

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

ВОЗЬНИЙ АНТОН ОЛЕГОВИЧ

Багатоканальний пристрій вимірювання температури в
діапазоні 0-100 градусів Цельсія / Multi-channel temperature
measuring device in the range of 0-100 degrees Celsius

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

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
МТІР – 41 А.О.Возьний

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
Возьний Антону Олеговичу
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Багатоканальний пристрій вимірювання температури в діапазоні 0-100 градусів Цельсія / Multi-channel temperature measuring device in the range of 0-100 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. Технічні характеристики та принципи роботи сенсорів температури.

2. Системи вимірювання температури побудовані з використанням мікроконтролерів.

3. Характеристики сучасних мікроконтролерів

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Особливості побудови багатоканальних пристроїв вимірювання температури.

2. Проектування компонентів багатоканального пристрою.

3. Програмно-апаратна реалізація багатоканального пристрою вимірювання температури з використанням мікроконтролерів.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема багатоканального пристрою вимірювання температури.
2. Схема підключення термісторів.
4. Електрична схема аналогового комутатора.

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	Особливості побудови багатоканальних пристроїв вимірювання температури з використанням термісторів	12.2024р. – 01.2025р.	
2	Обґрунтування вибору технічних засобів та мікропроцесорної техніки	02.2025р. – 03.2025р.	
3	Апаратно-програмна реалізація пристрою	04.2025р. – 05.2025р.	

Студент _____ Восьний А.О.
(підпис)

Керівник роботи _____ к.т.н., доц. Масляк Б.О.
(підпис)

РЕФЕРАТ

Робота виконана на 55 сторінках та містить 13 рисунків, 12 джерел за переліком посилань.

Мета роботи. Багатоканальний пристрій вимірювання температури в діапазоні 0-100 градусів Цельсія.

Результати роботи. Здійснено аналіз вимірювання відносно низьких температур за допомогою термісторів. Запропоновано автоматизувати основні функції вимірювання на основі застосування мікроконтролера як основної ланки системи управління багатоканальним пристроєм.

Розроблено структурну схему багатоканального пристрою вимірювання температури, обґрунтовано та вибрано елементну базу, запропоновано схеми електричних з'єднань пристрою. Здійснено аналіз невизначеності результатів вимірювань та розроблені рекомендації щодо калібрування пристрою та сенсорів. Здійснено програмну реалізацію багатоканального пристрою вимірювання температури

Рекомендації по використанню результатів роботи. Розроблений багатоканальний пристрій рекомендується використовувати в системах вимірювання температур в діапазоні 0-100 °C в різних сферах виробництва та побуту.

Ключові слова. ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЬ, АЦП, ДРОТОВИЙ ТА БЕЗДРОТОВИЙ ІНТЕРФЕЙС, СЕНСОР, МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМНИЙ СКЕТЧ.

ABSTRACT

The work is completed on 55 pages and contains 13 figures, 12 sources according to the list of references.

Purpose of the work. Multi-channel temperature measurement device in the range of 0-100 degrees Celsius.

Results of the work. An analysis of the measurement of relatively low temperatures using thermistors was carried out. It was proposed to automate the main measurement functions based on the use of a microcontroller as the main link in the control system of a multi-channel device.

A structural diagram of a multi-channel temperature measurement device was developed, the element base was justified and selected, and the electrical connection diagrams of the device were proposed. An analysis of the uncertainty of the measurement results was carried out and recommendations were developed for calibrating the device and sensors. A software implementation of a multi-channel temperature measurement device was carried out

Recommendations for using the results of the work. The developed multi-channel device is recommended for use in temperature measurement systems in the range of 0-100 °C in various areas of production and everyday life.

Keywords. MEASUREMENT, CONTROL, ADC, WIRED AND WIRELESS INTERFACE, SENSOR, MICROCONTROLLER, SOFTWARE SKETCH.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
Вступ	8
Розділ 1. Аналіз методів та засобів вимірювання температури	12
1.1. Принципи вимірювання температури – контактні та безконтактні методи	12
1.2. Типи температурних датчиків	18
1.3. Огляд існуючих багатоканальних систем вимірювання температури	24
1.4. Вибір оптимального підходу для розробки – обґрунтування вибору датчиків та методів вимірювання.	26
Розділ 2. Розробка апаратної частини пристрою	30
2.1. Розробка структурної схеми багатоканального пристрою	30
2.2. Обґрунтування та вибір елементної бази	34
2.3. Схема електричних з'єднань	40
2.4. Особливості визначення невизначеності результатів вимірювань та калібрування сенсорів	43
Розділ 3. Програмне забезпечення пристрою та обґрунтування системи збору даних	45
3.1. Алгоритм збору та обробки даних сенсорів	45
3.2. Налаштування програмного середовища та реалізація процесу збору інформації аналогових сенсорів	47
3.3. Програмна реалізація збору інформації цифрових сенсорів	50
Висновки	53
Список використаних джерел	54

					ДП.МТІР.97022469.00.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Возьний А.О.			Багатоканальний пристрій вимірювання температури в діапазоні 0-100 градусів Цельсія /_Multi-channel temperature measuring device in the range of 0-100 degrees Celsius	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів.		Масляк Б.О.					6	62
Консульт.						ЗУНУ.ФКІТ.МТІР-41		
Н. Контр.		Масляк Б.О						
Затверд.		Сегін А.І.						

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МК – мікроконтролер;

Т – термістор

ВК – вимірювальний канал

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро - аналоговий перетворювач

ПЗ – програмне забезпечення

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Багатоканальні системи вимірювання температури, здатні одночасно контролювати температуру у кількох точках, широко використовуються в різних галузях, де важливий просторовий контроль температурного поля при відносно невисоких температурах. Серед основних сфер застосування можна виділити:

1. Сільське господарство та тепличні комплекси

У теплицях критично важливо підтримувати однорідну температуру в різних зонах для рівномірного росту рослин. Для цього використовують багатоточкові системи моніторингу температури повітря та ґрунту. Крім того, температурний контроль необхідний під час пророщування насіння, зберігання врожаю, а також у автоматизованих системах поливу.

2. Системи «розумного дому» та HVAC (опалення, вентиляція, кондиціонування)

У сучасних житлових і комерційних будівлях застосовують багатоканальні вимірювачі температури для регулювання клімату в окремих кімнатах або зонах. Дані з кількох датчиків дозволяють системі контролювати комфортні умови та ефективно використовувати енергію.

3. Харчова промисловість

Температурний контроль необхідний на різних етапах обробки, приготування й зберігання продуктів. Наприклад, під час ферментації, пастеризації, охолодження або пакування. Багатоканальні системи дозволяють одночасно контролювати кілька технологічних ємностей або зони одного виробничого агрегату.

4. Медицина та лабораторії

У медичних установах температурні прилади використовуються для моніторингу умов зберігання препаратів (наприклад, вакцин), у термостатах, інкубаторах, центрифугах тощо. Лабораторії також потребують точного контролю температури під час хімічних чи біологічних експериментів.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

5. Навчальні лабораторії та дослідницькі стенди

У навчальних закладах студенти вивчають основи фізики, автоматики, електроніки, використовуючи багатоканальні температурні вимірювання для дослідів із теплопередачею, калібруванням сенсорів, дослідженням матеріалів тощо.

6. Промисловість та контроль якості

У машинобудуванні, легкій та деревообробній промисловості температурний моніторинг використовується при сушінні, склеюванні, пресуванні, контролі нагріву матеріалів тощо. Важливо знати температуру не в одній точці, а по всій площі об'єкта або на кількох етапах технологічного процесу.

7. Зберігання чутливих матеріалів

У логістиці й складах, де зберігаються продукти, медикаменти, біоматеріали або інші термочутливі об'єкти, багатоканальні системи дозволяють відстежувати температуру в різних секціях холодильного або ізотермічного обладнання.

Багатоканальність у вимірюваннях дозволяє отримувати детальнішу інформацію про розподіл температури, виявляти аномалії й вчасно реагувати на відхилення, тому подібні системи часто є невід'ємною частиною сучасних автоматизованих технологій у цих сферах.

Актуальність теми

Температура є одним з найважливіших параметрів у різних галузях – від промисловості та енергетики до сільського господарства й побуту. Забезпечення точного та безперервного контролю температурного режиму критично важливе для безпечної й ефективної роботи технологічних процесів: у виробництві воно гарантує якість і стабільність продукції, а в агросекторі – оптимальні умови вирощування культур. Сучасні аграрії широко застосовують метеостанції та системи локального моніторингу для контролю температури ґрунту й повітря, адже погодні умови значною мірою впливають на врожайність. У побутових системах «розумного дому» чи системах опалення-охолодження багатоканальне

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

вимірювання дозволяє підтримувати комфортну температуру в різних зонах приміщення.

Багатоканальний підхід до вимірювання температури є особливо актуальним у разі складних або просторих об'єктів, де необхідно одночасно контролювати покази з кількох точок (наприклад, у виробничих печах, холодильних камерах чи теплицях). Існують готові багатоканальні прилади (наприклад, термометр Т-056МК), які одночасно відображають температуру з 1–10 цифрових датчиків DS18B20. Проте готові рішення можуть бути доволі дорогими або малопристосованими для специфічних задач. У зв'язку з цим зростає потреба в розробці доступних та гнучких багатоканальних систем на основі відкритих апаратно-програмних платформ, таких як Arduino.

Мета і завдання роботи

Метою даної роботи є створення багатоканального пристрою вимірювання температури в діапазоні 0–100 °С з апаратною реалізацією на базі мікроконтролера Arduino. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити електричну схему приладу вимірювання температури з кількома каналами;
- обрати та апробувати температурні сенсори, які забезпечать необхідний діапазон і точність (наприклад, цифрові датчики DS18B20 чи аналогові термістори);
- реалізувати програмне забезпечення на базі Arduino для зчитування даних із кожного каналу і обробки отриманої інформації;
- проаналізувати можливості калібрування пристрою та перевірку точності вимірювань для забезпечення надійного функціонування.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процес багатоканального вимірювання температури вимірювальними пристроями. Предметом дослідження виступає електронна система на основі мікроконтролера Arduino, яка реалізує цей процес

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

у заданому діапазоні 0–100 °С. Іншими словами, ми досліджуємо роботу пристрою, що збирає і обробляє температуру з кількох сенсорів одночасно.

Методи дослідження

У роботі застосовані такі методи:

- аналіз науково-технічної літератури для вивчення існуючих підходів до вимірювання температури, особливо багатоканальних систем та їх реалізації на Arduino.
- проектування електричної схеми і вибір компонентів (термодатчиків, мультиплексорів тощо) з урахуванням вимог до діапазону і точності.
- розробка програмного забезпечення для мікроконтролера Arduino, що забезпечує зчитування та обробку сигналів з кількох каналів.
- аналіз особливостей тестування та калібрування створеного приладу та перевірка його роботи в умовах, наближених до реальних, оцінка точності вимірювання та стабільності показань.

Загалом, поєднання емпіричних (експериментальних) методів з аналізом технічної літератури та інженерним проектуванням забезпечить повне розкриття теми багатоканального температурного вимірювача на базі Arduino.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

1.1. Принципи вимірювання температури – контактні та безконтактні методи

Температура — це фізична величина, яка характеризує середню кінетичну енергію поступального руху частинок (атомів або молекул), з яких складається тіло або система. Температура має різні визначення залежно від рівня опису — макроскопічного (термодинаміка) або мікроскопічного (молекулярна фізика, статистика). Всі ці визначення узгоджуються між собою в межах відповідних теорій і умов застосування.

Температура — це фундаментальна фізична величина, яка немає безпосереднього фізичного носія (на відміну від, наприклад, маси чи довжини), є узагальненим параметром стану системи, що описує інтенсивність теплового руху частинок, не спостерігається напряму — її не можна "побачити" чи "відчути" точно, а лише опосередковано через фізичні зміни (наприклад, розширення тіл, зміни електричного опору, спектральні характеристики випромінювання). Для перетворення цієї абстракції у вимірювану величину, з якою можна працювати практично, необхідно застосовувати температурні шкали. Вони роблять температуру доступною для експериментів, порівнянь і технічного використання, забезпечуючи єдність вимірювань у науці й техніці.

Температурні шкали — це способи числового вираження температури, тобто рівня нагрівання або охолодження тіл. Різні шкали були створені в різні історичні періоди, і кожна має свої особливості — початкову точку відліку (нуль) та інтервал між градусами. Для відтворення температури використовують так звані реперні точки. Реперна точка (від лат. *reperire* — "знаходити") — це фіксована температура, яка використовується як еталон або вихідна опорна точка для побудови або калібрування температурної шкали чи термометра. Основними реперними точками у багатьох шкалах є температура танення льоду (точка замерзання води), температура кипіння води та абсолютний нуль — найнижча можлива температура.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

Шкала Цельсія ($^{\circ}\text{C}$) є найпоширенішою в світі, зокрема в Європі, Азії та Україні. Вона базується на двох природних реперних точках: температура танення льоду (0°C) та температура кипіння чистої води при нормальному атмосферному тиску (100°C). Відстань між цими точками поділено на 100 рівних частин — це і є градуси Цельсія. Шкалу запропонував шведський астроном Андерс Цельсій у 1742 році. Цю шкалу активно використовують у повсякденному житті, медицині, кулінарії та науці.

Шкалу Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$) розробив німецько-голландський фізик Даніель Фаренгейт у 1724 році. У цій шкалі температура замерзання води відповідає 32°F , а температура її кипіння — 212°F (також при нормальному атмосферному тиску). Таким чином, інтервал між цими реперними точками становить 180 градусів Фаренгейта. Сьогодні ця шкала здебільшого використовується у США та кількох інших країнах. Для пересічного мешканця США нормальна кімнатна температура — це близько 70°F .

Шкала Кельвіна (K) — це абсолютна температурна шкала, яка широко використовується у фізиці, хімії та інженерії. Вона не має від'ємних значень, оскільки її нуль (0 K) відповідає абсолютному нулю — температурі, при якій повністю припиняється тепловий рух частинок. Один кельвін дорівнює одному градусу Цельсія за розміром, але початок шкали зміщений - $0^{\circ}\text{C} = 273,15\text{ K}$. Цю шкалу запропонував британський фізик Вільям Томсон (лорд Кельвін) у XIX столітті. Основними реперними точками в цій шкалі є абсолютний нуль (0 K) та потрійна точка води (273,16 K), яка є більш точним еталоном. Основні реперні точки для різних шкал приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Основні реперні точки для основних шкал

Фізичне явище	Цельсій ($^{\circ}\text{C}$)	Фаренгейт ($^{\circ}\text{F}$)	Кельвін (K)	Ранкін ($^{\circ}\text{R}$)
Абсолютний нуль	$-273,15^{\circ}\text{C}$	$-459,67^{\circ}\text{F}$	0 K	0°R
Замерзання води	0°C	32°F	273,15 K	$491,67^{\circ}\text{R}$
Тройна точка води	$0,01^{\circ}\text{C}$	$32,02^{\circ}\text{F}$	273,16 K	$491,69^{\circ}\text{R}$
Кипіння води	100°C	212°F	373,15 K	$671,67^{\circ}\text{R}$
Кімнатна температура	$\sim 20\text{--}22^{\circ}\text{C}$	$\sim 68\text{--}72^{\circ}\text{F}$	$\sim 293\text{--}295\text{ K}$	$\sim 527\text{--}531^{\circ}\text{R}$

Контактні методи вимірювання температури базуються на фізичних ефектах, що виникають у матеріалах при тепловому контакті з об'єктом вимірювання. Основою цих методів є досягнення теплової рівноваги між об'єктом і сенсором, після чого температура чутливого елемента стає рівною температурі вимірюваного середовища. Ключовим моментом є наявність фізичної залежності певного параметра системи від температури, яку можна точно виміряти.

Фізичні принципи, що використовуються у контактних температурних сенсорах, можна класифікувати за типом температурно-залежних властивостей, які змінюються з температурою:

1. Електричні ефекти, що використовуються в термометрах опору. Зміна електричного опору використовується в термометрах опору (RTD, PTC, NTC). Основне співвідношення:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T)$$

де $R(T)$ — опір при температурі, R_0 — опір при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, α — температурний коефіцієнт опору.

Переваги використання полягають у високій точності (до $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), діапазоні використання приблизно $-200\dots+600\text{ }^{\circ}\text{C}$, високій стабільності і лінійності. Однак вимірювальні схеми потребують компенсації довжини з'єднувальних проводів та мають обмежену швидкодія (до кількох секунд).

2. Термоелектричні ефекти, зокрема ефект Зеебека — рисунок 1.1 застосовується в термопарах — пристроях, що складаються з двох різнорідних металів, з'єднаних у двох точках з різною температурою.

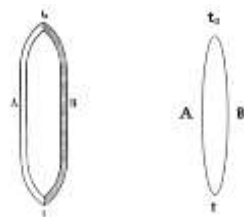


Рисунок 1.1 – Термоелектричне коло утворене з двох різнорідних провідників

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

Основне співвідношення:

$$\varepsilon = \int_{T_x}^{T_{xв}} S_{AB}(T) dT$$

де ε — термо-ЕРС, $S_{AB}(T)$ — термоелектрична сила на одиницю температури між металами А і В, T_x і $T_{xв}$ — температура гарячого і холодного спаю.

Переваги використання полягають у широкому діапазон температур: – 200...+1800 °С (залежно від типу термопари), помірній точності (приблизно $\pm 1...2$ °С), високій швидкодії (до десятків мілісекунд), стійкості до вібрацій, динамічних навантажень і агресивних середовищ. Однак вимірювальне коло потребує компенсації холодного спаю (reference junction).

3. Напівпровідникові властивості використовують у термісторах. Зокрема, у НТС-термісторах опір змінюється за експоненційним законом:

$$R(T) = R_0 \cdot \exp \left(\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right)$$

де β — матеріалозалежна константа, T — абсолютна температура, T_0 — номінальна температура.

Переваги використання полягають у високій чутливості у вузькому діапазоні (переважно –50...+150 °С), дуже високій швидкодії (до мілісекунд). До недоліків використання слід віднести невисоку стабільність довгострокової (дрейф параметрів) експлуатації та необхідність виконання процедур лінеаризації та температурної корекції.

4. Механічні ефекти, зокрема теплове розширення, використовується в біметалевих стрілочних термометрах і рідинних термометрах. Основне співвідношення описується наступним рівнянням:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T$$

де ΔL — зміна довжини, L_0 — початкова довжина, α — коефіцієнт лінійного розширення, ΔT — зміна температури.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15

Особливості застосування полягають у простоті конструкції, автономності, не потребують живлення, середній точності ($\pm 1 \dots 2^\circ\text{C}$), повільній реакції на зміну температури (секунди–хвилини), обмеженнями в діапазоні: рідини – до $\sim 200^\circ\text{C}$, біметали – до $\sim 500^\circ\text{C}$.

Вибір методу залежно від вимог доцільно здійснити орієнтуючись по інформації приведеній в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Характеристики використання контактних перетворювачів температури

Критерій	Термопари	Термометри опору (RTD)	Термістори (NTC/PTC)	Біметали/рідини
Діапазон температур	Дуже широкий	Широкий	Обмежений	Вузький–середній
Точність вимірювання	Середня	Висока	Середня–висока	Середня
Швидкодія	Висока	Середня	Висока	Низька
Стабільність	Середня	Висока	Середня	Висока
Стійкість до умов навколишнього середовища	Висока	Середня	Низька–середня	Висока
Вартість	Низька–середня	Вища	Низька	Дуже низька

Таким чином, вибір контактного методу вимірювання температури визначається комплексом технічних та експлуатаційних вимог. Наприклад, у точних лабораторних вимірюваннях доцільно використовувати термометри опору; для моніторингу високих температур у промисловості — термопари; в компактних електронних пристроях — термістори; а для побутових потреб — прості біметалічні або рідинні термометри.

Безконтактні методи вимірювання температури базуються на реєстрації теплового випромінювання, що надходить від об'єкта без фізичного контакту з ним. Коли тіло має температуру, вищу за абсолютний нуль, воно випромінює електромагнітну енергію. Ця енергія залежить від температури об'єкта, і її можна

використовувати для визначення температури за допомогою спеціалізованих оптичних або інфрачервоних сенсорів.

Класифікація фізичних принципів безконтактних методів вимірювання температури ґрунтуються на тепловому (інфрачервоному) випромінюванні, що описується законами радіаційної фізики.

1. Інфрачервоне (ІЧ) випромінювання чорного та сірого тіла. Кожне тіло з температурою $T > 0\text{K}$ випромінює електромагнітні хвилі. Інтенсивність і спектральний склад випромінювання залежать від температури згідно з законами Планка, Стефана–Больцмана, Віна та Кірхгофа. Основне співвідношення (закон Стефана–Больцмана для сірого тіла):

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

де E — енергетична світність, ε — коефіцієнт випромінювання ($0 < \varepsilon \leq 1$), σ — стала Стефана–Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{Вт/м}^2\text{K}^4$), T — термодинамічна температура в К.

2. Пірометрія (визначення температури за тепловим випромінюванням) поділяється на:

- радіаційні пірометри — інтегрують загальне теплове випромінювання у певному спектральному діапазоні.
- оптичні пірометри — порівнюють яскравість випромінювання на певній довжині хвилі.
- спектральні пірометри — визначають температуру за відношенням інтенсивностей випромінювання на двох довжинах хвиль.

3. ІЧ-термометри (інфрачервоні датчики температури) використовують теплові сенсори (термопіли, болометри) для реєстрації інтенсивності інфрачервоного випромінювання. Поширені в промисловості, медицині, автоматизації та побуті.

Особливості застосування безконтактних методів залежно від технічних вимог приведені у таблиці 1.3.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17

Таблиця 1.3 – Особливості використання бесконтактних методів

Критерій	Радіаційні пірометри	ІЧ-термометри	Оптичні/спектральні пірометри
Діапазон температур	~300...+3000 °C	-50...+1000 °C	~600...+3500 °C
Точність	Середня-висока ($\pm 1-3$ °C)	Середня ($\pm 1...2$ °C)	Висока (± 0.5 °C або краще)
Швидкодія	Висока (мс-десятки мс)	Дуже висока (до мс)	Висока
Стійкість до середовища	Висока (немає контакту)	Середня-висока	Залежить від оптики
Вимоги до об'єкта	Висока емісійна здатність, однорідність поверхні	Емісійність повинна бути відомою або компенсація	Потрібна стабільність спектру
Особливості	Бесконтактність, не потребує охолодження	Придатні для мобільних пристроїв	Використовуються у високотемпературних агресивних середовищах

Таким чином, бесконтактні методи вимірювання температури забезпечують швидке й надійне визначення температури на відстані, особливо у випадках, коли фізичний контакт з об'єктом неможливий або небажаний. Вони ідеально підходять для агресивних, високотемпературних, рухомих або медично чутливих середовищ, хоча й вимагають врахування додаткових факторів, таких як емісійність, оптична прозорість середовища та геометрія вимірювання.

1.2. Типи температурних датчиків

У діапазоні температур 0–100 °C можна використовувати широкий спектр температурних сенсорів [1-3]. У цьому діапазоні немає екстремальних умов, тому вибір сенсорів залежить від точності, вартості, швидкодії та умов експлуатації (вологість, хімічна агресивність, наявність електромагнітних завад тощо). Температурний діапазон 0–100 °C охоплює більшість побутових, сільськогосподарських і промислових застосувань. Це дозволяє застосовувати:

- терморезистори (NTC/PTC),

- термопари (типу Т, К – менш популярні в цьому діапазоні),
- цифрові сенсори (1-Wire, I²C, SPI).

Найпоширенішими типами сенсорів у цьому діапазоні є терморезистори, зокрема RTD-сенсори (наприклад, Pt100 або Pt1000) – рисунок 1.2. Вони базуються на властивості металів змінювати електричний опір зі зміною температури, причому ця залежність є лінійною, передбачуваною і добре калібрується. Платинові сенсори особливо цінуються за високу точність (до ± 0.1 °C) та довготривалу стабільність, що робить їх незамінними в наукових і медичних приладах. Однак, RTD-сенсори потребують високоточних електронних схем для обробки сигналу, що збільшує їхню вартість та складність інтеграції.

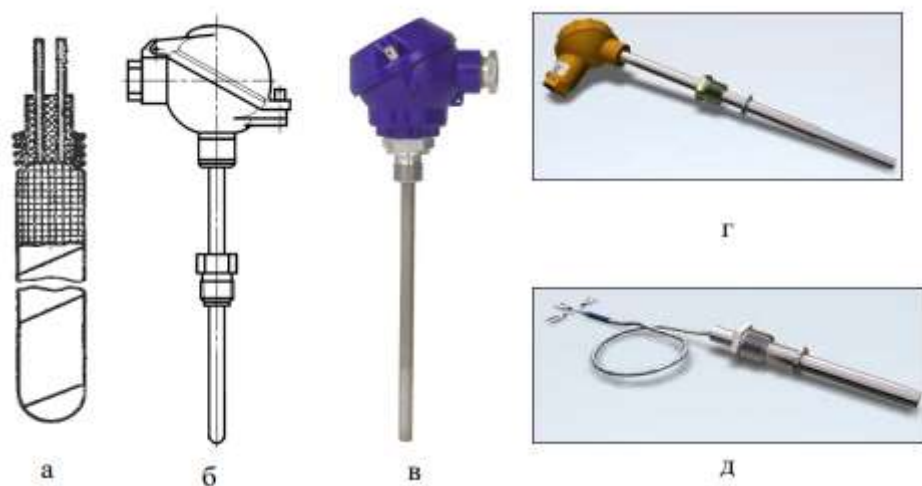


Рисунок 1.2 – Термометр опору і варіанти його використання – а), б), та промислові варіанти використання ТОП і ТОМ (в-д)

Інший різновид — NTC-термістори — мають вищу чутливість, але нижчу лінійність і стабільність у часі – рисунок 1.3. NTC термістори (Negative Temperature Coefficient) — зменшують свій опір зі збільшенням температури. Вони дешевші, часто використовуються в побутовій техніці (чайники, пральні машини) і портативних пристроях. Їхня точність зазвичай у межах ± 0.2 – 0.5 °C, чого цілком достатньо для нескладних завдань.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19



Рисунок 1.3 - Термістор

Термопари — це один розповсюджений тип температурних сенсорів, який працює за принципом виникнення електрорушійної сили в колі, утвореному з двох різних металів. Найпоширенішими в межах $0\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ є типи К і Т, які забезпечують добру механічну стійкість, швидку реакцію та простоту конструкції. Однак у цьому температурному діапазоні вони не забезпечують високої точності (похибка зазвичай $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$), тому частіше використовуються у випадках, де важливіше мати міцний і дешевий сенсор, ніж точність — наприклад, у промислових печах, котлах чи аграрному обладнанні.

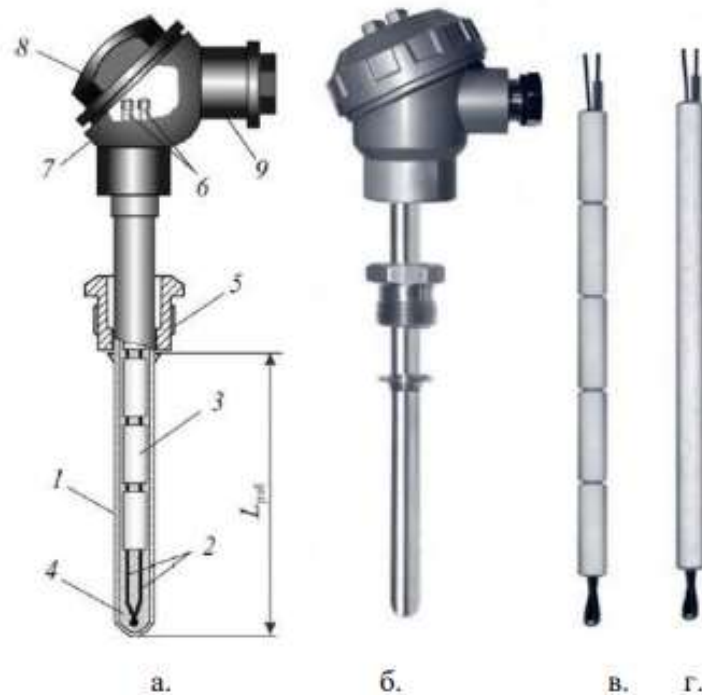


Рисунок 1.3 - Конструкція термопари (а), загальний вигляд (б) і вигляд армованих термоелектродів (в, г)

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

Сучасні цифрові температурні сенсори (такі як DS18B20, TMP36, TMP102, SHT31, BME280) отримали широке поширення завдяки простоті підключення до мікроконтролерів, наявності інтерфейсів (I2C, 1-Wire), низькому енергоспоживанню та часто вже проведеному калібруванню на заводі. Вони стали стандартом для вбудованих систем, IoT-рішень, «розумного» дому та побутових приладів. Наприклад, сенсор DS18B20 дозволяє дешево і просто реалізувати точні вимірювання з похибкою $\pm 0.5^\circ\text{C}$, а SHT31 або BME280 одночасно вимірюють вологість і тиск, що дуже зручно для метеостанцій або контрольованих середовищ.

Окрему категорію становлять інфрачервоні (IR) температурні сенсори, наприклад MLX90614. Вони вимірюють температуру без фізичного контакту, аналізуючи інтенсивність теплового випромінювання об'єкта. Це особливо корисно при вимірюваннях рухомих тіл, рідин, харчових продуктів, живих організмів або поверхонь, де неможливо або небажано торкатися об'єкта. Водночас ІЧ-сенсори мають більшу похибку при зміні емісивності об'єкта, тому їхнє застосування потребує врахування матеріалу, кольору та інших оптичних властивостей об'єкта. В цілому, вони знаходять обмежене застосування.

Переважає попит на доступні, енергоефективні й точні сенсори, які легко інтегруються в мікропроцесорні системи, такі як Arduino, Raspberry Pi або промислові ПЛК. Ключовими виробниками сенсорів і модулів вимірювання температури є Maxim Integrated (тепер Analog Devices), Texas Instruments, Sensirion, Bosch Sensortec, Honeywell, Omron, Danfoss, WIKA, Siemens. Аналіз продукції даних фірм та її особливостей приведено в таблиці 1.4.

Існують також готові багатоканальні рішення для вимірювання температури — це комплексні прилади або системи, призначені для одночасного збору температурних даних з кількох сенсорів – таблиця 1.5. Вони зазвичай включають модулі вводу для підключення різних типів термодатчиків (термопар, термоопорів, термісторів), модулі перетворення сигналів, АЦП (аналогово-цифрові перетворювачі), засоби обробки та збереження даних, а також інтерфейси для передавання інформації на комп'ютер або у хмару.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

Таблиця 1.4 - Аналіз продукції провідних фірм та її особливостей

Виробник	Продукція	Особливості
Maxim Integrated (тепер Analog Devices)	DS18B20 (цифровий термометр)	Один із найпоширеніших цифрових датчиків з інтерфейсом 1-Wire. Точність $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, діапазон $-55^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$. Підтримка кількох датчиків на одній шині.
Texas Instruments	TMP36, TMP102, LM35	TMP36 — аналоговий сенсор з простою обробкою. TMP102 — цифровий, I ² C. Висока точність, мале енергоспоживання.
Sensirion	SHT3x, SHT4x (комбіновані датчики температури і вологості)	Висока точність (до $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$), калібровані на заводі, I ² C. Широко використовуються в медичних та HVAC-застосуваннях.
Bosch Sensortec	BME280, BMP280	Багатофункціональні сенсори температури, вологості, тиску. Застосовуються в мобільних пристроях, метеостанціях, IoT.
Honeywell	Терморезистори NTC, цифрові термометри	Високоякісні сенсори для промисловості та медицини. Деякі моделі мають медичну сертифікацію.
Omron	Термодатчики та готові вимірювальні модулі	Висока надійність, часто використовуються в системах керування HVAC.
Danfoss, WIKA, Siemens	Промислові термометри та сенсори	Використовуються в промислових системах, автоматизації, холодильних установках. Мають сертифікати відповідності та тривалі строки експлуатації.

Такі системи часто мають модульну архітектуру і дозволяють масштабування — від кількох до десятків і навіть сотень каналів. Вони підтримують синхронне або асинхронне зчитування, що важливо для різних технологічних процесів. У багатьох рішеннях реалізовано функції автоматичної компенсації з'єднувального дроту, калібрування, контролю цілісності каналу та сигналізації про вихід за межі допустимих температур. Багатоканальні вимірювальні пристрої можуть бути стаціонарними або портативними, часто мають сенсорний інтерфейс, вбудовану пам'ять, підтримку стандартів промислової автоматики (Modbus, OPC UA, MQTT тощо), а також можливості інтеграції з SCADA-системами. Деякі з них оснащені бездротовими модулями зв'язку, що дозволяє розгортати їх у важкодоступних місцях без прокладання кабелів.

Такі рішення широко застосовуються у промисловості, енергетиці, харчовій та фармацевтичній галузях, у наукових дослідженнях, а також у системах моніторингу довкілля, де важливо мати дані з багатьох точок у реальному часі.

Таблиця 1.5 - Готові багатоканальні рішення

Назва пристрою	Характеристики	Застосування
OWEN TX210	Промисловий багатоканальний модуль збору даних про температуру (до 8 каналів), підтримка 1-Wire	Автоматизація, SCADA
Термометр Т-056МК (український ринок)	До 10 сенсорів DS18B20, LCD-дисплей, живлення 12 В	Склади, теплиці, серверні кімнати
Arduino-модулі Multiplexer (74HC4067)	Дешеве DIY-рішення, до 16 каналів	Освіта, побутові системи, експерименти

В результаті аналізу всього розмаїття сенсорів вимірювання температури, що функціонують по різних принципах, в таблиці 1.6 приведені найбільш перспективні з точки зору розробки багатоканального пристрою вимірювання температури.

Таблиця 1.6 - Порівняльна таблиця температурних сенсорів (0–100 °С)

Назва сенсора	Тип	Точність у 0–100 °С	Інтерфейс	Переваги	Орієнт. ціна (USD)
DS18B20	Цифровий	± 0.5 °С	1-Wire	Багатоканальність по шині, проста адресація, довгі лінії	1–3
LM35	Аналоговий	± 0.5 °С	Аналоговий	Простота, лінійність (10 мВ/°С), низьке енергоспоживання	~1
TMP36	Аналоговий	± 1 °С	Аналоговий	Широко використовується, проста інтерпретація	~1.5
TMP102	Цифровий	± 0.5 °С	I ² C	Висока точність, компактність, можливість підключення кількох	1.5–2.5
SHT31	Цифровий	± 0.3 °С	I ² C	Висока точність, надійність	4–6

Назва сенсора	Тип	Точність у 0–100 °C	Інтерфейс	Переваги	Орієнт. ціна (USD)
BME280 (Bosch)	Цифровий	±1.0 °C	I ² C / SPI	Комбінований датчик	5–7
NTC терморезистори	Аналоговий	~±1–2 °C	Аналоговий	Дешеві, потребують калібрування, нелінійність	0.2–1

Таким чином, при виборі конкретних видів сенсорів для кваліфікаційної роботи слід враховувати наступні рекомендації:

- якщо пріоритет — зручність багатоканального з'єднання та точність, оберіть DS18B20.
- якщо потрібна найвища точність, можна розглянути TMP102 або SHT31, але для багатоканальної реалізації потрібна шина I²C з керуванням адресами або мультиплексори.
- якщо проект передбачає низьку вартість, тоді NTC або LM35 із аналоговим мультиплексуванням — економний варіант.

1.3. Огляд існуючих багатоканальних систем вимірювання температури

Огляд існуючих багатоканальних систем вимірювання температури дозволяє краще зрозуміти рівень розвитку галузі, наявні технології, підходи до реалізації та комерційні варіанти для різних сфер застосування. Нижче подано узагальнений розповідний аналіз основних типів багатоканальних рішень, які представлені на ринку на сьогоднішній день.

На сучасному ринку представлені різноманітні багатоканальні системи вимірювання температури, які розрізняються за призначенням, технічними характеристиками, ціною та способом підключення сенсорів. Їх умовно можна поділити на три великі групи: DIY-рішення на базі мікроконтролерів, комерційні пристрої загального призначення та промислові системи.

DIY-рішення на базі Arduino / ESP32 / Raspberry Pi

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		24

Однією з найпоширеніших категорій є саморобні багатоканальні системи на базі мікроконтролерів. Такі пристрої зазвичай використовують цифрові температурні сенсори DS18B20 або аналогові LM35, TMP36 у поєднанні з аналоговими мультиплексорами (74HC4051, 74HC4067). Завдяки простоті реалізації та низькій вартості, подібні рішення широко застосовуються у навчальних проєктах, прототипуванні, «розумному домі» та аграрних проєктах.

Перевагою таких систем є гнучкість у розробці — розробник сам обирає кількість каналів, тип сенсорів, спосіб виведення та логування даних. Наприклад, пристрій на базі ESP32 дозволяє реалізувати бездротову передачу даних Wi-Fi або Bluetooth, що є особливо корисним для розподілених сенсорних мереж.

Комерційні системи загального призначення

На ринку також присутні готові багатоканальні вимірювальні модулі, розраховані на широку аудиторію користувачів. Серед популярних рішень варто згадати:

- Inkbird IBS-M1 — Wi-Fi концентратор для температурних зондів, орієнтований на побутове застосування, наприклад, у виноробстві, акваріумістики чи гриль-системах. Працює з кількома бездротовими датчиками одночасно.

- Термометр T-056МК — вітчизняне рішення для моніторингу температури у серверних, холодильних або складських приміщеннях. Підтримує до 10 сенсорів DS18B20, має екран та зручне меню.

Ці рішення зазвичай мають збалансовану функціональність, простий інтерфейс керування, обмежену кількість каналів (4–16) та орієнтуються на побутові або напівпромислові завдання.

Промислові багатоканальні системи

Промислові пристрої є більш дорогими, але забезпечують високу надійність, захист від впливу зовнішніх факторів, довговічність та точність:

- Siemens LOGO! або S7 з модулями аналогового вводу для температурних сигналів (Pt100, термопари) дозволяють створювати гнучкі багатоканальні системи з програмованою логікою.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

– WIKA TSD-30, Endress+Hauser TMT182 — високоточні вимірювальні перетворювачі з цифровим виходом і підтримкою HART або Modbus. Такі системи використовуються в енергетиці, хімічній промисловості, фармацевтиці.

– National Instruments (NI) пропонує модульні системи збору температурних даних із високою частотою дискретизації, призначені для наукових досліджень та випробувань.

Промислові рішення зазвичай підтримують гарячу заміну датчиків, мають ізольовані канали, можуть працювати в екстремальних умовах, а також включають вбудовану діагностику.

Онлайн-сервіси та IoT-інтеграція

Зі зростанням популярності Інтернету речей (IoT) дедалі більше рішень пропонують можливість віддаленого моніторингу температурних каналів через хмарні сервіси. Наприклад, платформи типу ThingSpeak, Blynk, Tasmota, Home Assistant підтримують інтеграцію з багатоканальними пристроями через MQTT або HTTP. Це особливо зручно для систем розумного дому, агропромислових комплексів, логістичних рішень або лабораторного моніторингу.

Сучасні багатоканальні системи вимірювання температури охоплюють дуже широкий спектр — від найпростіших Arduino-рішень до складних промислових систем. Для кваліфікаційної роботи доцільно зосередитися на доступних, модульних та гнучких рішеннях, таких як Arduino + доступний сенсор, які дозволяють легко масштабувати систему, інтегрувати її з доступними інтерфейсами та забезпечити просте виведення даних. Водночас аналіз промислових систем дозволяє оцінити можливості подальшої модернізації проєкту або перспективи впровадження в реальних умовах.

1.4. Вибір оптимального підходу для розробки – обґрунтування вибору датчиків та методів вимірювання

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розробка багатоканального пристрою для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 100 °C на основі мікроконтролера з використанням як аналогових, так і цифрових сенсорів є технічно доцільним і практично виправданим рішенням. Такий підхід забезпечує високу гнучкість системи, універсальність щодо вибору сенсорів і можливість адаптації до широкого спектра застосувань — від побутових і лабораторних вимірювань до промислових і автоматизованих систем контролю.

Обґрунтування використання мікроконтролера

Мікроконтролер (наприклад, STM32, ESP32, Arduino, RP2040 тощо) виступає як центральна обчислювальна і керуюча одиниця системи. Його застосування дозволяє:

- Обробляти сигнали з різних типів сенсорів — як аналогових, так і цифрових — завдяки наявності вбудованих АЦП, цифрових шин зв'язку (I2C, SPI, UART, 1-Wire), таймерів, ШІМ та інших периферійних модулів.
- Гнучко програмувати логіку вимірювань: реалізовувати алгоритми усереднення, фільтрації, температурної компенсації, калібрування, контролю порогів, зберігання та передачі даних.
- Забезпечити розширення функцій без зміни апаратної частини, наприклад, додавання нових каналів, режимів вимірювання, інтерфейсів зв'язку (Wi-Fi, Bluetooth, Ethernet) тощо.
- Інтегруватися в IoT-системи для віддаленого моніторингу або керування через мережу (MQTT, HTTP, Modbus TCP).
- Оптимізувати енергоспоживання — у багатьох мікроконтролерах передбачено режими сну, що дозволяє застосовувати пристрій в автономному чи мобільному режимі.

Таким чином, мікроконтролер є ключовим елементом, що забезпечує як обчислювальну потужність, так і системну інтеграцію всіх компонентів.

Інтегральне використання аналогових і цифрових сенсорів

Комбінування аналогових і цифрових температурних сенсорів в одній системі забезпечує високу універсальність пристрою. Це дозволяє враховувати

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

особливості кожного типу сенсора залежно від технічних вимог, умов експлуатації та бюджету проекту.

- Аналогові сенсори (LM35, TMP36, термістори NTC/PTC тощо) мають просту схему підключення, швидкий відгук, ідеально підходять для недорогих багатоканальних систем, але вимагають точного аналого-цифрового перетворення, фільтрації та калібрування. Їх зручно застосовувати для вимірювань у контрольованих умовах або де допустима невелика похибка.

- Цифрові сенсори (DS18B20, TMP117, SHT3x) передають уже оцифровану інформацію, що дозволяє отримувати більш точні та стабільні результати навіть при наявності електромагнітних завад. Їх легко ідентифікувати та масштабувати — наприклад, декілька десятків DS18B20 можна підключити до однієї шини 1-Wire, що значно спрощує проводку.

Інтегральне застосування обох типів сенсорів дозволяє:

- оптимізувати витрати: цифрові сенсори використовуються лише в точках, де потрібна висока точність або надійність, тоді як аналогові — в менш критичних місцях.

- забезпечити гнучке конфігурування пристрою під різні задачі без потреби заміни всієї платформи.

- реалізувати масштабованість системи: легко додавати нові канали без зміни логіки обробки — достатньо дописати програмну підтримку відповідного сенсора.

- забезпечити різнорівневу реакцію системи — цифрові сенсори можуть використовуватись для прецизійного контролю і керування, аналогові — для швидкого моніторингу тенденцій або попереднього реагування.

Завдяки такій архітектурі пристрій стає придатним для роботи у різних середовищах — від лабораторій до «розумного дому», від агротехнічних систем до охолоджувального або нагрівального промислового обладнання.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		28

Таким чином, застосування мікроконтролера в поєднанні з інтегральним використанням аналогових та цифрових сенсорів створює універсальну платформу для температурного моніторингу, яка забезпечує адаптивність, розширюваність, ефективність за витратами і надійність. Така система є легко масштабованою та придатною до вдосконалення відповідно до вимог конкретного проєкту або сфери застосування.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2. РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ПРИСТРОЮ

2.1. Розробка структурної схеми багатоканального пристрою

В даному розділі аналізуються можливі архітектурні рішення структури багатоканального пристрою вимірювання температури, що забезпечує інтеграцію як аналогових температурних сенсорів типу термісторів, так і цифрових сенсорів. Особливу увагу приділено наявності функціонального блоку, який дозволяє реалізувати процедуру самокалібрування, що є актуальним для забезпечення довготривалої стабільності та точності вимірювань.

Пристрій призначений для одночасного збору даних з кількох температурних каналів, обробки сигналів, а також передачі інформації до вищого рівня обробки через дротові або бездротові інтерфейси. У ролі керуючого та комунікаційного елемента системи виступає мікроконтролер, що виконує збір, попередню обробку, уніфікацію та передавання вимірювальної інформації.

- основу багатоканального пристрою складають такі компоненти:
- аналогові сенсори температури — термістори, що потребують підключення до аналогових входів та попередньої обробки сигналу;
- цифрові сенсори температури — пристрої з вбудованим АЦП, які передають дані через цифрові інтерфейси (наприклад, I²C, 1-Wire);
- блок самокалібрування — додатковий функціональний модуль, що реалізує автоматичне коригування вимірювальних параметрів на основі еталонних джерел або контрольних вимірювань;
- мікроконтролер — обробляє, зберігає і передає вимірювальні дані;
- телекомунікаційний інтерфейс — забезпечує передавання даних до зовнішніх систем.

Залежно від кількості каналів, типу сенсорів та вимог до масштабованості системи, доцільно розглядати три основні варіанти структурної побудови: централізовану, ієрархічну та децентралізовану.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У централізованій структурі всі сенсори — як аналогові, так і цифрові — підключаються безпосередньо до одного мікроконтролера. Аналогові сенсори з'єднуються з вбудованими або зовнішніми АЦП, тоді як цифрові — через відповідні інтерфейси. Блок самокалібрування також реалізується в межах центрального контролера.

Переваги:

- спрощена конструкція;
- єдиний вузол керування і калібрування;
- менші енергетичні витрати.

Недоліки:

- обмеження по кількості каналів;
- менш гнучка система при розширенні;
- зниження надійності у випадку відмови центрального елемента.

Ієрархічна структура складається з декількох підлеглих модулів, кожен з яких обслуговує певну групу сенсорів. Ці модулі з'єднані з головним контролером, який об'єднує та передає дані. Блок самокалібрування може бути реалізований на рівні кожного модуля або централізовано.

Переваги:

- Можливість масштабування;
- Зниження навантаження на головний контролер;
- Підвищена точність калібрування за рахунок локальної обробки.

Недоліки:

- Ускладнення взаємодії між модулями;
- Більша кількість компонентів і вища вартість.

У децентралізованій системі кожен вимірювальний вузол (наприклад, на базі ESP32 або STM32) функціонує автономно, з локальним збором, обробкою та самокалібруванням даних. Передача даних відбувається безпосередньо до центрального серверу або у хмару.

Переваги:

- Максимальна гнучкість у розміщенні сенсорів;

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

- Підвищена відмовостійкість;
- Незалежна робота кожного вузла.

Недоліки:

- Підвищена складність управління та синхронізації;
- Збільшене енергоспоживання;
- Необхідність уніфікації форматів даних на рівні сервера.

Варіанти реалізації аналого-цифрового перетворення.

У системі, що використовує термістори, критичним є вибір схеми АЦП.

Можливі такі варіанти:

- використання вбудованих АЦП мікроконтролера — забезпечує простоту реалізації, але обмежується по точності та кількості каналів.
- підключення зовнішніх АЦП (наприклад, ADS1115) — дозволяє досягти вищої роздільної здатності, покращеної стабільності та масштабованості.
- аналогові мультиплексори (наприклад, CD4051) у поєднанні з одним каналом АЦП — дозволяють обслуговувати велику кількість сенсорів, проте потребують ретельної синхронізації та компенсації перешкод.

Аналіз запропонованих варіантів показує, що вибір структури повинен базуватись на вимогах до точності вимірювань, кількості каналів, масштабованості та умов експлуатації [2-4]. Централізована структура є доцільною для простих систем з обмеженою кількістю сенсорів. Ієрархічна структура забезпечує кращу гнучкість і точність, що робить її оптимальною для середніх за складністю систем. Децентралізований підхід найкраще підходить для розподілених мереж з високими вимогами до надійності та адаптивності.

Враховуючи переваги та недоліки кожного з варіантів побудови структурної схеми – як базову, обираємо централізовану структуру. Даний вибір обґрунтовується завданням, тобто, розробляється пристрій. Пристрій сам по собі є нескладною структурою, особливої гнучкості та масштабованості не потребує. Крім того, умовами кваліфікаційної роботи не передбачені особливі вимоги до точності пристрою, то аналого-цифровий перетворювач пропонується

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

використати той, що входить в склад контролера. Виходячи з приведених міркувань, структура багатоканального пристрою вимірювання температури буде мати наступний вид – рисунок 2.1.

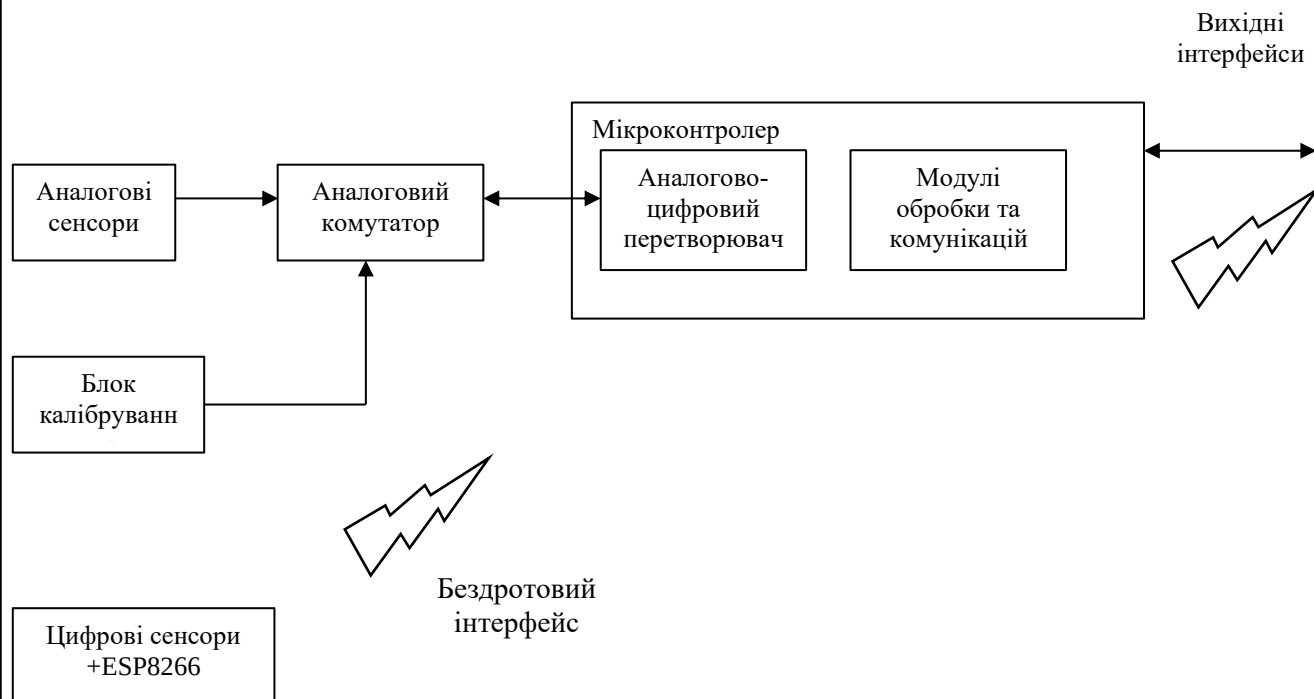


Рисунок 2.1 - Структура багатоканального пристрою вимірювання температури

Таким чином, розроблена структура багатоканального пристрою вимірювання температури передбачає підключення до нього по дротовому інтерфейсу аналогових сенсорів – термісторів, а по бездротовому цифрових сенсорів. Блок самокалібрування передбачається виконати з використання дротового підключення до мікроконтролера. Використання вбудованого аналого-цифрового перетворювача передбачає введення в схему аналогового комутатора. Для забезпечення можливості використання даного пристрою в складі автоматизованих систем в структурі передбачені зовнішні як дротові, так і бездротові інтерфейси.

2.2. Обґрунтування та вибір елементної бази

Для побудови багатоканального пристрою вимірювання температури в діапазоні від 0 до 100 °C доцільно використовувати NTC-термістори, які підключаються до мікроконтролера через аналоговий комутатор. Вибір саме NTC-термісторів обумовлений їх високою чутливістю до змін температури в цьому діапазоні, хорошою стабільністю, а також широкою доступністю на ринку.

Основними критеріями при виборі термістора є наявність робочого температурного діапазону, який перекриває необхідний інтервал (наприклад, від -40 до +125 °C), висока точність (не гірше ± 1 °C), а також відповідний номінальний опір — найчастіше обирають 10 кОм при 25 °C. Такий опір забезпечує зручну роботу з вбудованими АЦП мікроконтролерів і не створює надмірного навантаження на аналоговий комутатор.

Серед рекомендованих моделей термісторів можна виділити Murata NCP18WF104F03RC, Vishay NTCLE100E3103JB0, TDK B57330V2103J060 та EPCOS B57540G1104F. Всі ці термістори мають номінальний опір 10 кОм при 25 °C, широкий температурний діапазон, низьку похибку та хорошу довготривалу стабільність. Деякі моделі також мають більш високий номінал опору, наприклад 100 кОм, що може бути корисно при довгих лініях зв'язку або у випадках підвищеного електричного шуму.

Аналогові комутатори, які застосовуються в такій системі (наприклад, 74HC4051 або CD74HC4067), повинні бути сумісні з опорами термісторів. Бажано, щоб опір термістора не був меншим за 1 кОм, оскільки це може викликати спотворення сигналу через втрати у комутаторі. Для зчитування напруги з термісторного дільника доцільно використовувати мікроконтролер із розрядним АЦП (не менше 12 біт), або зовнішній прецизійний АЦП. Крім того, варто використовувати резистори з високою точністю (не гірше 1 %), щоб забезпечити стабільну та точну роботу вимірювального каналу.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

Вибір термісторів із номіналом 10 кОм є оптимальним, оскільки вони забезпечують достатню чутливість до температури, мають помірне енергоспоживання та добре узгоджуються з аналоговими комутаторами і вхідними характеристиками АЦП. Завдяки широкій підтримці та наявності температурних таблиць або В-коефіцієнтів, забезпечується можливість точного обчислення температури за показами АЦП [1-3].

В-коефіцієнт, або бета-коефіцієнт, є температурним коефіцієнтом, який описує залежність опору NTC-термістора від температури. Він використовується в спрощеній математичній моделі для обчислення температури за відомим опором термістора, без необхідності використовувати таблиці відповідності опору і температури.

Цей коефіцієнт входить у формулу, яка пов'язує опір термістора з температурою, вираженою в кельвінах.

$$R_T = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

Згідно з цією формулою, опір термістора при певній температурі визначається як номінальний опір при стандартній температурі (зазвичай 25 °C), помножений на експоненту, що містить В-коефіцієнт і різницю зворотних значень температури в Кельвінах.

Типові значення В-коефіцієнта для NTC-термісторів знаходяться в межах від 3000 до 4500 К. Наприклад, термістор із коефіцієнтом 3435 К добре описує зміну свого опору в діапазоні температур від 0 до 100 °C.

Використання В-коефіцієнта дозволяє обчислювати температуру за допомогою мікроконтролера аналітичним способом, без потреби в зовнішніх таблицях. Проте слід враховувати, що така модель є наближеною і забезпечує достатню точність лише в обмеженому діапазоні температур. Для більш точних обчислень використовуються розширені моделі, наприклад рівняння Штайнхарта—Гарта або калібровані таблиці.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

Таким чином, В-коефіцієнт є зручним інженерним параметром, який спрощує побудову недорогих і ефективних систем вимірювання температури.

У ситуації, коли термістори розміщені на відстані, а всі інші елементи схеми — резистори дільника, джерело живлення, аналоговий комутатор і мікроконтролер — зосереджені в одному місці (наприклад, на платі), доцільно підключати термістори за допомогою двох окремих провідників. У цьому випадку комутують обидва виводи кожного термістора. Такий підхід дозволяє уникнути паразитних струмів, наведень та взаємного впливу між сенсорами, що особливо важливо при довгих провідниках. В ролі апаратного рішення пропонується використати аналоговий комутатор ADG409BN – рисунок 2.2.

Мікросхема ADG409BN виробництва фірми Analog Devices є аналоговим мультиплексором/демультиплексором із конфігурацією 4:1, який використовується для комутації аналогових сигналів. Вона дозволяє вибирати один із чотирьох аналогових входів і спрямовувати його на один вихід (або навпаки в режимі демультиплексора). ADG409BN виконана за CMOS-технологією, що забезпечує низьке енергоспоживання, високу швидкість перемикання та сумісність із широким діапазоном напруг.

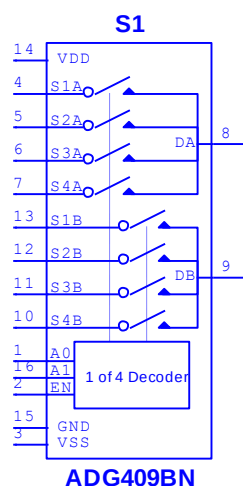


Рисунок 2.2 – Мікросхема аналоговий комутатора

ADG409BN працює як аналоговий комутатор, який за допомогою цифрових сигналів керування вибирає один із чотирьох аналогових входів (S1–

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

S4) і з'єднує його з вихідним виводом (D). У режимі демультіплексора сигнал із виведення D спрямовується до одного з чотирьох входів S1–S4. Вибір каналу здійснюється через два цифрових входи керування (A0 і A1), які визначають, який із входів буде активним. Мікросхема також має вивід увімкнення (EN), який дозволяє активувати або деактивувати весь комутатор: при низькому рівні сигналу на EN усі канали вимикаються, що переводить мікросхему в стан високого імпедансу. Вибір активного каналу залежить від комбінації сигналів на входах A0, A1 та стану EN:

- A1 = 0, A0 = 0: активний канал S1.
- A1 = 0, A0 = 1: активний канал S2.
- A1 = 1, A0 = 0: активний канал S3.
- A1 = 1, A0 = 1: активний канал S4.

Наступним кроком буде обґрунтування вибору мікроконтролера з врахуванням вимог до аналого-цифрового перетворювача. АЦП, або аналого-цифровий перетворювач, є ключовим елементом мікроконтролера в пристроях Arduino, STM32, коли потрібно вимірювати аналогові сигнали, наприклад, з термісторів. Він перетворює аналогову напругу у цифрове значення, яке мікроконтролер може обробити програмно. В різних моделях Arduino використовуються мікроконтролери з АЦП різної розрядності, швидкості та якості.

У базових платах, таких як Arduino Uno або Nano, використовується 10-бітний АЦП мікроконтролера ATmega328P, який дозволяє розділяти вхідний сигнал на 1024 рівні. Цього може бути недостатньо для точного вимірювання температури. У більш сучасних платах, таких як Arduino Due або ESP32, застосовуються 12-бітні або навіть 16-бітні АЦП, які забезпечують вищу точність та швидкість оцифрування. Порівняння характеристик поширених мікроконтролерів приведено в таблиці 2.1.

При побудові пристрою вимірювання температури, особливо коли в системі присутні ще й цифрові сенсори з бездротовим інтерфейсом, важливо враховувати кілька факторів.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

Таблиця 2.1 - Порівняння характеристик АЦП в поширених мікроконтролерах

Плата Arduino	МК	Розрядність АЦП	Канали	Опорна напруга	Інші особливості
Uno / Nano	ATmega328P	10 біт (0–1023)	6	5 В / 1.1 В	Простий, неточний
Mega 2560	ATmega2560	10 біт	16	5 В / 1.1 В	Багато каналів
Leonardo	ATmega32u4	10 біт	12	5 В / 1.1 В	USB без UART, схоже на Uno
Due	ATSAM3X8E (ARM Cortex-M3)	12 біт (0–4095)	12	до 3.3 В	Вищий розряд, швидший
Portenta H7	STM32H747	12–16 біт	до 24	до 3.3 В	Професійний рівень
ESP32	Tensilica Xtensa LX6	12 біт	до 18	до 3.3 В	Має вбудований Wi-Fi
RP2040	Raspberry Pi RP2040	12 біт	3	до 3.3 В	Дешевий, швидкий

АЦП повинен мати достатню розрядність (12 біт і вище), стабільну опорну напругу, стійкість до електричних завад і бажано можливість апаратного усереднення сигналу. Крім того, мікроконтролер повинен мати достатній обчислювальний ресурс і підтримку бездротового зв'язку.

Оптимальним вибором у такому випадку є мікроконтролер ESP32 – рисунок 2.3. Він має вбудований 12-бітний АЦП з кількома каналами, підтримує Wi-Fi і Bluetooth, і при цьому залишається доступним за ціною.



Рисунок 2.3 – Мікроконтролер ESP32 S3

Цей мікроконтролер добре підходить для поєднання аналогових і цифрових сенсорів в одному пристрої. Для складніших задач або коли потрібна вища точність, можна використовувати STM32, наприклад, плату Portenta H7, або підключити зовнішній прецизійний АЦП, такий як ADS1115 чи ADS1248. У випадках, коли бюджет обмежений, хорошим варіантом може бути Raspberry Pi Pico з мікроконтролером RP2040, який має 12-бітний АЦП, хоча без вбудованого бездротового зв'язку.

Таким чином, для нашого пристрою найкращим варіантом є ESP32, оскільки він поєднує достатню точність аналогових вимірювань із можливістю підключення цифрових бездротових сенсорів.

Цифрові сенсори температури з бездротовим інтерфейсом — це сучасні пристрої, призначені для вимірювання температури навколишнього середовища та передачі отриманих даних без використання фізичних кабелів [7]. Вони складаються з чутливого елемента, який реагує на зміни температури, аналого-цифрового перетворювача для обробки сигналу та модуля бездротового зв'язку, такого як Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee або LoRa. Ці сенсори забезпечують високу точність вимірювань, часто в межах $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, і можуть працювати в широкому діапазоні температур, наприклад, від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$, залежно від моделі — таблиця 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз можливостей використання бездротових сенсорів

Сенсор/Модуль	Інтерфейс	Точність ($^{\circ}\text{C}$)	Відстань передачі	Переваги
BME280+ESP8266/ESP32	Wi-Fi/Bluetooth	± 1	100 м (Wi-Fi), 10 м (BLE)	Універсальність, хмарна інтеграція
TI CC3200	Wi-Fi	± 2	100 м	Інтегрований Wi-Fi
STS3x+Zigbee/LoRa	Zigbee/LoRa	± 0.2	100 м (Zigbee), 10 км (LoRa)	Висока точність, дальність
Xiaomi Mijia	Bluetooth (BLE)	± 0.3	10-20 м	Простота, д

Для підключення датчика до модуля виконайте наступне: з'єднайте пін GND датчика з піном GND на ESP8266, пін VCC датчика підключіть до джерела живлення 3.3V або 5V на модулі (залежно від моделі датчика), а пін DQ (дані) приєднайте до будь-якого цифрового піна, наприклад, D4. Між пінами DQ і VCC необхідно встановити підтягуючий резистор на 4.7 кОм, щоб забезпечити стабільний зв'язок.

Для розробки схеми електричних з'єднань аналогових сенсорів температури використаємо ППП NI Multisim. Програмне забезпечення NI Multisim — це потужний інструмент для схемотехнічного моделювання та проектування електронних схем, розроблений компанією National Instruments. Воно широко використовується в освітніх закладах і промисловості для створення, аналізу та тестування аналогових, цифрових і силових електронних

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		40

схем. Ось основні характеристики NI Multisim, викладені розповідними реченнями:

NI Multisim є частиною пакету NI Circuit Design Suite і базується на стандартному симуляторі SPICE, що забезпечує точне моделювання поведінки електронних схем. Програма пропонує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який дозволяє користувачам легко створювати схеми, проводити їх аналіз і візуалізувати результати. Вона підтримує бібліотеку з понад 55 000 компонентів, верифікованих виробниками, включаючи моделі від National Semiconductor, Analog Devices, Texas Instruments та інших, що робить її універсальним інструментом для різноманітних проєктів.

Програма підтримує моделювання як аналогових, так і цифрових схем, що дозволяє розробляти складні мікроелектронні пристрої. Вона містить віртуальні вимірювальні прилади, які імітують реальні аналоги, такі як осцилографи, мультиметри та аналізатори сигналів, що спрощує перевірку поведінки схем. Завдяки інтеграції з NI Ultiboard, Multisim забезпечує безперервний перехід від створення схеми до проектування друкованих плат, зменшуючи кількість ітерацій прототипів.

NI Multisim доступний у двох основних версіях: Professional і Education. Версія Education призначена для навчальних закладів і включає навчальні курси, інтерактивні компоненти та можливість інтеграції з апаратними платформами, такими як NI myDAQ і NI ELVIS, для створення віртуальних лабораторій. Версія Professional орієнтована на промислове використання, пропонуючи розширені методи аналізу та інструмент Convergence Assistant, який автоматично виправляє помилки моделювання SPICE.

Програма підтримує 20 типів аналізу, що дозволяють виявляти обмеження схем і неефективність дизайну на ранніх етапах розробки. Вона інтегрується з NI LabVIEW, що дає змогу порівнювати теоретичні дані з реальними вимірюваннями, зменшуючи помилки та прискорюючи розробку. Multisim також підтримує моделювання програмованих логічних пристроїв (PLD) і дозволяє

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

розгорнути схеми на платформах Digilent FPGA, що є корисним для вивчення Verilog або VHDL.

Multisim відповідає стандартам IEEE і включає інструменти для графічного аналізу результатів, що полегшує інтерпретацію даних. Програма працює на Windows (XP, Vista, 7, 32/64 біти) і доступна за передплатою або як постійна ліцензія. Для навчальних цілей існує також Multisim Live — онлайн-версія з базою даних із 30 000 схем, яка працює на будь-якому пристрої. Завдяки цим можливостям NI Multisim є ефективним інструментом для навчання, дослідження та професійного проектування електронних схем.

Основною електричною схемою, яку потрібно розробити для багатоканального пристрою вимірювання температури, є аналоговий комутатор сигналів термісторів на вхід АЦП – рисунок 2.5 [4-6].

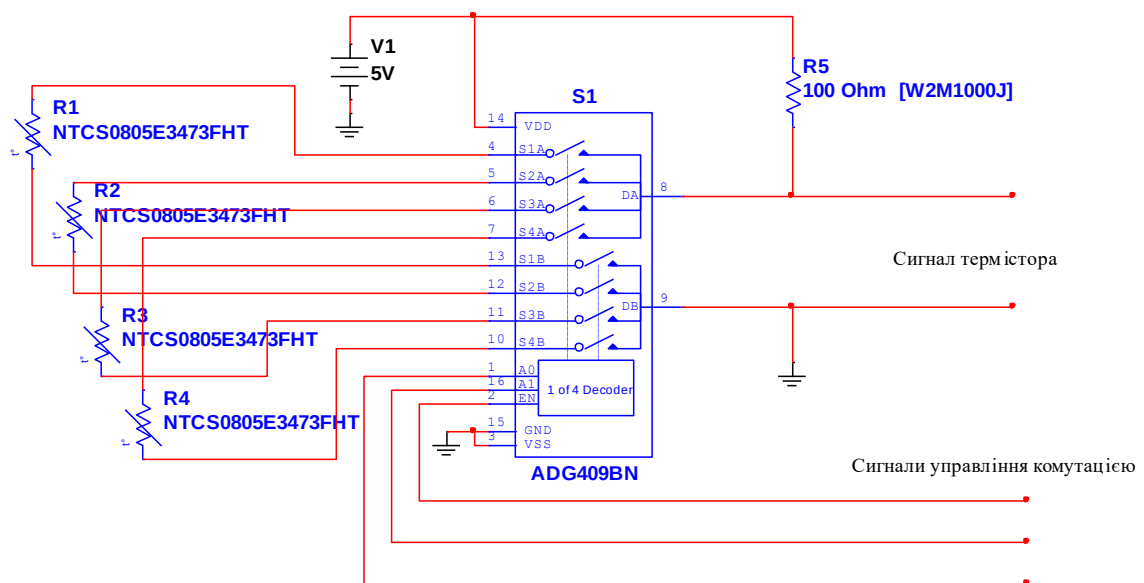


Рисунок 2.5 – Аналоговий комутатор сигналів аналогових сенсорів

Вихідний дільник, який перетворює опір термістора в напругу утворений R5 та вихідним сигналом ADG400BN.

Блок самокалібрування сенсорів, як аналогових, так і цифрових пропонується виконати з використанням зразкового термометра опору. Це може бути як мідний, так і більш точний платиновий. Тип термометра опору

уточнюється в залежності від умов експлуатації та забезпечення необхідної точності і виконується по схемі дільника напруги.

Таким чином, в даному розділі обґрунтована та розроблено апаратне забезпечення багатоканального пристрою вимірювання температури в діапазоні 0-100 градусів.

2.4. Особливості визначення невизначеності вимірювань та калібрування сенсорів

У даному дослідженні розглядається система вимірювання температури, яка поєднує як цифрові сенсори DS18B20, так і аналогові термістори. При цьому передача сигналу від термісторів до мікроконтролера ESP32 здійснюється через аналоговий мультиплексор ADG409. Такий підхід дозволяє підключити декілька аналогових сенсорів до одного АЦП ESP32, оптимізуючи кількість використовуваних пінів [8-10].

Цифровий сенсор DS18B20 працює за протоколом 1-Wire і напряму з'єднується з GPIO мікроконтролера. Він має внутрішню калібровку та забезпечує типову точність вимірювання ± 0.5 °C у діапазоні температур від -10 до +85 °C. Завдяки цифровому виходу він менш чутливий до впливу перешкод, хоча для стабільної роботи потребує використання підтягувача (наприклад, 4.7 кОм).

На відміну від DS18B20, термістори формують аналоговий сигнал, який після проходження через комутатор ADG409 надходить до АЦП ESP32. У такій конфігурації джерелом похибок можуть бути кілька чинників. Насамперед, аналоговий комутатор ADG409 вносить додатковий опір у ланцюг (типово 35–100 Ом) та має невеликі інжекційні струми, які можуть викликати короточасні сплески напруги при перемиканні каналів. Для їх придушення доцільно застосовувати прості RC-фільтри на виході кожного каналу.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

Точність вимірювання також залежить від характеристик АЦП ESP32, який має номінальну розрядність 12 біт, проте через шум ефективна точність становить близько 11 біт. Напруга на вході АЦП часто коливається через нестабільне живлення або змінну опорну напругу, тому для підвищення точності варто виконувати калібрування АЦП або використовувати середнє значення декількох вимірів.

Ще одним джерелом похибки є сам термістор, оскільки його опір залежить від температури нелінійно. Для перетворення напруги у температуру потрібно використовувати апроксимаційні методи, такі як рівняння Стейнхарта–Гарта або табличні залежності. Найкращих результатів можна досягти шляхом еталонного калібрування — порівняння показів термістора з точно відомою температурою, наприклад, від термометра опору, і побудови корекційної функції на основі отриманих даних.

Під час калібрування особливу увагу слід приділити резисторам, які утворюють ділник напруги з термістором. Використання резисторів з високою точністю (0.1%) дозволяє мінімізувати вплив їх відхилення на загальну точність вимірювання.

За результатами оцінки очікувана точність цифрового сенсора DS18B20 після програмного згладжування може досягати ± 0.25 °C. Для термісторів, за умови правильного калібрування, використання фільтрації та стабільного живлення, можна досягти точності на рівні ± 0.5 °C, що є цілком прийнятним для багатьох застосувань.

Таким чином, поєднання цифрових і аналогових сенсорів у системі на базі ESP32 з використанням комутатора ADG409 є ефективним рішенням, проте потребує ретельного підходу до калібрування, фільтрації та контролю похибок на кожному етапі обробки сигналу.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44

3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИСТРОЮ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ

3.1. Алгоритм збору та обробки даних сенсорів

У розробленій вимірювальній системі використовується комбінація аналогових і цифрових сенсорів температури, що забезпечує гнучкість та розширюваність під час побудови багатоканальних пристроїв з уніфікованим керуванням. Зчитування інформації з усіх типів сенсорів організовано за єдиним алгоритмом, реалізованим на базі мікроконтролера ESP32.

На етапі ініціалізації конфігуруються всі апаратні інтерфейси, зокрема виводи керування аналоговим мультиплексором ADG409BM (входи вибору каналу A0, A1 і сигнал увімкнення EN), пін для зчитування аналогового сигналу в АЦП мікроконтролера, а також цифровий пін, до якого підключено сенсори DS18B20 через 1-Wire інтерфейс ESP8622. Ініціалізуються відповідні бібліотеки, драйвери та внутрішні структури для зберігання результатів вимірювання [8-12].

Алгоритм збору даних реалізується у вигляді циклічного опитування цифрових та аналогових сенсорів – рисунок 3.1. Спочатку здійснюється зчитування температури з цифрових сенсорів DS18B20. Для цього мікроконтролер надсилає команду на запуск вимірювання температури для всіх сенсорів на шині 1-Wire, після чого очікує завершення процесу конверсії. Після цього дані зчитуються з кожного сенсора за його унікальним ідентифікатором, а отримані значення температури фіксуються разом з часовою міткою.

Далі здійснюється опитування аналогових сенсорів, підключених через мультиплексор ADG409BM. Мікроконтролер послідовно активує кожен канал мультиплексора, подаючи відповідні сигнали на входи A0 і A1 та активуючи мультиплексор (EN = 0). Після короткої затримки для стабілізації сигналу проводиться вимірювання напруги на активному каналі за допомогою внутрішнього АЦП ESP32. Отримані значення напруги обробляються відповідно до характеристик підключеного сенсора (наприклад, через використання таблиці апроксимації або аналітичної залежності) та перетворюються у значення

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		45

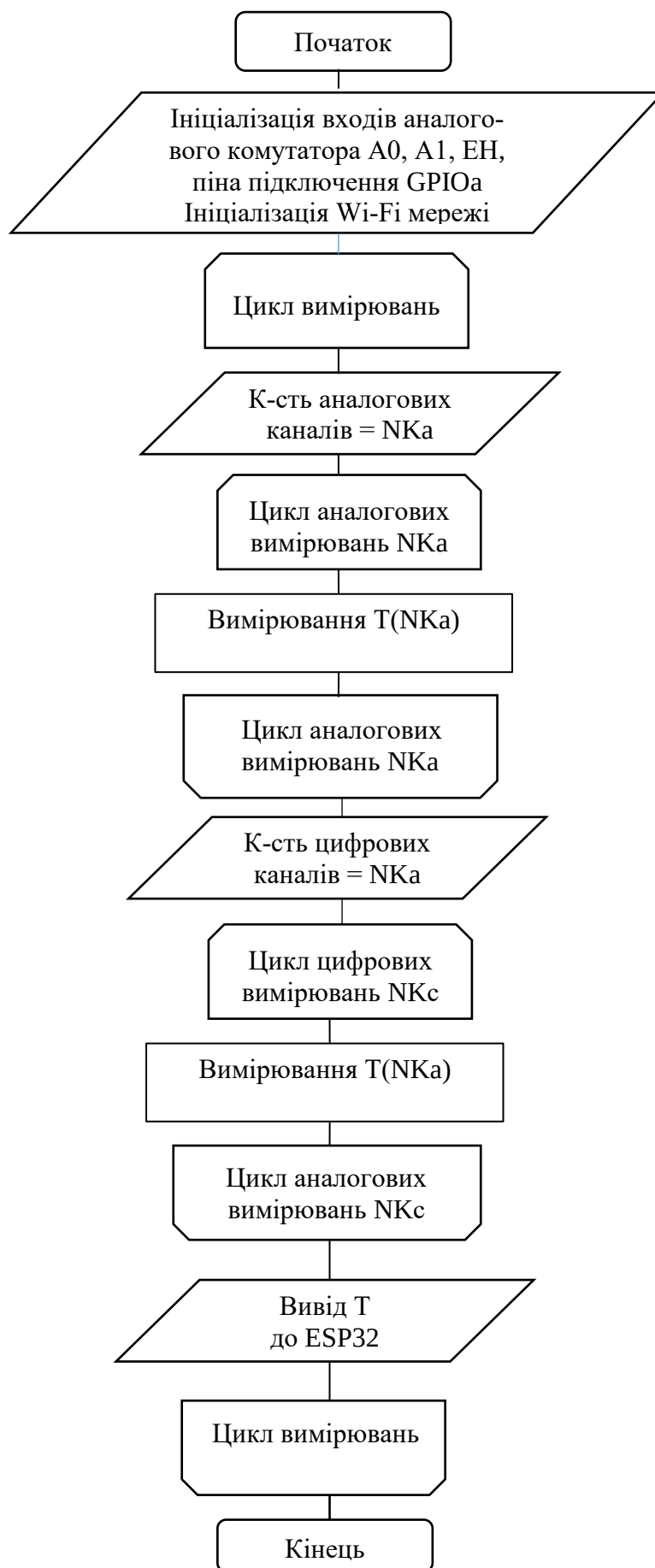


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму вимірювання температури в багатоканальній пристрої

температури. Кожен результат вимірювання також фіксується з прив'язкою до конкретного каналу та часу.

Один із каналів мультиплексора зарезервовано для підключення еталонного температурного сенсора, який використовується для калібрування. Після зчитування температури з еталонного каналу отримане значення використовується як базове для корекції результатів інших аналогових сенсорів. Це дозволяє зменшити вплив дрейфу характеристик, нелінійності АЦП або температурної нестабільності окремих компонентів.

У разі використання операційної системи реального часу (FreeRTOS), кожна група сенсорів може обслуговуватися в окремих задачах з пріоритетами, що додатково підвищує стабільність і масштабованість системи.

Алгоритм повторюється з заданою періодичністю, яка залежить від умов експлуатації, вимог до точності та динаміки температурного процесу.

Таким чином, в даному розділі розроблено та описано алгоритм функціонування багатоканального пристрою вимірювання температури.

3.2. Налаштування програмного середовища та реалізація процесу збору інформації аналогових сенсорів

Процес налаштування середовища Arduino IDE для роботи з термісторами через аналоговий комутатор по дротовому каналу до контролера ESP32, а також з цифровими температурними сенсорами, що передають дані по Wi-Fi з модуля ESP8266 до того ж ESP32, охоплює кілька етапів – від встановлення необхідних бібліотек до організації обміну даними між пристроями.

Спочатку необхідно встановити Arduino IDE або оновити її до актуальної версії. У налаштуваннях середовища, у розділі *Файл* → *Налаштування*, в полі «Додаткові URL-адреси для менеджера плат» слід додати посилання на плату ESP32, наприклад: https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package_esp32_index.json.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		47

Після цього потрібно відкрити *Інструменти* → *Плата* → *Менеджер плат*, знайти “esp32” і встановити відповідну підтримку від розробника Espressif Systems.

Далі налаштовується робота термісторів, які підключаються до ESP32 через аналоговий комутатор ADG409. Кожен термістор з'єднується в дільник напруги, а вихід дільника підключається до одного з каналів комутатора. Вихід комутатора з'єднується з аналоговим входом ESP32. Керуючі входи комутатора приєднуються до цифрових виходів ESP32, які формують бітову адресу активного каналу. У програмному коді Arduino IDE потрібно реалізувати логіку перемикання каналів через `digitalWrite()` і зчитування напруги `analogRead()`. Щоб отримати температуру, напруга обробляється за формулою Стейнхарта-Харта або іншим методом, що відповідає характеристикам термістора.

Після цього налаштовується обробка температурних даних, які надсилає модуль — ESP8266 [7]. На ньому виконується програма, що зчитує температури з цифрових сенсорів DS18B20 і передає дані на ESP32 через Wi-Fi. Це може бути реалізовано через протокол HTTP або через MQTT, залежно від обраної архітектури обміну. На стороні ESP32 необхідно підключити бібліотеку `WiFi.h` для встановлення з'єднання з мережею Wi-Fi та `HTTPClient.h` або `PubSubClient.h` для отримання даних від ESP8266. У програмі ESP32 виконується регулярне опитування вузла ESP8266, або обробляється вхідне повідомлення, якщо використовується підписка через MQTT. У результаті, ESP32 збирає температурну інформацію з двох каналів: локального аналогового (через термістори і комутатор) та бездротового цифрового (через Wi-Fi від ESP8266). Цей підхід дозволяє створити гнучку систему моніторингу температури, яка легко масштабується і може працювати в розподіленому середовищі IoT. Нижче приведено приклад фрагмента скетчу для ESP32, який здійснює циклічне опитування трьох термісторів, підключених через аналоговий комутатор ADG409BN, з коментарями до кожного кроку – рисунок 3.2.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48


```

// Пини ESP32, підключені до входів керування ADG409
const int EN_PIN = 14;    // Пін Enable (активний низьким рівнем)
const int A0_PIN = 12;    // Адреса A0
const int A1_PIN = 13;    // Адреса A1

// Пін, до якого підключено вихід комутатора (до АЦП ESP32)
const int ANALOG_IN_PIN = 34; // Вхід ESP32 з ADG409 (має підтримувати analogRead)

float temperatures[3]; // Масив для збереження результатів вимірювання температур

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

    // Ініціалізація цифрових виходів
    pinMode(EN_PIN, OUTPUT);
    pinMode(A0_PIN, OUTPUT);
    pinMode(A1_PIN, OUTPUT);

    // Увімкнення комутатора (EN = LOW – активний стан)
    digitalWrite(EN_PIN, LOW);
}

void loop() {
    for (int channel = 0; channel < 3; channel++) {
        // Встановлення адреси каналу на лінії A0 та A1
        digitalWrite(A0_PIN, channel & 0x01); // молодший біт
        digitalWrite(A1_PIN, (channel >> 1) & 0x01); // старший біт

        delay(5); // Невелика затримка для стабілізації сигналу після перемикання

        // Зчитування аналогового значення з обраного термістора
        int adcValue = analogRead(ANALOG_IN_PIN);

        // Перетворення в температуру (для прикладу – лінійне, потрібно адаптувати до характеристик термістора)
        float voltage = adcValue * 3.3 / 4095.0; // перетворення АЦП у напругу (3.3В опорне)
        float temperature = convertVoltageToTemperature(voltage); // користувацька функція

        // Збереження значення в масив
        temperatures[channel] = temperature;

        // Вивід у монітор порту
        Serial.print("Sensor ");
        Serial.print(channel);
        Serial.print(": ");
        Serial.print(temperature);
        Serial.println(" °C");

        delay(500); // Затримка перед наступним каналом
    }

    delay(2000); // Затримка між повними циклами опитування
}

// *** Приклад простої функції перетворення напруги у температуру ***
// Замість неї слід використовувати модель, яка відповідає типу термістора (наприклад, Стейнхарт-Харт)
float convertVoltageToTemperature(float voltage) {
    // Тут припускаємо, що діляник напруги з 10 кОм резистором та термістором
    float resistance = (voltage * 10000.0) / (3.3 - voltage); // обчислення опору термістора
}

```

Рисунок 3.2 – Фрагмент скетчу, що здійснює опитування аналогових сенсорів

Таким чином , в даному розділі були розглянуті питання налаштування Arduino IDE для роботи з контролером ESP32 та розроблено програмну реалізацію процесу вимірювання температури по трьох аналогових каналах.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ		Арк.
							49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			

3.3. Програмна реалізація збору інформації цифрових сенсорів

Для організації вимірювання температури цифровими сенсорами DS18B20 за допомогою модуля ESP8266, а також передавання результатів на ESP32 через Wi-Fi, потрібно виконати налаштування середовища Arduino IDE та реалізувати програмну взаємодію між модулями.

Спочатку в Arduino IDE додається підтримка плати ESP8266 через менеджер плат, де в налаштуваннях зазначається URL-адреса плати (наприклад, http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json). Аналогічно додається підтримка плати ESP32 за відповідним посиланням (наприклад, https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh-pages/package_esp32_index.json). У результаті обидві плати можуть бути програмовані з одного середовища.

На стороні ESP8266 підключається цифровий сенсор температури DS18B20, що працює за протоколом 1-Wire. Для взаємодії із сенсором використовується бібліотека OneWire у поєднанні з DallasTemperature. ESP8266 зчитує температуру в циклі 5 разів з певним інтервалом, накопичує ці значення, формує з них текстовий блок (наприклад, у форматі JSON або простого CSV) і передає його на ESP32 за допомогою Wi-Fi, використовуючи HTTP-запит типу POST [7].

На стороні ESP32 працює веб-сервер, який приймає вхідні запити від ESP8266, фрагмент скетчу приведено на рисунку 3.3.

Програма на ESP32 приймає ці дані, зберігає їх у пам'яті та за потреби обробляє або виводить у серійний монітор. Таким чином, реалізується бездротова взаємодія між двома модулями, що дозволяє централізовано збирати дані з віддалених цифрових сенсорів.

У цьому прикладі ESP8266 виступає як вузол збору температурних даних із сенсора DS18B20, який зберігає п'ять вимірювань і передає їх на ESP32 через Wi-Fi за допомогою HTTP-запиту. ESP32 приймає ці дані через вбудований веб-

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		50

сервер і може далі їх обробляти або зберігати. Такий підхід забезпечує гнучку архітектуру IoT-системи для віддаленого моніторингу температурних значень.

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <ESP8266HTTPClient.h>

// Налаштування сенсора
#define ONE_WIRE_BUS D4 // Пін підключення DS18B20
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// Налаштування Wi-Fi
const char* ssid = "Your_SSID";
const char* password = "Your_PASSWORD";

// IP ESP32 (отримує дані)
const char* esp32_host = "http://192.168.1.50/temperature"; // змініть IP
відповідно

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

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

void loop() {
    String payload = "";
    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        sensors.requestTemperatures(); // Запит вимірювання
        float tempC = sensors.getTempCByIndex(0);
        payload += String(tempC);
        if (i < 4) payload += ","; // Розділення значень
        delay(1000); // Затримка між вимірюваннями
    }

    // Відправка результатів на ESP32
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        HTTPClient http;
        http.begin(esp32_host);
        http.addHeader("Content-Type", "text/plain");
        int httpResponseCode = http.POST(payload);
        Serial.print("POST Status: ");
        Serial.println(httpResponseCode);
        http.end();
    }

    delay(10000); // Затримка перед наступною серією вимірювань
}
```

Рисунок 3.3 – Фрагмент скетчу вимірювання цифрових каналів

Фрагмент програмного коду для ESP32 (приймач) – рисунок 3.4.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

```

#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>

const char* ssid = "Your_SSID";
const char* password = "Your_PASSWORD";

// Створення HTTP-сервера на порту 80
WebServer server(80);

// Обробник POST-запиту з температурними даними
void handleTemperature() {
    if (server.method() == HTTP_POST) {
        String data = server.arg(0); // Отримання тіла запиту
        Serial.println("Отримано дані температури:");
        Serial.println(data);
        server.send(200, "text/plain", "OK");
    } else {
        server.send(405, "text/plain", "Метод не підтримується");
    }
}

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

    WiFi.begin(ssid, password);
    Serial.print("Підключення до WiFi");
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("\nWiFi з'єднано. IP-адреса ESP32:");
    Serial.println(WiFi.localIP());

    // Реєстрація обробника POST-запиту
    server.on("/temperature", HTTP_POST, handleTemperature);
    server.begin();
    Serial.println("HTTP-сервер запущено");
}

void loop() {
    server.handleClient();
}

```

Рисунок 3.4 - Фрагмент програмного коду для ESP32 (приймач)

Таким чином, в даному розділі розроблено та описано елементи розробки програмного забезпечення для ESP8266 виступає як вузол збору температурних даних із сенсорів DS18B20, який зберігає п'ять вимірювань і передає їх на ESP32 через Wi-Fi за допомогою HTTP-запиту. ESP32 приймає ці дані через вбудований веб-сервер і може далі їх обробляти або зберігати. Такий підхід забезпечує гнучку архітектуру IoT-системи для віддаленого моніторингу температурних значень.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи розглянуто особливості функціонування сенсорів температури різної природи та структури вимірювальних засобів для роботи з ними. Аналіз ринку сенсорів температури та пристроїв та систем для роботи з ними показав перспективність використання термісторів для вимірювань в багатьох сферах господарської діяльності.

Встановлено, що використання багатоканального пристрою дозволить оперативно отримувати достовірні дані про температуру в різних просторових температурних полів та забезпечить їх надійне функціонування без порушень технологічних процесів.

Для реалізації поставлених завдань розроблено структуру вимірювального пристрою на основі використання мікроконтролера. Обґрунтовано вибір аналогових сенсорів температури (термістори NTC 10K) та цифрового сенсора DS18B20. Аналіз технічних характеристик мікроконтролерів та аналого-цифрових перетворювачів у їх складі показав перспективність застосування мікроконтролерів ESP 8266 та ESP32. Це дозволить забезпечити використання цифрових сенсорів у віддалених місцях вимірювань та передачу результатів вимірювань по Wi-Fi. А для аналогових сенсорів передбачено безпосереднє підключення до АЦП за допомогою аналогового комутатора.

Здійснено апаратно-програмну реалізацію багатоканального пристрою вимірювання температури. Розроблено блок-схему алгоритму вимірювання температури та відповідні програмні скетчі прошивки мікроконтролера в середовищі Arduino IDE.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 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. Основи метрології та вимірювальної техніки / Лис, О.М., Якименко, М.В., Шинкаренко [та ін.]. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 424 с.
3. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: К.:Знання-Прес, 2018. – 180с.
4. Метрологія, вимірювання та контроль: Навчальний посібник / О.В. Бєлова, Ю.І. Гринюк, М.С. Ємельянов. - К.: Видавничий дім "Паливода А.С.", 2020. – 193с.
5. 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.
6. 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
7. Програмування Arduino / [Електронний ресурс]. / Режим доступу - <https://forum.arduino.ua/viewforum.php?id=1>.
8. 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.
9. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		54

10. 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.
11. 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.
12. R. Bartiromo, M. Vincenzi. Electrical Measurements in the Laboratory Practice. — Springer. - 2016. — 301p.

					ДП.МТІР.9702469.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		