

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ЛУЦАК БОГДАН РУСЛАНОВИЧ

Багатоканальний пристрій вимірювання температури в
діапазоні 400-1000 градусів Цельсія / Multi-channel
temperature measuring device in the range of 400-1000 degrees
Celsius

спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
освітньо професійна програма – Технології інтернету речей

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
МТІР – 41 Б.Р. Луцак

Науковий керівник :
к.т.н. доцент Б.О.Масляк

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«___» _____ 2025р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

Тернопіль - 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"

Спеціальність: 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Завідувач кафедри СКС

_____ А.І. Сегін
“ _____ ” _____ 2025р.

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Луцак Богдану Руслановичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Багатоканальний пристрій вимірювання температури в діапазоні 400-1000 градусів Цельсія / Multi-channel temperature measuring device in the range of 400-1000 degrees Celsius

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент Б.О.Масляк

затверджені наказом по університету від "28" грудня 2024 р. № 938

2. **Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи:** 25 травня 2025р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Контактні та безконтактні методи вимірювання температури
2. Системи вимірювання та моніторингу температури побудовані з використанням мікроконтролерів
3. Характеристики мікроконтролера ESP 32

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз методів побудови багатоканальних пристроїв вимірювання температури.
2. Проектування пристрою вимірювання високих температур.
3. Програмно-апаратна системи багатоканального пристрою.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема багатоканального пристрою.
2. Електрична схема аналогового комутатора сигналів термопар.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Масляк Б.О.		
2	Масляк Б.О.		
3	Масляк Б.О.		

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2024 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз ринку та технічних характеристик засобів вимірювання температури	12.2024р. – 01.2025р.	
2	Проектування схеми пристрою та основних його копонтів	02.2025р. – 03.2025р.	
3	Апаратно-програмна реалізація багатоканального пристрою	04.2025р. – 05.2025р.	

Студент

(підпис)

Луцак Б.Р.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Масляк Б.О.

РЕФЕРАТ

Робота виконана на 54 сторінках та містить 15 рисунків, 17 джерел за переліком посилань. Кваліфікаційна робота присвячена створенню багатоканального пристрою для вимірювання температури в діапазоні від 400 до 1000 °C.

Метою роботи є розробка пристрою, що дає змогу проводити вимірювання температури з використанням кількох термопар типу К і забезпечувати обробку сигналів термопар, включно з компенсацією температури холодного спаю, а забезпечити передавання даних.

У процесі виконання роботи було реалізовано кілька важливих функціональних елементів. В якості чутливих елементів використовувалися термопари типу К. Для компенсації впливу температури холодного спаю до складу пристрою було включено цифровий датчик температури. Перемикання сигналів від кількох термопар здійснюється за допомогою аналогового комутатора, що дозволяє послідовно подавати сигнали на вхід аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), вбудованого в мікроконтролер ESP32.

У мікроконтролері реалізовано програмне забезпечення, яке забезпечує автоматичне опитування термопар, обчислення температури з урахуванням температури холодного спаю та перетворення термоЕРС у значення температури в градусах Цельсія. Результати вимірювань виводяться на рідкокристалічний дисплей, а також можуть передаватися по Wi-Fi для подальшого віддаленого моніторингу або реєстрації. В роботі розглянуто особливості калібрування приладу.

Розробка може бути використана як основа для промислових систем моніторингу, а також у навчальних і дослідницьких цілях.

Ключові слова. ТЕРМОПАРА, АЦП, АНАЛОГОВИЙ КОМУТАТОР, СЕНСОР, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМНИЙ СКЕТЧ.

ABSTRACT

The work is completed on 54 pages and contains 15 figures, 17 sources according to the list of references. The qualification work is devoted to the creation of a multi-channel device for measuring temperature in the range from 400 to 1000°C.

The purpose of the work is to develop a device that allows temperature measurements using several K-type thermocouples and to provide processing of thermocouple signals, including compensation of the cold junction temperature, and to ensure data transmission.

In the process of performing the work, several important functional elements were implemented. K-type thermocouples were used as sensitive elements. To compensate for the influence of the cold junction temperature, a digital temperature sensor was included in the device. Switching signals from several thermocouples is carried out using an analog switch, which allows signals to be sequentially fed to the input of an analog-to-digital converter (ADC) built into the ESP32 microcontroller. The microcontroller implements software that provides automatic interrogation of thermocouples, temperature calculation taking into account the cold junction temperature and conversion of thermoelectric power into temperature values in degrees Celsius. The measurement results are displayed on an LCD display and can also be transmitted via Wi-Fi for further remote monitoring or registration. The paper discusses the features of device calibration.

The development can be used as a basis for industrial monitoring systems, as well as for educational and research purposes.

Keywords. THERMOCOUPLE, ADC, ANALOG SWITCH, SENSOR, MICROCONTROLLER, PROGRAM SKETCH.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
Вступ	8
1. Аналіз методів та засобів вимірювання високих температур	11
1.1. Особливості функціонування сенсорів температури	11
1.2. Вимірювальні засоби контактної термометрії	17
1.3. Вимірювальні засоби безконтактної термометрії	22
1.4. Обґрунтування вибору методу вимірювання високих температурта постановка задачі	24
2. Розробка пристрою вимірювання високих температур	28
2.1. Розробка структурної схеми багатоканального пристрою вимірювання емператури	28
2.2. Проектування аналогової частини багатоканального пристрою	33
2.3 Обґрунтування та вибір мікроконтролера	39
3. Програмна реалізація пристрою вимірювання температури	44
3.1. Система обробки виміряної інформації	44
3.2. Аналіз похибок пристрою та рекомендації по калібруванню компонентів	51
Висновки	53
Список використаних джерел	54

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Луцак Б.Р.			Багатоканальний пристрій вимірювання температури в діапазоні 400-1000 градусів Цельсія / Multi-channel temperature measuring device in the range of 400-1000 degrees Celsius	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів.		Масляк Б.О.					6	58
Консульт.						ЗУНУ.ФКІТ.МТІР-41		
Н. Контр.		Масляк Б.О						
Затверд.		Сегін А.І.						

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АС – автоматизована система

МК – мікроконтролер;

ТП – технологічний процес

ВК – вимірювальний канал

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро - аналоговий перетворювач

ПЗ – програмне забезпечення

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

У виробничих процесах температура є одним із ключових параметрів, що безпосередньо впливають на якість продукції, довговічність обладнання та енергоефективність. Діапазон 400–1000 °C охоплює критичні етапи термічної обробки — загартування, відпал, випал, плавлення, спікання — і є типовим для металургії, кераміки, склоробства, енергетики, авіаційної та електронної промисловості.

У цьому діапазоні підвищується чутливість процесу до відхилень температури. Наприклад, для гартування алюмінієвих сплавів, обробки спеціальних сталей або формування структур напівпровідників припустиме відхилення не перевищує ± 1 °C, а іноді — до $\pm 0,5$ °C. Тому прилад для контролю температури має не лише охоплювати високі значення, а й забезпечувати стабільну та достовірну точність [1-3].

Найчастіше в таких умовах застосовують термопари — прості, надійні й витривалі сенсори, здатні працювати в агресивному середовищі. Їхня похибка залежить від типу, способу прокладки, компенсованої температури холодного спаю та періодичності калібрування, однак для промислових термопар класу 1 похибка зазвичай становить $\pm 1,5$ – $2,5$ °C, що вже гранично близько до допустимих меж для чутливих процесів. Для підвищення точності часто застосовують багатоточковий контроль — з розміщенням кількох термопар у критичних зонах виробу або печі.

Коли йдеться про об'єкти великої площі або складної геометрії (наприклад, крила літаків чи лопатки турбін), нерівномірність нагріву стає серйозною проблемою. У таких випадках використовують безконтактний температурний контроль — пірометри та тепловізори. Їх перевага — здатність швидко сканувати великі поверхні й виявляти температурні аномалії в реальному часі. Проте безконтактні методи мають природні обмеження:

– Точність вимірювання пірометра суттєво залежить від правильно заданого коефіцієнта випромінювання поверхні. Для об'єктів з невідомими або

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

змінними властивостями (наприклад, при окисненні) похибка може перевищувати $\pm 5^\circ\text{C}$.

– Тепловізори, як правило, забезпечують просторову візуалізацію, але їхня точність рідко краща за $\pm 2\text{--}3^\circ\text{C}$ для середнього промислового класу обладнання. Навіть високоточні тепловізори класу R&D мають похибку $\pm 1^\circ\text{C}$, що недостатньо для процесів, де необхідне точне підтримання температури в межах $\pm 0,5\text{--}1^\circ\text{C}$.

Таким чином, у високоточних процесах (виготовлення чіпів, спеціальні термообробки) безконтактні методи можуть бути лише допоміжними — для виявлення неоднорідностей, «холодних зон», або попередньої діагностики. Основний контроль виконується контактними сенсорами, які попередньо відкалібровані або мають трасовану похибку.

Окрему складність становить теплова інерція масивних об'єктів, яка зумовлює повільну, але нерівномірну зміну температури. Для її компенсації в практиці використовують поєднання: точкові контактні сенсори — для контролю заданих значень, і безконтактні засоби — для загального контролю розподілу температури.

Отже, вибір методу вимірювання температури має базуватися не лише на діапазоні температур, а й на вимогах до точності, швидкості реакції, типі матеріалу та геометрії об'єкта. Комбінований підхід, що враховує ці фактори, дозволяє підвищити надійність і відтворюваність термічних процесів навіть у найскладніших умовах.

Мета роботи. Метою кваліфікаційної роботи є розробка багатоканального пристрою для вимірювання температури в діапазоні $400\text{--}1000^\circ\text{C}$, який забезпечує високу точність, надійність і зручність використання в промислових умовах.

Завдання роботи. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

– аналіз існуючих методів і засобів вимірювання температури в заданому діапазоні.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- обґрунтування вибору апаратних і програмних компонентів для реалізації багатоканального пристрою.
- розробка схемотехнічного рішення для багатоканального вимірювання температури.
- створення програмного забезпечення для обробки та відображення даних вимірювань.
- проведення експериментальних досліджень для оцінки точності та надійності розробленого пристрою.
- формулювання рекомендацій щодо практичного застосування пристрою.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес вимірювання температури в діапазоні 400–1000 °С у промислових або лабораторних умовах.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є багатоканальний пристрій вимірювання температури, його апаратно-програмна реалізація та методи забезпечення точності й надійності вимірювань.

Методи дослідження. У роботі застосовуються теоретичні, експериментальні та комп'ютерні методи дослідження. Теоретичні методи включають аналіз літературних джерел і порівняння характеристик існуючих засобів вимірювання. Експериментальні методи передбачають тестування розробленого пристрою в лабораторних умовах. Комп'ютерні методи використовуються для моделювання схемотехнічних рішень і розробки програмного забезпечення.

Практичне значення. Результати роботи можуть бути використані в промислових системах для моніторингу високотемпературних процесів, що сприятиме підвищенню ефективності та безпеки технологічних операцій. Розроблений пристрій може знайти застосування в автоматизованих системах керування та лабораторних дослідженнях, де потрібен одночасний контроль температури в кількох точках.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

1.1. Особливості функціонування сенсорів температури

Методи вимірювання високих температур поділяються на контактні, де сенсор фізично контактує з об'єктом, і безконтактні, які використовують теплове випромінювання. Кожен метод спирається на певні фізичні принципи та відповідні сенсори [3-5].

Контактні сенсори для вимірювання температури є одними з найпоширеніших засобів температурного контролю в промисловості, науці та побуті. Вони функціонують за принципом безпосереднього контакту з об'єктом вимірювання, що забезпечує високу точність передавання теплової енергії до чутливого елемента. Контактні сенсори класифікують за фізичними принципами роботи, типом чутливого елемента та особливостями застосування [1-4].

Одним із найбільш розповсюджених типів є терморезистори — це сенсори, у яких зміна температури викликає зміну електричного опору. До них належать термістори (NTC і PTC) та резистивні температурні детектори (RTD), зокрема платинові термометри опору (наприклад, PT100 або PT1000). RTD мають високу стабільність, лінійність та точність, що робить їх придатними для лабораторних досліджень, харчової та фармацевтичної промисловості – рисунок 1.1.

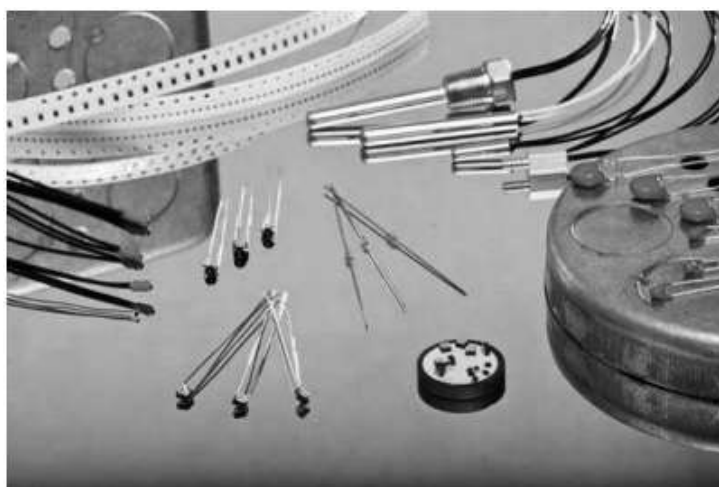


Рисунок 1.1 - Терморезистори

Термістори мають більшу чутливість, але обмежені в діапазоні температур, тому використовуються в побутовій техніці, медичних приладах та системах клімат-контролю.

Другу групу становлять термоелектричні сенсори, або термопари, які генерують напругу внаслідок термоелектричного ефекту (ефекту Зеебека) при з'єднанні двох провідників з різних металів. Це фізичне явище, при якому в замкнутому контурі з двох різних металів виникає електрорушійна сила (ЕРС) через різницю температур між гарячим і холодним спаями – рисунок 1.2.



Рисунок 1.2 - Термопара

Ця ЕРС пропорційна температурі гарячого спаю. Наприклад, термопара типу К (хромель-алюмель) вимірює температури до 1350 °С, тоді як тип S (платина-родій/платина) і тип В (платина-родій) працюють до 1600 °С і 1800 °С відповідно. Термопари прості й економічні, але їх точність ($\pm 0.5\text{--}2$ °С) знижується через деградацію матеріалів і потребу в компенсації температури холодного спаю. Термопари мають широкий діапазон вимірюваних температур (від -200 до понад +1800 °С залежно від типу) і високу міцність, що забезпечує їхнє застосування в умовах високих температур і агресивних середовищ — наприклад, у металургії, енергетиці та двигунах внутрішнього згорання.

До контактних сенсорів також відносяться напівпровідникові температурні сенсори, принцип роботи яких базується на температурній залежності параметрів р-п переходу або напруги на діоді. Такі сенсори часто реалізовані у вигляді інтегральних мікросхем (наприклад, DS18B20, LM35) і мають вбудовані інтерфейси зв'язку. Вони зручні для цифрових систем.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

Застосування контактних сенсорів залежить від низки факторів: необхідної точності, діапазону температур, умов експлуатації, вартості та складності інтеграції. Правильний вибір типу сенсора дозволяє забезпечити надійність, довговічність і метрологічну точність вимірювань у відповідному середовищі.

Безконтактні сенсори вимірювання температури використовуються для визначення температури об'єкта без фізичного контакту з ним. Вони базуються на вимірюванні теплового випромінювання, яке випромінюється об'єктом у відповідності до його температури, згідно з законом Стефана-Больцмана та законом Планка. Такі сенсори особливо корисні в умовах високих температур, обмеженого доступу або у випадках, коли контакт із середовищем є небажаним або неможливим.

Основну класифікацію безконтактних сенсорів можна здійснити за принципом дії, спектральним діапазоном чутливості та способом застосування.

Найбільш поширеними є інфрачервоні (ІЧ) термометри або пірометри. Вони вимірюють інтенсивність інфрачервоного випромінювання, що надходить від об'єкта, та перетворюють її у значення температури. Такі пристрої бувають одноколірними, які вимірюють інтенсивність випромінювання в одному діапазоні, та двоколірними, які дозволяють коригувати вплив зміни емісійної здатності поверхні. ІЧ-пірометри широко застосовуються у промисловості — для контролю температури розплавленого металу, гарячих поверхонь, рухомих або небезпечних об'єктів.

Окрему групу складають тепловізійні камери, які є масивами ІЧ-сенсорів і дозволяють отримувати просторовий розподіл температури у вигляді термограми. Вони застосовуються в енергетиці для виявлення перегріву обладнання, в медицині для діагностики запальних процесів, у будівництві — для теплового аудиту будівель, а також у військових і пошуково-рятувальних системах.

Ще однією категорією безконтактних сенсорів є оптичні волоконні температурні сенсори, які працюють за принципом зміни характеристик світлового сигналу в оптичному волокні в залежності від температури

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

середовища. Вони придатні для застосування в умовах сильної електромагнітної інтерференції, високого тиску та вибухонебезпечних середовищ, наприклад, у ядерній енергетиці або авіації.

Особливістю безконтактних сенсорів є їхня здатність швидко реагувати на зміну температури, що робить їх незамінними для динамічних процесів. Водночас, точність вимірювань залежить від коефіцієнта випромінювання поверхні об'єкта, прозорості атмосфери між сенсором і об'єктом, а також від правильного налаштування сенсора. Тому в багатьох випадках необхідна попередня калібрування або корекція за допомогою еталонних методів.

Отже, безконтактні сенсори є ключовими засобами температурного контролю там, де контактні методи технічно непридатні або небезпечні. Їх застосування забезпечує безперервний моніторинг, високу швидкодію та безпечність в умовах складного або агресивного середовища.

Перспективні безконтактні сенсори вимірювання температури ґрунтуються на сучасних фізичних принципах та інноваційних технологіях, що дозволяють отримати дані з високою просторовою та температурною роздільністю навіть у складних або мікроскопічних умовах. До таких сенсорів належать системи на основі лазерної інтерферометрії, флуоресцентних методів, а також раманівської спектроскопії, фотонних кристалів і наноматеріалів. Вони активно досліджуються й впроваджуються в нанотехнологіях, біомедицині, мікроелектроніці та аерокосмічній галузі.

Лазерна інтерферометрія використовується для непрямого вимірювання температури через детектування змін оптичного шляху або фазових зсувів світлових хвиль, викликаних температурним розширенням або зміною показника заломлення матеріалів. Цей метод дозволяє вимірювати температурні поля з нанометричною точністю у мікроструктурах або тонких плівках. Інтерферометричні сенсори особливо корисні в умовах, де необхідний безконтактний моніторинг на дуже малих масштабах — наприклад, у мікросхемах, MEMS-пристроях, оптичних волокнах або біологічних тканинах.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

Нижче представлено таблицю 1.1, яка порівнює методи вимірювання високих температур за діапазоном, точністю, перевагами, недоліками та типами сенсорів.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз сенсорів температури

Метод вимірювання	Типовий сенсор	Діапазон	Точність	Переваги	Недоліки
Терморезистивний (RTD)	Pt100, Pt1000	-200...+850 °C	$\pm 0.1 \dots \pm 0.5$ °C	Висока точність і стабільність, лінійна характеристика	Дорожчий за інші, чутливий до довжини ліній з'єднання
Термопари	K, J, T, N, E, R, S, B	-270...+1800 °C (залежить від типу)	$\pm 0.5 \dots \pm 5$ °C	Широкий діапазон, дешеві, міцні, швидкий відгук	Менш точні, потрібна компенсація холодного спаю, нелінійність
Термістори (NTC/PTC)	NTC 10k, NTC 100k	-50...+150 °C	$\pm 0.2 \dots \pm 2$ °C	Невисока вартість, висока чутливість у вузькому діапазоні	Нелінійні, обмежений діапазон температур, деградація
Інфрачервоні (IR) пірметри	MLX90614, TMP006	-70...+1000 °C (безконтактно)	$\pm 0.5 \dots \pm 2$ °C	Безконтактні, швидкий відгук, зручно для рухомих чи важкодоступних об'єктів	Залежить від емісійності поверхні, вплив довкілля (пил, волога), дорожчі
Напівпровідникові сенсори	LM35, TMP36, DS18B20, DHT22	-55...+150 °C	$\pm 0.5 \dots \pm 2$ °C	Недорогі, прості в інтеграції, цифровий вихід у деяких моделях	Обмежений діапазон, середня точність, повільніші за термопари
Волоконно-оптичні сенсори	DTS (Distributed Temperature Sensing)	до +700 °C	$\pm 1 \dots \pm 2$ °C	Нечутливі до ЕМП, можна вимірювати протяжні об'єкти	Висока вартість, складність інтерпретації, громіздкі

Флуоресцентні температурні сенсори базуються на властивостях люмінофорів або флуоресцентних барвників, що змінюють інтенсивність або тривалість флуоресценції залежно від температури. Ці сенсори дозволяють створити точкові або площинні температурні вимірювання, зокрема у формі термографічних покриттів або наночастинок. Завдяки високій чутливості й просторовій роздільності, флуоресцентні методи активно застосовуються в біомедичних дослідженнях — для моніторингу температури всередині клітин, тканин або під час лазерної термотерапії, а також в авіаційних і турбомашинних дослідженнях для аналізу температури лопаток двигунів.

Іншим перспективним напрямом є температурна раманівська спектроскопія, що використовує зміни у спектрі розсіяння світла для визначення температури молекулярного або кристалічного середовища. Такий підхід дозволяє вимірювати температуру з високою точністю у зонах високого тиску, у вуглецевих наноструктурах або на межах фазових переходів матеріалів.

Деякі сенсори нового покоління базуються на наноматеріалах з температурно-залежними оптичними властивостями, які можуть бути інтегровані у біосумісні або гнучкі платформи. Наприклад, квантові точки або нанотрубки можуть використовуватись для визначення температури в реальному часі на мікро- чи нано-рівні.

Усі ці технології відкривають нові можливості для вимірювання температури там, де традиційні контактні або інфрачервоні методи є неефективними. Перспективні безконтактні сенсори дозволяють проводити вимірювання з урахуванням вимог високої локалізації, біосумісності, швидкодії або стабільності в екстремальних умовах. Їх застосування особливо актуальне в галузях, де контроль температури визначає ефективність та безпеку процесу: в мікроелектроніці, клітинній біології, квантовій фізиці та новітніх виробничих технологіях.

Вибір методу вимірювання високих температур залежить від діапазону, умов і вимог до точності. Термопари та інфрачервоні пірометри залишаються популярними через їх доступність і універсальність. Перспективні методи, такі

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

як флуоресцентна термометрія, обіцяють вищу точність, але потребують спрощення та здешевлення для масового використання.

1.2. Вимірювальні засоби контактної термометрії

Враховуючи, що в загальному випадку, робота сенсорів температури базується на використанні різних фізичних явищ, то відповідно існують різні методи вимірювання - рисунок 1.3.

У сфері точного вимірювання температури за допомогою контактних методів низка провідних світових компаній пропонує широкий спектр інноваційних та надійних рішень. Ці фірми розробляють та виробляють високоякісні датчики, такі як термопари, резистивні датчики температури (RTD) та термістори, а також відповідні вимірювальні прилади та системи, що знаходять застосування у найрізноманітніших галузях промисловості, наукових дослідженнях та системах автоматизації [3-6].

У сфері точного вимірювання температури за допомогою контактних методів низка провідних світових компаній пропонує широкий спектр інноваційних та надійних рішень. Ці фірми розробляють та виробляють високоякісні датчики, такі як термопари, резистивні датчики температури (RTD) та термістори, а також відповідні вимірювальні прилади та системи, що знаходять застосування у найрізноманітніших галузях промисловості, наукових дослідженнях та системах автоматизації.

Серед ключових гравців на цьому ринку виділяються як вітчизняні, так і зарубіжні. Це, зокрема ТзОВ «Термомір» (м.Львів), JUMO (Німеччина), OMEGA Engineering (США, нині частина Dwyer Instruments), Endress+Hauser (Швейцарія), WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG (Німеччина) та Honeywell International Inc. (США).

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17



Рисунок 1.3 – Контактні методи вимірювання температури

Ці виробники мають багаторічний досвід та пропонують комплексні рішення для різних температурних діапазонів та умов експлуатації, включаючи конкретні серійно випускаються моделі та системи.

Товариство з обмеженою відповідальністю «Термомір» — це українське підприємство, засноване у 2009 році у місті Львові. Воно спеціалізується на розробці та виробництві сучасного обладнання для вимірювання, контролю, автоматизації та випробування у різних галузях промисловості. Основними напрямками діяльності компанії є виготовлення метрологічного обладнання, засобів термостатування та кліматичних випробувань, мікропроцесорних вимірювальних приладів, а також пристроїв для автоматизації технологічних процесів.

Компанія «Термомір» пропонує широкий асортимент продукції, до якого входять рідинні термостати, багатоканальні комутатори сигналів, прилади для реєстрації параметрів середовища, а також випробувальне обладнання для

пожежних лабораторій. Окрему увагу приділено розробці спеціалізованих приладів за технічними вимогами замовників. Уся продукція компанії відзначається високою точністю, надійністю та адаптованістю до умов експлуатації в Україні – рисунок 1.4.



Рисунок 1.4 - Термометри та регулятори температур

Однією з переваг підприємства є надання повного спектра послуг — від технічного консультування до методичної підтримки в організації внутрішньої метрологічної служби. Важливо, що компанія орієнтується на потреби клієнтів, пропонуючи індивідуальні рішення за доступною ціною.

Продукція «Термоміра» широко використовується в енергетиці, харчовій промисловості, машинобудуванні, лабораторній справі, системах контролю якості, а також у закладах метрологічної атестації. Таким чином, «Термомір» є одним із провідних вітчизняних виробників засобів вимірювання, здатним конкурувати з імпортними аналогами як за функціональністю, так і за якістю.

JUMO є відомим виробником промислових датчиків температури. Їхня продукція включає платинові RTD, наприклад, кабельні датчики серії JUMO RTD (902020, 902030) або вставні датчики для машинобудування. Термопари представлені серіями, такими як JUMO TUA (901005) для стандартних застосувань або високотемпературні термопари. Для відображення та контролю температури JUMO пропонує цифрові термостати, наприклад, серії JUMO miroTRON або багатофункціональні програмовані контролери, як-от JUMO dTRON 300/304/308/316, які можуть працювати з різними типами контактних датчиків – рисунок 1.5.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19



Рисунок 1.5 - Універсальні панельні ПІД – терморегулятори серії JUMO dTRON 304/308/316

OMEGA Engineering здобула всесвітнє визнання завдяки своєму надзвичайно широкому асортименту продукції. Їхній каталог включає термопари різних конфігурацій, такі як популярні серії Quick Disconnect Thermocouples або Standard Thermocouple Probes (наприклад, типу K, J). Високоточні RTD представлені, зокрема, платиновими датчиками серії PR (наприклад, PR-10, PR-11). Термістори NTC доступні у серіях типу ON-900. OMEGA також виробляє портативні вимірювачі температури, наприклад, багатоканальні термометри серії HH500 (HH506RA), що підтримують різні типи термопар.

Endress+Hauser спеціалізується на вимірювальному обладнанні, пропонуючи інноваційні RTD та термопари під брендом iTHERM. Наприклад, модульні термометри iTHERM TM411 можуть комплектуватися як RTD, так і термопарами, і призначені для широкого спектру промислових застосувань. Особливо варто відзначити iTHERM TrustSens TM371 – перший у світі самокалібрований RTD-датчик. Для менш вимогливих застосувань пропонуються компактні термометри iTHERM ModuLine TM1xx (наприклад, TM101, TM111), а для важких умов – термопари iTHERM StrongSens. Також доступні багатоточкові датчики температури, як-от iTHERM MultiSens.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

WIKA є глобальним лідером у виробництві приладів для вимірювання температури. Їхні резистивні термометри (RTD) представлені численними серіями, такими як TR10 (кабельні датчики), TR11 (компактні датчики), TR21 (для машинобудування) та TR22 (для санітарних застосувань). Термопари також мають широкий модельний ряд, включаючи серії TC10 (кабельні термопари), TC12 (для машинобудування) та TC40 (високотемпературні термопари з мінеральною ізоляцією). Wika також випускає портативні калібратори та ручні термометри, наприклад, цифровий манометр з функцією вимірювання температури CPH6200.

Honeywell International Inc. пропонує широкий спектр сенсорних технологій. Їхній портфель для контактного вимірювання температури включає RTD-датчики, наприклад, серії 1000 Series (зокрема, HEL-700 тонкоплівкові платинові RTD), та різноманітні термопари, що часто використовуються як компоненти у більших системах. NTC-термістори представлені, наприклад, серією 192/194. Honeywell також пропонує рішення для систем управління будівлями та промисловими процесами, де їхні датчики температури є невід'ємною частиною. Для портативних вимірювань існують прилади, такі як цифрові термометри серії DCT.

Окрім вищезгаданих компаній, варто відзначити Fluke Corporation (США). Вона відома своїми надійними портативними контактними термометрами. Популярними є моделі серії Fluke 50 Series II (наприклад, Fluke 51 II, Fluke 52 II, Fluke 54 II), які підтримують різні типи термопар. Для високоточних вимірювань Fluke пропонує еталонні термометри, такі як Fluke 1523/1524. Підрозділ Fluke Process Instruments також постачає термопари та RTD для промислових систем.

Фірма Danfoss (Данія) виробляє датчики температури, що часто використовуються в системах охолодження, кондиціонування та промислової автоматики. Популярними є RTD-датчики серії AKS (наприклад, AKS 11, AKS 12, AKS 21 – це Pt1000 датчики). Також у їхньому асортименті є датчики температури серії MBT, наприклад, MBT 3260 (компактні датчики з передавачем

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

або без), MBT 5250, MBT 5252 (RTD або термопари для важких умов експлуатації). NTC-термістори представлені серією EKS (наприклад, EKS 221).

Отже, провідні фірми у сфері контактного вимірювання температури забезпечують ринок не тільки широким асортиментом типів датчиків, але й конкретними серійно виробленими моделями та системами. Це дозволяє споживачам підбирати оптимальні рішення, що відповідають найсуворішим вимогам точності, надійності та адаптивності до конкретних умов експлуатації, сприяючи ефективному контролю та управлінню температурними процесами у всіх галузях сучасної індустрії та науки.

1.3. Вимірювальні засоби безконтактної термометрії

Провідні компанії, що займаються виробництвом безконтактних засобів вимірювання температури, представлені як на світовому, так і на українському ринку. Серед найбільш відомих виробників у світі варто відзначити американську компанію Fluke, яка спеціалізується на випуску інфрачервоних термометрів та тепловізійного обладнання. Її продукція активно використовується в енергетиці, обслуговуванні промислових об'єктів та системах HVAC, оскільки поєднує точність вимірювання, зручність використання та можливості цифрового збереження і обробки даних. Класифікація основних безконтактних методів вимірювання температури приведена на рисунку 1.6.

Німецька компанія Optris є одним із лідерів у розробці інфрачервоних пірометрів і тепловізійних систем, що орієнтовані на високоточне вимірювання температур у складних промислових умовах [5-8].

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22



Рисунок 1.6 – Безконтактні методи вимірювання температури

Продукція цієї фірми відома компактними розмірами сенсорів, високою температурною стійкістю та можливістю інтеграції в автоматизовані технологічні процеси.

Ще одним помітним гравцем є компанія FLIR (нині Teledyne FLIR), яка спеціалізується на тепловізорах та інфрачервоних камерах для оборонної, промислової та дослідницької сфер. Вона пропонує як компактні прилади для споживачів, так і високоточні пристрої для інженерних задач.

Також слід згадати компанію Testo з Німеччини, яка виробляє широкий спектр вимірювальної апаратури, включно з безконтактними термометрами. Прилади цієї марки часто застосовуються в харчовій та фармацевтичній промисловості, а також у кліматичних системах.

У Японії фірма Omron відома передусім інфрачервоними термометрами медичного призначення, які характеризуються високою точністю і швидкістю вимірювання.

На українському ринку достойною альтернативою імпортом рішенням є підприємство «Термомір», розташоване у Львові. Ця компанія займається розробкою і виготовленням високоточних приладів для контролю температури, а також комплексних систем для автоматизації процесів та лабораторних вимірювань. Її продукція вирізняється надійністю, відповідністю національним метрологічним вимогам та гнучкістю в адаптації до потреб замовника.

Порівняльну характеристику основних параметрів продукції зазначених компаній подано в таблиці 1.2.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

Таблиця 1.2 – Характеристики основних параметрів продукції провідних фірм

Компанія	Типи продукції	Температурний діапазон	Призначення	Особливості
Fluke (США)	Пірометри, тепловізори	-30...+900 °С	Промислова діагностика, HVAC	Надійність, ударостійкість, простота у використанні
Optris (Німеччина)	ІЧ-датчики, лазерні пірометри, ІЧ-камери	-50...+1600 °С	Металургія, скло, електроніка	Висока роздільна здатність, лазерне прицілювання
FLIR (США)	Тепловізори	-20...+2000 °С	Енергетика, будівництво, медицина	MSX-технологія, Wi-Fi, вбудована аналітика
Raytek (Thermo Fisher)	Портативні та вбудовані пірометри	-40...+1200 °С	Хімічна, харчова, енергетика	Висока точність, витривалість до середовища
Testo (Німеччина)	Пірометри, комбіновані прилади	-30...+500 °С	HVAC, агросектор	Ціна/функціональність, лазерне прицілювання
Omron (Японія)	ІЧ-матриці сенсорів	0...+100 °С	Smart Home, автоматизація, охорона	Багатоточкові вимірювання, інтеграція у системи

Таким чином, безконтактне вимірювання температури активно підтримується як глобальними лідерами галузі, так і українськими виробниками, які пропонують конкурентоспроможні рішення для промисловості та наукових досліджень.

1.4. Обґрунтування вибору методу вимірювання високих температур та постановка задачі

Для вимірювання температур у діапазоні 400–1000 °С оптимальним типом температурного сенсора є термопари, які поєднують широкий діапазон роботи, механічну простоту та високу термостійкість. Основною перевагою термопар є здатність працювати в екстремальних умовах — як за високих температур, так і в агресивних середовищах, при цьому забезпечуючи достатню точність і

швидкість реакції. Їх використання не потребує зовнішнього живлення, оскільки принцип дії базується на термоелектричному ефекті Зеебека.

Найпоширенішим і економічно доцільним варіантом у зазначеному діапазоні є термопара типу К (хромель–алюмель). Вона характеризується стабільною роботою в температурному діапазоні приблизно від -200 до +1100 °С, що з надлишком перекриває потребу вимірювань у межах 400–1000 °С. Термопара типу К має середню похибку близько $\pm 1,5$ – $2,5$ °С або 0,75% від показу (залежно від класу точності). З точки зору довговічності, термопара типу К добре працює в окислювальному середовищі, але може зазнавати деградації в сірчистих або відновлювальних умовах.

Проте для завдань, де критично важлива висока точність і довготривала стабільність показів, доцільно розглядати платинові термопари, зокрема типу S (платина–платинородій 10%) або типу R (платина–платинородій 13%). Вони мають ще вищу термостійкість і можуть працювати до 1600 °С. Ці термопари відзначаються виключно високою стабільністю — похибка в нормальних умовах становить приблизно $\pm 1,5$ °С або 0,25% від показу. Завдяки високій хімічній стійкості платини, їх параметри повільно деградують з часом, особливо за умов чистого, контрольованого середовища. Це робить платинові термопари незамінними в еталонних, лабораторних або критичних промислових застосуваннях, таких як металургія, склоробство, кераміка, а також у термічному контролі печей.

Проте їх застосування має й низку обмежень. По-перше, платина — дорогий матеріал, тому термопари типу S або R суттєво дорожчі за тип К. По-друге, вони мають нижчий термоелектричний коефіцієнт, тобто виробляють меншу ЕРС при однаковій різниці температур, що вимагає більш чутливих вимірювальних приладів. Крім того, вони чутливі до забруднення вуглецем або металами, які можуть змінити їх термоелектричні властивості.

Таким чином, для задач, де важлива надійність, простота й вартість, термопара типу К є найкращим вибором у діапазоні 400–1000 °С. Водночас, у випадках, де вимоги до точності, стабільності та відтворюваності є критичними,

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

доцільно використовувати платинові термопари типу S або R, попри вищу вартість. Вибір конкретного типу термопари повинен базуватись на аналізі умов експлуатації, тривалості роботи, типу середовища та вимог до метрологічних характеристик.

У рамках цієї роботи передбачається розробити вимірювальний пристрій для визначення температури в діапазоні 400–1000 °C, що базується на використанні термопари типу K (хромель–алюмель) як первинного сенсора температури. Пристрій має забезпечити точне, стабільне та відтворюване вимірювання температури з урахуванням особливостей роботи термопар, а саме:

- Компенсацію температури холодного спаю — оскільки термопара формує напругу, пропорційну різниці температур між гарячим та холодним спаями, необхідно точно визначати температуру холодного спаю за допомогою допоміжного датчика (наприклад, цифрового термометра або терморезистора). Отримане значення повинно враховуватися при обчисленні реальної температури об'єкта.

- Підсилення сигналу термопари — через низький рівень термоелектричної ЕРС (порядку десятків мікр вольт на градус), необхідно передбачити прецизійний підсилювальний каскад з високою точністю та низьким дрейфом нуля. Це дозволить мінімізувати похибки, пов'язані з електричними завадами.

- Аналого-цифрове перетворення — проект має передбачати вибір або розробку вузла АЦП із необхідною розрядністю та швидкістю, що дозволяє точно оцифрувати напругу з термопари. АЦП може бути інтегрований у мікроконтролер або окремим компонентом (наприклад, ADC з диференційним входом і послідовною передачею даних).

- Лінеаризацію вихідного сигналу — термоЕРС термопари типу K має нелінійну залежність від температури, тому необхідно реалізувати алгоритм лінеаризації. Це може бути поліноміальна апроксимація, інтерполяція за табличними значеннями (за стандартами NIST) або використання готових математичних моделей. Ця обробка здійснюється мікросхемою MAX1855 відповідно до градувальних таблиць.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		26

– Корекцію похибок — у системі має бути реалізована програмна або апаратна компенсація систематичних похибок (зміщення нуля, температурного дрейфу підсилювача тощо), а також калібрування приладу з використанням еталонного джерела температури.

– Вивід результатів — необхідно передбачити інтерфейс для візуалізації або передавання даних, наприклад: локальний дисплей (OLED/LCD), або передавання результатів через UART, Wi-Fi або інші цифрові канали.

– Енергоживлення та корпус — прилад повинен мати стабільне джерело живлення та бути змонтований у зручному корпусі, який забезпечує захист електроніки та зручність у використанні в лабораторних або виробничих умовах.

Результатом кваліфікаційної роботи має стати вимірювальний пристрій, який забезпечує точне вимірювання температури в діапазоні 400–1000 °С; компенсацію температури холодного спаю; лінеаризацію сигналу термопар; цифрову індикацію або передавання результатів; можливість подальшого розширення функціональності (наприклад, логування, обробка трендів, зв'язок із хмарним сервісом).

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

2. РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

2.1. Розробка структурної схеми багатоканального пристрою вимірювання температури

Найпростіша структурна схема вимірювання температури приведена на рисунку 2.1. основними складовими її є термопара, блок холодних кінців (з компенсацією температури) та вимірювальний прилад.

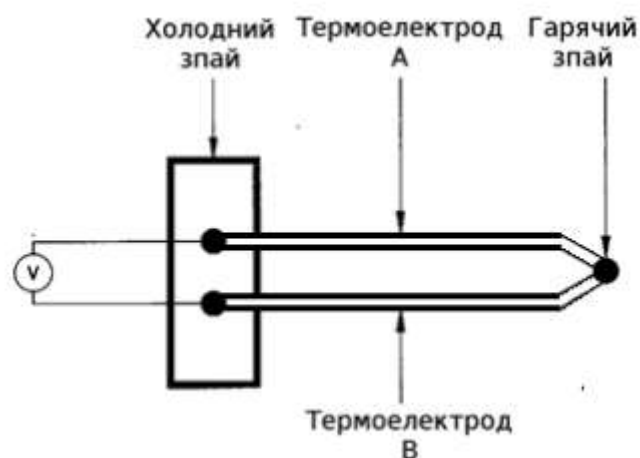


Рисунок 2.1 – Схема вимірювання температури

Використання вольтметра, в цій простій схемі, для вимірювання температури за допомогою термопар має низку суттєвих недоліків, які обмежують точність і надійність таких вимірювань. Перш за все, термопара сама по собі не вимірює абсолютну температуру — вона генерує електрорушійну силу (ЕРС), яка пропорційна різниці температур між її гарячим і холодним спаями. Якщо в схемі не передбачена компенсація температури холодного спаю, отримане значення напруги буде недостатнім для визначення точної температури [9-11].

Крім того, рівень сигналу термопари дуже низький — зазвичай це десятки або сотні мікр вольт на кожен градус Цельсія. Звичайні вольтметри не мають достатньої чутливості, щоб точно вимірювати такі сигнали. Навіть при

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		28

використанні цифрових вольтметрів їх роздільна здатність і стабільність можуть виявитися недостатніми, особливо коли мова йде про вимірювання з точністю до десятих або сотих частин градуса.

Ще одна проблема полягає в тому, що вольтметр лише показує рівень напруги, але не виконує перетворення цієї напруги у температуру. Для цього потрібна додаткова обробка з використанням калібрувальних таблиць або математичних моделей, які враховують нелінійність характеристики термопар. Більш того, через змінні умови навколишнього середовища можуть виникати паразитні термо - ЕРС у місцях з'єднань різнорідних металів, що ще більше спотворює результати вимірювання.

У таких схемах також часто ігноруються вимоги до високого вхідного опору. Оскільки термопара має дуже низький внутрішній опір, вольтметр повинен мати надзвичайно високий вхідний опір, інакше частина ЕРС втрачатиметься через струм навантаження. До цього додається проблема зовнішніх перешкод: мікрровольтові сигнали дуже чутливі до шумів, особливо в неекраниваних дротах або при наявності електромагнітних завад від інших пристроїв.

Таким чином, хоча підключення термопар безпосередньо до вольтметра може бути прийнятним для грубих або демонстраційних вимірювань, воно не забезпечує необхідної точності для практичного застосування. Для точного вимірювання температури за допомогою термопар слід використовувати спеціалізовані схеми — наприклад, із компенсацією холодного спаю, попереднім підсиленням сигналу, цифровою обробкою і належним захистом від перешкод.

Більш досконалим буде пристрій побудований з використанням цифрових технологій. В загальному випадку він буде містити кілька основних блоків, кожен з яких виконує свою окрему функцію. Перш за все, основними елементами є самі термопари — це сенсори, які перетворюють температуру в електричний сигнал (термоЕРС). Кожна термопара генерує дуже маленьку напругу, яка залежить від різниці температур на гарячому та холодному кінцях.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		29

Для точного вимірювання цих слабких сигналів використовується буферний або інструментальний підсилювач. Цей підсилювач збільшує рівень напруги, щоб її можна було надійно зчитати за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). В багатоканальних системах, де є багато термопар, часто застосовують мультиплексор — це пристрій, який послідовно підключає кожен канал до підсилювача, щоб економити ресурси і зменшити кількість підсилювачів.

АЦП перетворює аналоговий сигнал від підсилювача у цифровий код, який потім обробляє мікроконтролер. Сам мікроконтролер відповідає за збір даних зі всіх каналів, обробку сигналів, обчислення температури з урахуванням специфіки термопари та компенсацію впливу температури холодного спаю.

Компенсація холодного спаю є дуже важливою частиною системи, адже температура місця підключення термопар до плати впливає на точність вимірювань. Для цього біля точок підключення встановлюють окремий температурний датчик, який контролює температуру холодного кінця, а мікроконтролер використовує ці дані для коригування вимірювань.

В цілому, багатоканальний пристрій працює таким чином: термопари вимірюють температуру в різних точках, мультиплексор підключає їх до підсилювача, сигнал підсилюється і перетворюється у цифровий вигляд, після чого мікроконтролер виконує необхідні розрахунки, включаючи компенсацію холодного спаю, і передає результати на дисплей або зовнішній пристрій для подальшого аналізу.

При розробці структури багатоканального пристрою для вимірювання температури термопарами важливо правильно обрати спосіб підключення сенсорів до АЦП, а також реалізувати точну компенсацію температури вільних (холодних) кінців. Залежно від вимог до точності, кількості каналів і бюджету можна використати різні варіанти схем, кожен з яких має свої переваги і недоліки.

Один із найпростіших, але найточніших способів — це підключення кожної термопари через окремий буферний або інструментальний підсилювач до

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		30

власного АЦП або мультиплексора. Такий підхід забезпечує високу якість сигналу і можливість точно налаштувати посилення для кожного каналу окремо. Проте він суттєво ускладнює схему, потребує великої кількості компонентів і займає багато місця на платі, що не завжди доцільно в умовах обмежених ресурсів.

Інший варіант — використання одного загального підсилювача після мультиплексора. У цьому випадку всі термопари по черзі підключаються до одного підсилювача й АЦП. Це значно знижує вартість і спрощує конструкцію, але водночас знижує точність через необхідність перемикання каналів і використання однакового коефіцієнта підсилення для всіх термопар. До того ж така схема потребує певного часу для стабілізації сигналу після кожного перемикання.

Компромісним і доволі ефективним рішенням є використання мультиплексора з кількома буферними або інструментальними підсилювачами, які обслуговують групи термопар. Це дозволяє покращити якість сигналу при збереженні прийнятної складності й вартості системи. Такий підхід особливо ефективний у випадках, коли термопари згруповані за діапазоном температур або типом.

Ще одним поширеним рішенням є застосування спеціалізованих мікросхем для роботи з термопарами, таких як MAX31856, MCP9600 або AD849х. Вони мають вбудовані схеми підсилення, компенсації холодного спаю, фільтрації і навіть цифровий інтерфейс. Це значно спрощує проектування, але не завжди підходить для систем із великою кількістю каналів через високу вартість.

Щодо компенсації холодного спаю (КВК), найбільш точним способом є встановлення окремого температурного сенсора безпосередньо біля точки з'єднання термопар із платою. Це може бути термістор, аналоговий сенсор або цифровий датчик, наприклад, DS18B20 чи MCP9808. Виміряна температура потім використовується в мікроконтролері для обчислення температурної компенсації на основі таблиць або формул відповідного типу термопар.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

Оптимальним рішенням для багатоканального пристрою є схема, в якій усі термопари підключаються через мультиплексор до одного або кількох інструментальних підсилювачів, вихід яких надходить на високоточний АЦП. Компенсація холодного спаю реалізується за допомогою окремого цифрового температурного сенсора, розміщеного на платі поруч із клемми підключення термопар. Такий підхід забезпечує хороший баланс між точністю, масштабованістю та вартістю, що робить його доцільним вибором для більшості практичних застосувань [15-17].

Для розробки структурної схеми використаємо цей варіант – рисунок 2.2.

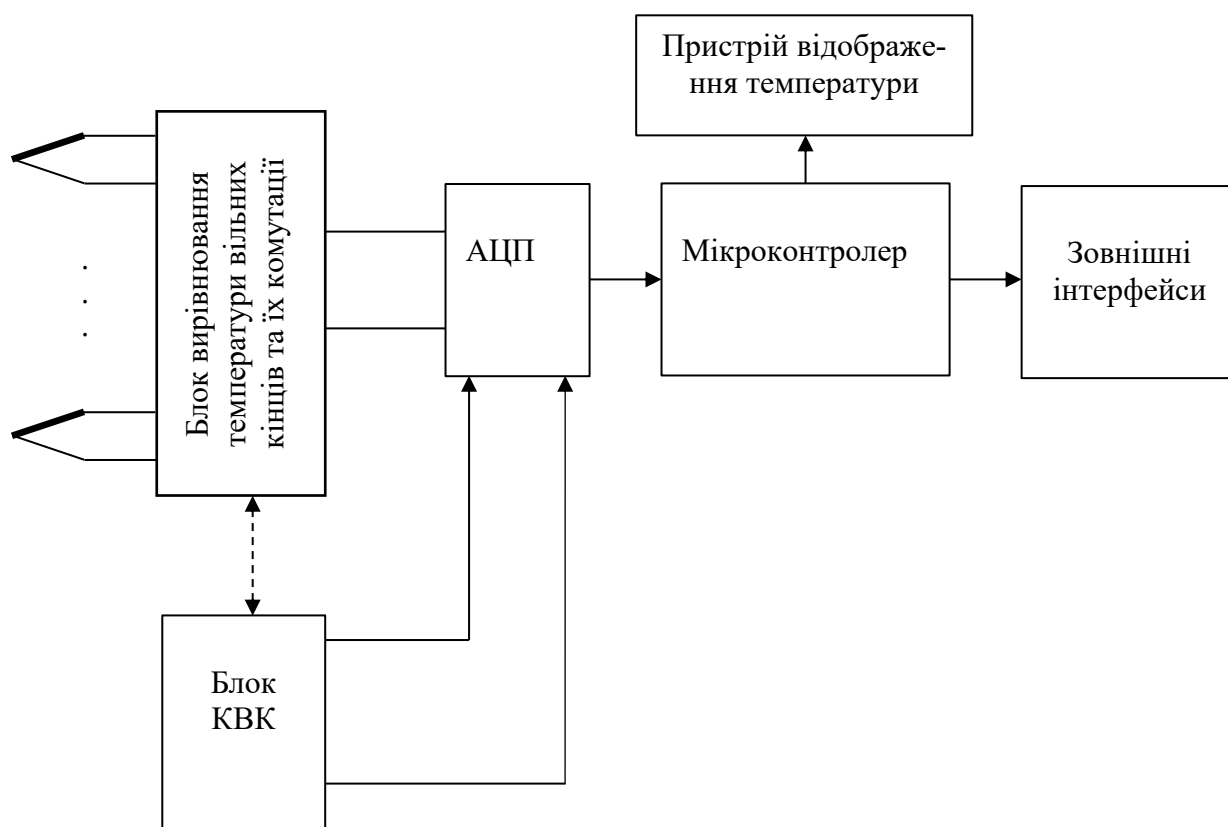


Рисунок 2.2 – Структурна схема багатоканального пристрою вимірювання температури

Таким чином, в даному розділі розроблено структуру пристрою, що працює наступним чином: термопари вимірюють температуру в різних точках, мультиплексор послідовно підключає їх до підсилювача, сигнал підсилюється і

перетворюється у цифровий вигляд, після чого мікроконтролер виконує необхідні розрахунки, включаючи компенсацію холодного спаю, і передає результати на дисплей або зовнішній пристрій для подальшого аналізу.

2.2. Проектування аналогової частини багатоканального пристрою

Як видно із структурної схеми одним з основних блоків пристрою є блок вирівнювання температури вільних кінців та їх комутації. Основним завданням блоку вирівнювання температури вільних кінців є забезпечення однакової їх температури. На практиці це досягається створенням масивної конструкції з матеріалу, що легко проводить тепло (мідь, алюміній) до якого через ізоляцію підключаються аналоговий комутатор та схема компенсації вільних кінців [15-17].

В якості базового елементу аналогового комутатора пропонується використати мікросхему приведену на рисунку 2.3.

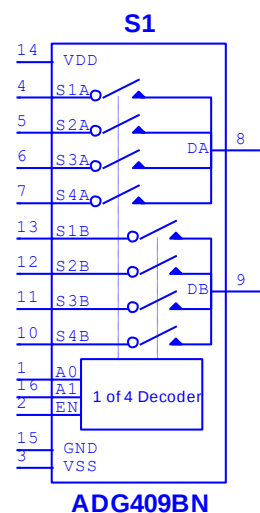


Рисунок 2.2 - Аналоговий комутатор

ADG409BN — це аналоговий мультиплексор виробництва компанії Analog Devices. Він має чотири вхідні канали, які можуть комутуватися на один

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33

спільний вихід. Пристрій призначений для роботи з аналоговими сигналами та дозволяє за допомогою цифрового керування вибирати, який із чотирьох каналів буде активним у певний момент часу.

Мультиплексор може працювати як з однополярним, так і з двополярним живленням у діапазоні від ± 3 до ± 18 вольт або від 5 до 36 вольт. Це робить його зручним для інтеграції в різноманітні аналогові системи. Вхідні сигнали можуть охоплювати майже повний діапазон живлення, що забезпечує гнучкість у використанні.

Опір відкритого каналу становить приблизно 45 Ом, а час перемикання між каналами — близько 160 наносекунд. Для керування перемиканням використовуються два цифрові входи адреси, а також вхід EN (enable), який активується низьким рівнем логіки. Завдяки сумісності з CMOS і TTL-рівнями, ADG409BN легко інтегрується з мікроконтролерами та іншими цифровими пристроями. Завдяки своїй надійності та простоті в роботі, ADG409BN часто використовується у вимірювальних приладах, аналогових комутаційних схемах, мультиметрах, а також у системах збору даних, зокрема на базі мікроконтролерів, таких як ESP32.

Використовуючи дану мікросхему розроблено електричну схему аналогового 8 – ми канального комутатора до 7 входів якого підключаються термопари, а восьмий вхід призначений для підключення схеми компенсації температури вільних кінців.

Компенсація вільних (або холодних) кінців термопар є ключовим елементом для забезпечення точності вимірювання температури. Коли термопара створює електричну напругу на основі різниці температур між гарячим і холодним спаями, важливо враховувати температуру саме в точці підключення — тобто в місці, де термопара з'єднується з мідними провідниками вимірювального кола. Ця точка, яку часто називають холодним спаєм, сама по собі створює додаткову термо-ЕРС, і якщо її не врахувати, вимірювання буде неточним. Це обумовлено тим, що градування термопар здійснюється при

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

температурі вільних кінців рівній трійній точці води - 0°C. Оскільки в практиці це непрактично використовують схему KBK.

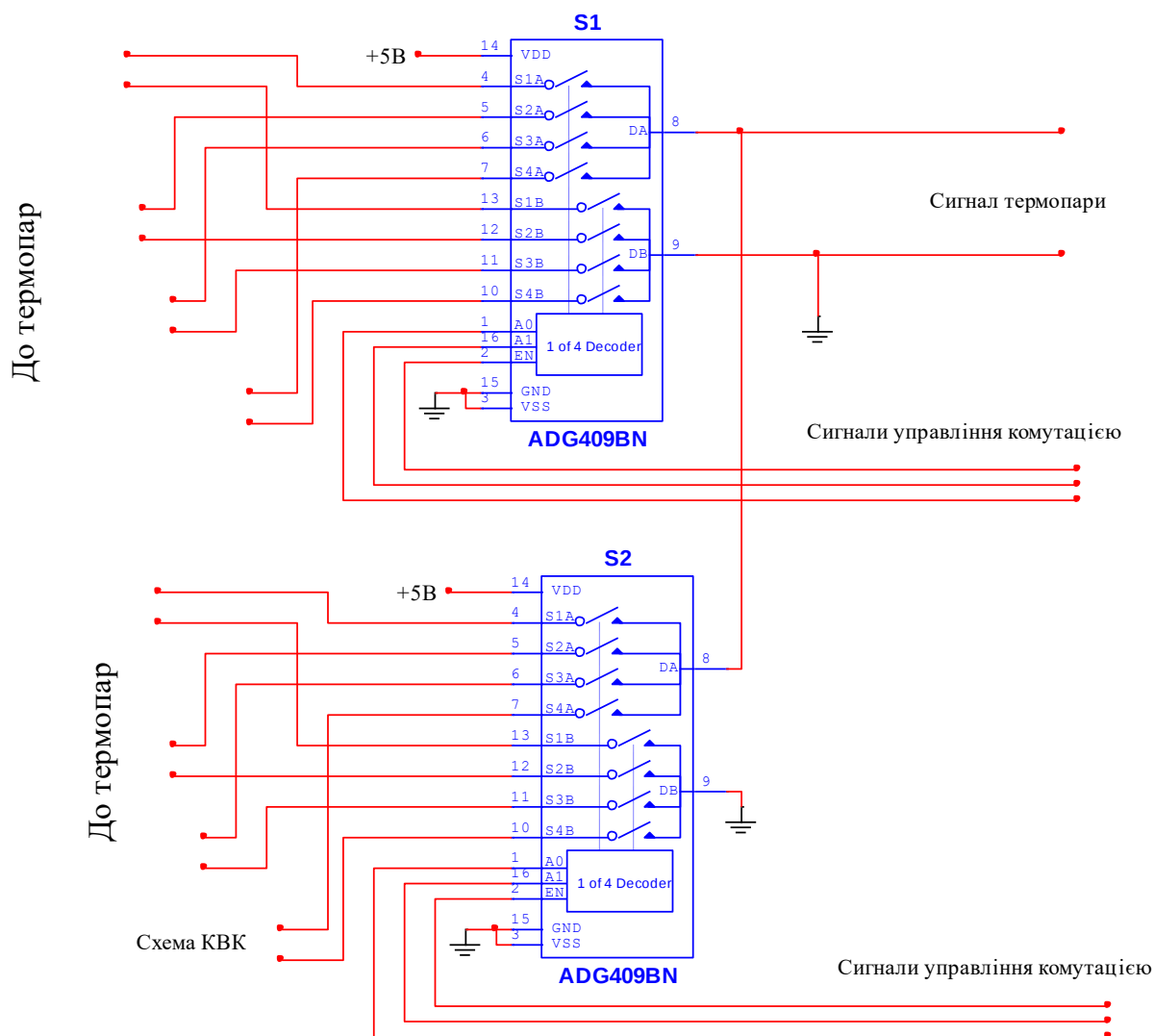


Рисунок 2.3 – Аналоговий комутатор сигналів термопар

Для компенсації температури холодного спаю найчастіше поруч із місцем підключення термопар розміщують окремий температурний сенсор. Це може бути цифровий датчик, наприклад DS18B20 або високоточний аналоговий термодатчик. Такий датчик вимірює температуру середовища в точці приєднання термопар, після чого мікроконтролер або спеціалізований чип за допомогою таблиць переведу термо-ЕРС і відповідних формул обчислює справжню температуру гарячого спаю.

Існують і більш традиційні підходи, як-от використання термостатованих або ізотермічних блоків, в яких холодні кінці підтримуються при стабільній і відомій температурі. Наприклад, у лабораторних умовах це може бути резервуар з талою водою, що гарантує температуру близько нуля градусів за Цельсієм. Такий метод дозволяє уникнути необхідності активної компенсації, однак вимагає специфічного обладнання і малопридатний для польових або компактних електронних пристроїв.

Деякі пристрої можуть використовувати спрощену програмну компенсацію, коли температура холодного спаю вважається сталою, наприклад 25 °С. У цьому випадку значення додається до обчислень вручну або автоматично, проте така схема годиться лише тоді, коли температура навколишнього середовища дійсно залишається стабільною, інакше похибка вимірювання суттєво зростає.

У сучасних мікросхемах, як-от MAX31855 або MAX6675, компенсація холодного спаю вже реалізована всередині модуля. Вони вимірюють температуру приєднання самостійно й надають вже скориговане значення температури гарячого спаю. Якщо ж використовуються більш універсальні схеми з окремим підсилювачем і АЦП, тоді програмна реалізація компенсації виконується мікроконтролером — він аналізує обидві температури, переводить їх у термо-ЕРС відповідно до типу термопари, підсумовує і виводить фінальний результат у градусах.

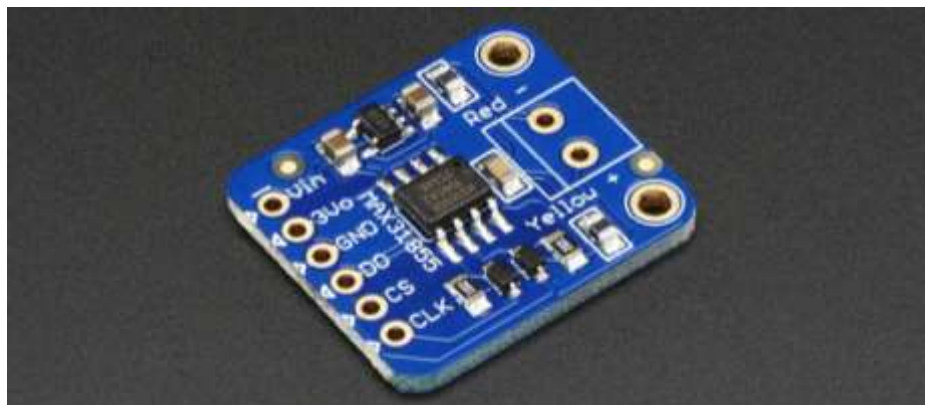


Рисунок 2.4 – Схема компенсації температури вільних кінців термопар

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

У мікросхемі MAX31855 вбудований високоточний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), який виконує перетворення аналогового сигналу терморезистора типу К у цифрове значення температури. Цей АЦП спеціалізований — він оцифровує дуже низькі напруги, характерні для терморезистора (в межах десятків мікр вольт), і має розрядність 14 біт для температури терморезистора та 12 біт для внутрішнього датчика холодного спою. Така структура дозволяє досягти високої роздільної здатності і точності вимірювання температури.

Окрім самого АЦП, MAX31855 містить вбудований прецизійний підсилювач, схему компенсації температури холодного спою, а також цифрову логіку для обробки та передачі результатів. Усі ці компоненти працюють разом, щоб забезпечити зручний інтерфейс для зчитування температури без необхідності зовнішньої обробки сигналу [10-14].

Для обміну даними з мікроконтролером використовується інтерфейс SPI. MAX31855 має кілька основних контактів. Контакт VCC подається до джерела живлення 3,3 В, а GND — до загальної землі системи. Аналогові входи терморезистора підключаються до виводів T+ і T-. Вивід SCK слугує для прийому синхросигналу від мікроконтролера, CS використовується для вибору пристрою, а SO (іноді позначається як MISO) передає дані назад до мікроконтролера — таблиця 2.1.

З боку мікроконтролера, ці сигнали підключаються до відповідних GPIO, які підтримують SPI-протокол. Зазвичай SCK підключається до SPI-тактового виходу мікроконтролера, CS — до довільного вільного GPIO, а SO — до SPI-входу даних (MISO). Комунікація здійснюється ініціативно з боку мікроконтролера: він активує сигнал CS, подає тактові імпульси на SCK, і зчитує дані, які надсилаються MAX31855 у відповідь на кожен імпульс.

У такий спосіб мікроконтролер отримує повне 32-бітне слово, що містить температурні значення та інформацію про можливі помилки, такі як обрив терморезистора. При підключенні мікросхеми MAX31855 важливо дотримуватись кількох ключових рекомендацій. Напругу живлення на вивід VCC слід подавати

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

строго в межах 3,0–3,6 вольт, оскільки мікросхема не підтримує 5-вольтову логіку — подача вищої напруги може призвести до її пошкодження.

Таблиця 2.1 - Призначенням виводів мікросхеми MAX31855

№ виводу	Назва виводу	Призначення
1	VCC	Живлення мікросхеми (3.0–3.6 В постійного струму)
2	GND	Загальний (нульовий) провід, спільний з мікроконтролером
3	T–	Вхід термопари (негативний, “холодний” спай), метал типу N
4	T+	Вхід термопари (позитивний, “гарячий” спай), метал типу P
5	NC	Не підключений. Може бути залишений в повітрі або припаяний до плати
6	SO	Вихід даних SPI (Serial Out), з’єднується з MISO мікроконтролера
7	CS	Вхід вибору чипа (Chip Select); активується логічним 0
8	SCK	Вхід тактового сигналу SPI (Serial Clock), подається від мікроконтролера

Вивід GND має бути надійно з’єднаний із загальною "землею" всієї системи, включаючи мікроконтролер, інакше передача даних через SPI може бути некоректною або нестабільною.

Контакти T+ і T– призначені для підключення термопари типу K. Важливо правильно дотримуватись полярності: T+ з’єднується з позитивним виводом термопари, а T– — з негативним. Хоча мікросхема може виявити неправильне підключення, точність вимірювання при цьому буде порушено.

Для зчитування температурних даних використовується інтерфейс SPI. Мікроконтролер керує обміном даними, генеруючи синхросигнали на вивід SCK і активуючи лінію CS (Chip Select) шляхом встановлення її в низький логічний рівень. Після цього MAX31855 починає передавати дані через вивід SO, який

підключається до входу MISO мікроконтролера. Передача виконується побітово, в такт із імпульсами на лінії SCK.

Один із виводів мікросхеми — NC (Not Connected) — не задіяний у функціонуванні пристрою, тому його можна залишити непідключеним або припаяти до плати без електричного з'єднання. Правильне підключення усіх виводів відповідно до специфікації гарантує точну та надійну роботу мікросхеми MAX31855 у складі цифрового спрйладу вимірювання температури.

2.3 Обґрунтування та вибір мікроконтролера

Для побудови системи вимірювання температури з використанням термопар типу K та мікросхеми MAX31855 доцільно обрати мікроконтролер, який підтримує SPI-протокол, працює з логічним рівнем 3,3 В та має достатню кількість виводів для підключення кількох сенсорів. MAX31855 не є сумісним із 5-вольтовою логікою, тому мікроконтролери, які працюють на 5 В, потребують додаткових логічних перетворювачів. Крім того, якщо планується передача або збереження даних, бажано, щоб мікроконтролер мав вбудовану підтримку Wi-Fi або SD-карт.

Мікроконтролери з родини Arduino мають широке поширення, підтримку Arduino IDE та численні бібліотеки, зокрема для MAX31855. У таблиці 2.2 приведено аналіз ряду найбільш доречних варіантів:

Серед наведених варіантів найдоцільнішим вибором є ESP32 DevKit, оскільки він має широкий функціонал, підтримує кілька SPI-шин, працює на логічному рівні 3,3 В і дозволяє безпосередньо підключити один або кілька модулів MAX31855 без необхідності додаткових логічних перетворювачів — рисунок 2.5.

Мікроконтролер ESP32 у модулі WROOM-32 має близько 38 виводів, з яких більшість є мультифункціональними. Основні групи виводів включають GPIO (загального призначення), UART, SPI, I2C, PWM, ADC та DAC. GPIO-

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		39

виводи можна використовувати для цифрового введення/виведення, а деякі з них підтримують аналогове зчитування (ADC1 і ADC2), хоча ADC2 не працює під час використання Wi-Fi.

Таблиця 2.2 – Аналіз перспективних мікроконтролерів

Модель Arduino	Переваги	Коментар
Arduino Uno	Простий, доступний, підтримує SPI.	Не рекомендовано напряму: працює на 5 В, потрібен перетворювач рівнів для роботи з MAX31855.
Arduino Nano 33 IoT	Працює на 3,3 В, має вбудований Wi-Fi, підтримка SPI, компактний розмір.	Оптимальний варіант
Arduino MKR Zero	3,3 В логіка, SPI, слот для SD-картки, підтримка живлення від батареї.	Дуже добрий вибір
Arduino Due	Потужний (32-біт Cortex-M3), SPI, працює на 3,3 В.	Добре підходить для багатоканальних систем
ESP32 DevKit (Arduino-сумісний)	Дуже потужний, підтримка кількох SPI-шин, Wi-Fi/Bluetooth, працює на 3,3 В.	Ідеально підходить для промислових вимірювань, IoT та хмарних застосувань

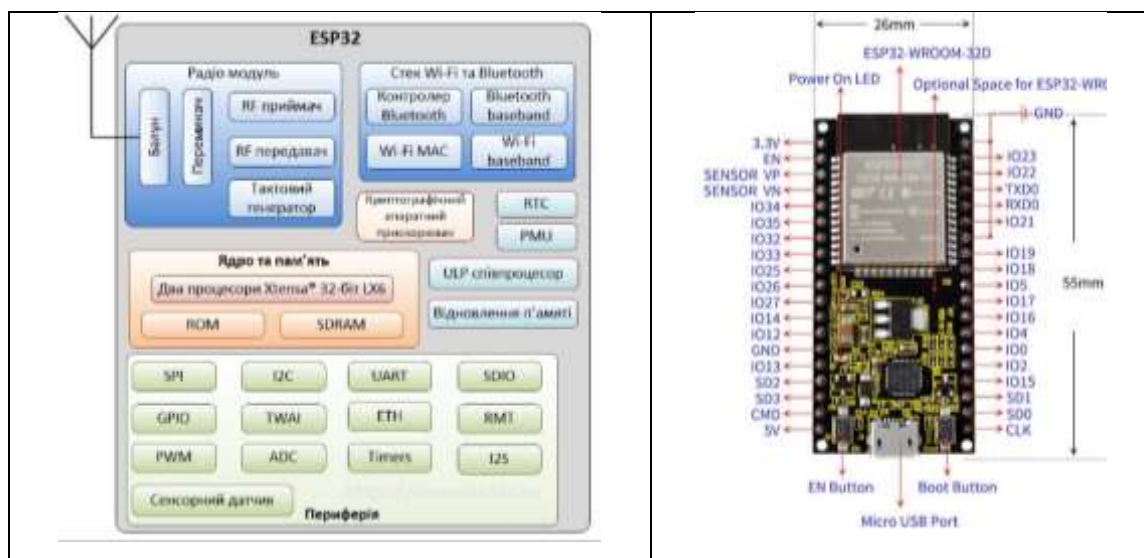


Рисунок 2.5 – Структурна схема мікроконтролера ESP32-WROOM32

Також доступні два канали ЦАП (DAC) на GPIO25 і GPIO26. SPI-інтерфейс має апаратну підтримку і зазвичай використовує виводи GPIO18 (SCK), GPIO19 (MISO), GPIO23 (MOSI) та GPIO5 (CS). У ESP32-WROOM-32 живлення здійснюється через виводи 3V3 і GND, а програмування можливо через UART0 (GPIO1 – TX, GPIO3 – RX).

Для реалізації багатоканального пристрою вимірювання температури з використанням семи термопар типу К використовується аналоговий мультиплексор ADG409BN, який забезпечує комутацію вхідних аналогових сигналів, та цифровий термопарний інтерфейс MAX31855, що виконує обробку сигналу та компенсацію температури холодного спаю. Централізоване управління здійснюється мікроконтролерним модулем ESP32-WROOM-32.

Модуль ESP32-WROOM-32 забезпечує достатню кількість GPIO-виводів для керування адресними входами мультиплексора та взаємодії по SPI-протоколу з MAX31855. Для вибору одного з семи каналів мультиплексора ADG409BN використовуються три керувальні входи A0, A1 та A2, які підключаються відповідно до виводів GPIO16, GPIO17 та GPIO18 ESP32. Керування станом увімкнення мультиплексора здійснюється через вивід EN, підключений до GPIO4. Активний рівень сигналу на цьому вході дозволяє передачу аналогового сигналу від обраного каналу до загального комутованого виходу X.

Вихід X мультиплексора підключається до входів T+ і T– мікросхеми MAX31855 відповідно через фільтрувальні елементи, які зменшують рівень високочастотних перешкод. MAX31855 виконує вимірювання електрорушійної сили термопари, компенсує температуру холодного спаю за допомогою вбудованого датчика та передає результат у цифровому вигляді по SPI-інтерфейсу.

Для обміну даними між ESP32 та MAX31855 використовується апаратний SPI-інтерфейс, де лінія SCK (Serial Clock) підключена до GPIO14, лінія MISO (Serial Data Out з MAX31855) — до GPIO12, а сигнал вибору чипа CS — до

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

GPIO5. Оскільки MAX31855 працює тільки як передавач (має лише вихід MISO), лінія MOSI не використовується.

Обидві мікросхеми — ADG409BN та MAX31855 — живляться від стабілізованої напруги 3.3 В, яка формується вбудованим регулятором живлення ESP32. Всі компоненти мають спільну точку заземлення, що критично важливо для точності вимірювання малих термопарних сигналів.

У процесі вимірювання ESP32 послідовно активує кожен із семи каналів комутатора, передаючи відповідну адресу на входи A0–A2, забезпечує коротку стабілізаційну паузу, після чого ініціює зчитування даних з MAX31855 через SPI. Отримане значення температури зберігається у внутрішній пам'яті або передається на сервер для подальшої обробки. Таким чином реалізується поетапне вимірювання температури з використанням лише одного інтерфейсу MAX31855 та одного аналогового комутатора.

В цій схемі мікросхема MAX31855 бере на себе функції аналогової обробки сигналу термопари. Сигнал від термопари надходить на відповідні аналогові входи мікросхеми — T+ та T–. Оскільки термопари генерують дуже малу напругу, яка відповідає різниці температур між гарячим та холодним спаями, MAX31855 виконує прецизійне вимірювання цієї напруги за допомогою вбудованого високоточного аналогово-цифрового перетворювача. Особливістю мікросхеми є наявність інтегрованого сенсора температури, який вимірює температуру в точці підключення термопари до самої мікросхеми — так звану температуру холодного спаю або вільних кінців. Це дозволяє мікросхемі автоматично виконувати компенсацію, необхідну для визначення абсолютної температури вимірюваної зони, без потреби у зовнішньому датчику чи обчисленнях на рівні мікроконтролера.

Усі ці функції — вимірювання термопарної напруги, вимірювання температури холодного спаю та розрахунок абсолютної температури — реалізуються всередині MAX31855 і результати передаються в цифровому вигляді через SPI-інтерфейс. Таким чином, модуль ESP32 отримує вже оброблену інформацію, не використовуючи власні аналогові входи. Це значно

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

спрощує схему, підвищує точність вимірювання та усуває необхідність програмно обробляти сирі аналогові сигнали.

До того ж, ESP32 має вбудований Wi-Fi, що дає змогу створити повноцінний цифровий прилад з бездротовою передачею даних. Якщо ж потрібна простота, компактність і інтегрований Wi-Fi — чудовою альтернативою буде Arduino Nano 33 IoT.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

3.1. Система обробки вимірної інформації

Відповідно до структурної схеми, розробленої в розділі 2.1 та апаратного забезпечення обґрунтування, вибір та схеми підключення якого розглянуті в розділах 2.2 та 2.3 в багатоканальному пристрою збору температурних даних використано мікроконтролер ESP32-WROOM-32, до якого підключено сім термопар типу К через аналоговий мультиплексор на мікросхемах ADG409BN (рисунок 2.3) та мікросхему MAX31855 (рисунок 2.4), що виконує компенсацію холодного спаю і базову лінеаризацію. Потреба в лінеаризації при температурних вимірюваннях термопарами зумовлена нелінійною залежністю термоЕРС від температури рисунок 3.1. Це ускладнює точне визначення температури за вимірною напругою. Без лінеаризації отримані значення можуть мати значну похибку, особливо за межами вузького робочого діапазону.

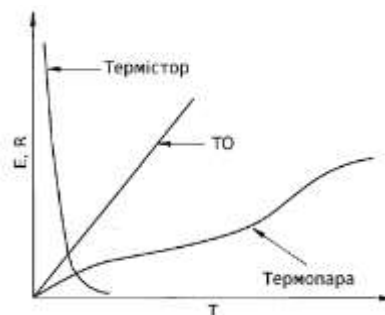


Рисунок 3.1 – Градувальні характеристики температурних сенсорів

Методи реалізації лінеаризації характеристик термопари:

- таблична апроксимація (lookup table): значення температури визначаються шляхом інтерполяції з табличних значень термоЕРС.
- поліноміальна апроксимація: використання стандартних поліномів (наприклад, NIST) для розрахунку температури з термоЕРС.

- цифрова лінеаризація в мікроконтролері: реалізується програмно на основі табличних або поліноміальних моделей.
- аналогова лінеаризація: застосовується рідше, наприклад, із використанням кіл із діодами або операційними підсилювачами.

У сучасних системах найчастіше використовуються цифрові методи, які забезпечують високу точність і гнучкість.

Вербальний алгоритм роботи системи управління даного багатоканального пристрою вимірювання температури з використанням плати мікроконтролера ESP32 – WROOM32 описано нижче. Результати вимірювання виводяться на рідкокристалічний дисплей, що підключений до ESP32 через інтерфейс I²C або SPI. Для зчитування показників температури по черзі з кожної термопари використовується адресне керування мультиплексором. На входи адрес **A0, A1, A2** мікросхеми ADG409 подаються сигнали з цифрових виходів ESP32, наприклад:

- A0 – GPIO16
- A1 – GPIO17
- A2 – GPIO18

Сигнал CS (Chip Select) мікросхеми MAX31855, що відповідає за ініціацію обміну по SPI, подається з виводу GPIO5 мікроконтролера. Лінії SPI також прив'язані до апаратних пінів ESP32:

- SCK – GPIO14
- MISO – GPIO12

MAX31855 працює в режимі постійного вимірювання температури, автоматично оновлюючи внутрішні регістри приблизно кожні 100 мс. Тому після кожного перемикавання каналу мультиплексора ESP32 програмно очікує не менше 150 мс, щоб дозволити мікросхемі сформувати актуальне значення температури для нової термопари. Далі ініціюється обмін по SPI — мікроконтролер активує CS, зчитує 32 біти даних, декодує температуру та прив'язує її до активного каналу.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		45

Зібрані дані виводяться на LCD-дисплей у вигляді списку з температурними значеннями для кожного з каналів (наприклад, "CH1: 26.5°C", "CH2: 27.0°C" тощо). Щоби користувач встиг візуально оцінити показники, після завершення повного циклу опитування встановлюється затримка відображення близько 2–3 секунд. Це дозволяє уникнути надмірно частого оновлення екрану, яке ускладнює сприйняття інформації.

Повний цикл опитування семи термопар триває близько 1,2 секунди, враховуючи затримку 150 мс на канал та незначний час на зчитування та відображення. Додавши паузу в 2 секунди на зчитування користувачем, маємо періодичність оновлення інформації кожні приблизно 3–3,5 секунди, що є оптимальним для температурного моніторингу.

Такий підхід дозволяє реалізувати гнучку, масштабовану і відносно недорогу систему моніторингу температури з використанням цифрового термоперетворення та відображення даних у реальному часі.

Для розробки програмного забезпечення використаємо середовище програмування ESP32 контролерів Arduino IDE – рисунок 3.2. Щоб налаштувати Arduino IDE для роботи з мікроконтролером ESP32-WROOM-32 і використовувати інтерфейси I²C та SPI, спочатку потрібно встановити Arduino IDE з офіційного сайту [arduino.cc](https://www.arduino.cc), якщо програма ще не встановлена. Далі необхідно додати підтримку плат ESP32, оскільки вони не входять до стандартного набору Arduino IDE.

Для цього відкрийте меню «Файл» → «Налаштування» і в поле «Additional Boards Manager URLs» вставте посилання на пакет ESP32 від Espressif: «https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/master/package_esp32_index.json».

Після цього в меню «Інструменти» → «Плата» → «Менеджер плат» знайдіть пакет «esp32 by Espressif Systems», установіть його і виберіть у тому ж меню плату «ESP32 Dev Module», яка підходить для ESP32-WROOM-32.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

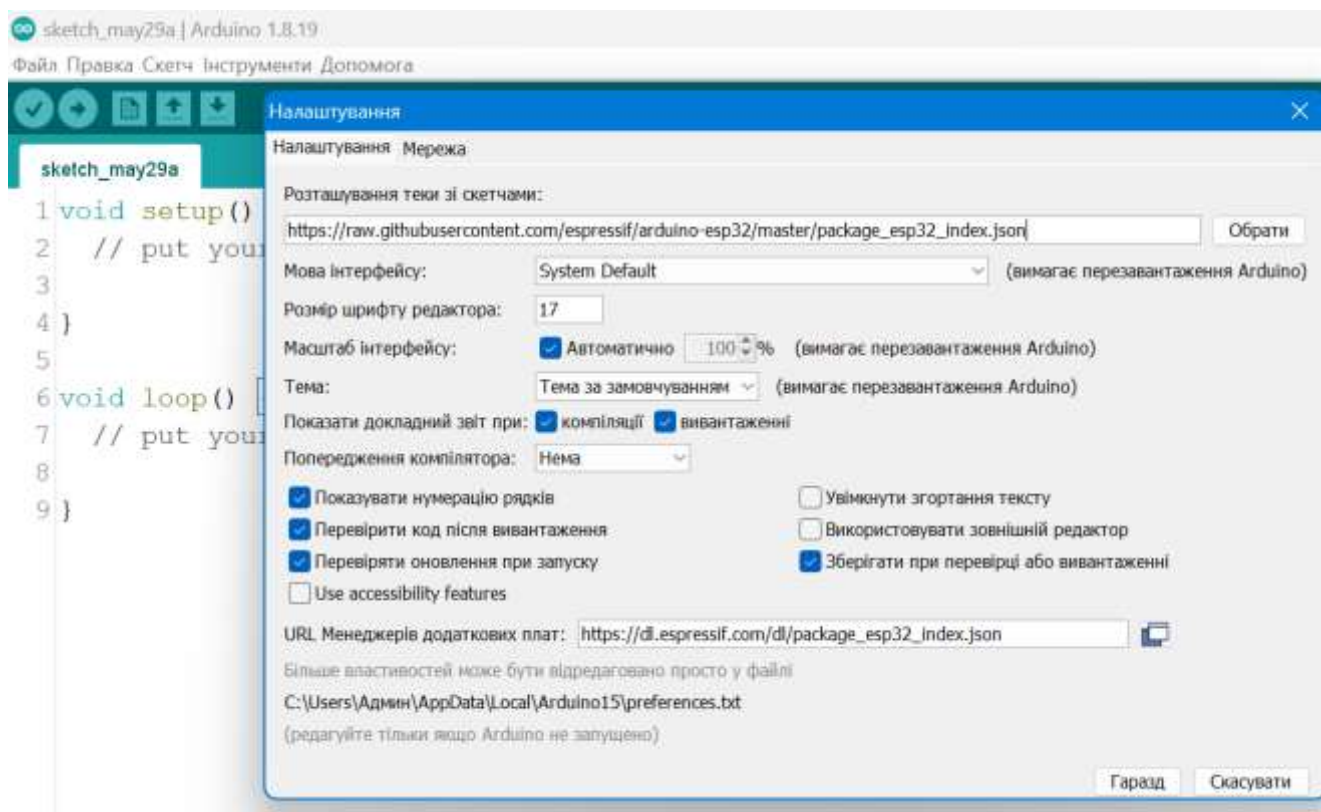


Рисунок 3.2 – Налаштування середовища Arduino IDE

Для коректної роботи плати налаштовуються параметри в меню «Інструменти»: встановлюється швидкість завантаження (наприклад, 921600), частоту процесора (240 МГц), частота флеш-пам'яті (80 МГц), розмір флеш-пам'яті (4 МБ) і схему розділів (за замовчуванням 4MB with spiffs). Також вибирається правильний порт, до якого підключений ESP32, наприклад, COMx на Windows або /dev/ttyUSBx на Linux/macOS – рисунок 3.3.

Для роботи з інтерфейсом I²C використовується вбудована бібліотека «Wire.h», яка вже є в Arduino IDE. Вона дозволяє працювати з I²C без додаткових бібліотек, використовуючи стандартні пini ESP32: GPIO 21 для SDA і GPIO 22 для SCL. Якщо потрібні інші пini, їх можна вказати через функцію «Wire.begin(SDA, SCL)». Наприклад, щоб ініціалізувати I²C, у коді програми достатньо підключити бібліотеку «Wire.h» і викликати «Wire.begin()». Якщо ви працюєте з конкретними I²C-пристроями, такими як датчик MPU6050 чи OLED-дисплей SSD1306, установіть відповідні бібліотеки, як-от «Adafruit MPU6050» або «Adafruit SSD1306», через менеджер бібліотек у меню «Скетч» →

«Підключити бібліотеку» → «Керувати бібліотеками». Для інтерфейсу SPI також використовується вбудована бібліотека «SPI.h». ESP32 має два апаратних SPI-інтерфейси, але зазвичай застосовується VSPI з пінами: GPIO 23 (MOSI), GPIO 19 (MISO), GPIO 18 (SCK) і GPIO 5 (CS).

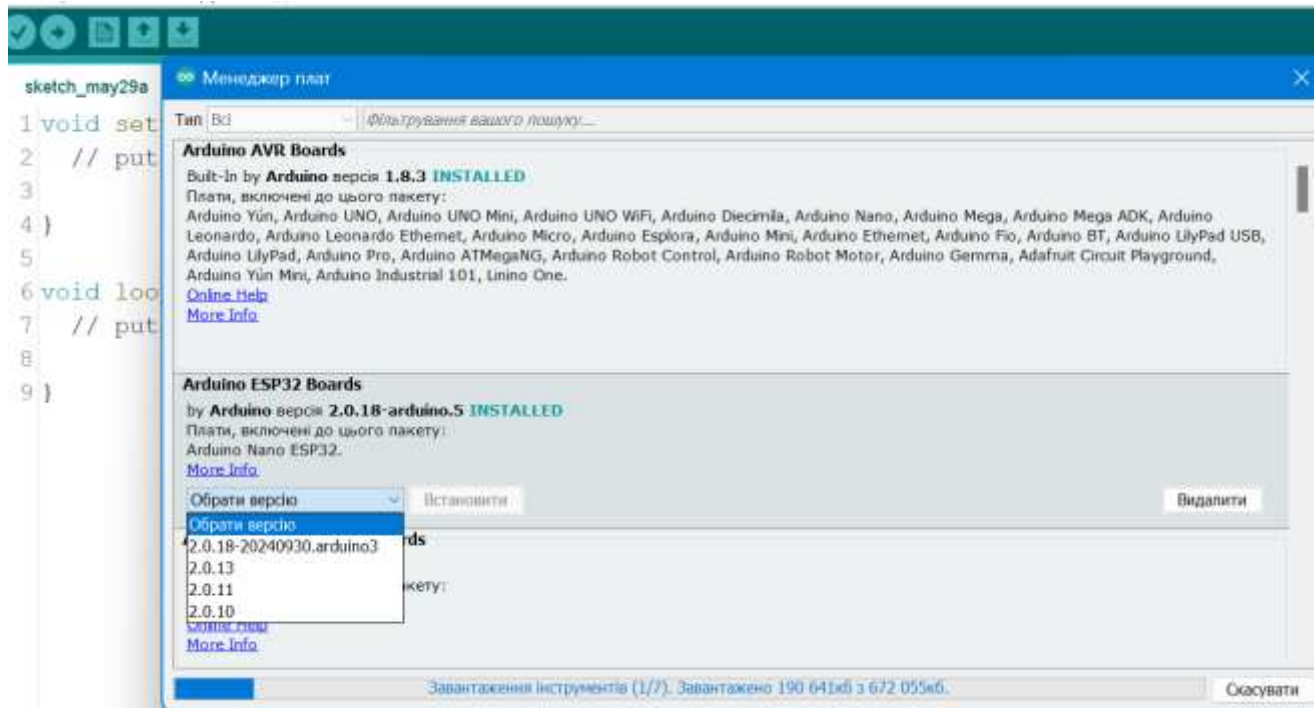


Рисунок 3.3 – Вибір плати ESP32

У коді ініціалізація SPI виконується викликом «SPI.begin()», а пін CS налаштовується як вихідний за допомогою «pinMode(CS_PIN, OUTPUT)».

Під час апаратного підключення для I²C піни SDA і SCL підключені через підтягуючі резистори номіналом 4.7 кОм між цими пінами та напругою 3.3 В. Для SPI підключіть піни MOSI, MISO, SCK і CS до відповідних виводів пристрою, враховуючи, що кожен SPI-пристрій потребує унікального пина CS.

Процес налаштування закінчується розробкою програмного скетчу циклічного опитування термопар – рисунок 3.4.

// Приклад коду для ESP32: зчитування температур з термопар через MAX31855 + ADG409,
// відображення на LCD1602 (через I2C), та передача даних на вебсервер через Wi-Fi.

```
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SPI.h>

// Налаштування дисплея
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Адреса I2C 0x27 може відрізнятись

// Wi-Fi параметри
const char* ssid = "YOUR_SSID";
const char* password = "YOUR_PASSWORD";
const String serverURL = "http://your-server.com/upload.php";

// Виводи ESP32
const int muxA0 = 14; // A
const int muxA1 = 27; // B
const int muxA2 = 26; // C
const int muxEN = 25; // Enable мультимплексора (0 - активний)

const int csPin = 5; // Chip Select для MAX31855

// Час оновлення (в мс)
const unsigned long updateInterval = 6000;
unsigned long lastUpdateTime = 0;

// Функція зчитування температури через MAX31855
float readMAX31855() {
    uint32_t value = 0;

    digitalWrite(csPin, LOW);
    delayMicroseconds(10);
    for (int i = 3; i >= 0; i--) {
        value |= ((uint32_t)SPI.transfer(0x00)) << (i * 8);
    }
    digitalWrite(csPin, HIGH);

    if (value & 0x00010000) return NAN; // помилка датчика
    int16_t tempData = (value >> 18) & 0x3FFF;
    if (tempData & 0x2000) tempData |= 0xC000;
    return tempData * 0.25;
}

// Встановлення активного каналу мультимплексора
void selectMUXChannel(int channel) {
    digitalWrite(muxA0, channel & 0x01);
    digitalWrite(muxA1, (channel >> 1) & 0x01);
    digitalWrite(muxA2, (channel >> 2) & 0x01);
}
```

```

void loop() {
  if (millis() - lastUpdateTime > updateInterval) {
    lastUpdateTime = millis();

    for (int ch = 0; ch < 7; ch++) {
      selectMUXChannel(ch);
      delay(200); // час стабілізації сигналу
      float temp = readMAX31855();

      // Вивід на дисплей
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("CH"); lcd.print(ch + 1);

    }

    void setup() {
      Serial.begin(115200);

      pinMode(muxA0, OUTPUT);
      pinMode(muxA1, OUTPUT);
      pinMode(muxA2, OUTPUT);
      pinMode(muxEN, OUTPUT);
      digitalWrite(muxEN, LOW);

      pinMode(csPin, OUTPUT);
      digitalWrite(csPin, HIGH);

      SPI.begin();

      lcd.init();
      lcd.backlight();

      WiFi.begin(ssid, password);
      while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
      }
      Serial.println("\nWiFi connected");
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("WiFi OK");
      delay(1000);
    }
  }
}

```

Рисунок 3.4 – Фрагмент коду зчитування значення температури та виведення її на екран

Таким чином, даний підхід дозволяє реалізувати гнучку, масштабовану і відносно недорогий багатоканальний пристрій вимірювання температури з використанням термоперетворення та відображення даних у реальному часі.

3.2 Аналіз похибок пристрою та рекомендації по калібруванню компонентів

У багатоканальній системі вимірювання температури з використанням термопар типу К, цифрових перетворювачів MAX31855 та аналогового комутатора ADG409BN точність вимірювання визначається сукупністю факторів, які включають як характеристики елементної бази, так і організацію вимірювального процесу. Основним джерелом похибки є сама термopара, яка має нелінійну характеристику ЕРС залежно від температури. Хоча MAX31855 виконує базову обробку сигналу, включаючи компенсацію холодного спаю, він не забезпечує повної лінеаризації температурної залежності, тому для підвищення точності необхідна програмна лінеаризація, наприклад, із застосуванням стандарту NIST ITS-90, табличної інтерполяції або нейромережових моделей.

Похибка термопар типу К зазвичай становить $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ або $\pm 0,4\%$ від температури, залежно від того, яка величина більша. MAX31855 має дві основні складові похибки: похибку вимірювання термо-ЕРС (приблизно $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) та похибку визначення температури холодного спаю (також близько $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ці похибки вважаються системними, тому їх варто враховувати при підсумовуванні.

Окрему увагу слід приділити похибці, яку вносить аналоговий комутатор ADG409BN. Він додає опір у сигнальний шлях (типово 35–60 Ом) і потенційно може бути джерелом додаткових термо-ЕРС або паразитних сигналів, особливо за поганих монтажних умов. У добре спроектованій системі з якісним з'єднанням його внесок у похибку можна обмежити до $\pm 0,2 \dots 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Щоб оцінити сумарну похибку такої системи, використовують кореневий метод статистичного підсумовування незалежних похибок:

$$\Delta T_{\text{total}} = \sqrt{(\Delta T_{\text{термопара}})^2 + (\Delta T_{\text{MAX31855 (термо-ЕРС)}})^2 + (\Delta T_{\text{MAX31855 (хол. спай)}})^2 + (\Delta T_{\text{ADG409BN}})^2}$$

Підставивши типові значення:

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

- Термопара: $\pm 1,5$ °C
- MAX31855 (термо-ЕРС): $\pm 2,0$ °C
- MAX31855 (холодний спай): $\pm 2,0$ °C
- ADG409BN: $\pm 0,5$ °C

отримаємо: 3,24°C.

Таким чином, без індивідуального калібрування та лінеаризації сумарна похибка системи може сягати приблизно $\pm 3,2$ °C. Водночас, при впровадженні програмної лінеаризації, цифрових методів компенсації похибок і періодичного калібрування (в контрольованих температурних точках), цю похибку можна зменшити до менше ніж $\pm 1,5$ °C. Для цього рекомендується застосовувати еталонні джерела температури, такі як термостати або калібрувальні печі, і виконувати корекцію зсуву нуля, нахилу та нелінійностей у вимірювальному каналі.

Таким чином, хоча система з MAX31855 і ADG409BN має свої похибки, вона може бути ефективним рішенням для багатоканального вимірювання температури з термопарами, якщо дотримано вимог до термостабільності, монтажу та виконано належне калібрування.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було проаналізовано методи вимірювання температур та обґрунтовано вибір типу К (хромель-алюмель). Розроблено структурну схему з використанням мікроконтролера. Для компенсації впливу температури холодного спаю до складу пристрою було включено цифровий датчик температури. Перемикання сигналів від кількох термопар здійснюється за допомогою аналогового комутатора, що дозволяє послідовно подавати сигнали на вхід аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), вбудованого в мікроконтролер ESP32.

У мікроконтролері реалізовано програмне забезпечення, яке забезпечує автоматичне опитування термопар, обчислення температури з урахуванням температури холодного спаю та перетворення термоЕРС у значення температури в градусах Цельсія. Результати вимірювань виводяться на рідкокристалічний дисплей, а також можуть передаватися по Wi-Fi для подальшого віддаленого моніторингу або реєстрації. В роботі розглянуто особливості калібрування приладу.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Восьний А., Луцак А., Луцак Б. Методи калібрування сенсорів при вимірюванні фізичних параметрів. - Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (АКІТ - 2025)», Тернопіль, 2025 – с. 68-70.

2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / Вуйцік В., Готра З., Григор'єв В., Каліта В., Мельник О., Потенцкі Є. – Львів: Національний університет Львівська політехніка, 2002. – Том 1. – 474 с.

3. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / Вуйцік В., Готра З., Григор'єв В., Каліта В., Мельник О., Потенцкі Є. – Львів: Національний університет Львівська політехніка, 2003. – Том 2. – 596 с.

4. Датчики неелектричних величин / Проценко І.Ю., Шумакова Н.І. – Суми: СумДУ, 2003. – 70 с.

5. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом: монографія / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Кравчук Н.С. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 162 с.

6. ДСТУ ISO 18434, ISO 80601-2-56 (для безконтактних вимірювань у медицині та промисловості).

7. Основи метрології та вимірювальної техніки / Лис, О.М., Якименко, М.В., Шинкаренко [та ін.]. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 424 с.

8. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: К.:Знання-Прес, 2018. – 180с.

9. Метрологія, вимірювання та контроль: Навчальний посібник / О.В. Бєлова, Ю.І. Гринюк, М.С. Ємельянов. - К.: Видавничий дім "Паливода А.С.", 2020. – 193с.

10.Метрологія та вимірювання: Навч.посіб. / М. Дорожовець, Р. Івах, В. Мотало [та ін.]; за наук. ред. Б.І. Стадника. - Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 312 с.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		54

11.Обробка результатів фізичних вимірювань: навч. посібник / І.Ф.Скіцько, О.І.Скіцько. - КПІ ім .Ігоря Сікорського. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. - 88 с. [Електронний ресурс]: - Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25320/1/Obrobka_rezult._fizych._vymiriuvan.pdf

12.Програмування Arduino / [Електронний ресурс]. / Режим доступу - <https://forum.arduino.ua/viewforum.php?id=1>. - Дата доступу – 08.05.2025.

13.Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник / В.П.Бабак, С.В.Бабак, В.С.Еременко и др.; под ред. чл.-кор. НАН Украины В,П,Бабака. – К., 2014. – 832с.

14.Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.

15.М.Дорожовець, В.Мотало, Б.Стадник та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник у 2-х т. Т.1. Основи метрології. — Львів.: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2005. — 532 с.

16.Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Стадник Б.І. та ін. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: Підручник. /За ред. Є.С.Поліщука. — Львів.: Видавництво «Бескид Біт», 2008. — 618 с.

17.R. Bartiromo, M. Vincenzi. Electrical Measurements in the Laboratory Practice. – Springer. - 2016. – 301p.

					ДП.МТІР.9702448.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		55