого порожнинного елемента вздовж усієї довжини достатньою кількістю рядами рівномірно по периметру.

Однак, основною проблемою побудови прецизійних і метрологічно надійних напівпровідникових сенсорів є забезпечення взаємозамінності їх характеристик. Для цього в роботі пропонується використовувати сенсори у вигляді послідовно

з'єднаних НПТ. Існує багато різних математичних моделей для опису функції перетворення НПТ [87-90].

З урахуванням основних фізичних явищ, що відбуваються в рп переході, падіння напруги на ньому описується виразом [85, 90] (3.1):

$$U_{di} = U_{0i} - \alpha_{1i} \Theta + \frac{kT_1}{q} \ln \frac{I_d}{I_{SO1i}} + m \ln \frac{T_1}{T_0}, \quad (3.1)$$

де U_{0i} – падіння напруги на рп переході при його температурі T_0 ; $\alpha_{1i} = E_k - U_{0i}/T_0$ – температурна чутливість; $\Theta = T_1 - T_0$; E_k – ширина забороненої зони напівпровідника; k – стала Больцмана; T – температура рп переходу; q – заряд електрона; I_{SO1i} – еквівалентний зворотний струм рп переходу; m – конструктивний коефіцієнт; I_d – рямий струм рп переходу.

Експериментально встановлено, що в широкому температурному діапазоні від 213 К до 473 К нелінійність транзисторних діодів не перевищує 3 К. Довгострокова ж їх стабільність після трирічної експлуатації в потрібній точці води перевищувала 0,01 К за рік. Це відкриває перспективи побудови прецизійних термометрів з дискретністю показів 0,01 К і межею допустимих значень похибки $\pm(0,02 \dots 0,05)$ К в діапазоні вимірювань $(-60 \dots +200)$ °С [85, 90].

З урахуванням технологічних розкидів параметрів окремих НПТ вираз для абсолютної похибки падіння напруги на сенсорі можна представити як (3.2) [20]:

$$\Delta U_{di} = U_{din} \delta_i = U_{0i} \delta_{0i} - \alpha_n \delta_{\alpha 1} \Theta - \varphi_T \delta_{I_{SOi}} + m \ln \frac{T_1}{T_0}, \quad (3.2)$$

де $\varphi_T = \frac{kT_x}{q}$ – температурний потенціал; α_n – номінальне значення температурної чутливості.

У разі використання послідовно включених НПТ, чутливість вимірювання температури і різниці температур збільшується в n раз, де n – кількість послідовно з'єднаних НПТ. Забезпечується інваріантність до значень вимірювального струму I_d , зменшується в $2\sqrt{n}$ раз технологічний розкид параметрів діодних сенсорів [20].

При застосування таких температурних сенсорів на основі рп переходів для вимірювання різниці температур різниця падінь напруги на них U_{d1} і U_{d2} визначимо як (див. рисунок 3.4) [20].

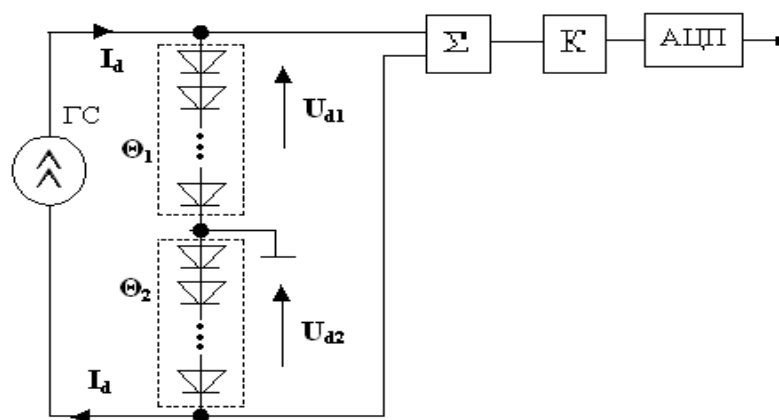


Рисунок 3.4 – Схема вимірювача різниці температур, з використанням температурного сенсора у вигляді послідовно з'єднаних діодів: ГС - генератор струму; Θ_1 - температура приймача енергетичного випромінювання; Θ_2 - температура навколишнього середовища; Σ - різниця температур.

Спад напруги на послідовно сполучених діодних які поміщені в температури T_1 і T_2 вимірювача різниці температур буде виглядати так (3.3) та (3.4) [20]:

$$U_{d1} = \sum_{i=1}^n U_{di} = \sum_{i=1}^n U_{0i} + \Theta_1 \sum_{i=1}^n \alpha_i - \varphi_{T1} \ln \left(\prod_{i=1}^n \frac{I_d}{I_{S0i}} \right) + mn \ln \frac{T_1}{T_0}; \quad (3.3)$$

$$U_{d2} = \sum_{j=1}^n U_{dj} = \sum_{j=1}^n U_{0j} + \Theta_2 \sum_{j=1}^n \alpha_j - \varphi_{T2} \ln \left(\prod_{j=1}^n \frac{I_d}{I_{S0j}} \right) + mn \ln \frac{T_2}{T_0}. \quad (3.4)$$

З урахуванням технологічних розкидів параметрів діодних сенсорів $U_{0H} \left(+ \delta_{0i} \right)$, $\alpha_{Hi} \left(+ \delta_{\alpha i} \right)$, $I_{S0H} \left(+ \delta_{Si} \right)$, $I_{dH} \left(+ \delta_d \right)$ запишемо вираз для відповідної різниці падінь напруги, пропорційний результату вимірювання різниці температур (3.5) [20]:

$$\Delta U_d = U_{d1} - U_{d2} = \Delta \Delta U_0 - n \alpha_H \Delta \Theta_{xH} - \frac{\Theta_1}{T_0} \sum_{i=1}^n \Delta U_{0i} + \frac{\Theta_2}{T_0} \sum_{j=1}^n \Delta U_{0j} - n \Delta \Theta_x \frac{k}{q} \ln \frac{I_{dH}}{I_{S0H}} - \Delta \Theta_x \frac{k}{q} + \frac{k}{q} \left(T_1 \sum_{i=1}^n \delta_{Si} - T_2 \sum_{j=1}^n \delta_{Sj} \right) + mn \ln(1 + \Delta \Theta_x) + \frac{k}{q} \Delta \Theta_x n \delta_d. \quad (3.5)$$

У процесорі вимірювача розраховуються виміряні значення різниці температур шляхом ділення інформативного параметра ΔU_d на номінальне значення чутливості перетворювача $n\alpha_H$. Для зручності подальшого аналізу від обох частин рівності віднімемо номінальне значення різниці температур $\Delta\Theta_{xH}$ і отримаємо похибку вимірювання різниці температур (3.6) [20]:

$$\Delta\Delta\Theta_x = \frac{U_{0H}}{n\alpha_H} \sum_{i=1}^n \left[\delta_{0i} + \delta_{0j} \right] \frac{U_{0H}}{n\alpha_H} \left(\frac{\Theta_1}{T_0} \sum_{i=1}^n \delta_{0i} + \frac{\Theta_2}{T_0} \sum_{j=1}^n \delta_{0j} \right) + \Delta\Theta_{xH} \frac{k}{q\alpha_H} \cdot \left(\ln \frac{I_{dH}}{I_{SOH}} + \frac{1}{n} \right) + \frac{k}{nq\alpha_H} \left(T_1 \sum_{i=1}^n \delta_{ISi} + T_2 \sum_{j=1}^n \delta_{ISj} \right) + \frac{m}{\alpha_H} \ln(1 + \Delta\Theta_x) + \frac{k}{q\alpha_H} \Delta\Theta_{xH} \delta_d. \quad (3.6)$$

Аналіз співвідношення (3.6) показує, що для реалізації вимірювача різниці температур доцільно використовувати НПТ, виготовлені в єдиному технологічному циклі. При цьому адитивна складова похибки, зумовлена розкидом значень початкової напруги, зменшується в $\sqrt{2n}$ раз. Мультиплікативна складова похибки вимірювання зменшується в \sqrt{n} разів (друга і третя складові виразу 3.6) [20].

Для оцінювання значення похибки результату вимірювання різниці температур $\Delta\Delta\theta_x$ прийемо такі типові значення величин для кремнієвого рп переходу: $\alpha_H = -2$ мВ/К; $n = 20$; $U_{0H} = 0,7$ В; $I_{dH} = 0,1$ мА; $\delta_{01} \approx \delta_{02} \approx \delta_{ISi} \approx \delta_{ISj} \approx \pm 1$ %; $\Delta\Theta_{xH} = 10$ °С і за формулою (3.7) визначаємо $\Delta\Delta\theta_x = \pm 1,1$ °С при вимірюваній різниці температур $\Delta\Theta_{xH} = 0$ °С та $\Delta\Delta\theta_x = \pm 1,4$ °С – при вимірюваній різниці температур $\Delta\Theta_{xH} = 10$ °С [18].

В процесі виготовлення можна скоригувати значення як адитивної, так і мультиплікативної складових похибки при двох значеннях температури. Коригування адитивної складової похибки зручно здійснювати загалом при довільному значенні температури, наприклад, рівному температурі навколишнього середовища, а для коригування мультиплікативної складової похибки доцільно використовувати еталонний випромінювач, змінюючи відповідно коефіцієнт перетворення будь-якого з масштабувальних елементів тракту перетворення [91]. При цьому коригування вказаних складових похибки можна здійснювати як апаратно, так і в цифровій частині шляхом уведення адитивної поправки та змінювання певного масштабувального елементу або домножування результату

перетворення на певний розрахований коригувальний коефіцієнт. У випадку використання десяти НПТ суттєво зменшуються вимоги до порогу чутливості перетворювальних елементів вторинного приладу, оскільки одиниці молодшого розряду навіть $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідатиме вхідна напруга 10 мкВ , що є набагато вищим від порогів чутливості сучасних масштабувальних елементів [92].

3.1.4. Використання плівкових платинових термоперетворювачів опору

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 термобатарей і їх сигнали опрацьовуються спеціальними інформаційно-вимірювальними системами із оптимальним алгоритмом знаходження середньо інтегральної температури [93]. 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 $0,1\text{ мВт}$. При цьому максимальне значення вимірювального струму не повинно перевищувати $I_{\text{доп}} \leq 0,3\text{ мА}$. Значення спадку напруги на ТО буде рівне $U_{\text{ТО}} = 0,3\text{ В}$, а чутливість за напругою сигналу – $\Delta U_{\text{ТО}} = 1,2\text{ мВ/К}$. 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 [94].

Оскільки залишковий розкид параметрів НПТ стоїть на заваді подальшому підвищенню точності й стабільності вимірювача різниці температур та в практичному використанні потребуватиме доволі частих калібрувань. Тому для прецизійного вимірювання різниці температур та температури пропонуємо

використовувати плівкові платинові термоперетворювачі опору (ПТО), оскільки вони є малогабаритними, а платина характеризується високою стабільністю температурного коефіцієнта опору, стабільністю хімічних і фізичних властивостей при нагріванні, інертністю до впливу досліджуваного середовища (рисунок 3.5) [95].

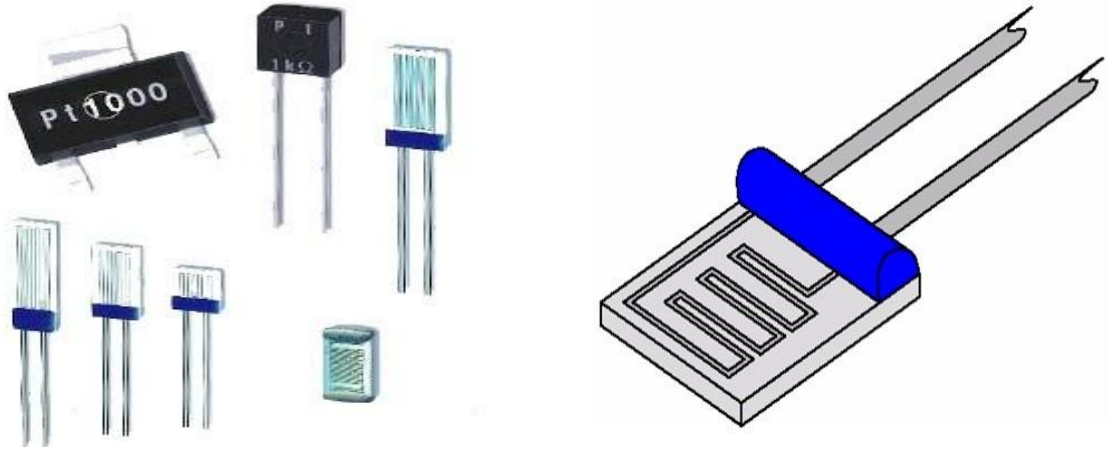


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд платинових термоперетворювачів опору

Конструктивно у приймачі сонячного випромінювання на зовнішній поверхні рівномірно можуть бути розташовані n послідовно з'єднаних термоперетворювачів та нагрівачів, за допомогою яких проводиться електричне заміщення в приймачі. Така конструкція приймача разом із затемненою приймальною поверхнею забезпечує його неселективність у широкому спектральному діапазоні та коефіцієнт поглинання близький до одиниці [18].

Похибка вимірювання температури δ_θ з платиновими термоперетворювачами опору (ТО) визначатиметься як сума складових $\delta_\theta = \delta_{TO} + \delta_{ЛЗ} + \delta_P + \delta_{ADC}$, де δ_{TO} , $\delta_{ЛЗ}$, δ_P , δ_{ADC} – похибки ТО, ліній зв'язку, нагріву ТО вимірювальним струмом та АЦП [91, 92]. У разі послідовного сполучення високоомних ТО з номінальною статичною характеристикою перетворення (НСХ) 1000П [95] похибка від впливу опорів ліній зв'язку з максимальним значенням опорів навіть декілька ом може бути зведена до значень, менших від одиниці молодшого розряду навіть 0,001 °С і, тому, нею можна знехтувати. Похибками сучасних АЦП, значення яких знаходяться на рівні декількох тисячних відсотка, можна знехтувати порівняно з похибками ТО [96]. Похибка, зумовлена перегрівом ТО вимірювальним струмом, може бути зменшена до значень менших від похибки АЦП шляхом вибору значення вимірювального

струму не більшим декількох сот мікроампер, як це рекомендовано для прецизійних АЦП типу AD7719 фірми Analog Device [96]. Структурна схема такого вимірювача різниці температур представлена на рисунку 3.6 [18].

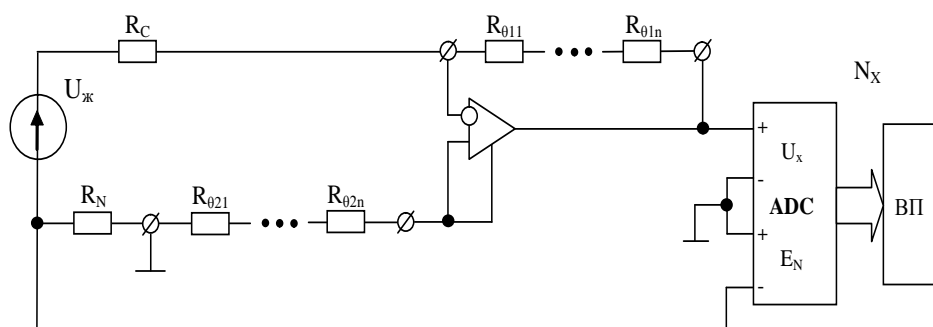


Рисунок 3.6 – Структурна схема вимірювача різниці температур

На рис. 3.6 позначено: $R_{\theta 1i}$, $R_{\theta 2i}$ – опори i -того ПТО, що знаходяться при температурі, відповідно, Θ_1 та Θ_2 ; R_N – опір зразкового резистора; ADC – аналого-цифровий перетворювач; ВП – вимірювальний пристрій; N_x – код результату вимірювання різниці температур.

Код N_x результату вимірювання різниці температур можна визначити як (3.7) [18]:

$$N_x = k_{ADC} \frac{U_{nX}}{U_N} = k_{ADC} \frac{I_0 \left(\sum_{i=1}^n R_{\theta 1i} - \sum_{i=1}^n R_{\theta 2i} \right)}{I_0 R_N} = k_{ADC} \frac{\sum_{i=1}^n R_{\theta 1i} - \sum_{i=1}^n R_{\theta 2i}}{R_N}, \quad (3.7)$$

де k_{ADC} – коефіцієнт перетворення АЦП; $R_{\theta 1i} = R_{01i} \cdot W_{\theta 1i}$; $R_{\theta 2i} = R_{02i} \cdot W_{\theta 2i}$ – опори i -того ПТО, що знаходяться при температурі, відповідно, Θ_1 та Θ_2 ; R_{01i} , R_{02i} – початкові значення опорів ПТО; $W_{\theta 1i} = 1 + A_{1i} \Theta_1 + B_{1i} \Theta_1^2$; $W_{\theta 2i} = 1 + A_{2i} \Theta_2 + B_{2i} \Theta_2^2$; R_N – опір зразкового резистора.

Якщо дійсні значення замінити відомими співвідношеннями через номінальні та відносні похибки, то вихідну напругу U_{nx} подамо як (3.8) [18]:

$$U_{nx} = I_0 \left\{ \sum_{i=1}^n \left[R_{0H} (1 + \delta_{01i}) W_{\theta 1H} (1 + \delta_{w1}) - R_{0H} (1 + \delta_{02i}) W_{\theta 2H} (1 + \delta_{w2}) \right] \right\} \cong \\ \cong I_0 R_{0H} n \left\{ W_{\theta 1H} - W_{\theta 2H} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\delta_{01i} W_{\theta 1H} - \delta_{02i} W_{\theta 2H} + W_{\theta 1} - \Delta W_{\theta 2} \right] \right\}, \quad (3.8)$$

де R_{0H} , $W_{\Theta_{1H}} = 1 + A_H \Theta_1 + B_H \Theta_1^2$, $W_{\Theta_{2H}} = 1 + A_H \Theta_2 + B_H \Theta_2^2$, A_H , B_H – номінальні значення початкового опору, відношення опорів обох груп ПТО, коефіцієнти залежності Календара, відповідно; δ_{01i} , δ_{02i} – похибки підгонки початкових значень опорів ПТО; δ_{W1} , δ_{W2} , ΔW_{Θ_1} , ΔW_{Θ_2} – відповідно, відносні та абсолютні похибки відношення опорів.

З урахуванням співвідношення (3.9) код N_x визначимо так (3.9) [18]:

$$N_x = k_{ADC} \frac{nR_{0H}}{R_N} \left\{ W_{\Theta_{1H}} - W_{\Theta_{2H}} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\delta_{01i} W_{\Theta_{1H}} - \delta_{02i} W_{\Theta_{2H}} + \Delta W_{\Theta_1} - \Delta W_{\Theta_2} \right] \right\}. \quad (3.9)$$

Максимальне значення коду ΔN_x абсолютної похибки вимірювання різниці температур подамо як (3.10) [18]:

$$\Delta N_x = k_{ADC} \frac{R_{0H}}{R_N} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\delta_{01i} W_{\Theta_{1H}} + \delta_{02i} W_{\Theta_{2H}} + \Delta W_{\Theta_1} + \Delta W_{\Theta_2} \right] \right\}. \quad (3.10)$$

Аналіз виразу (3.11) показує, що вимірювана різниця температур не залежить від значення вимірювального струму. З метою коригування показів вимірювача різниці температур можна здійснити калібрування або підстроювання - адитивне, наприклад, за умови $\Theta_1 = \Theta_2$ та мультиплікативне при $\Delta \Theta_{max} = \Theta_1 - \Theta_2$. Результати цих калібрувань можуть бути розраховані в інтелектуальному вторинному пристрої ВП як адитивна поправка та мультиплікативний поправковий коефіцієнт до коду результату вимірювання N_x [18].

Вибираючи ПТО з великими значеннями R_0 , наприклад, 1000П, можна забезпечити практичну незалежність показів від впливу опорів з'єднувальних проводів. Наприклад, проаналізуємо технічні можливості вимірювача різниці температур з використанням десяти послідовно сполучених ПТО $n=10$, $R_{0H}=1000$ Ом, класу В, з температурним коефіцієнтом опору $\varepsilon \approx 4 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$, $\Delta \Theta_{max}=10$ °С, $I_0=0,2$ мА. Якщо значення опорів ліній зв'язку становитиме навіть 10 Ом, то при та максимальному значенні різниці між опорами обох пар з'єднувальних проводів $\pm 10\%$, отримаємо значення відносної похибки $\pm 0,1 \cdot 10 / (10 \cdot 1000) = 10^{-4} = \pm 0,01\%$, або $\pm 10^{-4} \cdot 10 = \pm 0,001$ °С, що є співмірним із одиницею молодшого розряду. Подальшого зменшення цієї складової досягається під час коригування адитивної складової похибки. Еквівалентна чутливість

вимірювача температур становитиме $\varepsilon_{\Sigma} \approx 10 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^{\circ}\text{C} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$, значення напруги, що відповідає одиниці молодшого розряду $U_{OMP} = \varepsilon_{\Sigma} R_{0H} I_0 / 1000 = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3} = 8 \text{ мкВ} / 0,001 \text{ }^{\circ}\text{C}$, що є набагато більшим від порогів чутливості операційних підсилювачів та АЦП [95, 96]. З метою зменшення впливу напруг зміщення та вхідних струмів пропонуємо вибрати прецизійний операційний підсилювач типу AD8630 фірми Analog Device з напругою зміщення не більшою за $e_{zm} \leq 1 \text{ мкВ}$ та її дрейфом $de_{zm} \leq 2 \text{ нВ/}^{\circ}\text{C}$, вхідними струмами не більшими від $I_{ex} \leq 100 \text{ пА}$ та їх різницею не більшою від $\Delta I_{ex} \leq 50 \text{ пА}$ [97]. Тоді еквівалентна напруга зміщення становитиме $e_{екв} = e_{zm} + n \Delta I_{ex} R_{0H} \leq 1 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 50 \cdot 10^{-12} \cdot 10^3 = 1,5 \text{ мкВ}$, а еквівалентне значення різниці температур визначиться як $\Delta \Theta_{zm} = e_{екв} / \varepsilon_{\Sigma} = 1,5 \cdot 10^{-6} / 4 \cdot 10^{-2} \approx 0,00004 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і буде нехтовно малим порівняно з одиницею молодшого розряду вимірювача різниці температур [18].

Завдяки малим масо габаритним показникам у випадку використання плівкових платинових ТО як нагрівачів можна досягнути рівномірного теплового поля електричного заміщення. Завдяки малим масі і габаритним розмірам ПТО мають малий тепловий опір і можуть суттєво розігріватися вже відносно невеликими струмами [18].

3.2. Виконання експериментальних досліджень та їх аналіз

3.2.1. Аналіз можливостей застосування транзисторів з об'ємними виводами

Одним із основних напрямків вдосконалення сенсорів для забезпечення необхідних метрологічних параметрів вимірювання температури під час випробувань сонячних колекторів – застосування напівпровідникових перетворювачів температури (НПТ). Серед яких найбільш використовувані транзисторні діоди, що володіють високою часовою стабільністю на рівні кількох сотих кельвіна протягом року. Висока чутливість, довготривала стабільність, мала інерційність, досить широкий температурний діапазон використання, можливість точкових вимірювань температури, дешевизна і простота виготовлення – належать до істотних переваг таких сенсорів. Водночас, при паралельному або послідовному

з'єднанні транзисторних діодів відкривається можливість усереднення технологічних розкидів, що також дозволяє й збільшити їхню точність.

Були проведені досліджень напівпровідникових перетворювачів температури (НПТ) з метою визначення розкиду характеристик між сенсорами від зразка до зразка [31].

З метою визначення граничних можливостей таких НПТ проведено експериментальні дослідження десяти послідовно з'єднаних серійно виготовлюваних транзисторів типу КТ3107Ж зі структурою р-n-p та КТ315Б зі структурою n-p-n (рисунок 3.7), включені за схемою транзисторного діода із закороченими переходами бази та колектора.

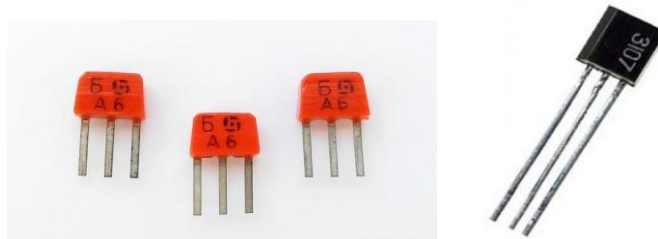


Рисунок 3.7 – Вигляд транзисторів для об'ємного монтажу КТ315Б (зліва) та КТ3107Ж (справа)

Умовні схеми послідовного та паралельного сполучення 10-ти транзисторних діодів представлені на рисунках 3.8 та 3.9.

Сенсори температури розташовувались в пасивному термостаті при температурі довкілля. Сенсори з'єднувались послідовно і паралельно з метою подальшого порівняння експериментально визначених середніх значень напруги на десяти послідовно сполучених транзисторах та при їх паралельному з'єднанні. Під час послідовного сполучення десяти транзисторів певного типу, протікав вимірювальний струм 0,1 мА, для паралельного з'єднання забезпечувався загальний струм 1 мА, що забезпечувало протікання струму приблизно по 0,1 мА через кожен транзистор з метою забезпечення співставлення експериментальних результатів для кожного із вказаних з'єднань. Значення напруг вимірювались мультиметром Picotest M3511A, з діапазонами вимірювань – 0,1 В, 1 В та 10 В, точністю 0,012 % за 1 рік та одиницею молодшого розряду в режимі усереднення 1 мкВ. Як джерело живлення

застосовувався диференціальний вольтметр В1-12, для забезпечення протікання заданого струму використовувався магазин опорів Р4831. Температура вимірювалась термометром TGL (0-50°C) з роздільною здатністю 0,1 °С.

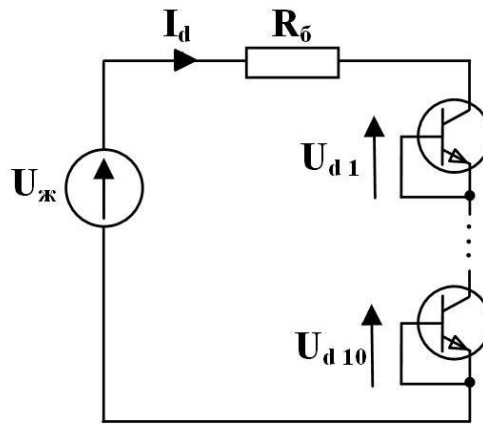


Рисунок 3.8 – Схема 10-ти послідовно з'єднаних транзисторних діодів :
 $U_{жс}=15\text{ В}$ – напруга живлення; $I_d=0,1\text{ мА}$ – вимірювальний струм; $R_б=90\text{ кОм}$ – струмозадавальний резистор; $U_{di}\approx 0,6\text{ В}$ – спад напруги на i -му транзисторі.

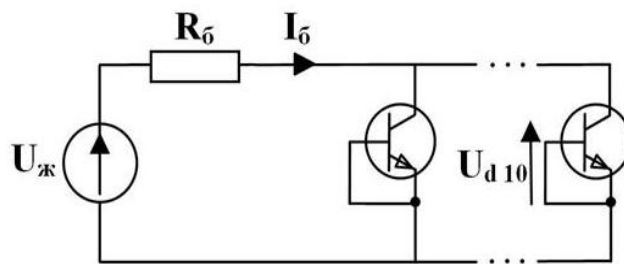


Рисунок 3.9 – Схема 10-ти паралельно з'єднаних транзисторних діодів:
 $U_{жс}=10\text{ В}$ – напруга живлення; $I_б=1\text{ мА}$ – загальний струм; $R_б=9,4\text{ кОм}$ – струмозадавальний резистор; $U_{d10}\approx 0,6\text{ В}$ – спад напруги на 10-ти транзисторах.

Результати експериментальних досліджень десяти послідовно з'єднаних транзисторів для об'ємного монтажу типів КТ3107Ж (p-n-p) та КТ315Б (n-p-n) показали, що їм властивий значний розкид значень напруги на сенсорах за кімнатних температур в межах від 0,6030 В до 0,5730 В ($\pm 15\text{ мВ}$ або $\pm 7,5\text{ К}$ відносно середнього значення) [31]. Це свідчить про неможливість їх безпосереднього застосування як температурних сенсорів за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005. Під час їх використання необхідно застосовувати відповідні методи і

засоби підстроювання під індивідуальну статичну характеристику перетворення у вторинних пристроях. Встановлено, що спостерігається істотний вплив конструктивного виконання дискретних транзисторів, зумовлених їх технологією виготовлення, на отримані результати дослідження транзисторів.

Результати експериментальних досліджень представлені в додатку В «Протокол лабораторних досліджень десяти послідовно з'єднаних серійно виготовлюваних транзисторів типу КТ3107Ж та КТ315Б з метою визначення їх граничних можливостей як температурних сенсорів за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005».

3.2.2. Розроблення методики дослідження взаємозамінності характеристик транзисторних діодів для поверхневого монтажу

Аналіз технології виготовлення напівпровідникових елементів показав, що для реалізації вимірювача різниці температур з похибкою порядку декілька сотих кельвіна, доцільно використовувати транзистори, виготовлені в єдиному технологічному циклі [18]. При цьому увагу насамперед необхідно звернути на транзистори в конструктивному виконанні для поверхневого монтажу, оскільки вони поставляються на монтажній стрічці для автоматизованого монтування на друкованих платах. Це слугує підставою для висловлення припущення про походження таких транзисторів з одного технологічного циклу. З цією метою в роботі експериментально підтверджене теоретичне припущення про зменшення розкиду початкових напруг під час використання транзисторів для поверхневого монтажу, порівняно із традиційними корпусними елементами. Для експериментальних досліджень доволно були вибрані такі типи транзисторів для поверхневого монтажу: BC858C, BC859B, BCW61C (p-n-p типу) та BC849B, BC849C, BC850BE (n-p-n типу). Їх незаперечними перевагами є малі розміри (від 1 мм до 1,3 мм), невелика вартість (приблизно 0,75 грн.), діапазон вимірюваних температур від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [98]. Транзистори були змонтовані на друкованій платі (рисунок 3.10, 3.11 та 3.12). Для забезпечення легкого доступу до кожного з транзисторів їх електроди (еквівалентно анод та катод) під'єднанні до комутаційних роз'ємів. З метою забезпечення мінімальних значень температурних градієнтів уся

експериментальна устава розміщені в пасивному термостаті.

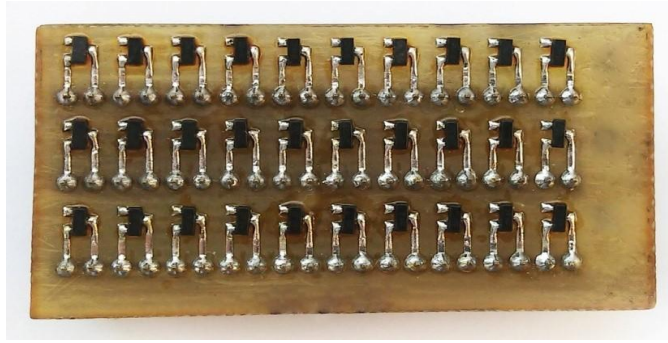


Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд друкованої плати із напаяними досліджуваними транзисторами

Для зменшення електромагнітних завад уся конструкція знаходилась в металевому екрані. Методика вимірювання полягала у десяти почергових вимірюваннях напруг на кожному з 10-ти послідовно з'єднаних транзисторів, з подальшим усередненням результатів і порівнянням його з експериментально визначеним значенням спаду напруги при їх паралельному з'єднанні. В результаті обиралися транзистори з найменшим розкидом значень напруг, які найдоцільніше в подальшому застосовувати як сенсори температури [32].

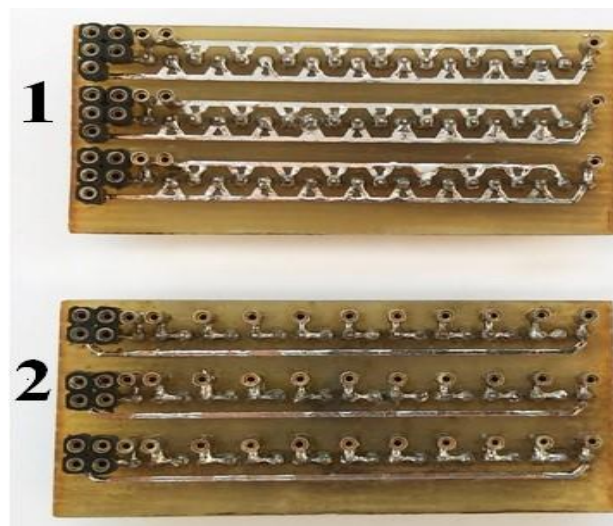


Рисунок 3.11 – Зображення друкованої плати з напаяними транзисторами для паралельного (1) і послідовного з'єднання (2) кожних 10-ти сенсорів



Рисунок 3.12 – Зовнішній вигляд експериментальної устави для дослідження транзисторів як сенсорів температури

Для усіх типів транзисторів розкид спадків напруг відносно середнього значення знаходився на рівні декількох десятих кельвіна, що є в декілька разів меншим від розкидів транзисторних діодів з виводами для об'ємного монтажу.

В результаті досліджень транзисторів для поверхневого монтажу типів BC858C, BC859B, BCW61C (p-n-p) та BC849B, BC849C, BC850BE (n-p-n) було обрано транзистори з найменшим розкидом значень напруг типів BCW61C та BC849C, які найдоцільніше в подальшому застосовувати як сенсори температури відповідно до вимог ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005. Оцінивши математичне сподівання напруг на десяти послідовно з'єднаних транзисторах та експериментально визначивши напруги при їх паралельному з'єднанні, доведено, що розкид отриманих значень не перевищує ± 50 мкВ. Наприклад, для десяти транзисторів типу BC 849C середнє значення напруг $U_{нсл.сер}=0,5808$ В відповідає вимірюваному значенню напруги при паралельному з'єднанні $U_{прл}=0,5808$ В, для транзисторів типу BCW61C: $U_{нсл.сер}=0,5903$ В та $U_{прл}=0,5903$ В, відповідно [32].

Результати експериментальних досліджень представлені у додатку Г «Протокол лабораторних досліджень взаємозамінності характеристик напівпровідникових сенсорів для вимірювання температури і різниці температур за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005».

Із досліджених були вибрані два типи транзисторних діодів BCW61C та BC849C із найменшим розкидом початкових напруг ± 457 мкВ ($\pm 0,224$ К) та ± 406 мкВ ($\pm 0,203$ К), відповідно. Це дає можливість забезпечення середньоквадратичного відхилення під час побудови вимірювача різниці температур із п'яти послідовно

сполученими діодами $\pm 0,457/\sqrt{10} = \pm 0,145 K$ за одночасного збільшення чутливості вимірювання температури і різниці температур до $\varepsilon_n = 10$ мВ/К. Функція перетворення НПТ в першому наближенні апроксимується такою залежністю (3.11) [19]:

$$U_X = 5R_B I_i + 5\eta \frac{kT_X}{q} \ln \frac{I_i}{I_{S0}}, \quad (3.11)$$

де U_X – спадок напруг на р-п переходах НПТ за їх температури T_X та значенні вимірювального струму I_i ; k , q – стала Больцмана та заряд електрона, відповідно; R_B , η – відповідно опір бази та коефіцієнт ідеальності НПТ; I_{S0} – зворотний струм НПТ за температури T_0 .

Під час побудови цифрових термометрів важливим є врахування коефіцієнта ідеальності та опору бази транзисторних діодів, як сенсорів температури [99], які визначаються із співвідношень (3.12)-(3.15) [19]:

$$U_{X11} = 5R_B I_1 + 5\eta \frac{kT_{X1}}{q} \ln \frac{I_1}{I_{S0}}, \quad (3.12)$$

$$U_{X12} = 5R_B I_2 + 5\eta \frac{kT_{X1}}{q} \ln \frac{I_2}{I_{S0}}, \quad (3.13)$$

$$U_{X21} = 5R_B I_1 + 5\eta \frac{kT_{X2}}{q} \ln \frac{I_1}{I_{S0}}, \quad (3.14)$$

$$U_{X22} = 5R_B I_2 + 5\eta \frac{kT_{X2}}{q} \ln \frac{I_2}{I_{S0}}, \quad (3.15)$$

де U_{X11} , U_{X12} – спадки напруг на рп переходах НПТ за їх температури T_{X1} та значеннях вимірювальних струмів I_1 та I_2 , відповідно; U_{X21} , U_{X22} – спадки напруг на рп переходах НПТ за їх температури T_{X2} та значеннях вимірювальних струмів I_1 та I_2 , відповідно.

Знаходячи попарно різниці спадків напруг

$$\Delta U_{X1} = U_{X11} - U_{X12} = 5R_B (I_1 - I_2) + 5\eta \frac{kT_{X1}}{q} \ln \frac{I_1}{I_2}, \quad \Delta U_{X2} = U_{X21} - U_{X22} = 5R_B (I_1 - I_2) + 5\eta \frac{kT_{X2}}{q} \ln \frac{I_1}{I_2},$$

розраховується значення η (3.16) [19]:

$$\eta = \frac{\Delta U_{x1} - \Delta U_{x2}}{[k(T_{x1} - T_{x2})] q \ln(I_1/I_2)} \quad (3.16)$$

та R_B (3.17) [19]:

$$R_B = \frac{\Delta U_{x1} - 5\eta \frac{kT_{x1}}{q} \ln \frac{I_1}{I_2}}{I_1 - I_2}. \quad (3.17)$$

На основі експериментальних результатів визначено значення коефіцієнта ідеальності для транзисторів типу BCW61C (p-n-p типу), за двома вимірювальними струмами $I_1=0,99700$ мА та $I_2=0,09970$ мА, а також двома різними вимірними значеннями температури транзисторів $T_{x1}=273,15$ К, $T_{x2}=291,15$ К (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Результати дослідження для 5-ти послідовно сполучених транзисторів типу BCW61C, при $I_1=0,99700$ мА та $I_2=0,00997$ мА, для $T_{x1}= 273,15$ К

№ п/п	$U_{\text{бе}}, \text{В}$		$\Delta U_{\text{бе}}=U_{\text{беі}}-U_{\text{сер}}, \text{мкВ}$		$\Delta U_{\text{бе1}}, \text{К}$	
	I_1	I_2	I_1	I_2	I_1	I_2
1	3,42269	3,14605	70	140	0,035	0,070
2	3,42197	3,14579	-650	-120	-0,325	-0,060
3	3,42318	3,1465	560	590	0,280	0,295
4	3,42273	3,14589	110	-20	0,011	-0,010
5	3,42319	3,14628	570	370	0,285	0,185
6	3,42176	3,14535	-860	-560	-0,430	-0,280
7	3,42244	3,14591	-180	20	-0,090	0,010
8	3,42313	3,14622	510	310	0,255	0,128
9	3,42202	3,14568	-600	-230	-0,300	0,115
10	3,42308	3,14536	460	-550	0,230	-0,275
Сер. зн.	3,42262	3,14591	± 457	± 291	$\pm 0,224$	$\pm 0,143$

Розраховане на підставі експериментальних даних значення коефіцієнта ідеальності транзисторів типу BCW61C становить $\eta=1,18380$, що відповідає практичним рекомендаціям щодо вибору транзисторів як сенсорів температури [99]. Результати експерименту показали, що сумарний опір бази та електродів бази та емітера для вказаних типів транзисторів становить приблизно 50 Ом. За такою ж методикою було визначено коефіцієнт ідеальності для іншого типу транзисторів BC849C (n-p-n типу). Для розрахунків використовувались такі отримані

експериментальні дані, як розраховані середні значення спаду напруги на 5-ти послідовно сполучених транзисторах при протіканні струмів $I_1=0,99700$ мА та $I_2=0,00997$ мА, а також при двох різних вимірних значень температури $T_{x1}=273,15$ К та $T_{x2}=292,15$ К (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Результати дослідження для 5-ти послідовно сполучених транзисторів типу BC849C, при $I_1=0,99700$ мА та $I_2=0,00997$ мА, для $T_{x1}= 273,15$ К

№ п/п	$U_{\text{бе}}, \text{ В}$		$\Delta U_{\text{бе}}=U_{\text{беi}}-U_{\text{сеп}}, \text{ мкВ}$		$\Delta U_{\text{бе1}}, \text{ К}$	
	I_1	I_2	I_1	I_2	I_1	I_2
1	3,39222	3,11443	650	390	0,325	0,195
2	3,39200	3,11429	430	250	0,215	0,125
3	3,39150	3,11402	-70	-20	-0,035	-0,010
4	3,39138	3,11422	-190	180	-0,095	0,090
5	3,39092	3,11375	-650	-290	-0,325	-0,145
6	3,39121	3,11384	-360	-200	-0,180	-0,100
7	3,39252	3,11480	950	760	0,475	0,380
8	3,39102	3,11353	-550	-510	-0,275	-0,255
9	3,39148	3,11410	-90	60	-0,045	0,030
10	3,39145	3,11339	-120	-650	-0,060	-0,325
Сер. зн.	3,39157	3,11404	± 406	± 331	$\pm 0,203$	$\pm 0,166$

В даному випадку коефіцієнт ідеальності становить $\eta=1,00048$, а сумарний опір бази та електродів бази та емітера для транзисторів типу BC849C становить приблизно 30 Ом.

Слід відмітити, що за вибраних значень двох різних вимірювальних струмів, не спостерігалось зміни показів прецизійного вольтметра, тобто похибка від нагрівання сенсорів знаходилась в межах похибки експерименту [24].

3.2.3. Вдосконалення конструкції напівпровідникових сенсорів температури для цифрових вимірювачів різниці температур

На основі попередніх досліджень зроблено висновок про доцільність використання в напівпровідникових перетворювачах температури таких транзисторів BCW61C (p-n-p структура) та BC849C (n-p-n структура) з найменшим розкидом значень напруг від зразка до зразка. Конструктивно НПТ являли собою п'ять послідовно сполучених транзисторних діодів, змонтованих на друкованих

платах, та з метою їх захисту від шунтувального впливу рідини були вкриті термоусаджувальною плівкою. З метою коректного порівняння розкиду характеристик декілька НПТ послідовно включалися в коло генераторів струму та розміщувалися в цифровому прецизійному рідинному термостаті типу ТСР-0105 НО з дискретністю задання значень температури $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. Напруги на НПТ та зразкових резисторах вимірювались цифровим мультиметром Picotest з точністю $0,012\%$ за 1 рік та одиницею молодшого розряду в режимі усереднення 1 мкВ . Досліджувані сенсори поміщались в термостат, в якому встановлювались задані значення температури від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ з дискретністю $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для коректного вибору вимірювальних струмів були задані такі їх номінальні значення $0,1\text{ мА}$, 1 мА та $1,9\text{ мА}$. Методика дослідження полягала у вимірюванні напруги на НПТ із зміненням полярності підключення вольтметра та усередненні декількох результатів перетворення.

На рисунку 3.13 подана структурна схема експериментальної устави для дослідження напівпровідникових температурних сенсорів VD_x , яка містить [13]:

- рідинний термостат;
- джерело напруги живлення $U_{\text{ж}}$;
- 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 рисунку 3.16 передбачено низку заходів із забезпечення заводо захищеності та заводостійкості перетворення [86].

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. Технічні характеристики термостата: діапазон термостатування $(0\dots+100)\text{ }^{\circ}\text{C}$; дискретність задання значень

температури $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$; межа допустимих значень основної похибки вимірювання та відтворення температури $\pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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. Спадки напруги на НПТ та зразкових резисторах вимірювались цифровим мультиметром Picotest M3511A. Діапазони вимірювань – $0,1\text{ В}$, 1 В та 10 В , точність $0,012\text{ }\%$ за 1 рік та одиниця молодшого розряду в режимі усереднення 1 мкВ [13].

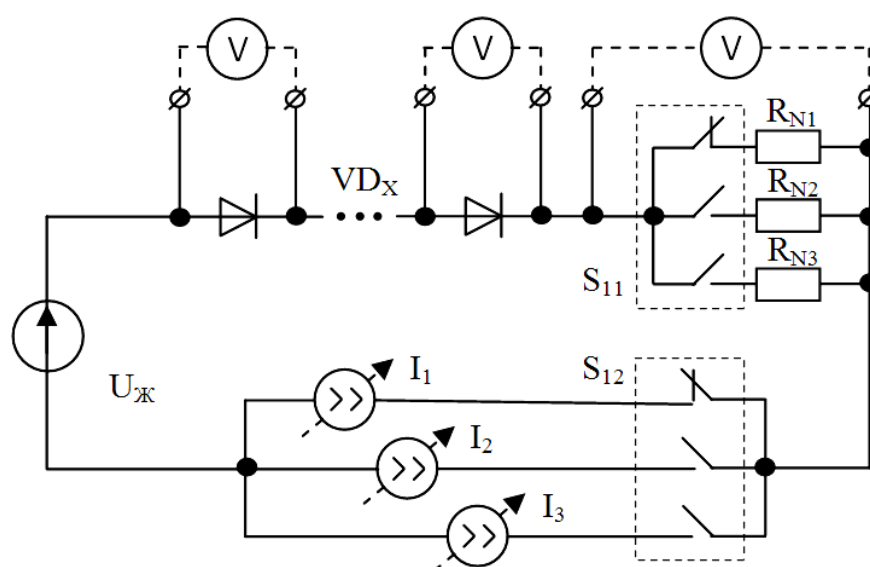


Рисунок 3.13 – Структурна схема експериментальної устави для дослідження напівпровідникових температурних сенсорів

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). З метою захисту транзисторів в рідині НПТ були вкриті термоусаджувальною плівкою (рисунок 3.14). Досліджувані сенсори поміщались в термостат, в якому встановлювались задані значення температури від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ з дискретністю $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для коректного вибору вимірювальних струмів були задані такі їх номінальні значення $0,1\text{ мА}$, 1 мА та $1,9\text{ мА}$ [13].



Рисунок 3.14 – Зовнішній вигляд транзисторних сенсорів температури

Досліджувані сенсори поміщались в термостат, в якому встановлювались задані значення температури від 0 °С до +80 °С з дискретністю 10 °С. Для коректного вибору вимірювальних струмів були задані такі їх номінальні значення 0,1 мА, 1 мА та 1,9 мА [13].

Проведені дослідження показали доцільність використання в НПТ транзисторів типу BCW61C з найменшим розкидом значень спадків напруг від зразка до зразка: $\pm 0,49$ мкВ ($\pm 0,049$ °С) (таблиця 3.3 і 3.4). Через НПТ по чергово пропускали три різні вимірювальні струми $I_1=1$ мА, $I_2=0,1$ мА та $I_3=1,9$ мА, а значення спадків напруг на них фіксувались мультиметром.

Таблиця 3.3 – Експериментальні значення спадків напруг при $I_1=1$ мА для сенсорів типу BCW61C в діапазоні вимірювання (0...+80) °С

№	U_{bei} , В				
	Темп. 0 °С	Темп. 20 °С	Темп. 40 °С	Темп. 60 °С	Темп. 80 °С
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
$U_{\text{сеп. bei}}$, В	3,42123	3,21382	3,00476	2,79358	2,58011

Методика дослідження полягала у вимірюванні спадків напруги на НПТ із змінням 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 $\pm 0,02$ °С. Експериментально встановлений розкид значень спадків напруги на НПТ $\Delta U_{\text{бєі}}$ визначався співвідношенням (3.18) [13]:

$$\Delta U_{\text{бєі}} = U_{\text{бєі}} - \Delta U_{\text{сер.бєі}}, \quad (3.18)$$

де $U_{\text{бєі}}$ – спадки напруги на р-п переходах НПТ і-того сенсора; $U_{\text{сер.бєі}}$ – середнє значення спадків напруги на р-п переходах НПТ і-того сенсора.

Таблиця 3.4 – Експериментально встановлені розкиди спадків напруг для сенсорів типу ВСW61С при $I_1=1$ мА в діапазоні вимірювання (0...+80) °С

№	$\Delta U_{\text{бєі}}$									
	Темп. 0 °С		Темп. 20 °С		Темп. 40 °С		Темп. 60 °С		Темп. 80 °С	
	мВ	°С	мВ	°С	мВ	°С	мВ	°С	мВ	°С
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

Аналіз результатів вимірювань спадів напруг на кожному із дев'яти сенсорів типу ВСW61С 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 $\pm 0,004$ °С. Також експериментально встановлено, що максимальний розкид температурних залежностей НПТ не перевищує $\pm 0,05$ °С у всьому вимірювальному діапазоні від 0 °С до +80 °С (рис. 3.15). При цьому значення розкидів не залежить від значень вимірювальних струмів [13].

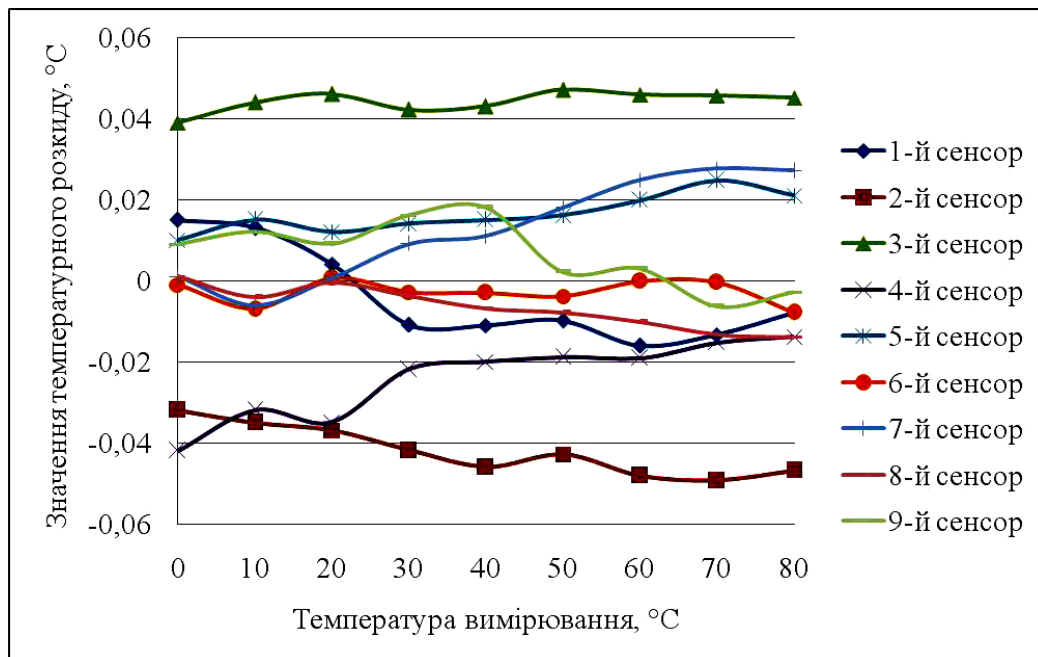


Рисунок 3.15 – Розкид між характеристиками дев'яти сенсорів типу BCW61C в залежності від температури вимірювання для $I_1=1$ мА

3.3. Розроблення структури цифрових термометричних вимірювачів для досліджень сонячних перетворювачів

3.3.1. Розроблення структури цифрових вимірювачів різниці температур

Під час побудови цифрових вимірювачів різниці температур основним чинником похибки є неоднаковість функцій перетворення температурних сенсорів. Тому, очевидно, в структурі прецизійних вимірювачів різниці температур слід використовувати калібрувальні елементи. Структура розроблених цифрових вимірювачів різниці температур (рисунок 3.16) основана на використанні АЦП з диференціальними входами, до яких подано сигнали з виходів генераторів струму DA1 та DA2 [19]. Опорна для АЦП напруга формується подільником ПДН, який складається з резистивного подільника з послідовно сполучених прецизійних резисторів R_{N1} , R_{N2} та змінного резистора R_p . Код результату вимірювання різниці температур визначається співвідношенням (3.19) [19]:

$$N_X = k_{ADC} \frac{U_{X1} - U_{X2}}{E_N \frac{R_{N2} + r}{R_{N1} + R_p - r}}, \quad (3.19)$$

де R_{N1} , R_{N2} – опори стабільних масштабувальних резисторів подільника напруги; R_{I1} , R_{I2} – опори струмозадавальних резисторів; R_p – повний опір підстроювального резистора; r – частина опору резистора R_p , яка знаходиться між його движком та резистором R_N .

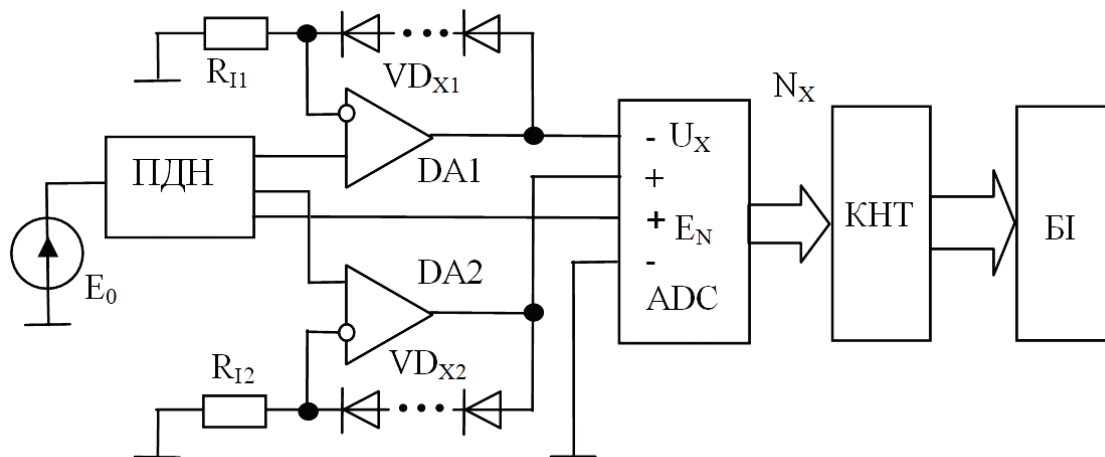


Рисунок 3.16 - Структурна схема цифрового вимірювача різниці температур:
ПДН – подільник напруги; КНТ – контролер; БІ – блок індикації

В процесі виготовлення можна скоригувати значення як адитивної, так і мультиплікативної складових похибки при двох значеннях температури. Коригування адитивної складової похибки зручно здійснювати загалом при довільному значенні температури, наприклад, рівному температурі довкілля, а для коригування мультиплікативної складової похибки доцільно використовувати еталонний вимірювач, змінюючи відповідно коефіцієнт перетворення будь-якого з масштабувальних елементів тракту перетворення [13]. При цьому коригування вказаних складових похибки можна здійснювати як апаратно, так і в цифровій частині шляхом уведення адитивної поправки та змінювання певного масштабувального елементу або домножування результату перетворення на певний розрахований коригувальний коефіцієнт. У випадку використання десяти НІТ суттєво зменшуються вимоги до порогу чутливості перетворювальних елементів вторинного приладу, оскільки одиниці молодшого розряду навіть $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідатиме вхідна напруга 10 мкВ , що є набагато вищим від порогів чутливості сучасних масштабувальних елементів [100].

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 рисунку 3.15, після калібрування значення похибки вимірювання різниці температур в температурному діапазоні $(20 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ не перевищуватиме $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ [13].

3.3.2. Розроблення структури цифрових вимірювачів температури

Аналіз результатів експериментальних досліджень також показав, що похибка взаємозамінності НПТ є найменшою для струму 1 мА. У всьому вимірювальному діапазоні від $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+80 \text{ }^\circ\text{C}$ її значення не перевищує $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 3.15). Під час практичної реалізації цифрових термометрів (ЦТ) впливатимуть також інструментальні адитивні та мультиплікативні похибки використаної елементної бази. Окрім того, НПТ властива й нелінійність, значення якої можна оцінити на рівні декількох десятих градуса [19, 101]. Тому в широкому вимірювальному діапазоні доцільно провести калібрування ЦТ, шкала яких проградуєвана в градусах Цельсія, при двох значеннях температури.

Як було вище зазначено, основною проблемою побудови прецизійних та метрологічно надійних цифрових вимірювачів температури (ЦТ) є забезпечення взаємозамінності характеристик НПТ [100]. Найпростішим в реалізації та дуже ефективним є метод уніфікації, оснований на калібруванні показів ЦТ при двох значеннях температури, які знаходяться всередині діапазону вимірювань. Для зменшення похибки від нагрівання НПТ значення вимірювального струму пропонується вибирати експериментально та встановлювати таким, щоб зміна показів ЦТ була в декілька разів меншою від допустимого значення його похибки. Очевидно, що у випадку реалізації ЦТ з індикацією результатів вимірювання у шкалі Цельсія за перше калібрувальне значення доцільно прийняти температуру топлення льоду, значення якої точно відоме та легко відтворюється з похибкою не

більшою від $\pm 0,1$ °С. При цьому в аналоговій або цифровій формі може бути скоригована адитивна складова похибки (АСП) ЦТ. Друге калібрувальне значення доцільно прийняти близьким до максимального значення вимірюваної температури та аналоговим або цифровим способом скоригувати мультиплікативну складову похибки (МСП) ЦТ. Природно, що значення цієї температури можна вибрати рівним значенню найближчої реперної точки шкали МТШ-90 – температури кипіння води. Але зважаючи на практичну складність її реалізації, доцільніше використовувати або прецизійні термостати, або стабільний термостат з прецизійним термометром, наприклад платиновим.

З урахуванням поданого вище розроблена структура ЦТ (рисунок 3.17), яка містить генератор струму на основі операційного підсилювача (ОП) DA1, струмозадавального резистора R_1 та джерела опорної напруги (ДОН) E_N . Вихідний сигнал ОП DA1 подається до інвертувального входу АЦП, до неінвертувального входу якого поданий сигнал з виходу ОП DA2, значення якого повинно бути рівним спадку напруги на НПТ за температури $T_0=273,15$ К. Опорна напруга для АЦП формується з напруги ДОН E_N шляхом її поділу резистивним подільником R_1, R_3 .

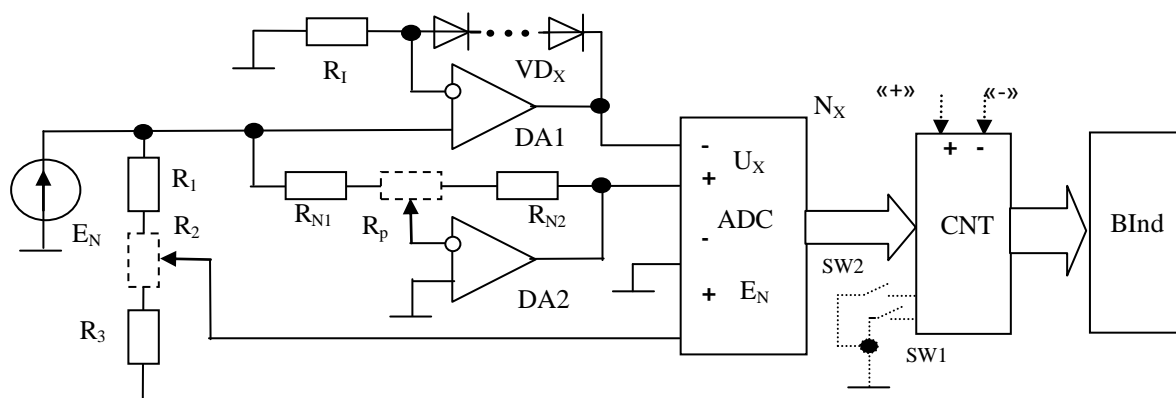


Рисунок 3.17 – Структурна схема цифрового вимірювача температури

Цифровий код N_X результату вимірювання подається як (3.20) [19]:

$$N_X = k_{ADC} \frac{U_X - E_N \left(R_{N2} + r_1 \right) \left(R_{N1} + R_p - r_1 \right)}{E_N \left(R_{N1} + r_2 \right) \left(R_3 + R_2 - r_2 \right)}, \quad (3.20)$$

де k_{ADC} – коефіцієнт перетворення АЦП; R_{N1}, R_{N2}, R_1, R_3 – опори стабільних масштабувальних резисторів; R_p, R_2 – повні опори підстроювальних резисторів; r_1 –

частина опору резистора R_p , яка знаходиться між його движком та резистором R_{N2} ; r_2 – частина опору резистора R_2 , яка знаходиться між його движком та резистором R_1 ; E_N – значення вихідної напруги ДОН.

З метою забезпечення встановлених вимогам до точності вимірювання температури при одночасному послабленні вимог до інструментальних похибок використовуваної елементної бази в вимірювачі температури доцільно використовувати метод уведення поправок. Під час його реалізації в аналоговій формі в структурі ЦВТ повинні бути підстроювальні резистори R_p , R_2 (на рис. 3.17 вони показані штриховими лініями). Методика калібрування полягатиме у виконанні таких операцій. НПТ поміщаються в нуль-термостат та після встановленні в ньому температури $0\text{ }^\circ\text{C}$ з допомогою змінного резистора R_p на цифровому табло V_{ind} встановлюються нульові покази ЦТ. У результаті буде скоригована АСП усього термометра як НПТ, так і ЦТ до значень одиниці його молодшого розряду. З метою коригування МСП термометра сенсор поміщається в термостат із стабільною температурою, значення якої вимірюється прецизійним термометром. Зміною опору підстроювального резистора R_2 досягають встановлення показів ЦТ рівним показам прецизійного термометра. Для цього значення калібрувальної температури похибка ЦТ не перевищуватиме суми похибок прецизійного термометра та одиниці молодшого розряду ЦТ. Очевидними недоліками такого калібрування є його практична незручність та необхідність залучення достатньо кваліфікованих операторів.

Найдоцільніше реалізувати калібрування ЦТ в цифровій формі, особливістю якої є використання в контролері реверсних лічильників, органи керування якими представлені у вигляді кнопок SW1 та SW2 (на рисунку 3.17 зображені штриховими лініями), конструктивно виведених на корпус вимірювача, що дозволяє шляхом їх вмикання збільшувати або зменшувати вміст лічильника результату з допомогою пари кнопок «+» і «-». За умови використання зразкового термометра на місці експлуатації можна скоригувати як адитивну так і мультиплікативну складові похибки вимірювача з похибками, значення яких буде таким самим як і в попередньому випадку.

За нелінійної функції перетворення приладу рекомендується вибирати калібрувальне значення з коефіцієнтом приблизно рівним 0,82 від максимального значення вимірюваної температури [92].

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 (3.21) [13]:

$$\Delta U_{iclb} = U_{i0} - U_{iclb} \quad (3.21)$$

Калібрувальні коефіцієнти α_{iclb} визначаються як відношення (3.22):

$$\alpha_{iclb} = \frac{\Delta U_{iclb}}{\theta_{clb}} \quad (3.22)$$

Експериментально встановлені значення похибок від нелінійності характеристики перетворення $\Delta_{инт}$ подаються співвідношеннями (3.23):

$$\Delta_{инт} = \frac{\Delta U_{ix}}{\alpha_{iclb}} - \theta_{ix}, \quad (3.23)$$

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

Похибки вимірювання температури при калібруванні дев'яти транзисторів типу BCW61C, представлені на рисунку 3.18 [13]. 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 (рисунок 3.18) 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 рп 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.

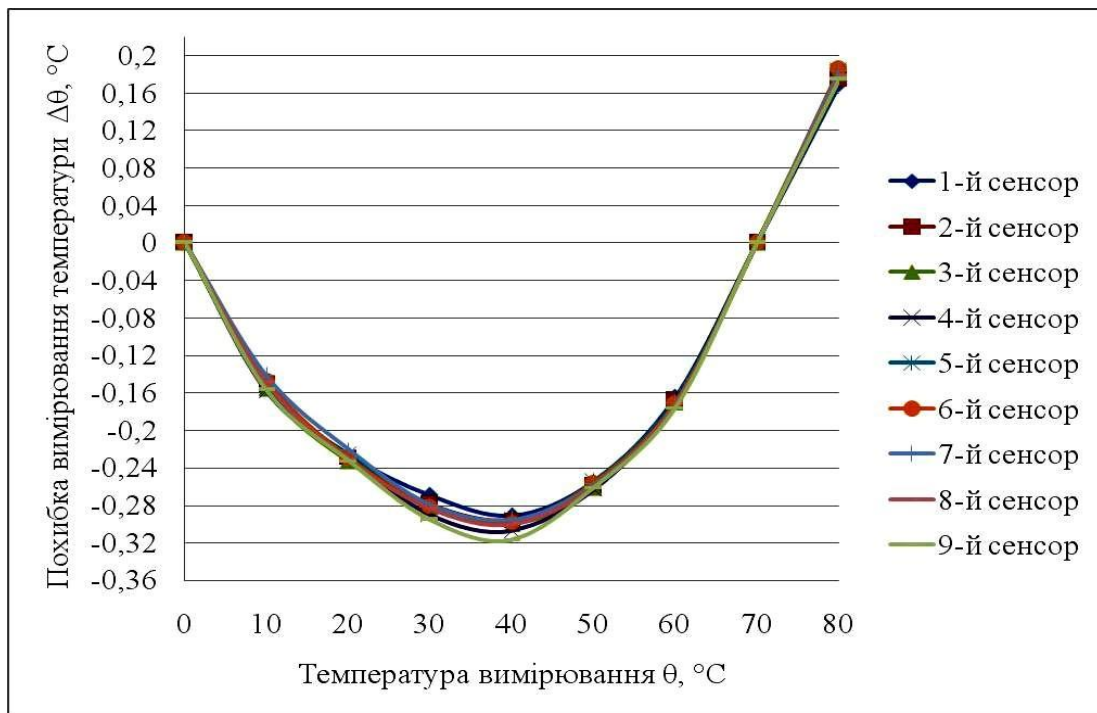


Рисунок 3.18 – Графічна залежність похибки вимірювання температури для дев'яти напівпровідникових перетворювачів при вимірювальному струмі $I_1=1$ мА

Температурну залежність похибки від нелінійності у вимірювальному діапазоні пропонуємо апроксимувати логарифмічною залежністю з урахуванням умов рівності нулю її значень для обох калібрувальних температур (3.24) [13]:

$$\Delta_{инл} = m\eta_i \left[\frac{\theta_x}{\theta_{clb}} \cdot \frac{kT_{clb}}{q} \cdot \ln \frac{T_{clb}}{T_0} - \frac{kT_x}{q} \cdot \ln \frac{T_x}{T_0} \right], \quad (3.24)$$

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

З рівняння (3.24) апроксимаційної залежності похибки від нелінійності $\Delta_{инл}$ знаходимо значення коефіцієнта η_i за експериментальними даними при 30 °C (3.25) [13]:

$$\eta_i = \frac{\Delta_{инл}}{5 \left[\frac{\theta_x}{\theta_{clb}} \cdot \frac{kT_{clb}}{q} \cdot \ln \frac{T_{clb}}{T_0} - \frac{kT_x}{q} \cdot \ln \frac{T_x}{T_0} \right]}. \quad (3.25)$$

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.

Запропоновані методики калібрування цифрових вимірювачів можуть бути реалізовані програмними способами. Апаратно при цьому може використовуватися лише декілька клавіш для уведення інформації про ознаку калібрувальної величини.

Результати експериментальних досліджень представлені в додатку Д «Протокол лабораторних досліджень напівпровідникових сенсорів температури для цифрових вимірювачів різниці температур за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005».

3.4. Висновки до розділу 3

У третьому розділі:

– теоретично обґрунтовано доцільність вибору транзисторних діодів як температурних сенсорів для подальшого застосування в радіометрах з електричним заміщенням;

– подано результати проведених експериментальних досліджень напівпровідникових транзисторних діодів з метою визначення розкиду характеристик між сенсорами для трьох різних значень вимірювальних струмів та розроблено конструкцію сенсорів, які можуть використовуватись в температурних каналах пристроїв для досліджень сонячних систем.

– розроблено структуру цифрового вимірювача різниці температур з досліджуваними сенсорами та запропоновано методику його калібрування з метою коригування адитивних і мультиплікативних складових похибки;

– запропоновано процедуру коригування нелінійної складової похибки у всьому вимірювальному діапазоні, в основу якої покладено визначення параметрів апроксимаційних залежностей сенсорів на основі експериментальних даних.

РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

4.1. Модель функції перетворення сенсора температури на основі р-п переходу

Встановлено, що технічні параметри НПТ визначатимуться електрофізичними параметрами, технологічністю та економічними показниками напівпровідникових матеріалів, з яких вони виготовляються, тому доцільно використовувати такий матеріал як кремній, що має низку незаперечних переваг. Із збільшенням концентрації домішок у власному напівпровіднику верхню граничну температуру застосування НПТ можна збільшувати, а з її зменшенням – знижувати [101]. В залежності від основних електрофізичних та конструктивних параметрів напівпровідникових діодів та транзисторів, які в основному використовуються як електронні елементи, викликає зацікавлення встановлення меж їх температурного діапазону як мікроелектронних сенсорів. Серед усього різноманіття електрофізичних параметрів на термометричні властивості напівпровідникових матеріалів найсуттєвіше впливає рівень їх легування, завдяки чому вони й набувають специфічних характеристик [101]. Рівень легування сучасних напівпровідникових матеріалів може змінювати концентрацію неосновних носіїв електричних зарядів майже на десять порядків – практично від власної концентрації до максимально можливої концентрації рівної ефективній густині станів в їх зоні провідності [101].

Оскільки мова йдеться про вимірювальний перетворювач температури то важливим фактором створення НПТ є вибір типу схмотехнічного елементу і для цього слід вибрати такий елемент, який би забезпечив найкращі метрологічні характеристики [101]. Найпростіший схмотехнічний елемент – напівпровідниковий діод, що являє собою двополісник. Зворотній струм зворотно зміщеного рп-переходу або напругу анод-катод при постійному прямому струмі діода можуть використовуватися як термометричний параметр. В свою чергу, зворотній струм діода, який є суттєво нестабільним, визначається декількома складовими: тепловою,

термогенераційною, витоковою. Саме тому він не може бути вибраний як термометричний параметр [101].

Оскільки сенсор на основі рп-переходу є параметричним перетворювачем, то йому властива методична похибка за рахунок перегріву вимірювальним струмом. Теоретично встановлено, що для типових значень електрофізичних параметрів, геометричних розмірів та конфігурації рп-переходу методична похибка ΔT від перегріву для кремнію не перевищуватиме 0,01 К для вимірювальних струмах до 150 мкА [102]. У загальному випадку струм рп переходу визначатиметься трьома складовими – дифузійною, дрейфовою та рекомбінаційною [103, 104]. При малих значеннях струму вважають, що у прямо зміщеному р-п переході буде низький рівень інжекції, можна не враховувати дрейфову складову струму, і проводять аналіз для теплової та рекомбінаційної складових струму [103, 104] або й взагалі тільки для теплової [105-108]. В більшості літературних джерел аналіз проводиться з певними спрощеннями для р-п переходів, що використовуються як елементи тих чи інших електронних компонентів у відносно вузькому температурному діапазоні використання та при деяких спрощувальних припущеннях стосовно їх електричних режимів роботи. Такий аналіз якісно правильно відображає процеси, що протікають в р-п переході, однак при розробленні математичної моделі доцільно приймати якомога менше необґрунтованих спрощень. Зокрема, слід одночасно враховувати всі три компоненти струму рп-переходу, оскільки практично всі їх електрофізичні параметри доволі сильно, в багатьох випадках експоненційно, залежать від температури. Всі три складові струму рп переходу – дрейфова, дифузійна та рекомбінаційна I_{DR} , I_{DF} , I_R - експоненційно залежать від температури [101]. При цьому рекомбінаційна складова має вдвічі менше значення показника експоненти, тому її температурна залежність значно слабша порівняно із двома іншими, особливо при високих температурах, хоча й значення струму рекомбінації при відносно низьких температурах є превалюючим в кремнієвих арсенід-галієвих рп переходах [103, 104].

Фактично вихідне рівняння математичної моделі рп-переходу як напівпровідникового перетворювача температури можна представити

співвідношенням (4.1) [101]:

$$U = IR_{БД} + \varphi_T \ln \frac{I}{I_{SD}} + 2\varphi_T \ln \left[\sqrt{\frac{I_R^2}{4I_{SD}I} + \frac{I_{SD} + I_R}{I} + 1} - \sqrt{\frac{I_R^2}{4I_{SD}I}} \right]. \quad (4.1)$$

де U – спадок напруги на р-п переході; $I \cdot R_{БД}$ – спад напруги на еквівалентному опорі бази; $\varphi_T = \frac{kT_x}{q}$ – температурний потенціал; T_x – температура р-п переходу; I_{SD} , I_R –

відповідно еквівалентний тепловий струм і струм рекомбінації.

З урахуванням того, що в дисертації використовуються m послідовно сполучених сенсорів рівняння (4.1) переписеться у вигляді (4.2):

$$U_m = I \sum_{i=1}^m R_{БДi} + \varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \frac{I}{I_{SD}} + 2\varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \left[\sqrt{\frac{I_R^2}{4I_{SD}I} + \frac{I_{SD} + I_R}{I} + 1} - \sqrt{\frac{I_R^2}{4I_{SD}I}} \right]. \quad (4.2)$$

У цьому випадку пропонується враховувати розкиди параметрів $R_{БДi}$, I_{SDi} , I_{Ri} напівпровідникового перетворювача температури відносно їх середніх значень (4.3) – (4.5):

$$R_{БДi} = R_{БДc} (1 + \delta_{R_{БДi}});, \quad (4.3)$$

$$I_{SDi} = I_{SDc} (1 + \delta_{I_{SDi}});, \quad (4.4)$$

$$I_R = I_{Rc} (1 + \delta_{I_R});, \quad (4.5)$$

Тоді із врахуванням розкидів сенсорів та, що

$$\varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \frac{I}{I_{SD}} = \varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \frac{I_u (1 + \delta_I)}{I_{SDc} (1 + \delta_{I_{SDi}})} \approx m\varphi_T \frac{I_u}{I_{SDc}} + m\varphi_T \delta_I - \varphi_T \sum_{i=1}^m \delta_{I_{SDi}}, \text{ рівняння (4.2) подається як (4.6):}$$

$$U_{mc} (1 + \delta_U) = IR_{БДc} (m + \sum_{i=1}^m \delta_{БДi}) + m\varphi_T \ln \frac{I}{I_{SDc}} + m\varphi_T \delta_I - \varphi_T \sum_{i=1}^m \delta_{I_{SDi}} + 2\varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \left[\sqrt{1 - B} \right], \quad (4.6)$$

де

$$B = \sqrt{\frac{I_{Rc}^2 (1 + \delta_{I_{Rc}})^2}{4I_{SDc} (1 + \delta_{I_{SDi}}) I_H (1 + \delta_I)}}. \quad (4.7)$$

$$A = \sqrt{B^2 + \frac{I_{SDc} (1 + \delta_{I_{SDi}}) + I_{Rc} (1 + \delta_{I_{Rc}})}{I_H (1 + \delta_I)}} + 1. \quad (4.8)$$

Враховуючи умови $\delta_{SDi} \ll 1$ та $\delta_I \ll 1$, рівняння (4.7) після розкладу знаменника і

підкореневого виразу в ряд та, знехтувавши членами другого порядку малості, представимо таким співвідношенням (4.9):

$$B \approx \sqrt{\frac{I_{Rc}^2}{4I_{SDc}I_H} + \frac{I_{Rc}^2}{4I_{SDc}I_H}(2\delta_{I_{Rc}} - \delta_{I_{SDi}} - \delta_I)} \approx B_c \left[1 + \frac{1}{2}(2\delta_{I_{Rc}} - \delta_{I_{SDi}} - \delta_I) \right], \quad (4.9)$$

$$\text{де } B_c = \sqrt{\frac{I_{Rc}^2}{4I_{SDc}I_H}}.$$

Після подібних перетворень рівняння (4.8) подається як (4.10):

$$A \approx \sqrt{B^2 + A_{1c} \left[1 + \frac{I_{SDc}\delta_{I_{SDi}} - I_{SDc}\delta_I + I_{Rc}\delta_{I_{Rc}} - I_{Rc}\delta_I}{I_{SDc} + I_{Rc}} \right]}, \quad (4.10)$$

$$\text{де } A_{1c} = \sqrt{\frac{I_{SDc} + I_{Rc}}{I_H}}.$$

Із врахуванням співвідношень (4.9) та (4.10) та після розкладу підкореневого виразу в ряд і знехтувавши членами другого порядку малості, вираз для А можна представити у вигляді (4.11):

$$A = \left(B_c^2 + A_{1c} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 + A_2 \right], \quad (4.11)$$

$$\text{де } A_2 = 0,5 \frac{B_c^2(2\delta_{I_{Rc}} - \delta_{I_{SDi}} - \delta_I)}{\left(B_c^2 + A_{1c} + 1 \right)} + 0,5 \frac{A_{1c}}{\left(B_c^2 + A_{1c} + 1 \right)} \left(\frac{I_{SDc}(\delta_{I_{SDi}} - \delta_I) + I_{Rc}(\delta_{I_{Rc}} - \delta_I)}{I_{SDc} + I_{Rc}} \right)$$

Враховуючи, зроблені перетворення остання складова $\left[1 - B \right]$ рівняння (4.6) матиме вигляд (4.12):

$$\left[1 - B \right] \approx \left\{ \left(B_c^2 + A_{1c} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - B_c \right\} \cdot \left(1 + A_{3i} \right), \quad (4.12)$$

$$\text{де } A_{3i} = \left[\frac{\left(B_c^2 + A_{1c} + 1 \right)^{\frac{1}{2}}}{\left(B_c^2 + A_{1c} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - B_c} A_2 + \frac{1}{2} \frac{B_c(\delta_{I_{Rc}} - \delta_{I_{SDi}} - \delta_I)}{\left(B_c^2 + A_{1c} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} - B_c} \right].$$

Тоді із врахуванням співвідношення $A_{3i} \ll 1$, подану вище складову рівняння (4.6) представимо у вигляді (4.13):

$$\begin{aligned} 2\varphi_t \sum_{i=1}^m \ln \left[1 - B \right] &\approx 2\varphi_t \sum_{i=1}^m \ln \left\{ \left(A_c - B_c \right) \left[1 + A_{3i} \right] \right\} \\ &\approx 2\varphi_t \sum_{i=1}^m \ln \left[A_c - B_c \right] + 2\varphi_t \sum_{i=1}^m \ln A_{3i} = 2m\varphi_t \ln \left[A_c - B_c \right] + 2\varphi_t \sum_{i=1}^m \ln A_{3i}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

З метою оцінювання загальної похибки від розкиду параметрів сенсорів рівняння (4.6) тепер перепишемо у вигляді (4.14):

$$U_{mc} \delta_{Uc} = I_n R_{БДc} \sum_{i=1}^m \delta_{R_{БДi}} + m I_n R_{БДc} \delta_I + m \varphi_T \delta_I - \varphi_T \sum_{i=1}^m \delta_{I_{SDi}} + 2 \varphi_T \sum_{i=1}^m A_{3i}, \quad (4.14)$$

Тоді відносну похибку середнього значення спаду напруги на сенсорі δ_{Uc} знаходимо як (4.15):

$$\begin{aligned} \delta_{Uc} &= \frac{I_n R_{БДc}}{U_{mc}} \sum_{i=1}^m \delta_{R_{БДi}} + \frac{m I_n R_{БДc}}{U_{mc}} \delta_I + \frac{m \varphi_T}{U_{mc}} \delta_I - \frac{\varphi_T}{U_{mc}} \sum_{i=1}^m \delta_{I_{SDi}} + \frac{2 \varphi_T}{U_{mc}} \sum_{i=1}^m A_{3i} = \\ &= \frac{m I_n R_{БДc}}{U_{mc}} \left[\delta_I + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta_{R_{БДi}} \right] + \frac{m \varphi_T}{U_{mc}} \left[\delta - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\delta_{I_{SDi}} - \frac{1}{2} A_{3i}) \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

Шляхом вибору певного значення струму I , що протікає через рn-перехід і у визначеному температурному діапазоні, границі якого будуть встановлені нижче, можна забезпечити виконання таких нерівностей [109, 110] (4.16) і (4.17):

$$\frac{I_{SD} + I_R}{I} \leq \delta_1, \quad (4.16)$$

$$\frac{I_R}{\sqrt{I \cdot I_{SD}}} \leq \delta_2, \quad (4.17)$$

де δ_1, δ_2 – допустимі значення методичних похибок;

то спадок напруги на р-n переході визначиться як (4.18) [101]:

$$U_d = I R_{БД} + \varphi_T \ln \frac{I}{I_{SD}} + \varphi_T \ln \left(1 + \frac{I_{SD} + I_R}{I} \right) + \varphi_T \ln \left(1 - \sqrt{\frac{I_R^2}{I \cdot I_{SD}}} \right), \quad (4.18)$$

За аналогією до попереднього аналізу, у рівнянні (4.18) теж доцільно враховувати розкиди параметрів сенсорів відносно їх середнього значення, тоді отримаємо рівняння (4.19):

$$U_{dc} (1 + \delta_{Ud}) = I R_{БДc} (m + \sum_{i=1}^m \delta_{БДi}) + m \varphi_T \ln \frac{I}{I_{SDc}} + m \varphi_T \delta_I - \varphi_T \sum_{i=1}^m \delta_{I_{SDi}} + \varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \left(\left[1 + C \right] \right) - \varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \left(\left[1 - D \right] \right), \quad (4.19)$$

$$\text{де } C = \frac{I_{SD} + I_R}{I}; \quad D = \sqrt{\frac{I_R^2}{I \cdot I_{SD}}}.$$

Із врахуванням співвідношень (4.4) та (4.5), складова рівняння C (4.19) представляється як (4.20):

$$C = \frac{I_{SDc}(1 + \delta_{I_{SDi}}) + I_{Rc}(1 + \delta_{I_{Rc}})}{I_H(1 + \delta_I)} = C_{1c} + \frac{I_{SDc}\delta_{I_{SDi}} - I_{SDc}\delta_I + I_{Rc}\delta_{I_{Rc}} - I_{Rc}\delta_I}{I_H}, \quad (4.20)$$

$$\text{де } C_{1c} = \frac{I_{SDc} + I_{Rc}}{I_H},$$

Враховуючи умови $\delta_{SDi} \ll 1$ та $\delta_I \ll 1$, складову $(1+C)$ рівняння (4.19) після нехтування членами другого порядку малості, представимо таким співвідношенням (4.21):

$$\langle 1 + C \rangle \approx \langle 1 + C_{1c} + C_{2i} \rangle, \quad (4.21)$$

$$\text{де } C_{2i} = \frac{I_{SDc}\delta_{I_{SDi}} - I_{SDc}\delta_I + I_{Rc}\delta_{I_{Rc}} - I_{Rc}\delta_I}{I_H},$$

Враховуючи, що $C_{1c} \ll 1$ та $C_{2i} \ll 1$ та зроблені перетворення, складова $\varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \langle 1 + C \rangle$ рівняння (4.19) матиме такий вигляд (4.22):

$$\varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \langle 1 + C \rangle \approx \varphi_T \sum_{i=1}^m \ln(1 + C_{1c} + C_{2i}) = m\varphi_T C_{1c} + \varphi_T \sum_{i=1}^m C_{2i}. \quad (4.22)$$

Після подібних перетворень складова D рівняння (4.19) подається як (4.23):

$$D = \sqrt{\frac{I_R^2}{I \cdot I_{SD}}} = \sqrt{D_{1c}^2 + D_{1c}^2(2\delta_{I_{Rc}} - \delta_{I_{SDi}} - \delta_I)} \approx D_{1c}^2 \left[1 + \frac{1}{2}(2\delta_{I_{Rc}} - \delta_{I_{SDi}} - \delta_I) \right], \quad (4.23)$$

$$\text{де } D_{1c} = \sqrt{\frac{I_{Rc}^2}{I_{SDc} \cdot I_H}}.$$

З урахуванням (4.23) складову $(1-D)$ рівняння (4.19) представимо таким співвідношенням (4.24):

$$\langle 1 - D \rangle \approx \left(1 - D_{1c} + \frac{D_{1c}}{2}(2\delta_{I_{Rc}} - \delta_{I_{SDi}} - \delta_I) \right). \quad (4.24)$$

Враховуючи зроблені перетворення та, що виконується умова $D \ll 1$ складова $\varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \langle 1 - D \rangle$ рівняння (4.19) матиме такий вигляд (4.25):

$$\varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \langle 1 - D \rangle \approx \varphi_T \sum_{i=1}^m \ln \langle 1 - D_{1c} \rangle + \varphi_T \sum_{i=1}^m \ln D_{1c} \approx -m\varphi_T D_{1c}, \quad (4.25)$$

Із урахуванням зроблених перетворень (4.22) та (4.25) перепишемо рівняння (4.19) у вигляді (4.26):

$$U_{dc} \delta_{Ud} = I_n R_{БДс} \sum_{i=1}^m \delta_{R_{Бв}} + m I_n R_{БДс} \delta_I + m \varphi_T \delta_I - \varphi_T \sum_{i=1}^m \delta_{I_{SDi}} + m \varphi_T C_{1c} + \varphi_T \sum_{i=1}^m C_{2i} - m \varphi_T D_{1c}. \quad (4.26)$$

Тоді відносна похибка середнього значення спаду напруги на транздіодних сенсорах δ_{Ud} знаходимо як (4.27):

$$\begin{aligned} \delta_{Ud} &= \frac{I_n R_{БДс}}{U_{dc}} \sum_{i=1}^m \delta_{R_{Бв}} + \frac{m I_n R_{БДс}}{U_{dc}} \delta_I + \frac{m \varphi_T}{U_{dc}} \delta_I - \frac{\varphi_T}{U_{dc}} \sum_{i=1}^m \delta_{I_{SDi}} + \frac{m \varphi_T}{U_{dc}} (C_{1c} - D_{1c}) + \frac{\varphi_T}{U_{dc}} \sum_{i=1}^m C_{2i} = \\ &= \frac{m I_n R_{БДс}}{U_{dc}} \left[\delta_I + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta_{R_{Бв}} \right] + \frac{m \varphi_T}{U_{dc}} \left[\delta_I + (C_{1c} - D_{1c}) - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\delta_{I_{SDi}} + C_{2i}) \right] \end{aligned} \quad (4.27)$$

В біполярному транзисторі, крім прямої напруги база-емітер, можна використовувати температурні залежності колекторного і емітерного струмів, коефіцієнта підсилення транзистора тощо. Однак, залежність струмів від температури є дуже нелінійною - експоненційною, крім того НПТ у цьому випадку стає триполюсником. При використанні двох інших термометричних параметрів транзистора суттєво, порівняно з діодом, ускладнюється схема вторинного приладу [101]. Термометричним параметром польових транзисторів може бути опір відкритого каналу, однак розкид його значень, мале значення температурного коефіцієнта та велика його залежність від режиму роботи ставить під сумнів доцільність їх використання як НПТ [103, 104, 112-115].

Вольт-амперна характеристика транздіода визначається рівнянням Молла-Еберса [88, 89, 103, 104, 116], у якому слід врахувати, що при з'єднаних виводах електродів колектор-база, колекторну напругу визначаємо як $U_K = \alpha I R_K - I R_B / (\beta + 1)$, де $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ - статичний коефіцієнт передачі транзистора, R_K - опір колектора та виводів колектора. При струмах рп-переходу не більших $I \leq 0,1$ мА напруга колектора (не більша декількох мілівольт) буде істотно меншою температурного потенціалу й експоненту розкладається в ряд, обмежуючись тільки лінійним членом. Тоді вольт-амперна характеристика транздіода представляється у виді (4.28) [117]:

$$I = I_{SD} \left(e^{\frac{U_{XT} - U_{BT}}{\varphi_T}} - 1 \right) + I_R \left(e^{\frac{U_{XT} - U_{BT}}{2\varphi_T}} - 1 \right) + c I_{SD}, \quad (4.28)$$

де $c = R_{KE} / R_{EE}$; $R_{KE} = \alpha R_K - R_B / (\beta + 1)$ - еквівалентний опір колектора; $R_{EE} = \varphi_T / I$ - опір емітера;

а спадок напруги на ньому (4.29) [101]:

$$U_{XT} = IR_{BT} + \varphi_T \ln \frac{I}{I_{SD}} + \varphi_T \ln \left[1 + \frac{I_{SD}(1-c) + I_R}{I} \right] + \varphi_T \ln \left(1 - \sqrt{\frac{I_R^2}{I \cdot I_{SD}}} \right), \quad (4.29)$$

де $R_{BT} = R_{EE} + R_{KE} + R_{JC}$ - еквівалентний внутрішній опір напівпровідникового сенсора.

Порівняння виразів (4.18) і (4.29) показує, що в транзисторному діоді (транздіоді) істотно зменшується вплив опору бази і дещо зменшується вплив теплового струму [101].

Як показує аналіз рівняння (4.26), метрологічні властивості сенсорів температури з р-п-переходом визначатимуться точністю встановлення їх параметрів. Оскільки сучасна напівпровідникова технологія при серійному виробництві не в змозі з високою точністю (менше декількох десятих відсотка) відтворювати основні параметри рп-переходів, то й метрологічні характеристики сенсорів температури з рп-переходом принципово матимуть значний технологічний розкид від зразка до зразка. Отже, основною проблемою побудови прецизійних та метрологічно надійних НПТ є забезпечення взаємозамінності їх характеристик. Як вже вище було зазначено, використання для уніфікації параметрів сенсорів схемотехнічних або технологічних прийомів призводить в результаті до суттєвого ускладнення схем і, відповідно, вартості термометрів на їх основі. Набагато привабливішим простим в реалізації і дуже ефективним для цієї мети є метод попереднього відбору транзисторів та статистичного усереднення їх характеристик завдяки послідовному сполученню з подальшим коригуванням їх похибок в декількох температурних точках і врахуванням цих індивідуальних характеристик у вторинному приладі (програмним способом) [13].

4.2. Функція перетворення вдосконалених цифрових вимірювачів різниці температур для випробувань сонячних перетворювачів

Реальна функція перетворення цифрових вимірювачів різниці температур (ЦВРТ) для випробувань сонячних перетворювачів також суттєво залежатиме від параметрів неідеальності використаної елементної бази.

Напряга на неінвертувальному вході U_{BX}^+ АЦП дорівнюватиме (4.30):

$$U_{BX}^+ = U_{X2} + m_2 E_N + e_2 + e_{B2}, \quad (4.30)$$

напряга на інвертувальному вході U_{BX}^- АЦП дорівнюватиме (4.31):

$$U_{BX}^- = U_{X1} + m_1 E_N + e_1 + e_{B1}, \quad (4.31)$$

де $U_{X1} = U_{X01} - \alpha_1 \theta_{X1} + \varphi_{T1} \ln \frac{I_{X1}}{I_{S01}} - \beta_1 \varphi_{T1} \ln \frac{T_1}{T_0} + I_{X1} R_{X1} + I_{BX1} R_{X1}$,

$U_{X2} = U_{X02} - \alpha_2 \theta_{X2} + \varphi_{T2} \ln \frac{I_{X2}}{I_{S02}} - \beta_2 \varphi_{T2} \ln \frac{T_2}{T_0} + I_{X2} R_{X2} + I_{BX2} R_{X2}$ – спади напруг на

діодних сенсорах VD1 та VD2 відповідно; U_{X01} , U_{X02} – спади напруг на діодних сенсорах при $T_0=273,15^0\text{C}$; $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 10$ мВ/°С – температурні коефіцієнти напруги обидвох діодних сенсорів; $I_{X1}=m_1 E_0/R_{I1}$, $I_{X2}=m_2 E_0/R_{I2}$ – вимірювальні струми, що протікають через сенсори VD1 та VD2 відповідно; m_1 , m_2 – коефіцієнти поділу ПДН; $R_{X1}=U_{X1}/I_{X1}$, $R_{X2}=U_{X2}/I_{X2}$ – статичні опори сенсорів VD1 при температурі T_1 та струмі I_{X1} та VD2 при температурі T_2 та струмі I_{X2} ; n – коефіцієнт поділу подільника ПДН під час формування опорної для АЦП напруги; I_{BX1} , I_{BX2} – вхідні струми операційних підсилювачів (ОП) відповідно DA1, DA2; e_1 , e_2 – напруги зміщення ОП, відповідно, DA1, DA2; e_{B1} , e_{B2} – напруги зміщення інвертувального та неінвертувального входів АЦП; $\varphi_T = \frac{kT_X}{q}$ – температурний потенціал; R_{I1} , R_{I2} – значення опорів

струмозадавальних резисторів для сенсорів VD1 та VD2 відповідно.

Код результату перетворення АЦП дорівнюватиме (4.32):

$$N_X = k_{AD} \left[U_{BX}^+ - U_{BX}^- \right] k_{AD} \left[\alpha_2 \theta_{X2} - \alpha_1 \theta_{X1} \right] + \Delta a_e \quad (4.32)$$

де $\Delta a_e = \Delta \varphi_{T21} + \Delta U_{X0} + \Delta e_{21}$ – еквівалентна АСП ЦВРТ; $\Delta U_{X0} = U_{X02} - U_{X01}$ – АСП через розкид значень початкових напруг U_{X01} , U_{X02} обидвох сенсорів VD1 та VD2;

$\Delta e_{21} = e_2 + e_{B2} - e_1 - e_{B1} + \left(I_{X2} R_{X2} + I_{BX2} R_{N22} \right) \left(1 + A_{3i} \right) - \left(I_{X1} R_{X1} + I_{BX1} R_{N11} \right)$ - еквівалентна АСП, зумовлена напругами зміщення та вхідними струмами обидвох ОП;

$$\Delta \varphi_{T21} = \varphi_{T2} \ln \frac{I_{X2}}{I_{S02}} - \varphi_{T1} \ln \frac{I_{X1}}{I_{S01}}.$$

Як показав проведений аналіз, в процесі реалізації цифрових вимірювачів різниці температур основними чинниками їх похибки є неоднаковість функцій перетворення температурних сенсорів, АСП і МСП використаної елементної бази. В процесі виготовлення слід скоригувати значення як адитивної, так і мультиплікативної складових похибки при двох значеннях температури. Коригування адитивної складової похибки зручно здійснювати загалом при довільному значенні температури, наприклад, рівному температурі довкілля, а для коригування мультиплікативної складової похибки доцільно використовувати еталонний вимірювач, змінюючи відповідно коефіцієнт перетворення будь-якого з масштабувальних елементів тракту перетворення, або уведення поправкового множника [90].

4.3. Шляхи покращення метрологічних характеристик каналів вимірювання температури для випробувань сонячних колекторів

4.3.1. Функція перетворення каналів вимірювання температури для випробувань сонячних колекторів

Під час реалізації ЦТ на його функцію перетворення суттєво впливатимуть параметри неідеальності використаної елементної бази.

Напруга на неінвертувальному вході U_{BX}^+ АЦП дорівнюватиме (4.33):

$$U_{BX}^+ = U_X + mE_N + e_1 + e_4 + I_{X1} R_X + I_{BX1} R_{X1} + e_{B1} + \varphi_T \ln \frac{I_{X1}}{I_{S0}}, \quad (4.33)$$

напруга на інвертувальному вході U_{BX}^- АЦП дорівнюватиме (4.34):

$$U_{BX}^- = E_N \left(1 + \frac{R_{N2}}{R_{N1}} \right) + e_3 \frac{R_{N2}}{R_{N1}} + e_2 + I_{BX2} R_{N12} + e_{B2}, \quad (4.34)$$

де $U_X = U_{X0} - \alpha \theta_X + \varphi_T \ln \frac{I_{X1}}{I_{S0}} - \beta \varphi_T \ln \frac{T}{T_0} + I_{X1} R_X$ - спад напруги на діодному сенсорі; U_{X0} - спад напруги на діодному сенсорі при $T_0=273,15^\circ\text{C}$; $\alpha \approx 10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ -

температурний коефіцієнт напруги діодного сенсора; $R_X = R_{ЛЗ} + U_X/I_{X11}$; U_X/I_{X11} – статичний опір сенсора при температурі T та струмі I_{X11} ; $R_{ЛЗ}$ – опір ліній зв'язку між сенсором та входом ЦТ; m – коефіцієнт поділу внутрішнього подільника; I_{BX1} , I_{BX2} – вхідні струми операційних підсилювачів (ОП) відповідно DA1, DA2; e_1 , e_2 , e_3 , e_4 – напруги зміщення ОП, відповідно, DA1, DA2, DA3, DA4; e_{B1} , e_{B2} – напруги зміщення інвертувального та неінвертувального входів АЦП; $\varphi_T = kT_x/q$ – температурний потенціал. Код результату перетворення АЦП дорівнюватиме (4.35):

$$N_x = k_{AD} \left[\frac{U_{BX}^+ - U_{BX}^-}{I_{S0}} \right] = k_{AD} \left\{ -\alpha\theta_x + \varphi_T \ln \frac{I_{X11}}{I_{S0}} + \left[U_{X0} - E_N \left(1 + \frac{R_{N2}}{R_{N1}} - m \right) \right] + \left(e_1 + e_3 \frac{R_{N2}}{R_{N1}} + e_2 + e_4 + e_{B1} + e_{B2} + I_{X11} R_X + I_{BX2} R_{N12} \right) \right\}, \quad (4.35)$$

$$= k_{AD} \left\{ -\alpha\theta_x + \varphi_T \ln \frac{I_{X11}}{I_{S0}} + \Delta U_{X0} + e_{екв} + I_{X11} R_X \right\},$$

де $\Delta U_{X0} = U_{X0} - E_N \left(1 + \frac{R_{N2}}{R_{N1}} - m \right)$; $e_{екв} = e_1 + e_3 \frac{R_{N2}}{R_{N1}} + e_2 + e_4 + e_{B1} + e_{B2} + I_{BX2} R_{N12}$.

Оцінка максимального значення АСП: якщо $\delta_{X0} \leq \pm 0,5\%$, то $\Delta_{X0} = U_{X0} \delta_{X0} \leq \pm 3,14 \cdot 0,005 \approx \pm 1,5$ мВ, $\delta_{EN} \leq \pm 0,5\%$, то $\Delta_{EN} = E_N \delta_{EN} \leq \pm 1,2 \cdot 0,005 \approx \pm 6$ мВ. $\delta_{N2} \approx \delta_{N1} \leq \pm 0,1\%$, $R_{N2} \approx 30$ кОм; $R_{N1} \approx 10$ кОм; $\delta_m \leq \pm 0,5\%$, то $E_N [(\delta_{N2} + \delta_{N1}) R_{N2}/R_{N1} + \delta_m] \leq \pm 1,2(3 \cdot 2 \cdot 0,001 + 0,005) \approx \pm 6$ мВ. Якщо $e_1 \approx e_2 \approx e_3 \approx e_4 \approx e_{B1} \approx e_{B2} \approx \pm 2$ мВ, то $e_{екв} \approx \pm 16$ мВ. Отже, $(\Delta N_x)_{доп} \approx k_{AD}(1,5 + 6 + 12 + 16) \approx k_{AD}(35 \text{ мВ}) \leq \pm 3,500$ °С.

Якщо дискретність показів ЦТ буде становити $0,001$ °С, то слід передбачити багаторозрядне встановлення «нуля» ЦТ.

Оцінка максимального значення МСП: якщо $\delta_{kAD} \approx \delta_a \leq \pm 0,1\%$, то мультиплікативне підстроювання $\delta_{МСП} = \delta_{kAD} + \delta_a \leq \pm 0,2\%$, слід буде також проводити в межах останніх трьох декад показу. Тоді код результату вимірювання температури визначатиметься співвідношенням (4.36):

$$N_x = k_{AD} \left[\frac{U_{BX}^+ - U_{BX}^-}{I_{S0}} \right] \left[k_{AD} \left(-\alpha\theta_x + \varphi_T \ln \frac{I_{X11}}{I_{S0}} + \Delta U_{X0} + e_{екв} + I_{X11} R_X \right) \mp \Delta N_x \right] \cdot \left(\mp \delta_{МСП} \right), \quad (4.36)$$

4.3.2. Коригування похибок термометра із змінюванням двох значень вимірювальних струмів

Як показав аналіз похибок, код результату перетворення N_{XI} із значенням вимірювального струму I_{XI} визначатиметься співвідношенням (4.37) та суттєво залежить від АСП тракту перетворення:

$$N_{X1} = k_{AD} \left(U_{BX1}^+ - U_{BX}^- \right) \left[k_{AD} \left(-\alpha \theta_X + \varphi_T \ln \frac{I_{XI1}}{I_{S0}} + \Delta U_{X0} + e_{екв} + I_{XI1} R_X \right) \right], \quad (4.37)$$

З метою спрощення та автоматизації процесу калібрування відомим є метод змінювання вимірювальних струмів, практична реалізація якого подана на рисунку 4.1. При цьому для випадку різночасового розділення вимірювального та коригувального каналів через сенсор пропускають вимірювальні струми різних значень I_{XI1} та I_{XI2} , для яких отримують різні значення кодів (4.38):

$$N_{X2} = k_{AD} \left(U_{BX2}^+ - U_{BX}^- \right) \left[k_{AD} \left(-\alpha \theta_X + \varphi_T \ln \frac{I_{XI2}}{I_{S0}} + \Delta U_{X0} + e_{екв} + I_{XI2} R_X \right) \right], \quad (4.38)$$

різниця яких дасть код результату вимірювання N_X (4.39):

$$N_X = N_{X1} - N_{X2} = k_{AD} \left[\frac{kT}{q} \ln \frac{I_{XI1}}{I_{XI2}} + I_{XI1} - I_{XI2} \right] R_X. \quad (4.39)$$

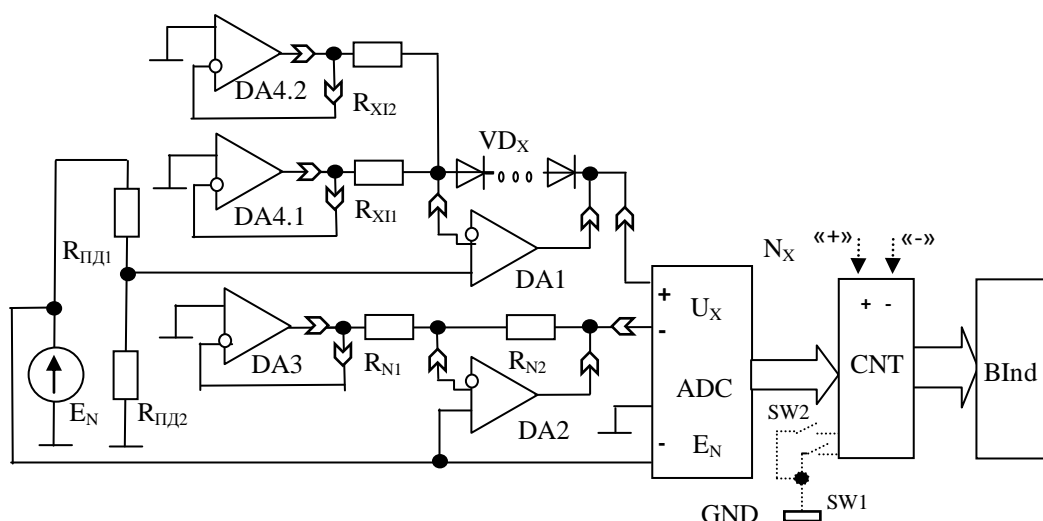


Рисунок 4.1 – Структурна схема цифрового вимірювача температури із змінюванням двох значень струмів

Як показує рисунок 4.1 перемикання значень струмів відбуватиметься шляхом програмного перемикання резисторів R_{XI1} та R_{XI2} . Це реалізується шляхом активізації певних виводів програмованої мікросхеми PSoC шляхом замикання виводів ОП DA4.1 та DA4.2 відповідно. Аналіз співвідношення (4.39) показує, що АСП тракту перетворення ЦВТ коригується.

Однак суттєвим недоліком такої реалізації ЦВТ є значне зменшення вхідного вимірювального сигналу на кінцях вимірювального діапазону. Дійсно, якщо співвідношення між двома значеннями вимірювальних струмів становитиме $I_{XI1}/I_{XI2}=10$, то в околі максимальних температур $T_X \approx 400$ К значення еквівалентної

вхідної напруги приблизно становитиме $\frac{k}{q} (T_X - T_0) \ln \frac{I_{XI1}}{I_{XI2}} \approx 20$ мВ. Без модуляції

вимірювальних струмів це значення приблизно буде рівним $\varepsilon_{\theta X} \approx 200$ мВ. Отже, під час змінювання значень вимірювальних струмів на порядок еквівалентне значення вхідної напруги зменшуватиметься приблизно на порядок. Це призводить до необхідності використання багаторозрядних АЦП та зростання впливу випадкової складової похибки ЦВТ, зумовленою внутрішніми та зовнішніми шумами. Окрім цього, аналіз співвідношення (4.40) показує, що в ЦВТ навіть із змінюванням значень вимірювальних струмів на порядок не забезпечується інваріантність до впливу опорів сенсора та ліній зв'язку.

4.3.3. Шляхи забезпечення в термометрах інваріантності до значень опорів ліній зв'язку

Аналіз виразу (4.39) показує, що в запропонованій структурі ЦВТ АСП коригуватиметься, але не забезпечується інваріантність до значень опорів ліній зв'язку. З цією метою слід використати змінювання трьох значень струму (рисунок 4.2).

Два перші значення кодів отримуватимуться так, як показано вище. Третє значення коду отримуватиметься шляхом під'єднання третього резистора R_{XI3} (рисунок 4.2) (4.40):

$$N_{X3} = k_{AD} \left(U_{BX3}^+ - U_{BX}^- \right) \approx \left[k_{AD} \left(-\alpha \theta_X + \varphi_T \ln \frac{I_{XI3}}{I_{S0}} + \Delta U_{X0} + e_{екв} + I_{XI3} R_X \right) \right]. \quad (4.40)$$

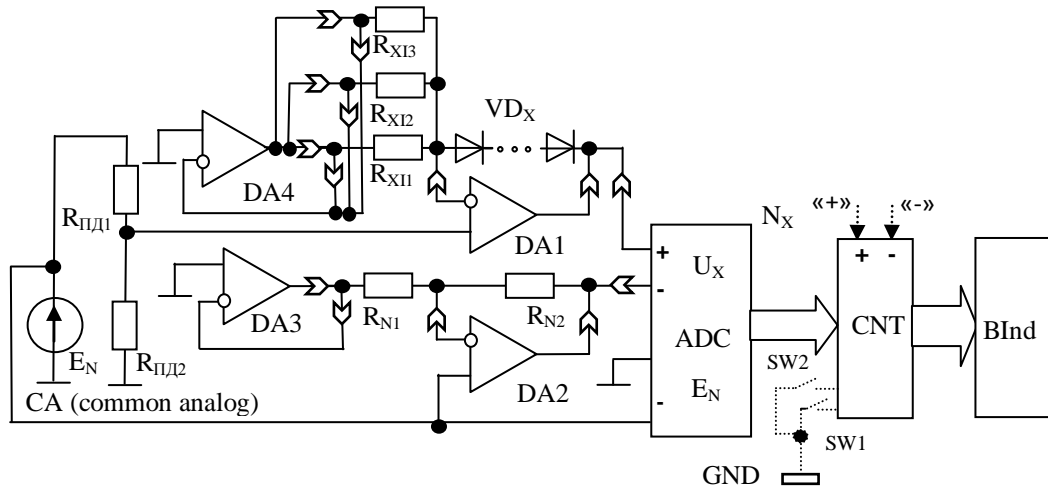


Рисунок 4.2 – Структурна схема цифрового вимірювача температури із забезпеченням інваріантності до параметрів ліній зв'язку

Для опрацювання результатів перетворень доцільно використати такий алгоритм (4.41):

$$N_x = 2N_{x1} - N_{x2} - N_{x3} = k_{AD} \left[\frac{kT}{q} \ln \frac{I_{x1}^2}{I_{x2} I_{x3}} + \alpha (I_{x1} - I_{x2} - I_{x3}) R_x \right]. \quad (4.41)$$

Якщо вибрати значення вимірювальних струмів за співвідношенням $2I_{x1} - I_{x2} - I_{x3} = 0$, то результат вимірювання буде інваріантний (незалежний) від опорів ліній зв'язку. Для забезпечення цього слід підбирати вказану умову для деякого значення опорів ліній зв'язку R_x .

Під час модуляції вимірювальних струмів еквівалентно суттєво зменшуються спадки напруг на сенсорах під час опрацювання сигналів. Дійсно, під час вимірювання температури біля $100\text{ }^\circ\text{C}$ та вибраних значеннях струмів $I_{x1}=1\text{ mA}$, $I_{x2}=0,1\text{ mA}$ та $I_{x3}=1,9\text{ mA}$, значення вхідної еквівалентної напруги становитиме приблизно $\frac{k(T_x - T_0)}{q} \ln \frac{I_{x1}^2}{I_{x2} I_{x3}} \approx 14\text{ mV}$, а без змінювання струмів – 200 mV , тобто в 14 разів меншим. При цьому суттєво впливатимуть випадкові складові похибок, що й було перевірено експериментально. Тому від цього методу уніфікації характеристик вимірювальних каналів практично відмовились.

4.4. Бюджет непевностей під час випробувань сонячних перетворювачів

Основною характеристикою якості вимірювань є непевність результату (англ. «uncertainty»). Слово «непевність» означає сумнівність, тому у метрологічному розумінні «непевність» означає сумніви щодо отриманого значення результату вимірювання

Розроблена вченими світу теорія непевності зумовила появу документа Міжнародної організації стандартизації ISO «Guide to the expression of uncertainty in measurement» (GUM), виданого 1993 р. Відповідно до GUM непевність результату вимірювання означено як «параметр, що пов'язаний (об'єднаний) з результатом вимірювання і який характеризує розкид значень, які обґрунтовано можна приписати вимірюваній величині» [120].

Відомо, що однією з основних характеристик, що визначають ефективність сонячних колекторів є їх коефіцієнт корисної дії (ККД) (розділ 2, формула 2.4), значення якого η може бути встановлено експериментально та розраховане за стандартизованим співвідношенням [14, 17], в якому враховуються усі основні впливні величини.

На етапі проектування слід оцінювати тільки непевності типу В, оскільки ще немає результатів вимірювань. При оцінюванні стандартної непевності за типом В $u_B(\eta)$ результату визначення ККД слід врахувати всі складові рівняння (2.4): v_m – масова швидкість потоку рідини; c_f – питома теплоємність рідинного теплоносія; ΔT – різниця температур на вході та на виході; t – час вимірювання; A_G – загальна площа колектора; G – загальна поверхнева густина потоку сонячного випромінювання.

Стандартну непевність за типом В визначають за апріорною інформацією про особливості вимірювання енергетичної освітленості методом електричного заміщення з використанням радіометра [121], наприклад, інформацією нормативних документів, специфікації виробників тощо.

Слід зазначити, що за походженням розрізняють чотири фактори непевностей: інструментальні непевності, непевності встановлення, непевності методу і особистісні непевності [91]. Фактори інструментальних непевностей є наслідком

недосконалості принципу дії і конструктивно-технічного виконання засобів вимірювань. Вони можуть бути виявлені шляхом калібрування (повірки) засобів вимірювань в робочих умовах експлуатації та внесення поправок в результати вимірювання, що і буде забезпечуватися в нашому випадку, коли радіометр з паралельним електричним заміщенням буде відкалібрований за державним спеціальним еталоном енергетичної освітленості [122].

Факторами непевностей встановлення є відхилення умов використання засобів вимірювань від умов їх градування або від оптимальних умов. Наприклад, відхилення впливних величин або неінформативних параметрів вхідного сигналу від їх номінальних значень. Фактори непевностей методу є наслідком недосконалості методу вимірювань, використання наближених формул, неповного узгодження характеристик засобів вимірювань з характеристиками досліджуваного об'єкту. Фактори особистісних непевностей обумовлені психофізичними особливостями експериментатора, пов'язані із втомою чи схильністю підвищувати чи занижувати відлік, заокругленням результату. При використанні цифрових ЗВТ практично немає впливу на результат вимірювання цієї складової непевності.

Під час аналізу закони розподілу непевностей зазвичай є невідомими, тому здебільшого приймають рівномірний закон розподілу впливних факторів. Тоді непевність цих складових оцінюють як границю відхилення значення вимірюваної величини від її оцінки.

Відомо, що сучасні методи та засоби випробувань сонячних перетворювачів дозволяють оцінювати значення ККД з межею допустимих значень похибки біля 7 % [17]. Під час порівняння характеристик сонячних перетворювачів різних типів та виробників така точність є недостатньою, тому в роботі з метою підвищення точності визначення ККД пропонується в уставах для випробувань СК передбачити заходи для підвищення точності вимірювання таких їх стандартизованих параметрів як загальна поверхнева густина потоку сонячного випромінювання, різниці температур СК та температури довкілля, вхідної та вихідної температури рідинного носія колектора.

В стандартах допускається зміна загальної поверхневої густини потоку

сонячного випромінювання в межах до $\pm 50/800=6,3\%$ [14]. Тому в роботі пропонується для випробувань сонячних колекторів використовувати імітатори сонячного випромінювання, в яких параметри створеного потоку можна вимірювати з допомогою радіометрів [14]. Для побудови радіометрів як було зазначено вище доцільно використати метод електричного заміщення, якому властиві такі основні фактори непевностей як методична непевність електричного заміщення та непевність вимірювання різниці температур під час електричного заміщення. Зроблений аналіз показує, що значення методичної непевності електричного заміщення може становити десяті частки відсотка ($\leq \pm 0,5\%$) [93]. Непевність вимірювання різниці температур залежатиме від таких факторів як розкид параметрів сенсорів від зразка до зразка, нагрівання сенсорів вимірювальним струмом та непевності, зумовлені ЦВРТ.

Зроблений аналіз у розділі 3 показав, що виходячи з вказаних вище особливостей, як сенсори температури найдоцільніше використати транзисторні діоди, яким властиві похибки, зумовлені розкидом параметрів сенсорів від зразка до зразка та їх нагріванням вимірювальним струмом.

Похибкою від нагрівання термоперетворювачів вимірювальним струмом можна знехтувати, якщо використовувати відносно низькі струми, що допускається при застосуванні сучасних чутливих АЦП сигналів низького рівня. Як показує аналіз, для суттєвого зменшення впливу складових похибок можна використати метод усереднення, метод калібрування та метод уведення поправок.

Максимальне значення АСП цифрового вимірювача різниці температур залежить від неоднаковості спадків напруги на обох сенсорах, значення похибки опорної напруги, значення напруги зміщення операційних підсилювачів в мікросхемі АЦП PSoC, значення неоднаковості струмів, що протікають через обидва сенсори, та неоднаковості внутрішніх опорів сенсорів. Як показано в розділі 4, стор. 142 похибка через неоднаковість спадків напруги на обох сенсорах не перевищує $\pm 0,05^\circ\text{C} \cdot 10\text{мВ}/^\circ\text{C} = 0,5\text{мВ}$. Значення опорної напруги можна виміряти прецизійним вольтметром Picotest M3511A із похибкою $\delta_{E0} \leq \pm 0,012\%$, тоді $\Delta_{E0} = E_0 \delta_{E0} \leq 1,2 \cdot 0,00012 \approx \pm 0,144\text{ мВ}$. Напруги зміщення операційних підсилювачів в

мікросхемі PSoC $e_1 \approx e_2 \approx e_{B1} \approx e_{B2} \approx \pm 2$ мВ. Неоднаковості струмів, що протікають через обидва сенсори, залежать від інструментальних похибок струмозадавальних резисторів (розділ 3, рис. 3.16), значення похибок яких можна вибрати не більшими від $\pm 0,1$ %. Внутрішній опір сенсорів під час протікання через них струму 1 мА складатиме приблизно $3 \text{ В} / 1 \text{ мА} = 3 \text{ кОм}$, а неоднаковість внутрішніх опорів сенсорів буде визначатися подібно до неоднаковості спадків напруг на обох сенсорах, тобто $3 \cdot 10^3 \text{ кОм} \cdot 0,05^\circ\text{C} \cdot 10^{-2} (\text{В}/^\circ\text{C}) / 3 \text{ В} = 0,017$ %. Тоді значення різниці спадків напруг на обидвох сенсорах через неоднаковість струмів, що протікають через них, та неоднаковості внутрішніх опорів сенсорів не перевищуватиме $I_{X1} R_{X1} - I_{X2} R_{X2} \leq \pm 2 \cdot 3 \cdot 10^3 \text{ кОм} \cdot 1 \text{ мА} \cdot 0,017 \% = \pm 1 \text{ мВ}$, а $e_1 + e_2 + e_{B1} + e_{B2} + I_{X1} R_{X1} - I_{X2} R_{X2} \approx \pm 3 \text{ мВ}$

Отже, значення еквівалентної адитивної складової похибки становитиме $(\Delta N_X)_{\text{ДОП}} \approx k_{AD} (0,5 + 2 + 3) \approx k_{AD} (5,5 \text{ мВ}) \leq \pm 0,55^\circ\text{C}$.

Якщо дискретність показів ЦВРТ буде становити $0,01^\circ\text{C}$, то слід передбачити дворозрядне встановлення «нуля» ЦВРТ з допомогою зміни значень будь-якого m_1 або m_2 коефіцієнтів поділу ДОН E_N . Сучасна елементна база дозволяє здійснювати періодичне коригування АСП до значення дискретності показів ЦВРТ, тобто $\pm 0,01^\circ\text{C}$.

Оцінка максимального значення МСП: якщо $\delta_{kAD} \approx \leq \pm 0,1$ %, то абсолютна похибка становитиме $\pm 1,5^\circ\text{C} \cdot 0,1 \% = \pm 0,0015^\circ\text{C}$, що майже на порядок менше від одиниці молодшого розряду ЦВРТ і нею можна знехтувати. Тут слід відмітити, що МСП ЦВРТ не впливатиме на характеристики радіометра з електричним заміщенням, оскільки він використовується як компаратор температур під час зміни джерел тепла.

Отже, як показав проведений аналіз, в процесі реалізації цифрових вимірювачів різниці температур основними чинниками їх похибки є неоднаковість функцій перетворення температурних сенсорів, АСП і МСП використаної елементної бази. В процесі виготовлення доцільно скоригувати значення адитивної складової похибки при певній однаковій температурі обидвох сенсорів температури. Коригування

адитивної складової похибки зручно здійснювати загалом при довільному значенні температури, наприклад, рівному температурі довкілля. Нескориговане значення АСП ЦВРТ не перевищуватиме $\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}/1,5 \text{ }^\circ\text{C}=0,67 \%$. Тоді комбінована (сумарна) стандартна непевність радіометра з електричним заміщенням, отже й загальної поверхневої густини потоку сонячного випромінювання, складатиме $u_c(X) = \sqrt{0,67^2 + 0,5^2} = \sqrt{0,6989} = 0,84 \%$, а розширена відносна непевність ($p=0,95$, $k_{0,95}=1,96$) $u_p(X) = 1,96 \cdot 0,84 \% = 1,64 \%$.

Для розрахунку стандартної непевності за типом В використовуються наступні співвідношення (4.42):

$$u_B(X) = \frac{\Delta_{instr.}}{\sqrt{3}}, \quad (4.42)$$

де Δ_{instr} - основна похибка ЗВТ, вказана в технічній документації.

За умови взаємної незалежності розглянутих вище величин комбіновану стандартну непевність за типом В $u_{cB}(\eta)$ результату вимірювання ККД, визначаємо як корінь квадратний із зважених через коефіцієнти впливу C_j (тут $j=1, \dots, 6$, оскільки є 6 впливних величин) сум квадратів відповідних стандартних непевностей $u_B(x_j)$ результатів вимірювань величин – аргументів x_j , тобто $v_m, c_f, \Delta T, t, A_G, G$ (4.43) [123]:

$$u_c(\eta) = \sqrt{u_B^2(v_m) \cdot C_{v_m}^2 + u_B^2(c_f) \cdot C_{c_f}^2 + u_B^2(\Delta T) \cdot C_{\Delta T}^2 + u_B^2(t) \cdot C_t^2 + u_B^2(A_G) \cdot C_{A_G}^2 + u_B^2(G) \cdot C_G^2} = 2,61 \% \quad (4.43)$$

Коефіцієнти впливу C_j ($j = 1, \dots, 6$) знаходяться із (4.45) як частинні похідні результату вимірювання ККД, по кожному аргументу x_j (4.44) [123]:

$$C_j = \frac{\partial \eta_i}{\partial x_j}, \quad j = 1 \dots 6. \quad (4.44)$$

Розширену стандартну непевність $U_p(\eta)$ результату вимірювання ККД для заданого рівня довіри p обчислюємо за формулою (4.45) [123]:

$$U_p(\eta) = k_p \cdot u_c(\eta) = 1,96 \cdot 2,61 \% = 5,12 \% , \quad (4.45)$$

де k_p – коефіцієнт розширення (охоплення).

Коефіцієнт охоплення вибирається відповідно до виразу (4.46) [123]:

$$k_p = t_p(v), \quad (4.46)$$

де $t_p(v)$ - коефіцієнт розподілу Стюдента з ефективним числом ступенів свободи та імовірністю допуску, який для рівня довіри $p = 0,95$ дорівнює 1,96.

Таблиця 4.1 – Бюджет непевності результату визначення ККД СК

№ п/п	Складові непевності (величина, параметр)	Значення величини та її характеристики	Тип непевності	Густина розподілу	Коефіцієнти впливу C_j	Вміст до сумарної непевності
1	масова швидкість потоку рідини (v_m)	$v_m = 0,02$ кг/с, $\delta_{v_m} \leq \pm 1$ %	В	рівн.	1	1%
2	питома теплоємність рідинного теплоносія (c_f)	$c_f = 4,204$ кДж/(кг·К), $\delta_c \leq \pm 1$ %	В	рівн.	1	1%
3	різниця температур на вході та на виході (ΔT)	$\Delta T \approx 1,5$ °С $\delta_{\Delta T} \leq \pm 1,5$ %	В	рівн.	1	1,5%
4	час вимірювання (t)	$\Delta t \leq \pm 1$ с, $\delta_t \leq \pm 0,1$ %	В	рівн.	1	0,1%
5	загальна площа колектора (A_G)	$A_G = 0,2$ м ² $\Delta A_G \leq \pm 1$ %	В	рівн.	1	1%
6	загальна поверхнева густина потоку сонячного випромінювання (G)	$G = 800$ Вт/м ² , $\Delta_G = \pm 10$ Вт/м ²	В	рівн.	1	2,25%
Комбінована (сумарна) стандартна непевність						2,61 %
Розширена відносна непевність ($p = 0,95, k_{0,95} = 1,96$)						5,12 %

Оцінений результат непевності вимірювання ККД засвідчуватиме, що використання вдосконаленої процедури вимірювання параметрів сонячного випромінювання з використанням радіометра з електричним заміщенням дозволить застосовувати її для проведення випробувань сонячних колекторів. В результаті, це сприятиме широкомасштабному впровадженню сонячних установок в Україні і дозволить зробити суттєвий крок у зменшенні енергетичної залежності країни та охороні довкілля [28].

4.5. Результати практичного виконання

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.

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 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. Проведено попередні дослідження, які показали можливість зменшення технологічного розкиду НПТ до значень декількох десятих кельвіна з використанням транзисторів для поверхневого монтажу [32]. Тому подальший аналіз спрямований на встановлення граничних можливостей використання НПТ під час випробувань СК.

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. Технічні характеристики термостата: діапазон термостатування (0...+100) °С; дискретність задання значень температури 0,01 °С; межа допустимих значень основної похибки вимірювання та відтворення температури $\pm 0,02$ °С. 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. Спадки напруги на НПТ та зразкових резисторах вимірювались цифровим мультиметром Picotest M3511A. 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 [13].

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 [13].

Досліджувані сенсори поміщались в термостат, в якому встановлювались задані значення температури від 0 °С до +80 °С з дискретністю 10 °С. Для коректного вибору вимірювальних струмів були задані такі їх номінальні значення 0,1 мА, 1 мА та 1,9 мА [13].

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 клавіш для уведення 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.

Крім того, вдосконалено методику випробувань сонячних перетворювачів стосовно визначення теплових характеристик у закритих приміщеннях із застосуванням імітаторів потоку сонячного випромінення, радіометрів з електричним заміщенням та прецизійних вимірювачів температури і різниці температур (див. додаток Б). Проведені дослідження сприятимуть ширшому впровадженню сонячних установок в Україні, що дозволить зробити наступний крок у зменшенні енергетичної залежності держави та охороні довкілля.

4.6. Висновки до розділу 4

У четвертому розділі :

– встановлено, що уточнена математична модель температурного сенсора, який складається з послідовно сполучених транздіодів, враховує всі основні фізичні процеси р-п переходу і може бути використана для теоретичного аналізу і подальшого вдосконалення сенсорів;

– наголошено, що основною проблемою побудови прецизійних та метрологічно надійних напівпровідникових сенсорів температури є забезпечення взаємозамінності їх характеристик, тому на підставі зробленого аналізу показано практичну доцільність використання методу попереднього відбору транзисторів та статистичного усереднення їх характеристик завдяки послідовному сполученню з подальшим коригуванням їх похибок в декількох температурних точках і врахуванням їх індивідуальних характеристик у вторинному приладі (апаратним чи програмним способом);

– запропоновано налаштовувати функцію перетворення прецизійних вимірювачів різниці температур в двох температурних точках, однією з яких може бути довільна температура всередині допустимого температурного діапазону вимірювань, а другою температура, значення якої відрізняється від температури першої точки приблизно на максимальне значення діапазону вимірювання різниці температур;

– запропоновано використовувати метод уніфікації функцій перетворення

цифрових напівпровідникових термометрів, оснований на знаходженні коду результату вимірювання як різниці кодами при поточному вимірюваному значенні температури та зразковій температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та її домножування на поправковий мультиплікативний коефіцієнт, значення якого розраховане за кодом, що відповідає другому зразковому значенню температури, яке знаходяться всередині діапазону вимірювань в околі її максимальних значень;

– запропоновано процедуру коригування нелінійної складової похибки прецизійних цифрових вимірювачів температури, яка полягає у використанні поправки до поточних вимірюваних значень температури, значення параметрів якої розраховується за логарифмічною функцією та з використанням третього зразкового значення температури;

– проаналізовано джерела виникнення, складено бюджет непевності та розроблено методику оцінювання непевності результату вимірювання енергетичної освітленості в радіометрах з електричним заміщенням.

ВИСНОВКИ

У результаті виконаних у цій роботі досліджень, спрямованих на розв'язання актуальної науково-практичної задачі вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів, отримано такі наукові та практичні результати:

1. Проаналізовано сучасні методи та засоби випробувань сонячних перетворювачів, стан їх нормативного забезпечення і наявну контрольно-вимірювальну апаратуру для випробувань сонячних елементів та колекторів та встановлено, що через трудомісткість, складність та вартісність процедур випробувань суттєво стримується широке впровадження геліотехнічного обладнання.

2. Запропоновано шляхи покращення комплексу технічних характеристик абсолютного радіометра з електричним заміщенням для вимірювання енергетичних параметрів сонячного випромінювання, побудованого на основі конструктивно суміщених нагрівачів і прецизійних температурних сенсорів, в якому розділено в часі процедури нагрівання приймальної поверхні під час електричного заміщення та вимірювання значення отримуваної різниці температур, що дає можливість в декілька разів зменшити методичні похибки.

3. На підставі експериментальних досліджень вибрано тип чутливих елементів на базі планарних серійних транзисторів та розроблено конструкцію сенсорів з використанням послідовного сполучення декількох транзисторних діодів, які доцільно використовувати в температурних каналах пристроїв для досліджень сонячних перетворювачів, що дає можливість збільшення чутливості перетворення за одночасного зменшення технологічних розкидів до $\pm 0,05$ °C та спрощення вторинних приладів.

4. Розроблено структуру 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 $\pm 0,02$ °C у всьому вимірювальному діапазоні.

5. Запропоновано використовувати метод уніфікації функцій перетворення цифрових напівпровідникових вимірювачів температури, оснований на знаходженні коду результату вимірювання як різниці між кодами при поточному вимірюваному значенні температури та зразковій температурі 0 °C та його домноження на поправковий мультиплікативний коефіцієнт, значення якого розраховане за кодом, що відповідає другому зразковому значенню температури, яке знаходяться всередині діапазону вимірювань в околі її максимальних значень.

6. Розроблено методику коригування нелінійної складової похибки у всьому вимірювальному діапазоні, в основу якої покладено визначення параметрів апроксимаційних логарифмічних залежностей сенсорів на основі експериментальних даних при трьох зразкових значеннях температури, що дозволяє зменшити похибку вимірювання температури в діапазоні від -20 до +120 °C до значень менших від $\pm 0,1$ °C.

7. Вдосконалено методику випробувань сонячних перетворювачів стосовно визначення теплових характеристик у закритих приміщеннях із застосуванням імітаторів потоку сонячного випромінення, радіометрів з електричним заміщенням та прецизійних вимірювачів температури і різниці температур.

8. Проаналізовано непевності за типом В радіометра з електричним заміщенням, та процедури визначення ККД сонячних перетворювачів. Це дозволить здешевити процедуру випробувань і сприятиме широкомасштабному впровадженню сонячних установок в Україні для зменшення її енергетичної залежності та охорони довкілля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Малєєв В.О. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні / В.О. Малєєв, В.М. Безпальченко, Д.С. Макаруч // Актуальні проблеми сучасної енергетики: матеріали II-ої Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. – Херсон : ХНТУ, 2017. – С.74–70.
2. Дробишева В. П. Сучасний стан використання відновлювальних джерел енергії в Україні [Електронний ресурс] / В. П. Дробишева, К. П. Токар, Г. А. Федоренко // Науковий вісник будівництва. - 2014. - № 1. - С. 165-168. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2014_1_44.
3. Будько В. І. Сучасні технологічні процеси, обладнання та устаткування фотоелектричного перетворення сонячної енергії / В. І. Будько – серія навчально-методичних матеріалів – Київ: ЮНІДО, 2015. – 49 с.
4. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії [Текст]: підручник / С. О. Кудря – Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2012. – 495 с.
5. Стоян О.Ю. Державне регулювання розвитку сонячної енергетики в Україні: від теорії до практики / О.Ю. Стоян // Наукові праці [Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу "Києво-Могилянська академія"]. Серія : Державне управління. - 2014. - Т. 239, Вип. 237. - С. 124-130.
6. 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-dzherel/>. – 09.10.2014 р.
7. Возняк О. Т. Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні / О. Т. Возняк, М. Є. Янів // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". Теорія і практика буд-ва. - 2010. - N 664. - С. 7-10.
8. Кудря С.О. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії України / С.О. Кудря, Л.В. Яценко, Г.П. Душина, Л.Я. Шинкаренко та ін // – К., 2001. – 41 с.

9. Сонячна енергетика: теорія та практика: монографія [Текст]: / Й.С. Мисак, О.Т. Возняк, О.С. Дацько, С.П. Шаповал // . – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2014. – 340 с.
10. Бабієв Г.М. Перспективи впровадження нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в Україні / Г.М. Бабієв, Д.В. Дероган, А.Р. Щокін // Електричний Журнал. – Запоріжжя: ВАТ "Гамма", 1998. – №1. – С.63–64.
11. Дероган Д.В. Перспективи використання енергії та палива в Україні з нетрадиційних та відновлюваних джерел / Д.В. Дероган, А.Р. Щокін // Бюл. "Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії". – К.: АТ "Укренергозбереження", 1999. – №2. – С.30–38.
12. NASA Official (офіційний сайт) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nasa.gov>.
13. 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.
14. Колектори сонячні. Методи випробування. – Ч.1: Теплові характеристики та перепад тиску закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-1:1994, IDT): ДСТУ ISO 9806-1:2005. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 56 с.
15. Колектори сонячні. Методи випробування. – Ч. 2: Кваліфікаційні випробування (ISO 9806-2:1995, IDT): ДСТУ ISO 9806-2:2005. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. –36 с.
16. Колектори сонячні. Методи випробування. – Ч.3: Теплові характеристики (лише відчутне теплопередавання) та перепад тиску незаскслених сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-3:1995, IDT) : ДСТУ ISO 9806-3:2005. - К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 36 с.
17. Столярчук П. Г. Розробка математичної моделі ефективності сонячних перетворювачів / П. Г. Столярчук, В. О. Яцук, М. М. Микийчук, М. С. Міхалева, О. І. Шпак, Т. М. Олесків // Східно-європейський журнал передових технологій. –5/8 (71), 2014. – С. 30-36.

18. Серкез Х.В. Покращення характеристик приймачів сонячного випромінення з електричним заміщенням / Х.В. Серкез., В.О. Яцук, Ю.В. Яцук // Вісник Нац-ного ун-ту «Львівська політехніка» «Автоматика, вимірювання та керування». – Львів, Вид-во НУ «ЛП», 2013. - Вип. 753.– С. 25 – 30.

19. Василюха Х.В. Вдосконалення цифрових термометричних засобів для досліджень сонячних колекторів / Х.В. Василюха, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук, В.Б. Здеб // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія» (ISSN 0368-6418) – Львів, Вид-во НУ «ЛП», – №77, – 2016. – С. 70 – 79.

20. Серкез Х.В. Метрологическое обеспечение измерений энергетических параметров солнечного излучения при испытаниях солнечных коллекторов / Х.В. Серкез, В.А. Яцук // Международный журнал «Устойчивое развитие» (ISSN 1314-4138), техн. ун-т Варна, Болгария, май, 2013. – №7. – С. 45-49.

21. Serkez Kh. Metrological assurance of the sun energy collector testing / V. Yatsuk, P. Stolyarchuk, M. Mykyjchuk, Kh. Serkez, R. Dyak, T. Oleskiv // Pomiar, Automatyka, Kontrola. — Vol. 59. — Nr 9/2013. — Pp. 901-905.

22. Серкез Х.В. Метрологічне забезпечення вимірювань різниці температур під час випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної та студентської конференції за напрямком «Проблеми розвитку та впровадження системи управління стандартизації, сертифікації, метрології в регіонах України», 24-26 травня 2011 р. – Донецьк : Дон. НТУ, 2011. – 344 с. – С. 251-254.

23. Серкез Х.В. Шляхи вдосконалення блоку вимірювання різниці температур абсолютного радіометра енергетичної освітленості./ Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Збірник тез доповідей 69-тої студентської науково-технічної конференції Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, 17-21 жовтня 2011 р. – Львів: НУ «ЛП», 2011. – С. 55-57.

24. Серкез Х.В. Метрологічне забезпечення температурних вимірювань під час випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної та студентської конференції за напрямком «Проблеми розвитку та впровадження системи управління стандартизації,

сертифікації, метрології в регіонах України», 3-5 травня 2012 р.– Донецьк : Дон. НТУ, 2012. – С. 80-82.

25. Серкез Х.В. Особливості вимірювання різниці температур під час випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук, Т.М. Олеськів // Матеріали VII Міжнародної конференції «Стратегія якості у промисловості і освіті», 8-15 червня 2012 р. Том II. – Дніпропетровськ-Варна, 2012. – С. 186-188.

26. Серкез Х.В. Покращення характеристик приймачів сонячного випромінювання з електричним заміщенням / Х.В. Серкез, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 22-24 травня 2013 р. – Львів : НУ «ЛП», 2013. – С. 252-254.

27. Серкез Х.В. Метрологічне забезпечення випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук, П.Г. Столярчук, М.М. Микийчук, Р.П. Дяк, Т.М. Олеськів // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань», 23-27 травня 2013 р. – Львів: НУ «ЛП», 2013. – С. 150.

28. Серкез Х.В. Оцінювання непевності вимірювання енергетичної освітленості методом електричного заміщення / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // збірник матеріалів Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2015», 2- 6 лютого 2015 р. – Київ: Академія метрології України, 2015. – С. 101-102.

29. Серкез Х.В. Стан і тенденції розвитку прецизійних вимірювачів температури під час випробувань сонячних колекторів /Х.В. Серкез, В.О. Яцук, Ю.А. Лапченко // Збірник тез доповідей II Міжнар. наук.-практ. конф. «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 28-30 травня 2015 р. – Львів : НУ «ЛП», 2015. – С. 217-219.

30. Серкез Х.В. Аналіз системи виявлення та запобігання вторгнень для роботи з радіометрами / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Збірник матеріалів IV Міжнар. наук.-практ. конф. «Захист інформації і безпека інформаційних систем», 04-05 червня 2015 р. –Львів: Українська академія друкарства, 2015. – С. 201.

31. Серкез Х.В. Дослідження взаємозамінності характеристик напівпровідникових сенсорів для вимірювання різниці температур під час випробувань сонячних перетворювачів / Х.В. Серкез, Ю.В. Яцук, А.Г. Павельчак // Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2016», 1- 5 лютого 2016 р.– Київ: Академія метрології України, 2016. – С. 70-71.

32. Серкез Х.В. Дослідження діодних сенсорів температури для застосування в абсолютному радіометрі з електричним заміщенням / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка», 5- 7 жовтня 2016 р. – Харків, 2016. – С. 125.

33. Василюха Х.В. Експериментальні дослідження напівпровідникових сенсорів для цифрових вимірювачів різниці температур /Х.В. Василюха, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук, В.Б. Здеб //Збірник тез доповідей III Міжнар. наук.-практ. конф. пам'яті проф. П. Столярчука «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 11 травня 2017 р. – Львів: НУ «ЛП», 2017. – С. 150-151.

34. Петухов Б. В. Использование солнечной энергии / Б. В. Петухов. - М.: Знание, 1958. –32 с.

35. Michael Forst. Germany's module industry poised for growth / F. Michael // SUN & Wind Energy. –Vol.5. –2011. – Pp.256-263.

36. Світовий ринок сонячних установок 2015-2016 роки. [Електронний ресурс]. Режим доступа: URL: <http://сахара.ua/informaciya/statti/svitovi-rinok-sonjachnih-ustanovok-2015-2016>.

37. Сонячні колектори – ефективна альтернатива традиційному енергопостачанню. Інжинірингова компанія «ТЕПЛОВАМ». 2009. [Електронний ресурс]. Режим доступа: URL: <http://teplovam.com/index.php/opalennya/4-soniachni-systemy?showall=1>.

38. Гелетуха Г. Г. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Частина 1 / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Желєзна // Промышленная теплотехника. – К., 2010. – № 3. – С. 73–79.

39. Кудря С.О. Перспективи заміщення традиційних паливно-енергетичних ресурсів за рахунок використання енергії, виробленої на об'єктах альтернативної енергетики / С.О. Кудря, Б.Г. Тучинський // Енергоінформ. – 2006. - № 18 (357).
40. Назаренко Л.А. Метрологія і стандартизація фототехнічних випробувань фотоперетворювачів сонячної енергії та фотоелектричних модулів / В.П. Костильов, В.В. Черненко, С.П. Андрос, Л.А. Назаренко // Матеріали IV Міжнар. наук-техн. конф. «Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики». – Харків: ХНАМГ, 2011 р. – С.164-165.
41. Фреїк Д.М. Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінення. Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку (огляд) / Д.М. Фреїк, В.М. Чобанюк, М.О. Галушак, О.С. Криницький, Г.Д. Матеїк // ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА. – 2012. – №1 Т.13. – С. 7 – 20.
42. Скришевський В. А. Що таке сонячна енергетика і чи потрібна вона сьогодні Україні? [Текст] / В. А. Скришевський // Країна знань : Науково-популярний журнал для юнацтва. - 2002. - N7/8. - С. 12-16. Режим доступу: <http://iht.univ.kiev.ua/Ukraine-Solar-cells-article>.
43. Кожем'яко В.П. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики / В.П. Кожем'яко, О.Г. Домбровський, В.Ф. Жердецький, В.І. Маліновський, Г.В. Притуляк // Оптико-електронні пристрої та компоненти в лазерних і енергетичних технологіях – 2011 – С. 141-157.
44. Сонячний колектор – плюси, мінуси, відгуки. 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: <http://dovidkam.com/remont/sonyachnij-kolektor-plyusi-minusi-vidguki.html>.
45. Сонячні колектори трубні і плоскі. 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: http://www.siriusone.net/index.php?action=page&page_id=56.
46. Паламарчук О.Ю. Підвищення ефективності використання сонячної енергії за допомогою колекторів з концентраторами: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.03 "Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання" / О.Ю. Паламарчук. – Х., 2007. – 20 с.

47. Скляню А. Дослідження роботи геліоустановки для спільної генерації електричної та теплової енергії / А. Скляню, А. Кучер // Матеріали ІV Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“, 19-20 квітня 2011 року — Т. : ТНТУ, 2011 — Том 1. — С. 275. — (Електротехніка, електроніка та світлотехніка).

48. Ефимов В. П. Фотопреобразователи энергии солнечного излучения нового поколения / В. П. Ефимов // Физика и техника полупроводников.- 2010.-т. 8.- № 2.- С. 100-115.

49. Кувшинов В.В. Методи розрахунку і підвищення ефективності використання теплофотоелектричних установок / В.В. Кувшинов // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЕиП, 2013. – Вып. 2 (46). – С. 166 – 171.

50. Kern Jr., E. C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems [Текст] / E. C. Kern Jr., M. C. Russel // Proceedings of the 13th ISES Photovoltaic Specialists, Washington, DC, USA. – 1978. – P. 1153-1157.

51. Bharava, A. K. Study of a hybrid solar system—solar air heater combined with solar cells [Текст] / A. K. Bharava, H. P. Garg, R. K. Argaval // Energy Conversion and Management. – 1991. – Vol. 31. – Issue 5. – P. 471-479.

52. Вілінський О. О. Термоелектричний перетворювач сонячного випромінювання в електроенергію / О.О. Вілінський, Л.Ю. Цибульський // Матеріали XI-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 6-7 квітня 2017 р. – С. 145-150. (електронне видання)

53. Захарченко Р.В., Воробйов Ю.В. Оптимізація будови фотоелектричної панелі для гібридної ФЕ/термічної системи. [Електронний ресурс]. Режим доступа: URL: http://www.rusnauka.com/11_NPE_2014-/Phisica/2_165910-.doc.htm.

54. Florshuetz, L. W. Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors [Текст] / L.W. Florshuetz // Sol. Energy. – 1979. - Vol. 22. – P. 361-366.

55. IEC 61215:2005 [Text] / Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval. [Електронний ресурс]. Режим доступа: URL: <https://webstore.iec.ch/publication/4928/>

56. Горбань А.П. Сучасні проблеми імітації сонячного випромінювання для випробувань фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії [тези] / А.П. Горбань, В.П. Костильов, В.В. Черненко, С.П. Андрос, Л.А. Назаренко // Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми світлотехніки». – Харків: ХНАМГ, 2009. – С. 9 – 12.

57. IEC 60904-1:2006 [Text] / Photovoltaic devices - Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics. [Електронний ресурс]. Режим доступа: URL: <https://webstore.iec.ch/publication/3872>

58. Енергія сонячна. Калібрування піранометра із застосуванням піргеліометра (ISO 9846:1993, IDT): ДСТУ ISO 9846:2006. — К.: Держспоживстандарт України, 2009. — 19 с.

59. Енергія сонячна. Калібрування польових піранометрів порівнянням з еталонним піранометром (ISO 9847:1992, IDT): ДСТУ ISO 9847:2007. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 16 с.

60. EN 12975-2:2006 [Text] / Thermal solar systems and components - Collectors - Part 2: Test methods. [Електронний ресурс]. Режим доступа: URL: www.estif.org/.../QAISt%20D2.3%20Guide%20to%20EN%2012975.pdf

61. Патент № 31494 UA 6 F23J 3/02. Спосіб випробувань сонячних колекторів / К. І. Луданов // Промислова власність. – 2000. – №7;

62. Даффи Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман; пер. с англ.; под ред. Ю. Н. Малевского. – М.: Мир, 1977.– 420 с.

63. Екологізація енергетики: навч. посіб. / В. Я. Шевчук, Ю. М. Білявський, Ю. М. Саталкін, В. М. Навроцький // – К.: Вища освіта, 2002. – 111 с.

64. Фрид С. Е. Методы тепловых испытаний солнечных коллекторов / С. Е. Фрид. - М.: ИВТАН АН СССР, 1988. – 57 с. – (Препринт № 3-248).

65. Perers B. Dynamic method of solar collector testing // *Solar Energi Engng* 2. – 1992. – P. 1149 – 1154.
66. Duffie J. A. *Solar Engineering of Thermal Processes* / J. A. Duffie, W. A. Beckman // 4-th edition, Chichester John Wiley & Sons Ltd. 2013. – 909 p.
67. Paul, G. *The Complexities of Solar Collector Testing* / G. Paul // *Evaluation Engineering*. Schreier. 2010. Режим доступа: URL: <https://www.evaluationengineering.com/the-complexities-of-solar-collector-testing>.
68. A guide to the standard EN 12975. Quality Assurance in solar thermal heating and cooling technology – keeping track with recent and upcoming developments. 2012 [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/projects/QAiST/QAiST_results/QAiST%20D2.3%20Guide%20to%20EN%2012975.pdf.
69. Fischer, S. Topic report for WP2 Solar thermal collectors / S. Fischer, T. Osório, M. Carvalho, U. Fritzsche, Pr. Kovacs, C. Lampe, C. Buscarlet, K. Kramer // *Performance testing of evacuated tubular collectors. Version 2.1 Project IEE/08/593/SI2.529236*. Режим доступа: URL: <http://www.estif.org/solarkeymarknew-/images/downloads/QAiST/qaist%20d2.1%20r2.1%20performance%20testing%20of%20e-vacuated%20tubular%20collectors.pdf>.
70. Seene G. *Optimization of the Quasi Dynamic Method for Solar Collector Testing* / G. Seene, P. Ollas // *Master of Science Thesis in Sustainable Energy Systems (MPSES)*. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012. Режим доступа: URL: <http://publications.lib.-chalmers.se/records/fulltext/-162910.pdf>.
71. Allan J. Performance testing of thermal and photovoltaic thermal solar collectors / J. Allan, Z. Dehouche, S. Stankovic, L. Mauricette // *Energy Science and Engineering* 2015: 3 (4); – P. 310-326. Режим доступа: URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.75/epdf>.
72. *Solar Simulation. ORIEL PRODUCT TRAINING* [Электронный ресурс]. 2012. Режим доступа: URL: <https://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/12298.pdf>.

73. Osório T. Testing of solar thermal collectors under transient conditions [Text] / T. Osório, M. Carvalho // Energy Procedia – 30 (2012). – P.1344 – 1353.
74. Назаренко Л. А. Развитие прецизионной фотометрии и радиометрии [Текст] / Л. А Назаренко, Е. П. Тимофеев // Сучасні проблеми світлотехніки: матеріали IV між нар.наук.-техн. конф. Харків, 2011. – С. 15–17.
75. Міжнародні тести сонячних батарей STC і PTC [Електронний ресурс].Режим доступу: URL: <https://kworum.com.ua/mizhnarodni-testi-sonjachnih-batarej-stci-ptc>.
76. IEC 61646:2008 [Text] / Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval. [Електронний ресурс]. Режим доступа: URL: <https://webstore.iec.ch/publication/5697>.
77. IEC 904-9:2007[Text] / Part 9: Solar Simulator Performance Requirements, Photovoltaic Devices. [Електронний ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.document-center.com/standards/show/IEC-904-9/history/>.
78. Гур'єв М. В. Розробка і дослідження еталонних засобів вимірювань енергетичних параметрів оптичного випромінювання на базі абсолютних радіометрів : Автореф. дис... канд. техн. наук : 05.11.15 / М. В. Гур'єв // – Харк. держ. НДІ метрології. - Х., 2001. - 20 с.
79. Фотометрия и радиометрия оптического излучения (общий курс). Книга 4.: підручник / В.С. Иванов, А.Ф. Котюк, В.И. Саприцкий, Р.И. Столяревская, Б. Б. Хлевной.– М.: Полиграф сервис, 2001. – 216 с.
80. Серкез Х.В. Шляхи вдосконалення блоку вимірювання різниці температур абсолютного радіометра енергетичної освітленості / Х.В. Василюха, В.О. Яцук // 69-та студентська науково-технічна конференція Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології – Львів: НУ «ЛП», 2011. – С. 55-57.
81. Зинченко Н.И. Эталонный первичный измерительный преобразователь энергии лазерного излучения на основе конусного калориметра / Н.И. Зинченко, Е.П Тимофеев // Наук. праці III Міжнар. наук.-техн. конф. у 2-х т «Метрологія в електроніці–2000». Т. 2. – Харків: ХДНДІМ, 2000. – С.77-79.

82. Ковальов І.О. Альтернативні джерела енергії України: навч. посіб. / І.О. Ковальов, О.В. Ратушний. – Суми: Вид-во СумДУ, 2015. – 201 с.
83. Введение в современную оптику: Фотометрия.: підручник / Б.И. Степанов – Мн.: Наука и техника, 1989. –254 с.
84. Фотометрія: конспект лекцій для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання спеціальності 6.090600– Світлотехніка і джерела світла // В.М. Поліщук. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 147 с.
85. Василюк В.М. Принципи побудови високоточних температурних сенсорів на основі рп-переходу / В.М. Василюк // Міжвідомчий науково-тенічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія», № 53. - Львів: НУ «ЛП», – 1998. – С.70-76.
86. Вимірювальні перетворювачі (сенсори): підручник / Є. С. Поліщук, В. М. Ванько, В. О. Яцук, М. М. Дорожовець, Ю. В. Яцук // – Вид-во Нац. ун-ту «Львів. Політехніка», 2015. – 584 с.
87. Яцук В.А. Повышение точности и метрологической надежности средств измерения температуры с полупроводниковыми сенсорами / В.А. Яцук, Ю.В. Яцук // Вестник национ. ун-та «Львовская политехника», «Автоматика, измерения и управления». – 2003. – Вып. 475. – С.88-93.
88. Kanoun O. Kalibrationsfreie Temperaturmessung durch Parameterextraktion aus der Strom-Spannungskennlinie von pn-Übergängen / O. Kanoun, H.-R. Tränkler // Technisches Messen. – 2003. – Vol. 68, №9. – P.442-448.
89. Kanoun O. Übersicht kalibrationsfreier Verfahren der Temperaturmessung / O. Kanoun, H.-R. Tränkler // Technisches Messen 67. – 2000. – tm4/200. – P.171-176.
90. Василюк В.М. Проектирование цифровых термометров с термодиодными сенсорами / В.М. Василюк, А.М. Леновенко, П.С. Малачивская // Межведомственный научно-технической сборник "Измерительная техника и метрология", № 56. – М.: ГУ " Львовська политехника", 2000. – С.55-59.
91. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук та ін.; за ред. проф. Є.С. Поліщука. – 2-е вид., доп. та перероб. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 544 с.

92. Методи підвищення точності вимірювань: підручник / В.О. Яцук, П.С. Малачівський // – Львів: Вид-во «Бескид-біт», 2008. – 368 с.
93. Бондаренко, Л. І. Модифікація конструкції блока термоіндикації абсолютного радіометра енергетичної освітленості [Текст] / Л. І. Бондаренко, Л. В. Грищенко, Л. А. Назаренко, В. І. Полевой // Матеріали наук.-техн. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка» – Харків, 2006. – С. 59-63.
94. Яцук В. Можливості вдосконалення метрологічного забезпечення систем індивідуального обліку тепла / В. Яцук, П. Бугайцова, Ю. Яцук // Східно-європейський журнал передових технологій. – Том 5. - №9(65). – 2013. – С. 6-10.
95. Каталог ELFA. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://www.elfaelektronika.com>.
96. Low Voltage, Low Power, Factory-Calibrated 16-/24-Bit Dual Δ - Σ ADC AD7719. Електронний ресурс. Режим доступу: www.analog.com.
97. Precision operational amplifier AD8630. Електронний ресурс. Режим доступу: www.analog.com.
98. РАДІОМАГ Львів - РКС Компоненти. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.rcscomponents.kiev.ua>.
99. Vivek Shankar Kannan, Julie Chen. AN60590. PSoC® 3, PSoC 4, and PSoC 5LP - Temperature Measurement with a Diode. - Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.cypress.com/documentation/application-notes/an60590-psoc-3-psoc-4-and-psoc-5lp-temperature-measurement-diode>.
100. Яцук Ю. Коригування похибок діодних цифрових термометрів // Ю. Яцук, О. Тимчук / Вимірювальна техніка та метрологія, № 72 .- 2011. – С. 50 – 54.
101. Яцук В.О. Розвиток теорії та методів підвищення якості засобів вимірювальної техніки з використанням кодокерованих мір [Текст] : дис. д-ра техн. наук: 05.11.05 / Яцук Василь Олександрович ; Національний ун-т «Львівська політехніка». - Л., 2004. - 350 с.
102. Shwarts Yu.M. Limiting characteristics of diode temperature sensors / Yu.M. Shwarts, V.L. Borblik, N.R. Kulich, E.F. Venger, V.N. Sokolov // Sensors and actuators. – 86(2000). – 2000. – P. 197-205/

103. Полупроводниковые приборы: підручник // Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.;
104. Основы теории транзисторов и транзисторных схем: підручник // И.П. Степаненко – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 672 с.
105. Спосіб вимірювання температури та пристрій для його здійснення: Пат. 10540А Україна, МКВ G01K7/22 / Ю.О. Скрипник, О.В. Іванченко, А.М. Стретович, М.П. Наконечний - №93005065; Заявлено 21.10.93; Опубл. 25.12.96., Бюл. №4. – 2 с.;
106. Спосіб вимірювання падіння напруги на р-п переході напівпровідникового датчика: Пат. 15274А Україна, МКВ G01R19/00. / Ю.О. Скрипник, О.В. Іванченко, А.М. Стретович, М.П. Наконечний - №94052783; Заявлено 23.05.94; Опубл. 30.06.97., Бюл. №3. – 2 с.;
107. Багатоточкова система вимірювання температури: Пат. 23280А Україна, МКВ G01K7/00 / Ю.О. Скрипник, О.В. Іванченко, В.Ю. Санніков, Ю.В. Шинкаренко - №97031159; Заявлено 14.03.98; Опубл. 19.05.98., Бюл. №4. – 2 с.;
108. Іванченко О.В. Застосування напівпровідникових елементів з р-п переходом для температурних вимірювань / О.В. Іванченко // Вісник Державної академії легкої промисловості України. – 1999. - №2. – С. 124-127.
109. Яцук В. Метод покращення характеристик напівпровідникових сенсорів на основі р-п переходу / В. Яцук, Ю. Яцук // Вимірювальна техніка та метрологія. – Л.: НУ«ЛП», 2002. - №59. – С. 90 – 96.
110. Яцук В.О. Підвищення точності та метрологічної надійності засобів вимірювання температури з напівпровідниковими сенсорами / В.О. Яцук, Ю.В. Яцук // Вісник Націон. ун-ту «Львівська політехніка» «Автоматика, вимірювання та керування». – Л.: 2003. - Вип. 475.– С. 88-93.
111. Василюк В.М. Лінеаризація цифрових вимірювальних пристроїв з нелінійними сенсорами / В.М. Василюк, А.М. Леновенко, П.С. Малачівський // Вісник національного університету «Львівська політехніка» «Автоматика, вимірювання, керування». – Л: 1999. - Вип. 366. – С. 118-122.
112. Аналоговые интегральные схемы: пер. с англ. / Под ред. Дж. Конелли – М.: Мир, 1977. – 439 с.

113. Пейтон А. Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях: підручник // А. Дж. Пейтон, В. Волш – пер. с англ. – М.: БИНОМ, 1994.- 352 с.
114. Усилители с полевыми транзисторами: підручник / В.М. Немчинов, В.Г. Никитаев, М.А. Ожогин, В.В. Ляхович; под ред. И.П.Степаненко. – М.: Сов. радио, 1980. – 192 с.
115. Аналоговые полупроводниковые интегральные микросхемы: підручник // Г.С. Остапенко– М.: Радио и связь, 1981. – 280 с.
116. Shokley W. The theory of pn-junction in semiconductors and pn-junction transistor. / W. Shokley // Bell Syst. Tech. J. - 1949. No.28. – P. 435-489.
117. Столярчук П. Унификация параметров полупроводниковых сенсоров / П. Столярчук, В. Яцук, Ю. Яцук // Problemy jakosciowe, energetyczne i eksploatacyjne w maszynach cieplnych (materially konferencyjne), Bydgoszcz, Polska, 19-20 wrzesnia. - 2002. – С. 237-246.
118. McNamara A.G. Semiconductor diodes and transistors as electrical thermometers / A.G. McNamara // Rev. Sci. Instrum.. - Vol. 33. - 1962. – P. 330-333.
119. Електронний цифровий термометр: Патент 23648А Україна, МКВ G01K7/02 / А.М. Леновенко, В.М. Василюк, В.І. Капітан / №96114474; Заявлено 29.11.96; Опубл. 31.08.98., Бюл. №4. – 6 с.
120. Применение «Руководства по выражению неопределённости измерений»: РМГ 43-2001: Приняты Межгосуд. советом по станд., метрологии и сертиф. 02.11.2001 / ИПК Изд-во стандартов. – М., 2003. – 20 с.
121. Пиргелиометрия: підручник // А. А. Кмито, Ю. А. Складоров – Ленинград: Гидрометеозда,т, 1981. – 232с.
122. ДСТУ 3193-95. Державна повіросна схема для засобів вимірювань енергетичної освітеності некогерентним випроміненням. – Київ: Держстандарт України, 1996. – 19 с.
123. Дорожовець М.М. Опрацювання результатів вимірювань: Навч. посіб. / Дорожовець М.М. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2007. – 624 с.

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Серкез Х.В. Покращення характеристик приймачів сонячного випромінювання з електричним заміщенням / Х.В. Серкез., В.О. Яцук, Ю.В. Яцук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Автоматика, вимірювання та керування». – Львів, Вид-во НУ «ЛП», 2013. - Вип. 753.– С. 25 – 30.
2. Василюха Х.В. Вдосконалення цифрових термометричних засобів для досліджень сонячних колекторів / Х.В. Василюха, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук, В.Б. Здеб // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія» (ISSN 0368-6418) – Львів, Вид-во НУ «ЛП», – №77, – 2016. – С. 70 – 79.
3. 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.
4. Серкез Х.В. Метрологическое обеспечение измерений энергетических параметров солнечного излучения при испытаниях солнечных коллекторов / Х.В. Серкез, В.А. Яцук // Международный журнал «Устойчивое развитие» (ISSN 1314-4138), техн. ун-т Варна, Болгарія, май, 2013. – №7. – С. 45-49.
5. Serkez Kh. Metrological assurance of the sun energy collector testing / V. Yatsuk, P. Stolyarchuk, M. Mykyjchuk, Kh. Serkez, R. Dyak, T. Oleskiv // Pomiar, Automatyka, Kontrola. — Vol. 59. — Nr 9/2013. — Pp. 901-905.
6. Серкез Х.В. Метрологічне забезпечення вимірювань різниці температур під час випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Матеріали І Всеукраїнської науково-практичної та студентської конференції за напрямком «Проблеми розвитку та впровадження системи управління стандартизації, сертифікації, метрології в регіонах України», 24-26 травня 2011 р. – Донецьк : Дон. НТУ, 2011. – 344 с. – С. 251-254.

7. Серкез Х.В. Шляхи вдосконалення блоку вимірювання різниці температур абсолютного радіометра енергетичної освітленості./ Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Збірник тез доповідей 69-тої студентської науково-технічної конференції Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, 17-21 жовтня 2011 р. – Львів: НУ «ЛП», 2011. – С. 55-57.

8. Серкез Х.В. Метрологічне забезпечення температурних вимірювань під час випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної та студентської конференції за напрямком «Проблеми розвитку та впровадження системи управління стандартизації, сертифікації, метрології в регіонах України», 3-5 травня 2012 р.– Донецьк : Дон. НТУ, 2012. – С. 80-82.

9. Серкез Х.В. Особливості вимірювання різниці температур під час випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук, Т.М. Олесків // Матеріали VII Міжнародної конференції «Стратегія якості у промисловості і освіті», 8-15 червня 2012 р. Том II. – Дніпропетровськ-Варна, 2012. – С. 186-188.

10. Серкез Х.В. Покращення характеристик приймачів сонячного випромінювання з електричним заміщенням / Х.В. Серкез, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 22-24 травня 2013 р. – Львів : НУ «ЛП», 2013. – С. 252-254.

11. Серкез Х.В. Метрологічне забезпечення випробувань сонячних колекторів / Х.В. Серкез, В.О. Яцук, П.Г. Столярчук, М.М. Микийчук, Р.П. Дяк, Т.М. Олесків // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань», 23-27 травня 2013 р. – Львів: НУ «ЛП», 2013. – С. 150.

12. Серкез Х.В. Оцінювання непевності вимірювання енергетичної освітленості методом електричного заміщення / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // збірник матеріалів Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2015», 2- 6 лютого 2015 р. – Київ: Академія метрології України, 2015. – С. 101-102.

13. Серкез Х.В. Стан і тенденції розвитку прецизійних вимірювачів температури під час випробувань сонячних колекторів /Х.В. Серкез, В.О. Яцук, Ю.А. Лапченко // Збірник тез доповідей II Міжнар. наук.-практ. конф. «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 28-30 травня 2015 р. – Львів : НУ «ЛП», 2015. – С. 217-219.

14. Серкез Х.В. Аналіз системи виявлення та запобігання вторгнень для роботи з радіометрами / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Збірник матеріалів IV Міжнар. наук.-практ. конф. «Захист інформації і безпека інформаційних систем», 04-05 червня 2015 р. –Львів: Українська академія друкарства, 2015. – С. 201.

15. Серкез Х.В. Дослідження взаємозамінності характеристик напівпровідникових сенсорів для вимірювання різниці температур під час випробувань сонячних перетворювачів / Х.В. Серкез, Ю.В. Яцук, А.Г. Павельчак // Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2016», 1- 5 лютого 2016 р.– Київ: Академія метрології України, 2016. – С. 70-71.

16. Серкез Х.В. Дослідження діодних сенсорів температури для застосування в абсолютному радіометрі з електричним заміщенням / Х.В. Серкез, В.О. Яцук // Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка», 5- 7 жовтня 2016 р. – Харків, 2016. – С. 125.

17. Василюха Х.В. Експериментальні дослідження напівпровідникових сенсорів для цифрових вимірювачів різниці температур / Х.В. Василюха, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук, В.Б. Здеб // Збірник тез доповідей III Міжнар. наук.-практ. конф. пам'яті проф. П. Столярчука «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 11-12 травня 2017 р. – Львів: НУ «ЛП», 2017. – С. 150-151.

Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях:

Основні наукові результати та положення роботи були представлені та обговорювались на: I Всеукраїнській науково-практичній та студентській конференції за напрямком «Проблеми розвитку та впровадження системи

управління стандартизації, сертифікації, метрології в регіонах України» (м. Донецьк, 2011 р.); 69-тій студентській науково-технічній конференції Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології (м. Львів, 2011 р.); II Всеукраїнській науково-практичній та студентській конференції за напрямком «Проблеми розвитку та впровадження системи управління стандартизації, сертифікації, метрології в регіонах України» (м. Донецьк, 2012 р.); VII Міжнародній конференції «Стратегія якості у промисловості і освіті» (Болгарія, м. Варна, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (м. Львів, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань» (м. Львів, 2013 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2015» (м. Славське, 2015 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (м. Львів, 2015 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Захист інформації і безпека інформаційних систем» (м. Львів, 2015 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement-2016» (м. Славське, 2016 р.); X Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» (м. Харків, 2016 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції пам'яті проф. П. Столярчука «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи» (м. Львів, 2017 р.).

Додаток Б

Проект Національного стандарту України «Методика випробувань сонячних перетворювачів стосовно визначення теплових характеристик за усталеного режиму з імітатором потоку сонячного випромінення »



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

**МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ СОНЯЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СТОСОВНО
ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗА УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ З
ІМІТАТОРОМ ПОТОКУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЕННЯ**

**ДСТУ ХХХХ:ХХХХ
(Проект)**

Видання офіційне

ПЕРЕДМОВА

1 ВНЕСЕНО: Національним університетом «Львівська політехніка»

РОЗРОБЛЕНО: **В. Яцук**, докт. техн. наук, професор, **М. Микийчук**, докт. техн. наук, професор, **Х. Василюха**, аспірант

2 НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ _____ № _____ з _____

**Право власності на цей документ належить державі.
Відтворювати, тиражувати і розповсюджувати його повністю чи частково
на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу заборонено.
Стосовно врегулювання прав власності треба звертатися до Департамент технічного
регулювання та метрології Міністерства економічного розвитку і торгівлі України**

Департамент технічного регулювання та метрології
Міністерства економічного розвитку і торгівлі України, 20__
ДСТУ (Проект)

ЗМІСТ

1 ГАЛУЗЬ ВИКОРИСТАННЯ	...
2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ	...
3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ	...
4 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	...
5 ВИПРОБУВАЛЬНА УСТАНОВКА	...
5.1 Встановлення та розміщення колектора	...
5.2 Попереднє підготування колектора	...
6 УМОВИ ВИПРОБУВАННЯ	...
6.1 Імітатор потоку сонячного випромінення для випробування на визначання ККД за усталеного режиму	...
6.2. Контрольно-вимірювальна апаратура/реєструвачі даних	...
7 ВИПРОБОВУВАЛЬНА ПРОЦЕДУРА	...
7.1 Вимірювання поверхневої густини імітованого потоку сонячного випромінення	...
7.2. Вимірювання поверхневої густини потоку теплового випромінення в імітаторах	...
7.3 Вимірювання температури	...
7.4. Температура навколишнього повітря в імітаторі	...
8 ВИПРОБУВАЛЬНИЙ ПЕРІОД	...
9 ОБЧИСЛЮВАННЯ ТА ПОДАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	...
Додаток А	...

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ СОНЯЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СТОСОВНО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗА УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ З ІМІТАТОРОМ ПОТОКУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЕННЯ

Чинний від хх.хх.20хх

1 ГАЛУЗЬ ВИКОРИСТАННЯ

Цей стандарт встановлює методи визначання теплових характеристик закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини. Випробування треба провадити одночасно з іншими випробуваннями, які визначено в ISO 9806-1.

У цьому стандарті наведено методи випробування та процедури обчислювання, спрямовані на визначення теплових характеристик сонячних колекторів під час експлуатування в у закритих приміщеннях із застосуванням імітатора потоку сонячного випромінення.

Цей стандарт не можна застосовувати до колекторів, у яких акумулятор тепла є невід'ємною частиною колектора і в яких процес накопичування не може бути відокремлено, щоб оцінити ці два процеси.

Цей стандарт не можна застосовувати до незаскслених сонячних колекторів та концентрувальних сонячних колекторів з автоматичним наведенням (див. ISO 9806-3, де описано методи випробування незаскслених колекторів).

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

Дана методика містять положення наведені нижче стандартів, і у цьому тексті містяться посилання на них:

ISO 9806-1:1994 Методи випробування сонячних колекторів. Частина 1. Теплові характеристики та перепад тиску закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини

ISO 9060:1990 Сонячна енергія. Технічні умови і класифікація приладів для вимірювання півсферичного та прямого сонячного випромінення

ISO 9806-2 Методи випробування сонячних колекторів. Частина 2. Кваліфікаційні випробування

ISO 9806-3 Методи випробування сонячних колекторів. Частина 3. Теплові характеристики (лише відчутне теплопередавання) та перепад тиску незаскслених сонячних колекторів для нагрівання рідини

ISO 9846:1993 Сонячна енергія. Калібрування піранометра із застосуванням піргеліометра

ISO 9847:1992 Сонячна енергія. Калібрування польових піранометрів порівнянням з еталонним піранометром

ISO/TR 9901:1990 Сонячна енергія. Польові піранометри. Рекомендована практика застосування ВМО, Довідник з метеорологічного устаткування та методів спостереження, № 8, 5-те видання, ВМО, Женева, 1983, Розділ 9

ДСТУ 3193:1995 Державна повір очна схема для засобів вимірювань енергетичної освітленості некогерентним випроміненням.

Примітка 1. На час опублікування цього стандарту зазначені нормативні документи були чинними. Всі нормативні документи підлягають переглядові, і учасникам угод, базованих на цьому стандарті, рекомендовано застосовувати найновіші видання нормативних документів, наведених нижче.

3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

У цьому стандарті застосовано такі терміни та визначення понять:

3.1 абсорбер (absorber)

Пристрій у складі сонячного колектора, що поглинає променеву енергію та передає її рідині як теплову енергію.

3.2 кут надходження (прямого сонячного випромінення) (angle of incidence (of direct solar radiation))

Кут між прямою, що з'єднує центр сонячного диска з точкою на опромінюваній поверхні, та перпендикуляром до опромінюваної поверхні, проведеним від центра сонячного диска.

3.3 апертура (aperture)

Отвір у сонячному колекторі, крізь який проходить неконцентроване сонячне випромінення.

3.4 загальна площа колектора (collector area, gross)

Максимальна проектна площа укомплектованого сонячного колектора, за винятком будь-яких вбудованих монтажних засобів та з'єднувального трубопроводу для рідини.

3.5 ККД колектора (сонячного теплового колектора) (*collector efficiency (of a solar thermal collector)*)

Відношення енергії, відведеної з певної визначеної площі колектора (загальної або площі абсорбера) рідинним теплоносієм протягом визначеного часу, до сонячної енергії, що надходила на колектор протягом того самого часу, за умов усталеного режиму.

3.6 рідинний теплоносій (*heat transfer fluid*)

Рідина, яку використовують для передавання теплової енергії між компонентами системи.

3.7 поверхнева густина потоку випромінення (*irradiance*)

Для точки поверхні – це потік променевої енергії, яка надходить на ділянку поверхні, поділений на площу цієї ділянки. Поверхневу густину потоку випромінення зазвичай виражають у ватах на квадратний метр

3.8 поверхнева густина потоку прямого сонячного випромінення (*irradiance, direct solar*)

Потік променевої енергії, що надходить на конкретну пласку приймальну поверхню під невеликим тілесним кутом з центром на сонячному диску, поділений на площу цієї поверхні. Зазвичай виражають у ватах на квадратний метр.

Примітка 2. Треба визначити нахил поверхні: наприклад, горизонтальна поверхня. Якщо площина є перпендикулярною до осі тілесного кута, то поверхня приймає прямий перпендикулярний потік сонячного випромінення. Для відповідних радіометрів сучасного дизайну невеликий тілесний кут (кут поля зору) є меншим за 6° .

3.9 загальна поверхнева густина потоку сонячного випромінення (*irradiance, global solar*)

Потік променевої енергії, що надходить на певну поверхню приймальної площини під тілесним кутом 2π ср, поділений на площу цієї поверхні. Зазвичай виражають у ватах на квадратний метр.

Примітка 3. Потрібно визначити нахил поверхні, наприклад горизонтальна поверхня.

3.10 оптична повітряна маса (*optical air mass*)

Міра довжини шляху, пройденого променями світла від сонця крізь атмосферу до рівня моря, яку виражають відносно довжини перпендикулярного (вертикального) шляху.

3.11 піранометр (*pyranometer*)

Радіометр, призначений для вимірювання густини потоку випромінення на пласкій приймальній поверхні, утвореного випроміненням, що надходить з вищої півсфери в діапазоні довжини хвиль від 0,3 мкм до 3 мкм.

3.12 піргеометр (*pyrgeometer*)

Прилад для визначання густини потоку випромінення на пласкій приймальній поверхні, утвореного випроміненням, що надходить з вищої півсфери у діапазоні довжини хвиль приблизно від 3 мкм до 50 мкм.

Примітка 4. Цей діапазон спектра є ідентичний діапазону атмосферного довгохвильового випромінення та виключно умовний. Спектральна чутливість піргеометра залежить переважно від матеріалу, з якого виготовлено ковпаки, що захищають приймальні поверхні.

3.13 променева енергія (*radiant energy*)

Енергія, що її виділено, передано або прийнято як випромінення.

3.14 потік променевої енергії (*radiant energy flux*)

Потужність, що її виділено, передано або прийнято як випромінення.

3.15 випромінення (*radiation*)

Передавання енергії у формі електромагнітних хвиль.

3.16 радіометр (*radiometer*)

Прилад для вимірювання випромінення. Результат вимірювання цим приладом можна назвати «поверхневою густиною потоку випромінення, або випроміненням».

3.17 імітатор потоку сонячного випромінення (*solar irradiance simulator*)

Штучне джерело променистої енергії, що імітує сонячне випромінення; зазвичай це електрична лампа або група таких ламп.

3.18 стала часу (*time constant*)

Час, потрібний для системи, робочі характеристики якої можна приблизно визначити за диференціальним рівнянням першого порядку, щоб змінити вихідну потужність на 63,22 % від кінцевої зміни вихідної потужності покроковим змінюванням вхідної потужності.

4 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Робочі характеристики переважної більшості колекторів за умов прямого сонячного випромінення є кращими, ніж за умов розсіяного випромінення, тому на сьогодні ми не маємо достатнього досвіду імітування розсіяного сонячного випромінення. Цей метод випробовування було розроблено тільки для імітаторів, у яких пучок променів імітованого сонячного випромінення може бути спрямований на колектор з кутом надходження, близьким до 90° . Оскільки на практиці важко створити однорідний пучок променів імітованого сонячного випромінення, на апертурі колектора треба вимірювати середній рівень поверхневої густини потоку випромінення.

5 ВИПРОБУВАЛЬНА УСТАНОВКА

Колектор встановлюють відповідно до рекомендацій, наданих у п.5.1, та приєднують до випробувального контуру. Рідинний теплоносій повинен проходити від нижньої до верхньої частини колектора або як рекомендовано виробником. Рідинним теплоносієм для випробування колектора може бути вода або інша рідина, рекомендована виробником колектора. Випробувальні контури повинні мати два ступеня контролю за вхідною температурою рідини. Пристрій первинного контролювання за температурою треба встановлювати вище за течією від вимірювача потоку та пристрою регулювання потоку. Пристрій вторинного регулювання температури треба застосовувати, щоб регулювати температуру рідини поблизу вхідного отвору колектора.

5.1 Встановлення та розміщення колектора

Спосіб встановлення колектора впливатиме на результати випробування теплових характеристик.

Монтажною рамою колектора в жодному разі не можна загороджувати апертуру колектора та істотно впливати на тильну або бічну ізоляцію. Якщо інше не зазначено, то треба застосовувати відкриту монтажну конструкцію, що забезпечує вільне циркулювання повітря навколо фронтальної та тильної частин колектора. Колектор встановлюють так, щоб його нижній край був щонайменше на 0,5 м вище земної поверхні відповідної місцевості.

Кут нахилу колектора повинен забезпечувати можливість приймання пучка променів імітованого сонячного випромінення з надходженням, близьким до перпендикулярного. Кут нахилу має дорівнювати $(45 \pm 5)^\circ$, або його треба коригувати до такої позначки, або бути таким, як рекомендовано виробником. Нестандартні кути нахилу потребують встановлення батареї імітаторів, яка для підтримання перпендикулярного надходження має вільно регульований нахил.

Більшість імітаторів потоку сонячного випромінення здатні створювати пучки променів, що імітують виключно потоки прямого сонячного випромінення. Для того щоб спростити вимірювання поверхневої густини імітованого потоку сонячного випромінення, потрібно мінімізувати відбитий потік випромінення. Цього можна досягти, пофарбувавши всі поверхні робочої частини темною (з низькою здатністю до відбиття) фарбою.

Під час випробування у приміщенні та випробування з імітатором колектор треба захистити екранами від гарячих поверхонь, таких, наприклад, як радіатори, канали та оснащення систем кондиціонування повітря, а також від холодних поверхонь, зокрема вікон та зовнішніх стін. Важливо захистити не лише фронтальну, а й тильну поверхню колектора.

Щоб утворити повітряний потік разом з імітатором сонячного випромінення застосовують генератор вітру.

5.2 Попереднє підготування колектора

До початку випробування на визначання ККД потрібно провести низку кваліфікаційних випробувань колектора, зазначених в ISO 9806-2. Колектор перевіряють візуально, будь-які пошкодження реєструють. Покрив апертури колектора треба ретельно почистити. Рідину треба перевіряти на вміст повітря або часток за допомогою прозорої трубки, вбудованої у трубопровід контуру з рідиною. Будь-які забруднювачі слід видалити.

6 УМОВИ ВИПРОБУВАННЯ

Під час випробування загальна поверхнева густина потоку сонячного випромінення на площині апертури колектора має перевищувати 800 Вт/м^2 .

Поверхнева густина потоку теплового випромінення на площині апертури колектора не повинна перевищувати тієї, що надходить до абсолютно чорної порожнини за температури навколишнього повітря, більше ніж на 50 Вт/м^2 . Під час випробування у приміщенні поверхневу густину потоку теплового випромінення треба визначати так, щоб похибка не перевищувала $\pm 10 \text{ Вт/м}^2$.

Кут надходження прямого сонячного випромінення на апертуру колектора має бути в діапазоні, за якого модифікатор кута надходження на колектор відрізняється не більше ніж на $\pm 2 \%$ від свого значення у разі перпендикулярного надходження. Для звичайних закслених пласких колекторів ця умова зазвичай задовольняється, якщо кут надходження прямого сонячного випромінення на апертуру колектора не перевищує 30° . Проте окремі конструкції потребують значно менших кутів.

Середнє значення швидкості навколишнього вітру, зважаючи на просторові зміни навколо колектора і тимчасове змінення протягом випробувального періоду, має бути в межах 2 м/с і 4 м/с .

Якщо інше не рекомендовано, то швидкість потоку рідини повинна бути приблизно $0,02 \text{ кг/с}$ на один квадратний метр загальної площі колектора. Це значення треба підтримувати з допустимими відхилами $\pm 1 \%$ встановленого значення протягом кожного випробувального періоду і під час переходу від одного випробувального періоду до іншого воно не повинно коливатися більш як на $\pm 10 \%$ від встановленого значення.

Температура повітря, що її утворює генератор вітру, не повинна відрізнятися від температури навколишнього повітря більше ніж на ± 1 К.

Результати вимірювань перепадів температур рідини, що не перебільшують 1,5 К, до результатів випробування, через відповідні проблеми з точністю апаратури, не залучають.

6.1 Імітатор потоку сонячного випромінення для випробування на визначання ККД за усталеного режиму

Імітатор потоку сонячного випромінення для випробування на визначання ККД за усталеного режиму повинен мати наведені нижче характеристики:

- лампи мають бути придатними для утворення середньої поверхневої густини потоку випромінення на апертурі колектора, що дорівнює щонайменше 800 Вт/м^2 . Для спеціалізованих випробувань можна також застосовувати значення в діапазоні від 300 Вт/м^2 до 1000 Вт/м^2 , а значення поверхневої густини потоку випромінення занесено до протоколу випробування.

- протягом випробувального періоду не повинно бути відхилів середньої поверхневої густини потоку випромінення на апертурі колектора, більших за $\pm 50 \text{ Вт/м}^2$.

- поверхнева густина потоку випромінення в усіх точках апертури колектора не повинна відрізнятися від середньої поверхневої густини потоку випромінення на апертурі більше ніж на ± 15 %.

- спектральний розподіл імітованого сонячного випромінення повинен бути приблизно еквівалентний спектру сонячного випромінення за повітряної маси 1,5.

- вимірювання спектральних характеристик імітаторів потоків сонячного випромінення треба виконувати у площині колектора в діапазоні довжини хвиль (0,3 – 3) мкм та визначати у ширині смуги частот 0,1 мкм або менше.

- поверхнева густина потоку теплового випромінення на колекторі не повинна перевищувати ту, що надходить до абсолютно чорної порожнини за температури навколишнього повітря, більше ніж на 50 Вт/м^2 .

- колімація імітатора повинна бути такою, щоб кути надходження, щонайменше 80 % від імітованого потоку сонячного випромінення, були в діапазоні, за якого модифікатор кута надходження для колектора відрізнявся б від свого значення в умовах перпендикулярного надходження не більше ніж на ± 2 %. Для типових плоских колекторів ця умова зазвичай задовольняється, якщо під час випробування щонайменше 80 % від імітованого сонячного випромінення надходить на будь-яку точку колектора з ділянки імітатора, яка не виходить за межі стягненого кута у 60° , якщо дивитися із зазначеної вище точки.

- під час випробування потрібно контролювати поверхневу густину потоку випромінення, яка протягом випробувального періоду не повинна змінюватися більше ніж на 3 %. Метод для вимірювання поверхневої густини потоку випромінення під час випробувального періоду має передбачати визначання середньої поверхневої густини потоку випромінення, що збігається зі значенням, отриманим за просторовим інтегруванням з похибкою до ± 1 %.

6.2 Контрольно-вимірювальна апаратура/реєструвачі даних

Мінімальний поділ шкали приладу або системи приладів у жодному разі не повинен перевищувати певну похибку більше ніж удвічі. Наприклад, якщо похибка дорівнює $\pm 0,1^\circ\text{C}$, то мінімальна ціна поділки шкали приладу не повинна перевищувати $0,2^\circ\text{C}$.

Похибка цифрового устаткування та електронних інтеграторів має бути такою, що дорівнює або є меншою за $\pm 1,0$ % виміряного значення.

Похибка аналогових та цифрових реєструвачів не повинна перевищувати $\pm 0,5$ % показів по всій шкалі та мати сталу часу, що дорівнює 1 с або є меншою. Індикація пікових значень сигналу має бути в межах 50 %—100 % від усієї шкали.

Загальний вхідний опір реєструвачів повинен перевищувати більше ніж у 1000 разів загальний опір давачів або дорівнювати 10 МОм, перевагу віддають більшому.

7 ВИПРОБОВУВАЛЬНА ПРОЦЕДУРА

Колектор випробовують з урахуванням усього робочого діапазону температур. Під час випробування із застосуванням імітаторів сонячного випромінення потрібно зробити вісім випробувальних циклів за умови, що враховано принаймні чотири різні значення вхідної температури, для стабілізації температур вистачає часу, а одна із застосованих вхідних температур дорівнює температурі навколишнього повітря ± 3 К. Протягом випробування вимірювання провадять відповідно до ДСТУ 9806-1. Результати цих вимірень можна надалі використати для визначання випробувальних періодів, які дають змогу отримати задовільні дані.

Потрібно зробити такі вимірювання під час випробування в імітаторах потоку сонячного випромінення:

- a) загальної площі колектора A_c , площі абсорбера A_a та площі апертури A_a ;
- b) об'єму рідини;

- c) поверхневої густини імітованого потоку сонячного випромінення;
- d) поверхневої густини потоку теплового випромінення в імітаторах;
- e) кута надходження прямого сонячного випромінення (альтернативно цей кут можна визначити обчисленням);
- f) швидкості навколишнього повітря;
- g) температури навколишнього повітря;
- h) вхідної температури рідинного теплоносія в колекторі;
- i) вихідної температури рідинного теплоносія в колекторі;
- j) швидкості потоку рідинного теплоносія.

7.1 Вимірювання поверхневої густини імітованого потоку сонячного випромінення

Примітка 5. Імітований потік сонячного випромінення зазвичай зазнає просторових коливань на площині апертури колектора, а також змінюється протягом випробовування. Тому виникає потреба інтегрувати поверхневу густину потоку випромінення на апертурі колектора. Коливання в мережі електропостачання та змінення потужності ламп відповідно до температурних та часових змін зазвичай спричиняють з часом змінення поверхневої густини потоку випромінення. Деяким лампам потрібно більше ніж 30 хв для досягнення стабільних робочих умов, якщо попередньо вони були холодними.

Для вимірювання поверхневої густини потоку імітованого сонячного випромінення відповідно до ДСТУ 9806-1 можна застосовувати піранометри. Альтернативно можна застосовувати детектори випромінення інших типів, якщо їх було спеціально відкалібровано для імітованого сонячного випромінення.

Дана методика передбачає для вимірювання поверхневої густини імітованого потоку сонячного випромінення використовувати радіометр з електричним заміщенням, який побудований на основі конструктивно суміщених нагрівачів і прецизійних температурних сенсорів, в якому розділено в часі процедури нагрівання приймальної поверхні під час електричного заміщення та вимірювання значення отриманої різниці температур, що дає можливість в декілька разів зменшити методичні похибки.

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.

Радіометр, працює на основі компаратора температур на основі сучасних напівпровідникових температурних сенсорів. Схема вимірювача різниці температур базується на двох перетворювачах напруга-струм, в зворотний зв'язок яких увімкнено температурні сенсори. Шляхом використання одного джерела опорної напруги через сенсори протікатимуть однакові струми. Вихідні сигнали обох перетворювачів рівні спадкам напруг на сенсорах та подані на диференційні входи АЦП, що дозволяє отримати вихідний код пропорційним до вимірюваної різниці температур. Здійснюється калібрування цього вимірювача за будь-якої температури в діапазоні вимірювання та забезпеченні однаковості температур обох сенсорів. Після калібрування оцінене значення похибки вимірювача різниці температури не перевищує $\pm 0,1$ °C у всьому вимірювальному діапазоні.

Код результату вимірювання різниці температур визначається співвідношенням:

$$N_x = k_{ADC} \frac{U_{x1} - U_{x2}}{E_N \frac{R_{N2} + r}{R_{N1} + R_p - r}},$$

де R_{N1} , R_{N2} – опори стабільних масштабувальних резисторів подільника напруги; R_{I1} , R_{I2} – опори струмозадавальних резисторів; R_p – повний опір підстроювального резистора; r – частина опору резистора R_p , яка знаходиться між його движком та резистором R_N .

Детально щодо устаткування та методів, застосованих під час калібрування, потрібно звітувати разом з результатами випробування.

Розподіл поверхневої густини потоку випромінення на апертурі колектора треба вимірювати із застосуванням решітки з максимальним шагом 150 мм та з урахуванням просторового середнього значення, отриманого звичайним усередненням.

Радіометри з електричним заміщенням потрібно перевіряють відповідно до ДСТУ 3193:1995, шляхом безпосереднього звіряння і звірянням за допомогою компаратора. Якщо приладові буде завдано значних пошкоджень, його треба знову відкалібрувати або замінити.

7.2 Вимірювання поверхневої густини потоку теплового випромінення в імітаторах

Імовірно, що поверхнева густина потоку теплового випромінення в імітаторі сонячного випромінення буде вищою за ту, що виникає просто неба. Тому її вимірюють, щоб упевнитися, що вона не перевищує меж, описаних у 8.

Під час вимірювання у приміщенні поверхневу густину потоку теплового випромінення можна вимірювати піргеометром, який треба добре вентилювати, щоб мінімізувати вплив імітованого

сонячного потоку випромінення. Встановлювати піргеометр потрібно у площині апертури колектора та біля одного з його боків на висоті, що дорівнює половині висоти колектора.

Середню поверхневу густину потоку теплового випромінення на випробній площині колектора потрібно визначати кожного разу, як відбуваються зміни в імітаторі, здатні впливати на поверхневу густину потоку теплового випромінення, або принаймні раз на рік. Середнє значення поверхневої густини потоку теплового випромінення на випробній площині колектора та дату останнього вимірювання реєструють разом з результатами випробування колектора.

За умови, що всі джерела та відвід теплового випромінення в полі зору колектора має бути визначено, поверхневу густину потоку теплового випромінення на апертурі колектора можна обчислити, застосовуючи виміряні значення температури, випромінення поверхні та коефіцієнтів видимого випромінення.

7.3 Вимірювання температури

Під час випробування сонячного колектора треба виконати три вимірювання температури: температури рідини на вході колектора, температури рідини на виході колектора та температури навколишнього повітря. Потрібна точність та умови довкілля для цих вимірень різняться, отже, перетворювач та допоміжне устаткування так само можуть бути різними. Відповідно до ДСТУ 9806-1.

7.4 Температура навколишнього повітря в імітаторі

До вимірювання температури довкілля в імітаторах треба підходити уважно. Може бути застосовано усереднення кількох виміряних значень. Перетворювачі потрібно екранувати, щоб мінімізувати взаємообмінвання випроміненням. Для обчислювання робочих характеристик колектора застосовують температуру повітря на виході з генератора вітру.

8 ВИПРОБУВАЛЬНИЙ ПЕРІОД

Випробувальний період, що передбачає збирання даних за усталеного режиму, складається з підготовчого періоду, який триває щонайменше 15 хв, часу точного вимірювання температури рідини на вході, а також періоду вимірювання за усталеного режиму, що також триває принаймні 15 хв.

Колектор вважають таким, що працює за умов усталеного режиму протягом певного випробувального періоду, якщо протягом цього періоду відхили кожного з експериментальних параметрів від своїх середніх значень не перевищують меж, зазначених у таблиці 1. Аби впевнитись, що усталеного режиму досягнуто, потрібно порівняти середні значення кожного з параметрів, які визначено за послідовні 30-секундні періоди, із середніми значеннями за весь період вимірювання.

Таблиця 1 — Допустимі відхили вимірюваних параметрів протягом періоду вимірювання

Параметр	Допустимий відхил від середнього значення
Випробувальна поверхнева густина потоку сонячного випромінення	$\pm 50 \text{ Вт/м}^2$
Температура навколишнього повітря	$\pm 1 \text{ К}$
Масова швидкість потоку рідини	$\pm 1\%$
Температура рідини на вході колектора	$\pm 0,1 \text{ К}$

9 ОБЧИСЛЮВАННЯ ТА ПОДАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати вимірювання потрібно упорядкувати, щоб зробити набір даних, які відповідають умовам випробування, враховуючи випробування під час роботи за усталеного режиму. Їх треба подавати, використовуючи стандартні форми, наведені в додатку А.

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАННЯ

Колектор №

Випробування виконано
 Адреса
 Дата Телефон Факс

А.1 Опис сонячного колектора

А.1.1 Назва підприємства-виробника
та моделі колектора

А.1.2 Колектор

Тип: Плаский Вакуумний трубчастий Інший (зазначити)

Загальна площа М²
 Площа апертури М²
 Площа абсорбера М²
 Кількість покривів
 Матеріал покривів
 Товщина покривів ММ
 Кількість труб або каналів
 Діаметр труб або розміри каналів ММ
 Довжина труб або каналів ММ

А.1.3 Теплоносій

Тип: Вода Мاستило Інший (зазначити)

Технічні характеристики (домішки тощо)
 Альтернативні допустимі рідинні теплоносії

А.1.4 Абсорбер

Матеріал.....
 Оброблення поверхні
 Тип конструкції
 Місткість рідини л
 Вага у порожньому стані кг
 Розміри ММ

А.1.5 Теплоізоляція та обшивка

Товщина теплоізоляції ММ
 Теплоізоляційний матеріал
 Матеріал обшивки.....
 Загальна маса колектора без рідини кг
 Загальні розміри ММ
 Розміри апертури ММ
 Герметизувальний матеріал

А.1.6 Обмеження

Максимальна робоча температура °С
 Максимальний тиск Па
 Інші обмеження

А.1.7 Схематичне зображення сонячного колектора

(може бути на окремій сторінці)

А.1.8 Фотографічний знімок колектора

(за потреби подають на окремій сторінці)

А.1.9 Схематичне зображення монтажу колектора

(може бути на окремій сторінці)

Примітки щодо будь-яких особливостей монтажу

А.2 Поточний ККД**А.2.1 Метод**Зовні приміщення за усталеного режиму У приміщенні за усталеного режиму **А.2.2 Схематичне зображення випробувального контуру**

(у разі потреби подають на окремій сторінці)

А.2.3 Результати випробування, виміряні та похідні дані

Широта Довгота

Нахил колектора градусів Азимут колектора

Місцевий час у сонячний полудень

Таблиця А.1 — Результати випробування, виміряні дані

Дата рік, міс., день	Час вимірюван ня t , с	Масова швидкість потoku рідинного теплоносія \dot{m} , кг/с	Питома теплоємність рідинного теплоносія, c_f , Дж/(кг К)	Загальна поверхнева густина потoku сонячного випромінення G , Вт/м ²	Загальна площа колектора A_G , м ²	Різниця температур на виході та на вході ΔT , °С

А.2.4 Значення поточного ККД сонячного колектора

Значення ККД сонячного колектора:

$$\eta = \frac{v_m t c_f \Delta T}{A_G G} = \dots\dots\dots \%,$$

А.3 Висновок

.....

.....


.....

.....

Додаток В

Протокол лабораторних досліджень десяти послідовно з'єднаних серійно виготовлених транзисторів типу КТ3107Ж та КТ315Б з метою визначення їх граничних можливостей як температурних сенсорів за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005

Міністерство освіти і науки України
 Національний університет «Дніпровський політехнічний інститут»

 ЗВЕРДЖУЮ
 Проректор з наукової роботи
 Чухрай Н.І.
 травня 2017 р.

ПРОТОКОЛ

лабораторних досліджень десяти послідовно з'єднаних серійно виготовлених транзисторів типу КТ3107Ж та КТ315Б з метою визначення їх граничних можливостей як температурних сенсорів за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005

Належить кафедрі МСС НУ "ЛП".

1. Зразкові прилади:

- цифровий прецизійний рідинний термостат типу ТСП-0105 заводський номер №06, пройшов періодичну атестацію від 30.06.2015 р., термін дії свідоцтва чинний до 01.07.2016 р.
- мультиметр М3514А №ТW0013442 фірми PICOTEST, пройшов державна метрологічну атестацію від 28.12.2015 р., термін дії свідоцтва чинний до 28.12.2016 р.

2. Метою лабораторних досліджень напівпровідникових перетворювачів температури (НПТ) є перевірка можливості використання серійно виготовлених транзисторів типу КТ3107Ж (р-п-р) та КТ315Б (п-р-р) як температурних сенсорів за ДСТУ 3742-98 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Контактні засоби вимірювань температури» та ДСТУ ISO 9806-1:2005 «Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 1. Теплові характеристики та перепад тиску закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини». Визначити розкиди характеристик між сенсорами від зразка до зразка, граничні метрологічні властивості послідовного та паралельного з'єднання десяти серійно виготовлених транзисторів типу КТ3107Ж (р-п-р) та КТ315Б (п-р-р). Перевірити теоретичне припущення про зменшення впливу розкиду початкових напруг під час використання в НПТ послідовно з'єднаних транзисторів. На підставі експериментальних досліджень вибрати тип транзисторів з найкращими характеристиками та розробити конструкцію сенсорів, які можуть використовуватись в температурних каналах пристроїв для досліджень сонячних перетворювачів.

3. Умови досліджень

- температура довкілля $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$.
- атмосферний тиск (740 ± 20) мм. рт. ст.
- відносна вологість $(40 \pm 20)\%$.
- відсутні зовнішні тряски, вібрації та електромагнітні поля, що можуть впливати на результати досліджень.

4. Методика виконання вимірювань напруг на десяти послідовно та паралельно з'єднаних транзисторів типу КТ3107Ж та КТ315Б

Як сенсори температури використовувались транзистори (типу КТ3107Ж та КТ315Б конструктивно призначені для об'ємного монтажу), включені за схемою транзисторного діода із закороченими переходами бази та колектора. Сенсори температури розташовувались в пасивному термостаті при температурі довкілля. Сенсори з'єднувались послідовно і паралельно з метою подальшого порівняння експериментально визначених середніх значень напруги на десяти послідовно сполучених транзисторах та при їх паралельному з'єднанні. Під час послідовного сполучення десяти транзисторів певного типу, протікав вимірювальний струм 0,1 мА, для паралельного з'єднання забезпечувався загальний струм 1 мА, що забезпечувало протікання струму приблизно по 0,1 мА через кожен транзистор з метою забезпечення співставлення експериментальних результатів для кожного із вказаних з'єднань. Значення напруг вимірювались

мультиметром Picotest M3511A, з діапазонами вимірювань – 0,1 В, 1 В та 10 В, точністю 0,012 % за 1 рік та одиницею молодшого розряду в режимі усереднення 1 мкВ. Як джерело живлення застосовувався диференціальний вольтметр В1-12, для забезпечення протікання заданого струму використовувався магазин опору Р4831. Температура вимірювалась термометром TGL (0-50°C) з роздільною здатністю 0,1 °С.

Експериментально встановлений розкид значень напруги на НПТ $\Delta U_{\delta ei}$ визначався співвідношенням (1):

$$\Delta U_{\delta ei} = U_{\delta ei \text{ сep}} - U_{\text{сep } \delta ei}, \quad (1)$$

де $U_{\delta ei}$ – напруга на р-п переходах НПТ і-того сенсора;

$U_{\text{сep } \delta ei}$ – середнє значення напруги на р-п переходах НПТ і-того сенсора.

Середнє значення експериментально встановленого розкиду значень напруги на НПТ виражене у Вольтах $\Delta U_{\delta eij}$ представлено формулою (2):

$$\Delta U_{\delta eij} = U_{\delta eij \text{ сep}} - U_{\text{сep } \delta eij}, [\text{В}] \quad (2)$$

де $U_{\delta eij \text{ сep}}$ – усереднене значення двократних вимірювань напруги на р-п переходах НПТ і-того сенсора.

Середнє значення експериментально встановленого розкиду значень напруги на НПТ виражене у Кельвінах $\Delta U_{\delta eij} / \varepsilon$ представлено формулою (3):

$$\Delta U_{\delta eij} / \varepsilon = (U_{\delta eij \text{ сep}} - U_{\text{сep } \delta eij}) / \varepsilon, [\text{К}] \quad (3)$$

де $\varepsilon = 10$ мВ/К – чутливість.

5. Опрацювання результатів вимірювань напруги на транзисторах типу КТ3107Ж та КТ315Б

Проведено експериментальні дослідження десяти послідовно та паралельно з'єднаних транзисторів типу КТ3107Ж зі структурою р-п-р та КТ315Б зі структурою п-р-п (табл.1 – табл.2). Встановлено, що при паралельному або послідовному з'єднанні транзисторних діодів відкривається можливість усереднення технологічних розкидів, що також дозволяє й збільшити їхню точність.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень десяти послідовно та паралельно сполучених транзисторів типу КТ3107Ж

№ п/п	Послідовне з'єднання			Паралельне з'єднання	
	$U_{\delta ei}$, В	$U_{\text{сep } \delta ei}$, В	$\Delta U_{\delta ei} = U_{\delta ei} - U_{\text{сep } \delta ei}$		$U_{\delta e \text{ пар}}$, В
			В	К	
1	0,540	0,566	-0,0254	-12,7	0,570
2	0,576		0,0106	5,3	
3	0,572		0,0066	3,3	
4	0,562		-0,0034	-1,7	
5	0,572		0,0066	3,3	
6	0,579		0,0136	6,8	
7	0,571		0,0056	2,8	
8	0,563		-0,0024	-1,2	
9	0,544		-0,0214	-10,7	
10	0,575		0,0096	4,8	

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень десяти послідовно та паралельно сполучених транзисторів типу КТ315Б

№ п/п	Послідовне з'єднання			Паралельне з'єднання	
	$U_{\text{обс}}, \text{В}$	$U_{\text{сер. obs}}, \text{В}$	$\Delta U_{\text{обс}} = U_{\text{обс}} - U_{\text{сер. obs}}$		$U_{\text{обс. пар.}}, \text{В}$
			В	К	
1	0,603	0,598	0,0041	2,05	0,599
2	0,600		0,0011	0,55	
3	0,573		-0,0259	-12,95	
4	0,603		0,0041	2,05	
5	0,592		-0,0069	-3,45	
6	0,607		0,0081	4,05	
7	0,600		0,0011	0,55	
8	0,601		0,0021	1,05	
9	0,598		-0,0009	-0,45	
10	0,612		0,0131	6,55	

7. Висновки

Результати експериментальних досліджень десяти послідовно з'єднаних транзисторів для об'ємного монтажу типів КТ3107Ж (p-n-p) та КТ315Б (n-p-n) показали, що їм властивий значний розкид значень напруги на сенсорах за кімнатних температур в межах від 0,6030 В до 0,5730 В (± 15 мВ або $\pm 7,5$ К відносно середнього значення). Це свідчить про неможливість їх безпосереднього застосування як температурних сенсорів за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005. Під час їх використання необхідно застосовувати відповідні методи і засоби підстроювання під індивідуальну статичну характеристику перетворення у вторинних пристроях. Встановлено, що спостерігається істотний вплив конструктивного виконання дискретних транзисторів, зумовлених їх технологією виготовлення, на отримані результати дослідження транзисторів.

Аналіз технології виготовлення і експериментальних досліджень напівпровідникових елементів показав, що для реалізації вимірювача різниці температур з похибкою порядку декілька десятих кельвіна, доцільно використовувати транзистори, виготовлені в єдиному технологічному циклі. При цьому перевагу слід віддати транзисторам конструктивного виконання для поверхневого монтажу, оскільки вони поставляються на монтажній стрічці і ймовірно виготовляються з однієї напівпровідникової пластини, тобто в одному технологічному циклі.

Лабораторні дослідження проводили:

Доцент кафедри «Електромеханіка та електроніка»
Національної академії сухопутних військ
ім. гетьмана Петра Сагайдачного
к.т.н., доцент

Директор
ТзОВ «Лапаївка-сервіс»







Зав. відділу метрології
управління НДЧ

К.т.н., асистент
кафедри МСС

Д.т.н. професор
кафедри МСС

Аспірантка
кафедри МСС



 Міхалєва М.С.
 Зарічна В.І.
 Приймачук І.М.
 Здеб В.Б.
 Яцук.В.О.
 Василюха Х.В.

Додаток Г

Протокол лабораторних досліджень взаємозамінності характеристик напівпровідникових сенсорів для вимірювання температури і різниці температур за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»



ПРИТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи

Чухрай Н.І.

Чухрай 2017 р.

ПРОТОКОЛ

лабораторних досліджень взаємозамінності характеристик напівпровідникових сенсорів
для вимірювання температури і різниці температур за вимогами ДСТУ 3742-98 та
ДСТУ ISO 9806-1:2005

Належить кафедрі МСС НУ "ЛП".

1. Зразкові прилади:

- цифровий прецизійний рідинний термостат типу ТСР-0105 заводський номер №06, пройшов періодичну атестацію від 30.06.2015 р., термін дії свідоцтва чинний до 01.07.2016 р.
- мультиметр М3514А №TW0013442 фірми PICOTEST, пройшов державна метрологічну атестацію від 28.12.2015 р., термін дії свідоцтва чинний до 28.12.2016 р.

2. Метою лабораторних досліджень напівпровідникових перетворювачів температури (НПТ) є визначення взаємозамінності характеристик між сенсорами. На підставі результатів досліджень вибрати тип планарних транзисторів з найкращими характеристиками та розробити конструкцію температурних сенсорів відповідно до вимог ДСТУ 3742-98 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Контактні засоби вимірювань температури» та ДСТУ ISO 9806-1:2005 «Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 1. Теплові характеристики та перепад тиску закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини». Перевірити теоретичне припущення про зменшення розкиду початкових напруг під час використання транзисторів для поверхневого монтажу порівняно із традиційними транзисторними діодами для об'ємного монтажу. Для експериментальних досліджень серед доступних на ринку були вибрані такі типи транзисторів для поверхневого монтажу: BC858C, BC859B, BCW61C (типу p-n-p) та BC849B, BC849C, BC850BE (типу n-p-n).

3. Умови досліджень

- температура довкілля $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$.
- атмосферний тиск (740 ± 20) мм. рт. ст.
- відносна вологість $(40 \pm 20)\%$.
- відсутні зовнішні тряски, вібрації та електромагнітні поля, що можуть впливати на результати досліджень.

4. Методика виконання вимірювань напруг на десяти послідовно та паралельно з'єднаних транзисторах для поверхневого монтажу типу BC858C, BC859B, BCW61C та BC849B, BC849C, BC850BE

Для експериментальних досліджень були вибрані такі типи транзисторів для поверхневого монтажу: BC858C, BC859B, BCW61C (p-n-p типу) та BC849B, BC849C, BC850BE (n-p-n типу). Транзистори були змонтовані на друкованій платі. Для забезпечення легкого доступу до кожного з транзисторів їх електроди (еквівалентно анод та катод) під'єднані до комутаційних роз'ємів. З метою забезпечення мінімальних значень температурних градієнтів уся експериментальна устава була розміщена в пасивному термостаті. Для зменшення електромагнітних завад уся конструкція знаходилась в металевому екрані.

Сенсори з'єднувались послідовно і паралельно з метою подальшого порівняння експериментально визначених середніх значень напруги на десяти послідовно сполучених транзисторах та при їх паралельному з'єднанні. Під час послідовного сполучення десяти

транзисторів певного типу, протікав вимірювальний струм 0,1 мА, для паралельного з'єднання забезпечувався загальний струм 1 мА, що забезпечувало протікання струму приблизно по 0,1 мА через кожен транзистор з метою забезпечення співставлення експериментальних результатів для кожного із вказаних з'єднань. Значення напруг вимірювались мультиметром Picotest M3511A, з діапазонами вимірювань – 0,1 В, 1 В та 10 В, точністю 0,012 % за 1 рік та одиницею молодшого розряду в режимі усереднення 1 мкВ.

Методика вимірювання полягала у десяти почергових вимірюваннях напруг на кожному з 10-ти послідовно з'єднаних транзисторів, з подальшим усередненням результатів і порівнянням його з експериментально визначеним значенням спаду напруги при їх паралельному з'єднанні. В результаті обиралися транзистори з найменшим розкидом значень напруг, які найдоцільніше в подальшому застосовувати як сенсори температури.

Експериментально встановлений розкид значень напруги на НПТ $\Delta U_{\delta ei}$ визначався співвідношенням (1):

$$\Delta U_{\delta ei} = U_{\delta ei \text{ сep}} - U_{\text{сep } \delta ei} \quad (1)$$

де $U_{\delta ei}$ – напруга на р-п переходах НПТ і-того сенсора;

$U_{\text{сep } \delta ei}$ – середнє значення напруги на р-п переходах НПТ і-того сенсора.

Середнє значення експериментально встановленого розкиду значень напруги на НПТ виражене у Вольтах $\Delta U_{\delta eij}$ представлено формулою (2):

$$\Delta U_{\delta eij} = U_{\delta eij \text{ сep}} - U_{\text{сep } \delta eij} \text{ [В]} \quad (2)$$

де $U_{\delta eij \text{ сep}}$ – усереднене значення двократних вимірювань напруги на р-п переходах НПТ і-того сенсора.

Середнє значення експериментально встановленого розкиду значень напруги на НПТ виражене у Кельвінах $\Delta U_{\delta eij} / \varepsilon$ представлено формулою (3):

$$\Delta U_{\delta eij} / \varepsilon = (U_{\delta eij \text{ сep}} - U_{\text{сep } \delta eij}) / \varepsilon \text{ [К]} \quad (3)$$

де $\varepsilon = 10 \text{ мВ/К}$ – чутливість.

5. Опрацювання результатів вимірювань напруги на транзисторах для поверхневого монтажу типу BC858C, BC859B, BCW61C та BC849B, BC849C, BC850BE

Проведено експериментальні дослідження десяти послідовно та паралельно з'єднаних транзисторів типу BC858C, BC859B, BCW61C зі структурою р-п-р та BC849B, BC849C, BC850BE зі структурою н-р-п, результати експериментально встановлених розкидів напруг на сенсорах представлені в таблиці 1 і таблиці 2.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень десяти послідовно та паралельно сполучених транзисторів типів BC858C, BC859B, BCW61C зі структурою р-п-р

Тип	№ п\п	Послідовне з'єднання				Паралельне з'єднання $U_{\delta e \text{ пар. В}}$
		$U_{\delta ei}, \text{ В}$	$U_{\text{сep } \delta ei}, \text{ В}$	$\Delta U_{\delta ei} = U_{\delta ei} - U_{\text{сep } \delta ei}$		
				В	К	
BCW61C	1	0,595	0,5948	0,0002	0,1	0,595
	2	0,595		0,0002	0,1	
	3	0,595		0,0002	0,1	
	4	0,595		0,0002	0,1	
	5	0,595		0,0002	0,1	
	6	0,5945		-0,0003	-0,15	
	7	0,5945		-0,0003	-0,15	
	8	0,595		0,0002	0,1	
	9	0,5945		-0,0003	-0,15	
	10	0,5945		-0,0003	-0,15	

BC 858C	1	0,585	0,5859	-0,0009	-0,45	0,586
	2	0,586		0,0001	0,05	
	3	0,5875		0,0016	0,8	
	4	0,584		-0,0019	-0,95	
	5	0,585		-0,0009	-0,45	
	6	0,5875		0,0016	0,8	
	7	0,587		0,0011	0,55	
	8	0,587		0,0011	0,55	
	9	0,584		-0,0019	-0,95	
	10	0,586		0,0001	0,05	
BC 859B	1	0,601	0,6028	-0,0018	-0,9	0,604
	2	0,6035		0,0007	0,35	
	3	0,600		-0,0028	-1,4	
	4	0,604		0,0012	0,6	
	5	0,6045		0,0017	0,85	
	6	0,602		-0,0008	-0,4	
	7	0,603		0,0002	0,1	
	8	0,605		0,0022	1,1	
	9	0,600		-0,0028	-1,4	
	10	0,605		0,0022	1,1	

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень десяти послідовно та паралельно сполучених транзисторів типів BC849B, BC849C, BC850BE зі структурою n-p-n

Тип	№ п/п	Послідовне з'єднання				Паралельне з'єднання $U_{бе\ пар}, В$
		$U_{беі}, В$	$U_{сер. беі}, В$	$\Delta U_{беі} = U_{беі} - U_{сер. беі}, В$		
				В	К	
BC 849B	1	0,603	0,6027	0,00035	0,175	0,603
	2	0,603		0,00035	0,175	
	3	0,6025		-0,00015	-0,075	
	4	0,6025		-0,00015	-0,075	
	5	0,6015		-0,00115	-0,575	
	6	0,600		-0,00265	-1,325	
	7	0,603		0,00035	0,175	
	8	0,604		0,00135	0,675	
	9	0,604		0,00135	0,675	
	10	0,603		0,00035	0,175	
BC 849C	1	0,588	0,588	0,00000	0,000	0,588
	2	0,588		0,00000	0,000	
	3	0,588		0,00000	0,000	
	4	0,588		0,00000	0,000	
	5	0,588		0,00000	0,000	
	6	0,5885		0,00050	0,250	
	7	0,588		0,00000	0,000	
	8	0,588		0,00000	0,000	
	9	0,588		0,00000	0,000	
	10	0,5875		-0,00050	-0,250	
BC 850BE	1	0,5935	0,5939	-0,0004	-0,20	0,594
	2	0,594		0,0001	0,05	

3	0,594	0,0001	0,05
4	0,594	0,0001	0,05
5	0,594	0,0001	0,05
6	0,594	0,0001	0,05
7	0,594	0,0005	0,25
8	0,594	0,0001	0,05
9	0,594	0,0001	0,05
10	0,5935	-0,0004	-0,20

7. Висновки

Експериментально підтверджено теоретичне припущення про зменшення розкиду початкових напруг під час використання транзисторів для поверхневого монтажу виготовлених в єдиному технологічному циклі, порівняно із традиційними транзисторними діодами для об'ємного монтажу. А також доведено, що під час використання в НІТ послідовно з'єднаних транзисторів спостерігається зменшення впливу розкиду початкових напруг та показано й можливість збільшення їх чутливості.

В результаті досліджень транзисторів для поверхневого монтажу типів BC858C, BC859B, BCW61C (p-n-p) та BC849B, BC849C, BC850BE (n-p-n) було обрано транзистори з найменшим розкидом значень напруг типів BCW61C та BC849C, які найдоцільніше в подальшому застосовувати як сенсори температури відповідно до вимог ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005. Оцінивши математичне сподівання напруг на десяти послідовно з'єднаних транзисторах та експериментально визначивши напруги при їх паралельному з'єднанні, доведено, що розкид отриманих значень не перевищує ± 50 мкВ. Наприклад, для десяти транзисторів типу BC 849C середнє значення напруг $U_{нсл.сер}=0,5808$ В відповідає виміряному значенню напруги при паралельному з'єднанні $U_{нрл}=0,5808$ В, для транзисторів типу BCW61C: $U_{нсл.сер}=0,5903$ В та $U_{нрл}=0,5903$ В, відповідно.

Лабораторні дослідження проводили:

Доцент кафедри «Електромеханіка та електроніка»
Національної академії сухопутних військ
ім. гетьмана Петра Сагайдачного
к.т.н., доцент

Директор
ТзОВ «Ланіаївка-сервіс»

Зав. відділу метрології
управління НДЧ

К.т.н., асистент
кафедри МСС


Д.т.н. професор
кафедри МСС


Аспірантка
кафедри МСС



Міхалева М.С.


Зарічна В.І.


Приймачук І.М.


Здеб В.Б.



Яцук.В.О.


Василиха Х.В.

Додаток Д

**Протокол лабораторних досліджень напівпровідникових сенсорів температури
для цифрових вимірювачів різниці температур за вимогами ДСТУ 3742-98 та
ДСТУ ISO 9806-1:2005**

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»


 ЗАТВЕРДЖУЮ
 Професор з наукової роботи
 Чухрай Н.І.
 15 травня 2017 р.

ПРОТОКОЛ

лабораторних досліджень напівпровідникових сенсорів температури для цифрових вимірювачів температури і різниці температур за вимогами ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005

Належить кафедрі МСС НУ «ЛП».

1. Зразкові прилади:

- цифровий прецизійний рідинний термостат типу ТСР-0105 заводський номер №06, пройшов періодичну атестацію від 30.06.2015 р., термін дії свідоцтва чинний до 01.07.2016 р.
- мультиметр М3514А №ТW0013442 фірми PICOTEST, пройшов державна метрологічну атестацію від 28.12.2015 р., термін дії свідоцтва чинний до 28.12.2016 р.

2. Метою лабораторних досліджень є виконання вимірювань напруг на напівпровідникових сенсорах, на основі п'яти послідовно сполучених транзисторних діодів та визначення розкиду характеристик між сенсорами. Для експериментальних досліджень були вибрані такі типи транзисторів для поверхневого монтажу: BCW61C (типу р-п-р) та BC849C (типу п-р-п). Перевірити можливість використання обраних типів планарних транзисторів з найкращими характеристиками для вимірювання температури та різниці температур в радіометрах для досліджень сонячних перетворювачів із врахуванням вимог ДСТУ 3742-98 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Контактні засоби вимірювань температури» та ДСТУ ISO 9806-1:2005 «Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 1. Теплові характеристики та перепад тиску закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини». (ISO 9806-1:1994, IDT)

3. Умови досліджень

- температура довкілля (20±5)°С.
- атмосферний тиск (740±20) мм. рт. ст.
- відносна вологість (40±20) %.
- відсутні зовнішні тряски, вібрації та електромагнітні поля, що можуть впливати на результати досліджень.

4. Методика виконання вимірювань напруг на напівпровідникових сенсорах, на основі п'яти послідовно сполучених транзисторних діодів (транзистори типів BCW61C та BC849C)

На основі попередніх досліджень зроблено висновок про доцільність використання в напівпровідникових перетворювачах температури таких транзисторів BCW61C (р-п-р структура) та BC849C (п-р-п структура) з найменшим розкидом значень напруг від зразка до зразка. Конструктивно НПТ являли собою п'ять послідовно сполучених транзисторних діодів, змонтованих на друкованих платах, та з метою їх захисту від шунтувального впливу рідини були вкриті термоусаджувальною плівкою. З метою коректного порівняння розкиду характеристик декілька НПТ послідовно включалися в коло генераторів струму та розміщувалися в цифровому прецизійному рідинному термостаті типу ТСР-0105 НО з дискретністю задання значень температури 0,01 °С. Напруги на НПТ та зразкових резисторах вимірювались цифровим мультиметром Picotest з точністю 0,012 % за 1 рік та одиницею молодшого розряду в режимі усереднення 1 мкВ. Досліджувані сенсори поміщались в термостат, в якому встановлювались задані значення температури від 0 °С до +80 °С з дискретністю 10 °С. Для коректного вибору вимірювальних струмів були задані такі їх номінальні значення 0,1 мА, 1 мА та 1,9 мА. Методика

дослідження полягала у вимірюванні напруги на НПТ із зміненням полярності підключення вольтметра та усередненні декількох результатів перетворення.

Експериментально встановлений розкид значень напруги на НПТ $\Delta U_{\delta e i}$ визначався співвідношенням (1):

$$\Delta U_{\delta e i} = U_{\delta e i} - U_{\text{сер. } \delta e i}, \quad (1)$$

де $U_{\delta e i}$ – напруга на р-п переходах НПТ і-того сенсора;

$U_{\text{сер. } \delta e i}$ – середнє значення напруги на р-п переходах НПТ і-того сенсора.

Середнє значення експериментально встановленого розкиду значень напруги на НПТ виражене у Вольтах $\Delta U_{\delta e i j}$ представлено формулою (2):

$$\Delta U_{\delta e i j} = U_{\delta e i j} - U_{\text{сер. } \delta e i j}, [\text{В}] \quad (2)$$

де $U_{\delta e i j}$ – усереднене значення двократних вимірювань напруги на р-п переходах НПТ і-того сенсора.

Середнє значення експериментально встановленого розкиду значень напруги на НПТ виражене у Кельвінах $\Delta U_{\delta e i j} / \varepsilon$ представлено формулою (3):

$$\Delta U_{\delta e i j} / \varepsilon = (U_{\delta e i j} - U_{\text{сер. } \delta e i j}) / \varepsilon, [\text{К}] \quad (3)$$

де $\varepsilon = 10$ мВ/К – чутливість.

5. Опрацювання результатів

5.1. Опрацювання результатів вимірювання напруг на сенсорах типу BC849C для трьох значень струмі в температурному діапазоні від 0 до +60 °С.

Експериментально встановлені розкиди напруг на напівпровідникових сенсорах, на основі п'яти послідовно сполучених транзисторних діодів типу BC849C при струмах $I_1 = 1$ мА, $I_2 = 0,1$ мА та $I_3 = 1,9$ мА для температури вимірювання (0...60)°С з дискретністю 10 °С, представлені у таблицях 1 – 3.

5.2. Опрацювання результатів вимірювання напруг на сенсорах типу BCW61C для трьох значень струмі в температурному діапазоні від 0 до +80 °С

Експериментально встановлені розкиди напруг на напівпровідникових сенсорах, на основі п'яти послідовно сполучених транзисторних діодів типу BCW61C при струмах $I_1 = 1$ мА, $I_2 = 0,1$ мА та $I_3 = 1,9$ мА для температури вимірювання (0...80)°С з дискретністю 10 °С, представлені у таблицях 4 – 6.

Таблиця 1 – Експериментально встановлені розкиди напруг на сенсорах типу ВС849С при $I_1=1$ мА в діапазоні температур вимірювання (0...60) °С

№ п/п	$\Delta U_{\text{бєі}}$													
	Темп. 0 ⁰ С		Темп. 10 ⁰ С		Темп. 20 ⁰ С		Темп. 30 ⁰ С		Темп. 40 ⁰ С		Темп. 50 ⁰ С		Темп. 60 ⁰ С	
	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К
1	0,31	0,031	0,25	0,025	0,13	0,013	0,06	0,006	0,05	0,005	0,09	0,009	0,02	0,002
2	-0,65	-0,065	-0,31	-0,031	-0,38	-0,038	-0,22	-0,022	-0,23	-0,023	-0,26	-0,026	-0,29	-0,029
3	0,13	0,013	0,04	0,004	0,18	0,018	0,11	0,011	0,10	0,010	0,09	0,009	0,17	0,017
4	-0,12	-0,012	-0,21	-0,021	-0,09	-0,009	-0,12	-0,012	-0,13	-0,013	-0,15	-0,015	-0,14	-0,014
5	-0,12	-0,012	-0,21	-0,021	-0,21	-0,021	-0,29	-0,029	-0,27	-0,027	-0,28	-0,028	-0,25	-0,025
6	0,59	0,059	0,55	0,055	0,56	0,056	0,56	0,056	0,59	0,059	0,56	0,056	0,56	0,056
7	0,11	0,011	0,05	0,005	0,01	0,001	-0,06	-0,006	0,005	0,0005	0,02	0,002	-0,03	-0,003
8	-0,26	-0,026	-0,17	-0,017	-0,20	-0,020	-0,05	-0,005	-0,08	-0,008	-0,07	-0,007	-0,03	-0,003

Таблиця 2 – Експериментально встановлені розкиди напруг на сенсорах типу ВС849С при $I_2=0,1$ мА в діапазоні температур вимірювання (0...60) °С

№ п/п	$\Delta U_{\text{бєі}}$													
	Темп. 0 ⁰ С		Темп. 10 ⁰ С		Темп. 20 ⁰ С		Темп. 30 ⁰ С		Темп. 40 ⁰ С		Темп. 50 ⁰ С		Темп. 60 ⁰ С	
	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К
1	0,29	0,029	0,30	0,030	0,12	0,012	0,07	0,007	0,07	0,007	0,11	0,011	0,12	0,012
2	-0,33	-0,033	-0,22	-0,022	-0,23	-0,023	-0,19	-0,019	-0,19	-0,019	-0,21	-0,021	-0,23	-0,023
3	0,21	0,021	0,08	0,008	0,15	0,015	0,08	0,008	0,07	0,007	0,03	0,003	0,07	0,007
4	-0,12	-0,012	-0,18	-0,018	-0,11	-0,011	-0,10	-0,010	-0,11	-0,011	-0,14	-0,014	-0,12	-0,012
5	-0,11	-0,011	-0,21	-0,021	-0,21	-0,021	-0,28	-0,028	-0,33	-0,033	-0,24	-0,024	-0,30	-0,030
6	0,45	0,045	0,36	0,036	0,42	0,042	0,44	0,044	0,41	0,041	0,41	0,041	0,39	0,039
7	0,11	0,011	0,15	0,015	0,10	0,010	-0,02	-0,002	-0,03	-0,003	-0,08	-0,008	-0,10	-0,010
8	-0,49	-0,049	-0,28	-0,028	-0,22	-0,022	0	0	0,13	0,013	0,10	0,010	0,17	0,017

Таблиця 3 – Експериментально встановлені розкиди напруг на сенсорах типу BC849C при $I_3=1,9$ мА в діапазоні температур вимірювання (0...60) °С

№ п/п	$\Delta U_{\text{бел}}$													
	Темп. 0°С		Темп. 10°С		Темп. 20°С		Темп. 30°С		Темп. 40°С		Темп. 50°С		Темп. 60°С	
	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К
1	0,50	0,050	0,37	0,037	0,26	0,026	0,17	0,017	0,16	0,016	0,10	0,010	0,10	0,010
2	-1,12	-0,112	-0,55	-0,055	-0,50	-0,050	-0,40	-0,040	-0,26	-0,026	-0,30	-0,030	-0,31	-0,031
3	0,25	0,025	0,09	0,009	0,18	0,018	0,14	0,014	0,09	0,009	0,20	0,020	0,22	0,022
4	0,08	0,008	-0,14	-0,014	-0,13	-0,013	-0,15	-0,015	-0,17	-0,017	-0,11	-0,011	-0,13	-0,013
5	-0,04	-0,004	-0,21	-0,021	-0,24	-0,024	-0,29	-0,029	-0,29	-0,029	-0,29	-0,029	-0,29	-0,029
6	0,73	0,073	0,62	0,062	0,59	0,059	0,64	0,064	0,62	0,062	0,61	0,061	0,59	0,059
7	0,09	0,009	0,02	0,002	-0,04	-0,004	-0,11	-0,011	-0,12	-0,012	-0,15	-0,015	-0,12	-0,012
8	-0,48	-0,048	-0,20	-0,020	-0,11	-0,011	-0,01	-0,001	-0,02	-0,002	-0,07	-0,007	-0,05	-0,005

Таблиця 4 – Експериментально встановлені розкиди напруг на сенсорах типу BCW61C при $I_1=1$ мА в діапазоні температур вимірювання (0...80) °С

№ п/п	$\Delta U_{\text{бел}}$																	
	Темп. 0°С		Темп. 10°С		Темп. 20°С		Темп. 30°С		Темп. 40°С		Темп. 50°С		Темп. 60°С		Темп. 70°С		Темп. 80°С	
	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К
1	0,15	0,015	0,13	0,013	0,04	0,004	-0,11	-0,011	-0,11	-0,011	-0,1	-0,01	-0,16	-0,016	-0,13	-0,013	-0,08	-0,008
2	-0,32	-0,032	-0,35	-0,035	-0,37	-0,037	-0,42	-0,042	-0,46	-0,046	-0,43	-0,043	-0,48	-0,048	-0,49	-0,049	-0,47	-0,047
3	0,39	0,039	0,44	0,044	0,46	0,046	0,42	0,042	0,43	0,043	0,47	0,047	0,46	0,046	0,46	0,046	0,45	0,045
4	-0,42	-0,042	-0,32	-0,032	-0,35	-0,035	-0,22	-0,022	-0,2	-0,02	-0,19	-0,019	-0,19	-0,019	-0,15	-0,015	-0,14	-0,014
5	0,1	0,01	0,15	0,015	0,12	0,012	0,14	0,014	0,15	0,015	0,16	0,016	0,2	0,02	0,25	0,025	0,21	0,021
6	-0,01	-0,001	-0,07	-0,007	0,005	0,0005	-0,03	-0,003	-0,03	-0,003	-0,04	-0,004	0	0	-0,001	-0,0001	-0,08	-0,008
7	0,01	0,001	-0,06	-0,006	0,005	0,0005	0,09	0,009	0,11	0,011	0,18	0,018	0,25	0,025	0,28	0,028	0,27	0,027
8	0,01	0,001	-0,04	-0,004	-0,005	-0,0005	-0,004	-0,004	-0,07	-0,007	-0,07	-0,008	-0,1	-0,01	-0,13	-0,013	-0,14	-0,014
9	0,09	0,009	0,12	0,012	0,09	0,009	0,016	0,016	0,18	0,018	0,02	0,002	0,03	0,003	-0,06	-0,006	-0,03	-0,003

Таблиця 5 – Експериментально встановлені розкиди напруг на сенсорах типу BCW61C при $I_2=0.1$ мА в діапазоні температур вимірювання (0...80) °С

№ п/п	$\Delta U_{\text{бел}}$																	
	Темп. 0 ⁰ С		Темп. 10 ⁰ С		Темп. 20 ⁰ С		Темп. 30 ⁰ С		Темп. 40 ⁰ С		Темп. 50 ⁰ С		Темп. 60 ⁰ С		Темп. 70 ⁰ С		Темп. 80 ⁰ С	
	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К
1	0,35	0,035	0,27	0,027	0,19	0,019	-0,13	-0,013	-0,17	-0,017	0,02	0,002	-0,07	-0,007	-0,08	-0,008	0,23	0,023
2	0,03	0,003	-0,29	-0,029	-0,34	-0,034	-0,39	-0,039	-0,42	-0,042	-0,35	-0,035	-0,36	-0,036	-0,46	-0,046	-0,31	-0,031
3	0,01	0,001	0,41	0,041	0,35	0,035	0,40	0,040	0,43	0,043	0,45	0,045	0,47	0,047	0,55	0,055	0,53	0,053
4	-0,28	-0,028	-0,22	-0,022	-0,32	-0,032	-0,16	-0,016	-0,14	-0,014	-0,14	-0,014	-0,10	-0,010	-0,03	-0,003	-0,10	-0,010
5	-0,09	-0,009	0,05	0,005	-0,09	-0,009	0,13	0,013	0,16	0,016	0,15	0,015	0,16	0,016	0,20	0,020	-0,11	-0,011
6	-0,28	-0,028	-0,22	-0,022	-0,29	-0,029	-0,15	-0,015	-0,08	-0,008	-0,13	-0,013	-0,11	-0,011	-0,14	-0,014	-0,41	-0,041
7	0,16	0,016	-0,04	-0,004	0,66	0,066	0,16	0,016	0,21	0,021	0,24	0,024	0,29	0,029	0,30	0,030	0,22	0,022
8	-0,08	-0,008	-0,11	-0,011	-0,12	-0,012	-0,07	-0,007	-0,04	-0,004	-0,13	-0,013	-0,12	-0,012	-0,15	-0,015	-0,19	-0,019
9	0,18	0,018	0,15	0,015	-0,04	-0,004	0,22	0,022	0,04	0,004	-0,13	-0,013	-0,16	-0,016	-0,17	-0,017	0,16	0,016

Таблиця 6 – Експериментально встановлені розкиди напруг на сенсорах типу BCW61C при $I_3=1,9$ мА в діапазоні температур вимірювання (0...80) °С

№ п/п	$\Delta U_{\text{бел}}$																	
	Темп. 0 ⁰ С		Темп. 10 ⁰ С		Темп. 20 ⁰ С		Темп. 30 ⁰ С		Темп. 40 ⁰ С		Темп. 50 ⁰ С		Темп. 60 ⁰ С		Темп. 70 ⁰ С		Темп. 80 ⁰ С	
	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К	мВ	К
1	0,14	0,014	0,11	0,011	0,08	0,008	-0,08	-0,008	-0,10	-0,010	-0,09	-0,009	-0,05	-0,005	-0,09	-0,009	-0,11	-0,011
2	-0,18	-0,018	-0,35	-0,035	-0,38	-0,038	-0,45	-0,045	-0,50	-0,050	-0,46	-0,046	-0,41	-0,041	-0,52	-0,052	-0,54	-0,054
3	0,49	0,049	0,46	0,046	0,49	0,049	0,46	0,046	0,48	0,048	0,48	0,048	0,52	0,052	0,46	0,046	0,44	0,044
4	-0,38	-0,038	-0,40	-0,040	-0,41	-0,041	-0,28	-0,028	-0,29	-0,029	-0,27	-0,027	-0,22	-0,022	-0,23	-0,023	-0,21	-0,021
5	0,10	0,010	0,18	0,018	0,14	0,014	0,18	0,018	0,17	0,017	0,16	0,016	0,25	0,025	0,23	0,023	0,17	0,017
6	-0,10	-0,010	0,01	0,001	0,04	0,004	0,02	0,002	0,04	0,004	0,06	0,006	0,11	0,011	0,06	0,006	0,03	0,003
7	-0,13	-0,013	-0,15	-0,015	-0,14	-0,014	-0,01	-0,001	0,04	0,004	0,12	0,012	0,23	0,023	0,23	0,023	0,27	0,027
8	-0,02	-0,002	0,01	0,001	0,04	0,004	-0,01	-0,001	-0,05	-0,005	-0,08	-0,008	-0,03	-0,003	-0,11	-0,011	-0,11	-0,011
9	0,08	0,008	0,14	0,014	0,15	0,015	0,19	0,019	0,21	0,021	0,09	0,009	0,10	0,010	-0,03	-0,003	0,06	0,006

7. Висновки

В результаті досліджень напівпровідникових сенсорів на основі п'яти послідовно сполучених транзисторних діодів типів BCW61C та BC849C встановлено значення розкидів напруг від зразка до зразка: $\pm 0,49$ мкВ ($\pm 0,049$ °C) та $\pm 0,62$ мкВ ($\pm 0,062$ °C) відповідно. Рекомендується використовувати досліджувані сенсори температури для вимірювання температури та різниці температур в радіометрах, із врахуванням вимог до їх точності та чутливості за ДСТУ 3742-98 та ДСТУ ISO 9806-1:2005.

Лабораторні дослідження проводили:

Доцент кафедри «Електромеханіка та електроніка»
Національної академії сухопутних військ
ім. гетьмана Петра Сагайдачного
к.т.н., доцент

Директор
ТзОВ «Лапаївка-сервіс»

Д.т.н. професор
кафедри МСС

Зав. відділу метрології
управління НДЧ

К.т.н., асистент
кафедри МСС

Аспірантка
кафедри МСС



Міхалева М.С.

Зарічна В.І.

Яцук.В.О.

Приймачук І.М.


Здеб В.Б.

Василиха Х.В.

Додаток Е

Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес

З А Т В Е Р Д Ж У Ю
Проректор науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
доц. Давидчак О.Р.
04 вересня 2017 р.




А К Т
про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес
Василихи Христини Василівни
«Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів»
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Комісія Національного університету «Львівська політехніка» у складі:
Голова комісії – голова науково-методичної ради інституту комп'ютерних технологій, автоматичної та метрології, д.т.н., проф. Байцар Р.І.
Члени комісії: професор кафедри «Інформаційно-вимірвальні технології», д.т.н., проф. Бойко Т.Г., професор кафедри «Інформаційно-вимірвальні технології», д.т.н., проф. Ванько В.М., інженер кафедри «Інформаційно-вимірвальні технології», к.т.н. Здеб В.Б.


Даний акт підтверджує, що проведені дисертанткою наукові дослідження виконувались на кафедрі метрології, стандартизації та сертифікації Національного університету «Львівська політехніка». Основні положення та результати дисертаційної роботи впровадженні у навчальний процес кафедри «Інформаційно-вимірвальні технології» Національного університету «Львівська політехніка», зокрема використання методу попереднього відбору транзисторів та статистичного усереднення їх характеристик завдяки послідовному сполученню з подальшим коригуванням їх похибок в декількох температурних точках і врахуванням їх індивідуальних характеристик у вторинному приладі, а також вдосконалені процедури коригування похибок переносних цифрових вимірвачів різниці температур, що дають змогу вдосконалити існуючі методи та засоби випробувань сонячних перетворювачів, а також підвищити підготовку фахівців за спеціалізацією «Метрологічне забезпечення випробувань та якості продукції» і можуть використовуватись при вивченні дисциплін: «Основи побудови оптичних та оптоелектронних засобів вимірювань»; «Автоматизовані засоби метрологічного забезпечення»; «Методи та засоби підвищення точності вимірювань та випробувань».

Голова комісії:
Голова науково-методичної ради ІКТА
д.т.н., проф.

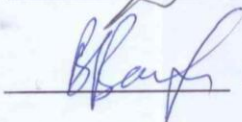
 **Байцар Р.І.**

Члени комісії:


проф. каф. ІВТ,
д.т.н., проф.

 **Бойко Т.Г.**

проф. каф. ІВТ,
д.т.н., проф.

 **Ванько В.М.**

інженер каф. ІВТ,
к.т.н.

 **Здеб В.Б.**

Додаток Ж

**Акт про використання результатів дисертації при виконанні
держбюджетної науково-дослідної роботи**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
професор



Чухрай Н.І.
« 09 » 2017 р.

АКТ

про використання результатів дисертації Василюхи Христини Василювни «Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології Національного університету «Львівська політехніка»


Комісія у складі – начальника НДЧ, к.т.н., доцента Жук Л.В., завідувача відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень, к.т.н. Лазько Г.В., завідувача кафедри електронних обчислюваних машин, д.т.н., професора Мельника А.О. та заступника начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М., цим актом підтверджують, що результати дисертації Василюхи Х.В. за темою «Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів» використано при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи «Інтеграція методів і засобів вимірювання, автоматизації, опрацювання та захисту інформації в базисі кібер-фізичних систем» (№ держреєстрації 0115U000446, ДБ/Кібер).

У результаті теоретичних і практичних досліджень, виконаних Василюхою Х.В. розроблено теоретичні основи, алгоритми, методи та рекомендації, спрямовані на створення прецизійних цифрових вимірювачів температури і різниці температур, які призначені для розроблення кібер-фізичних систем для дослідження сонячних перетворювачів та для індивідуального обліку спожитого тепла в реальному масштабі часу та засобів їх калібрування на місці експлуатації, зокрема:

- розроблено структури та методики налагодження і калібрування переносних цифрових вимірювачів температури та різниці температур з напівпровідниковими сенсорами;
- теоретично та експериментально встановлено, що після калібрування межа допустимих похибок цифрових термометрів в діапазоні вимірювання від 0 °С до +100 °С не перевищуватиме $\pm 0,1$ °С.

Голова комісії:

Начальник НДЧ,
к.т.н., доцент

 Жук Л.В.

Завідувач відділу науково-організаційного
супроводу наукових досліджень,
к.т.н.

 Лазько Г.В.

Завідувач кафедри
електронних обчислюваних машин,
д.т.н., проф.

 Мельник А.О.

Заст. начальника
планово-фінансового відділу

 Чулой Т.М.