

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

ФРАНАСЮК БОГДАНА ПАВЛІВНА

Інформаційно-вимірювальна система відтворення і
передачі одиниці температури за допомогою цифрових
термометрів і еталонних термопар / Information and
measurement system for reproducing and transmitting
temperature units using digital thermometers and reference
thermocouples

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

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
МТІР – 41 Б.П.Франасюк

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

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«___» _____ 2026р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

Тернопіль - 2026

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
Франасюк Богдані Павлівні
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Інформаційно-вимірювальна система відтворення і передачі одиниці температури за допомогою цифрових термометрів і еталонних термопар /
Information and measurement system for reproducing and transmitting temperature units using digital thermometers and reference thermocouples

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент Б.О.Масляк
затверджені наказом по університету від «1» грудня 2025р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи: 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Температурна шкала.
2. Технічні характеристики та принципи роботи сенсорів температури.
3. Методи передачі значення температури.
4. Системи вимірювання температури побудовані на базі цифрових термометрах та еталонних термопар.
5. Характеристики сучасних мікроконтролерів.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Особливості побудови інформаційно-вимірювальної системи відтворення і передачі одиниці температури за допомогою цифрових термометрів і еталонних термопар.

2. Проектування компонентів інформаційно-вимірювальної систем.
3. Програмно-апаратна реалізація інформаційно-вимірювальної системи відтворення і передачі одиниці температури.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи відтворення і передачі одиниці температури.
2. Схема підключення термопар та цифрових термометрів.
4. Електрична схема аналогових та цифрових компонентів.

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 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Особливості побудови системи відтворення і передачі одиниці температури.	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Обґрунтування вибору технічних засобів та мікропроцесорної техніки	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Апаратно-програмна реалізація інформаційно-вимірювальної системи	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	

Студент

_____ Франасюк Б.П.
(підпис)

Керівник роботи

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

РЕФЕРАТ

В бакалаврській роботі на тему «Інформаційно-вимірювальна система відтворення і передачі одиниці температури за допомогою цифрових термометрів і еталонних термопар» об'єктом дослідження виступають процеси відтворення та передачі одиниці температури. Предметом дослідження є методи, засоби та алгоритми побудови інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для відтворення і передачі одиниці температури на базі мікроконтролера ESP32 із забезпеченням необхідних метрологічних характеристик.

Метою роботи є розробка інформаційно-вимірювальної системи відтворення та передачі одиниці температури, що забезпечує єдність вимірювань із оцінкою невизначеності результатів вимірювання.

У роботі розглянуто питання єдності вимірювань температури, методики передачі розміру одиниці робочим засобам вимірювання.

Розроблено структурну та функціональну схему ІВС на базі мікроконтролера ESP32. До складу системи входять: первинні вимірювальні перетворювачі (еталонна термопара та цифрові), термостат, аналоговий комутатор, АЦП, модуль компенсації температури холодного спаю, мікроконтролер ESP32 із вбудованими інтерфейсами, а також вбудовані засоби відображення та передачі даних.

Виконано розробку програмного забезпечення в середовищі Arduino IDE мовою C++, що реалізує алгоритми зчитування даних з термопари і цифрового термометра, корекції систематичної похибки, обчислення невизначеності вимірювання типу А і типу В. Складено методику калібрування цифрових термометрів із використанням розробленої ІВС як засобу порівняння.

Ключові слова: ТЕМПЕРАТУРА, ЦИФРОВИЙ ТЕРМОМЕТР, ЕТАЛОННА ТЕРМОПАРА, ESP32, КАЛІБРУВАННЯ, МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ, ПЕРЕДАЧА РОЗМІРУ ОДИНИЦІ, ЄДНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ.

ABSTRACT

In the bachelor's thesis on the topic "Information and measuring system for reproducing and transmitting a unit of temperature using digital thermometers and reference thermocouples" the object of research is the processes of reproducing and transmitting a unit of temperature.

The subject of research is methods, means and algorithms for building an information and measuring system (IMS) for reproducing and transmitting a unit of temperature based on the ESP32 microcontroller with the provision of the necessary metrological characteristics.

The purpose of the work is to develop an information and measuring system for reproducing and transmitting a unit of temperature, which ensures the unity of measurements with an assessment of the uncertainty of measurement results. The work considers the issue of the unity of temperature measurements, the methodology for transferring the size of the unit to working measuring instruments. A structural and functional diagram of the IMS based on the ESP32 microcontroller has been developed. The system includes: primary measuring transducers (reference thermocouple and digital), thermostat, analog switch, ADC, cold junction temperature compensation module, ESP32 microcontroller with built-in interfaces, as well as built-in data display and transmission tools. Software was developed in the Arduino IDE environment in C++, which implements algorithms for reading data from a thermocouple and a digital thermometer, correcting systematic errors, calculating type A and type B measurement uncertainties. A method for calibrating digital thermometers using the developed IBS as a comparison tool has been developed.

Keywords: TEMPERATURE, DIGITAL THERMOMETER, REFERENCE THERMOCOUPLE, ESP32, CALIBRATION, METROLOGICAL ASSURANCE, MEASUREMENT UNCERTAINTY, UNIT SIZE TRANSFER, UNITY OF MEASUREMENTS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
Вступ	8
Розділ 1. Теоретичні основи відтворення та передачі температури	14
1.1. Поняття температури та міжнародна температурна шкала	14
1.2. Система передачі одиниці температури	20
1.3. Огляд існуючих засобів відтворення та вимірювання температури	26
1.4. Обґрунтування напрямку досліджень та побудови інформаційно-вимірювальної системи	31
Розділ 2. Аналіз і вибір компонентів інформаційної системи	32
2.1. Розробка структурної схеми інформаційної системи	32
2.2. Аналіз температурних сенсорів та термостатів	36
2.3. Обґрунтування та вибір мікроконтролера та аналогової частини	40
Розділ 3. Реалізація інформаційно-вимірювальної системи	43
3.1. Методика експерименту по відтворенню та передачі одиниці температури	43
3.2. Програмна реалізація процесу передачі одиниці температури	47
3.3. Оцінка невизначеності відтворення та передачі одиниці температури	52
Висновки	56
Список використаних джерел	58

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Франасюк Б.П.			ІВС відтворення і передачі одиниць температури за допомогою цифрових термометрів і еталонних термопар/ IMS reproduction and transmission of temperature units using digital thermometers and reference thermocouples	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 – термопара;

КХС – схема компенсації холодного спаю;

НСХ — номінальна статична характеристика;

СПТО - стандартним платиновим термометром опору;

ВК – вимірювальний канал;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ЦАП – цифро - аналоговий перетворювач;

ПЗ – програмне забезпечення.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

ВСТУП

Температура є однією з основних фізичних величин, що визначає стан термодинамічної системи. Точне вимірювання температури має критичне значення в широкому спектрі галузей: від метрологічних еталонних лабораторій і наукових досліджень до промислового виробництва, медицини, харчової промисловості та екологічного моніторингу. Забезпечення єдності та достовірності вимірювань температури на всіх рівнях — від первинних еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки — є фундаментальним завданням метрології [1-5].

Передача одиниці температури є процесом, що забезпечує простежуваність результатів вимірювань до первинних еталонів. Це означає, що результат будь-якого вимірювання температури в лабораторії чи на виробництві може бути пов'язаний безперервним ланцюжком порівнянь із Міжнародною температурною шкалою ITS-90 (International Temperature Scale of 1990). Дана шкала є офіційним наближенням до термодинамічної температури і підтримується Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) — Міжнародним бюро мір і ваг, яке відповідає за міжнародну систему одиниць SI.

Шкала ITS-90 охоплює діапазон від 0,65 K до найвищих температур, що можуть бути практично виміряні, та базується на ряді відтворюваних реперних точок — температур фазових переходів хімічно чистих речовин. Для відтворення та передачі одиниці температури у практично важливому діапазоні від 0 °C до 1084,62 °C (точка затвердіння міді) традиційно використовуються платинові термометри опору та термоелектричні перетворювачі (термопари) відповідних типів.

Сучасні засоби вимірювання температури поділяються на дві основні категорії: аналогові та цифрові сенсори. Кожна з них має свої конструктивні особливості, принципи дії, метрологічні характеристики та галузі застосування, що безпосередньо визначає підходи до їх калібрування та передачі одиниці температури.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

Аналогові сенсори температури формують на виході безперервний електричний сигнал (напругу, струм або опір), величина якого пропорційна температурі. До найпоширеніших типів аналогових сенсорів належать термоелектричні перетворювачі (термопари), термометри опору (ТО) та терморезистори (термістори).

Термопари є найбільш широко застосовуваним типом аналогових перетворювачів температури завдяки широкому діапазону вимірювань (від -270°C до $+1800^{\circ}\text{C}$ залежно від типу), відносній простоті конструкції та механічній міцності. Принцип дії ґрунтується на ефекті Зеєбека: у колі, утвореному двома різнорідними провідниками, виникає термо-ЕРС, пропорційна різниці температур між гарячим і холодним спаями. Міжнародний стандарт ІЕС 60584 класифікує термопари за типами (В, Е, J, К, N, R, S, Т) та встановлює їх номінальні статичні характеристики і допуски. Зразкові термопари типів S та R (платина–родій) використовуються як передавальні еталони завдяки їх стабільності та відтворюваності в діапазоні від 0°C до $1084,62^{\circ}\text{C}$.

Термометри опору (ТО) базуються на залежності електричного опору провідника від температури. Платинові термометри опору (ПТО, стандарти ІЕС 60751 та ДСТУ ІЕС 60751:2010) є одними з найточніших аналогових сенсорів — стандартний платиновий термометр опору (СПТО) слугує первинним еталоном у діапазоні від $-259,3467^{\circ}\text{C}$ до $961,78^{\circ}\text{C}$ згідно з ITS-90. Промислові ПТО класу АА мають допуск $\pm(0,1 + 0,0017 \cdot |t|)^{\circ}\text{C}$. Терморезистори (NTC та PTC термістори) забезпечують значно вищу чутливість у вузькому діапазоні температур, проте мають нелінійну характеристику та нижчу стабільність порівняно з ПТО.

Цифрові сенсори температури інтегрують у єдиному корпусі чутливий елемент, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) і цифровий інтерфейс передачі даних. На відміну від аналогових, вони формують на виході числовий код, що представляє виміряне значення температури. Це суттєво спрощує підключення до мікроконтролерів та цифрових систем збору даних, оскільки не потребує зовнішніх підсилювачів, АЦП та схем компенсації.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

Серед цифрових сенсорів найпоширенішими є мікросхеми з інтерфейсами 1-Wire (наприклад, DS18B20 виробництва Analog Devices — діапазон від $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, роздільна здатність 12 біт, похибка $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ у діапазоні від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$), I²C (LM75, PCT2075, SHT-серія — призначені переважно для вимірювання температури навколишнього середовища) та SPI (MAX31855, MAX31865 — спеціалізовані мікросхеми для підключення термопар та ПТО відповідно, що реалізують компенсацію холодного спаю та лінеаризацію характеристики апаратними засобами). Цифрові сенсори на основі MEMS-технологій дозволяють досягти роздільної здатності до $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ при відносно низькій вартості, однак їх абсолютна похибка та довготривала стабільність поступаються зразковим аналоговим перетворювачам.

Ключова відмінність між аналоговими та цифровими сенсорами в контексті передачі одиниці температури полягає в тому, що аналогові первинні перетворювачі — зокрема термопари — традиційно виступають опорними (зразковими) засобами вимірювання завдяки своїй метрологічній простежуваності та стабільності, тоді як цифрові сенсори є об'єктами калібрування. Саме ця методологічна схема — «зразкова термопара як еталон, цифровий термометр як об'єкт перевірки» — є основою інформаційно-вимірювальної системи, що розробляється в даній роботі. Мікроконтролер виконує функцію збору даних з обох каналів, первинної обробки та передачі результатів порівняння на комп'ютер або сервер для подальшого аналізу та формування протоколів калібрування.

Актуальність теми. В умовах розвитку цифрових технологій та Індустрії 4.0 виникає нагальна потреба у створенні автоматизованих інформаційно-вимірювальних систем, здатних не лише забезпечувати точне вимірювання температури, а й у реальному часі калібрувати та верифікувати засоби вимірювальної техніки, фіксувати метрологічні характеристики та передавати результати на верхній рівень автоматизованих систем управління або до хмарних серверів обробки даних.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

Традиційні методи передачі одиниці температури передбачають ручні процедури калібрування із залученням висококваліфікованого персоналу та спеціалізованого обладнання. Такі методи є трудомісткими, вимагають значних часових витрат і не завжди можуть бути реалізовані безпосередньо в умовах виробничого підприємства. У зв'язку з цим розробка автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи, що інтегрує зразкову термопару як опорний засіб вимірювання, мікроконтролерний блок збору та обробки даних і програмне забезпечення для аналізу та передачі результатів, є актуальним науково-технічним завданням.

Крім того, чинне законодавство України у сфері метрології та метрологічної діяльності вимагає підтвердження метрологічної простежуваності засобів вимірювальної техніки, що застосовуються в сферах законодавчо регульованої метрології. Запровадження автоматизованих систем передачі одиниці температури сприятиме підвищенню ефективності метрологічного контролю та зниженню витрат на проведення повірки та калібрування.

Об'єкт досліджень — процес відтворення та передачі одиниці температури з використанням зразкових термоелектричних перетворювачів і цифрових засобів вимірювальної техніки.

Предмет досліджень — інформаційно-вимірювальна система, що реалізує передачу одиниці температури на основі зразкової термопари, мікроконтролерного блоку збору даних та програмного забезпечення аналізу і передачі результатів вимірювання.

Мета роботи — розробка інформаційно-вимірювальної системи відтворення та передачі одиниці температури за допомогою зразкової термопари, що забезпечує автоматизоване калібрування та верифікацію цифрових термометрів із передачею метрологічних даних на комп'ютер або сервер.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити наступні завдання:

- 1) аналіз вимог міжнародної температурної шкали ITS-90 та нормативної бази у сфері метрологічного забезпечення вимірювань температури;

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

- 2) вибір та обґрунтування типу зразкової термопари як опорного засобу вимірювання;
- 3) розробка апаратної складової системи на основі мікроконтролера для збору та первинної обробки даних від зразкової термопари та підключених термометрів;
- 4) розробка алгоритмів та програмного забезпечення для реалізації процедури калібрування цифрових термометрів;
- 5) реалізація інтерфейсу передачі метрологічних даних на комп'ютер або сервер;
- 6) оцінювання похибок системи та підтвердження відповідності нормативним вимогам.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці комплексного підходу до автоматизованої передачі одиниці температури, що поєднує апаратну реалізацію на основі мікроконтролера, зразкову термопару як опорний канал вимірювання та цифровий інтерфейс передачі даних. На відміну від існуючих рішень, запропонована система забезпечує безперервну простежуваність вимірювань у реальному часі без участі оператора, що є принципово новим для задач метрологічного обслуговування цифрових термометрів в умовах виробничого середовища.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена система може бути впроваджена в метрологічних службах підприємств, випробувальних лабораторіях, центрах стандартизації та метрології для автоматизованого калібрування та верифікації цифрових термометрів. Застосування системи дозволяє скоротити час проведення калібрування, знизити вплив людського чинника на результати вимірювань, забезпечити документування та архівування метрологічних даних у цифровому форматі відповідно до вимог систем управління якістю ISO 9001 та ISO/IEC 17025.

Нормативна база. Розробка системи виконувалася відповідно до вимог таких міжнародних та вітчизняних нормативних документів.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

Бакалаврська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить ____ сторінок, з яких основний текст займає ____ сторінок. Робота містить ____ рисунків, ____ таблиць та ____ найменувань у списку використаних джерел.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІДТВОРЕННЯ ТА ПЕРЕДАЧІ ТЕМПЕРАТУРИ

1.1. Поняття температури та міжнародна температурна шкала

Температура є однією з семи базових фізичних величин Міжнародної системи одиниць (SI) і характеризує ступінь нагрітості тіла або термодинамічного стану системи. На відміну від більшості інших базових величин SI, температура не є адитивною: температури двох систем не можна «скласти», а лише порівняти або встановити між ними рівновагу. Це визначає специфічні підходи до відтворення та передачі одиниці температури, що суттєво відрізняються від підходів, які застосовувались для інших фізичних величин.

З точки зору молекулярно-кінетичної теорії та статистичної механіки, температура є мірою середньої кінетичної енергії хаотичного теплового руху частинок системи. Для ідеального газу середня кінетична енергія молекули пов'язана з термодинамічною температурою T через сталу Больцмана $k = 1,380649 \times 10^{-23}$ Дж/К. Саме через числове значення сталої Больцмана і визначається кельвін з 2019 року [2, 3].

Нульовий закон термодинаміки встановлює, що якщо тіло A перебуває у тепловій рівновазі з тілом B , і тіло B — з тілом C , то тіла A і C також перебувають у тепловій рівновазі. Цей закон є теоретичним фундаментом вимірювання температури за допомогою термометрів: термометр виступає тілом C , яке досягає теплової рівноваги з об'єктом вимірювання і фіксує стан цієї рівноваги через одну зі своїх вимірюваних властивостей — термометричну властивість.

Одиницею термодинамічної температури є кельвін (K). Відповідно до 26-ї Генеральної конференції з мір і ваг (CGPM), кельвін визначається шляхом фіксації числового значення сталої Больцмана: 1 K — температура, при якій середня кінетична енергія термічного руху дорівнює $(3/2) \cdot k$. Шкала Цельсія пов'язана з термодинамічною шкалою співвідношенням $t (^{\circ}\text{C}) = T (\text{K}) - 273,15$, де 273,15 K — температура танення льоду при атмосферному тиску.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

Фізичні температурні ефекти, що використовуються для вимірювання температури, умовно поділяють на контактні та безконтактні. Контактні методи передбачають безпосередній тепловий контакт перетворювача з об'єктом. До них належать: термоелектричний ефект (термопари), зміна електричного опору (термометри опору, термістори), теплове розширення рідини або газу (рідинні та газові термометри). Безконтактні методи базуються на реєстрації теплового електромагнітного випромінювання об'єкта (пірометри, тепловізори) і не вимагають фізичного контакту.

Вимірювання температури охоплює надзвичайно широкий діапазон — від кріогенних температур поблизу абсолютного нуля (фізика надпровідності, зберігання кріогенних речовин) до температур плазми у термоядерних реакторах (понад 10^8 K). Жоден окремий первинний термометр не може охопити весь цей діапазон, тому міжнародна метрологічна спільнота побудувала спеціальну ієрархічну структуру — Міжнародну температурну шкалу — для забезпечення відтворюваності і простежуваності вимірювань в усіх його частинах [4, 5].

Міжнародна температурна шкала 1990 року (ITS-90, International Temperature Scale of 1990) є офіційно прийнятим наближенням до термодинамічної температурної шкали. Вона прийнята Міжнародним комітетом мір і ваг у 1989 році та набула чинності з 1 січня 1990 року, замінивши IPTS-68 (International Practical Temperature Scale of 1968) та EPT-76 (Échelle Provisoire de Température de 1976). Зберігання і поширення шкали здійснює Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), розташоване в Севрі (Франція).

Шкала ITS-90 побудована на таких ключових принципах:

1. Термодинамічна узгодженість. Значення T_{90} максимально наближені до термодинамічної температури T у межах невизначеності вимірювань, досяжної на момент 1990 року. Функція різниці $(T - T_{90})$ документально визначена BIPM і регулярно уточнюється відповідно до нових вимірювань термодинамічної температури.
2. Відтворюваність через фазові переходи. Реперні точки реалізуються як рівноважні фазові переходи (потрійні точки, точки кипіння та затвердіння)

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15

хімічно чистих речовин — явища, що відбуваються при суворо визначеній температурі, незалежно від того, де і ким реалізується реперна точка. Чистота речовини становить не менше 99,9999 % (6N), що забезпечує відтворюваність у межах від 0,1 до 1,0 мК залежно від типу реперної точки.

3. Неперервність і узгодженість піддіапазонів. Шкала ITS-90 поділена на чотири піддіапазони, і значення T_{90} разом із першою похідною є неперервними у точках переходу між піддіапазонами. Ряд реперних точок є спільними для двох суміжних піддіапазонів, що забезпечує метрологічну сумісність результатів, отриманих різними первинними термометрами.
4. Стандартизований інтерполяційний прилад. У кожному піддіазоні використовується конкретний тип первинного термометра з чітко регламентованою процедурою калібрування через набір реперних точок. Між реперними точками температура визначається інтерполяційним рівнянням, коефіцієнти якого розраховуються за відліками у реперних точках.

Чотири піддіапазони шкали ITS-90 та відповідні первинні термометри характеризуються наступним чином. Перший піддіапазон охоплює температури від 0,65 К до 5,0 К і реалізується за допомогою парових термометрів ізотопів гелію ^3He (0,65–3,2 К) та ^4He (1,25–5,0 К). Другий піддіапазон — від 3,0 К до 24,5561 К — реалізується стандартним платиновим термометром опору (СПТО), відкаліброваним за трикритичною точкою водню та рядом реперних точок. Третій і основний піддіапазон охоплює від 13,8033 К до 1234,93 К і використовує СПТО, калібрований за 10–17 реперними точками залежно від вибраного піддіапазону. Четвертий піддіапазон — від 1234,93 К і вище — реалізується за законом Планка для теплового випромінювання з використанням радіаційних термометрів.

Стандартний платиновий термометр опору (СПТО) є найважливішим інструментом шкали ITS-90 у діапазоні від 13,8033 К до 1234,93 К. Його характеристика описується нормованим опором $W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273,16 \text{ К})$, де $R(273,16 \text{ К})$ — опір термометра у потрійній точці води. Для передачі одиниці у

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

промисловому діапазоні від 0 °С до 961,78 °С (точка затвердіння срібла) СПТО інтерполює між реперними точками за поліноміальними рівняннями Девіаційних функцій, визначених у тексті ITS-90. При цьому відтворюваність СПТО становить близько 0,1–1 мК у відповідному діапазоні.

Для діапазону вище точки затвердіння срібла (961,78 °С) до точки затвердіння міді (1084,62 °С) і далі використовуються термопари з платино-родієвими електродами — типів S (Pt10%Rh-Pt) та R (Pt13%Rh-Pt) — як передавальні еталони другого розряду – рисунок 1.1. Вони калібруються у реперних точках Ag, Au і Cu і забезпечують відтворюваність у межах 0,1–0,5 °С. Саме цей тип термопар є прямим предком зразкових термопар, що використовуються в інформаційно-вимірювальних системах передачі одиниці температури.

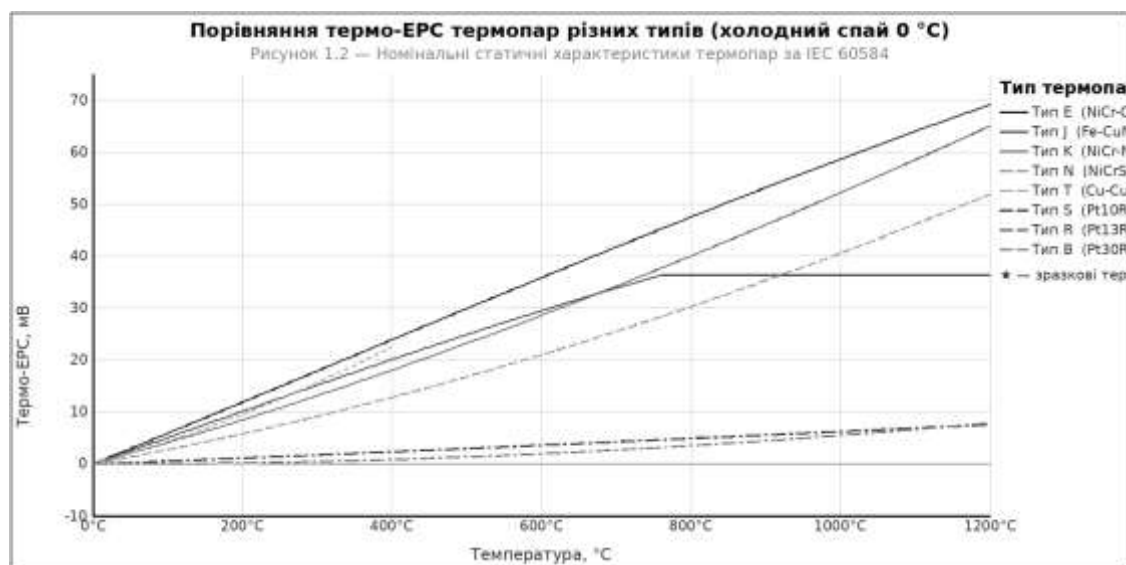


Рисунок 1.1 — Номінальні статичні характеристики термопар різних типів за IEC 60584 (холодний спай 0 °С)

Реперна точка ITS-90 (fixed point) — це відтворюваний рівноважний стан чистої речовини (або їх суміші), якому присвоєно точно визначене значення температури T_{90} . Усього ITS-90 визначає 17 реперних точок, 16 з яких є «визначальними» (defining fixed points) — вони безпосередньо входять до

рівнянь шкали, а одна (потрійна точка водню при тиску 33,3213 кПа) є допоміжною. Їх ієрархія відображена у таблиці 1.1.

Розрізняють три основні типи реперних точок. Потрійна точка (triple point) — це стан рівноваги трьох фаз речовини (тверда, рідка, газоподібна) при конкретному тиску та температурі, що характеризується найвищою відтворюваністю і не залежить від атмосферного тиску [7]. Саме тому потрійна точка води (273,16 K = 0,01 °C) є первинною реперною точкою SI і основою визначення кельвіна. Точка затвердіння (freezing point, liquidus) — це рівновага рідкої і твердої фаз при стандартному тиску 101,325 кПа; реалізується у калібрувальних печах із тиглями з чистого металу. Точка кипіння (boiling point) — рівновага рідкої і газоподібної фаз при стандартному тиску

Таблиця 1.1 — Визначальні реперні точки Міжнародної температурної шкали ITS-90

№	Речовина та тип реперної точки	T ₉₀ , K	t ₉₀ , °C
1	Рівноважний водень (e-H ₂): потрійна точка	13,8033	–259,3467
2	Рівноважний водень: тиск насич. пари 33,3213 кПа	≈17,035	≈–256,115
3	Рівноважний водень: нормальна точка кипіння	≈20,2700	≈–252,880
4	Неон (Ne): нормальна точка кипіння	24,5561	–248,5939
5	Кисень (O ₂): потрійна точка	54,3584	–218,7916
6	Аргон (Ar): потрійна точка	83,8058	–189,3442
7	Ртуть (Hg): потрійна точка	234,3156	–38,8344
8	Вода (H ₂ O): потрійна точка ★	273,16	0,01
9	Галій (Ga): точка плавлення	302,9146	29,7646
10	Індій (In): точка затвердіння	429,7485	156,5985
11	Олово (Sn): точка затвердіння	505,078	231,928
12	Цинк (Zn): точка затвердіння	692,677	419,527
13	Алюміній (Al): точка затвердіння	933,473	660,323
14	Срібло (Ag): точка затвердіння ★★	1234,93	961,78
15	Золото (Au): точка затвердіння	1337,33	1064,18
16	Мідь (Cu): точка затвердіння ★★	1357,77	1084,62

★ — потрійна точка води є первинною реперною точкою SI (визначення кельвіна);

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

★★ — реперні точки, що використовуються для калібрування зразкових термопар.

Чистота речовини для реперних точок регламентована ITS-90 на рівні не нижче 99,9999 % (6N), що дозволяє досягти відтворюваності в межах від 0,05 мК (потрійна точка аргону) до 1 мК (точки затвердіння металів). Відхилення від номінальної температури, спричинені домішками, розраховуються за законом зниження температури кристалізації. Тому у практиці метрологічних лабораторій для контролю якості реалізації реперної точки використовують аналіз форми температурного плато при кристалізації.

З точки зору практичної метрології, найбільш значущими для передачі одиниці температури у промисловому діапазоні (0 °C — 1085 °C) є реперні точки, що реалізуються у вигляді комірок затвердіння чистих металів. Точка затвердіння індію (156,60 °C) використовується для калібрування прецизійних платинових термометрів опору у низькотемпературному діапазоні. Точки олова (231,93 °C), цинку (419,53 °C) та алюмінію (660,32 °C) є ключовими для калібрування СПТО у середньому діапазоні. Точки срібла (961,78 °C) та міді (1084,62 °C) використовуються для атестації зразкових термопар типів S і R.

Таким чином, реперні точки ITS-90 утворюють метрологічний каркас, на якому будується вся система передачі одиниці температури — від первинних національних еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки, включаючи цифрові термометри, що є об'єктами калібрування в інформаційно-вимірювальній системі, яка розробляється в даній роботі.

Відтворення та передача одиниці температури в Україні та на міжнародному рівні регламентується системою нормативних документів, що охоплює міжнародні угоди, міждержавні та національні стандарти, а також методичні настанови метрологічних організацій.

На міжнародному рівні визначальним документом є текст ITS-90 (Preston-Thomas, 1990) разом із Supplementary Information for the ITS-90 (BIPM, 2018), що деталізує процедури реалізації реперних точок і калібрування первинних термометрів. Стандарт ІЕС 60584 (частини 1, 2, 3) регламентує номінальні

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

статичні характеристики та допуски для термодатчиків усіх стандартних типів. Стандарт ІЕС 60751 встановлює вимоги до платинових термометрів опору. Настанови EURAMET cg-03 і cg-08 регулюють визначення невизначеності при калібруванні термометрів. Стандарт ISO/IEC 17025 встановлює загальні вимоги до компетентності калібрувальних лабораторій, у тому числі щодо метрологічної простежуваності.

На національному рівні в Україні базовими є: Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» № 1314-VII від 05.06.2014 р.; ДСТУ 2681-94 «Метрологія. Терміни та визначення»; ДСТУ ІЕС 60584-1:2014 та ДСТУ ІЕС 60584-2:2014 (термодатчики — характеристики та допуски); ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 (загальні вимоги до лабораторій); ДСТУ JCGM 100:2015 (GUM — настанова з висловлення невизначеності вимірювання). Наведений нормативний масив формує правову та технічну основу для проектування та атестації інформаційно-вимірювальної системи відтворення та передачі одиниці температури.

Таким чином, в даному розділі розглянуто фізичні основи поняття температури та проаналізовано принципи побудови Міжнародної температурної шкали ITS-90, що забезпечує відтворюваність і міжнародну порівнянність вимірювань. Наведена нормативна база підтверджує правомірність і необхідність розробки автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи передачі одиниці температури за допомогою зразкової термодатчики.

1.2. Система передачі одиниці температури

Засоби вимірювання температури поділяються на дві основні групи залежно від типу вихідного сигналу: аналогові та цифрові датчики [13]. Аналоговий датчик формує на виході безперервний електричний сигнал (напругу, струм або опір), пропорційний до температури. Цифровий датчик

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

інтегрує у єдиному корпусі чутливий елемент, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) та цифровий інтерфейс, і передає результат вимірювання безпосередньо у числовому форматі. [14]

Відповідно до ДСТУ 2681-94, засіб вимірювальної техніки — це технічний засіб, який застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики. [4] Для обох класів сенсорів обов'язковою умовою використання у метрологічно значущих задачах є наявність нормованих характеристик та метрологічна простежуваність результатів вимірювань відповідно до вимог *ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019*. [4, 5]

Існують сенсори температури принцип роботи яких базується на різних ефектах. Термоелектричний перетворювач (термопара) є первинним перетворювачем температури, принцип дії якого ґрунтується на ефекті Зеєбека, відкритому Т. Й. Зеєбеком у 1821 році. [13] Суть ефекту полягає в тому, що в замкнутому електричному колі, утвореному двома різнорідними провідниками А і В, виникає термо-ЕРС Е, якщо температури місць їх з'єднань (спаїв) різні:

$$E = \alpha (T_1 - T_0)$$

де α — коефіцієнт Зеєбека (термоелектрична чутливість), мкВ/К; T_1 — температура гарячого (вимірювального) спаю; T_0 — температура холодного спаю (вільних кінців). Температура холодного спаю T_0 повинна бути або стабілізована, або точно виміряна для введення поправки — це процедура компенсації холодного спаю (КХС). У сучасних вимірювальних перетворювачах КХС реалізується апаратно або програмно.

Номінальні статичні характеристики (НСХ) термопар регламентовані у *ДСТУ IEC 60584-1:2014* для восьми стандартних типів: В, Е, J, К, N, R, S, Т. [7] Допуски на відхилення від НСХ встановлені у *ДСТУ IEC 60584-2:2014*. [8] Клас 1 (найвищий) для термопар типу S передбачає допуск ± 1 °С або $\pm [0,003 \cdot |t|]$ °С (більше з двох значень) у діапазоні від 0 °С до 1600 °С [8].

Зразкові термопари типів S та R (платина–родій) є найстабільнішими серед стандартних термопар і традиційно використовуються як передавальні еталони

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

другого розряду в діапазоні від 0 °С до 1084,62 °С. [2] Їх стабільність при правильному зберіганні становить менше 0,1 °С за рік, а невизначеність при калібруванні у реперних точках ITS-90 — 0,05–0,3 °С [10].

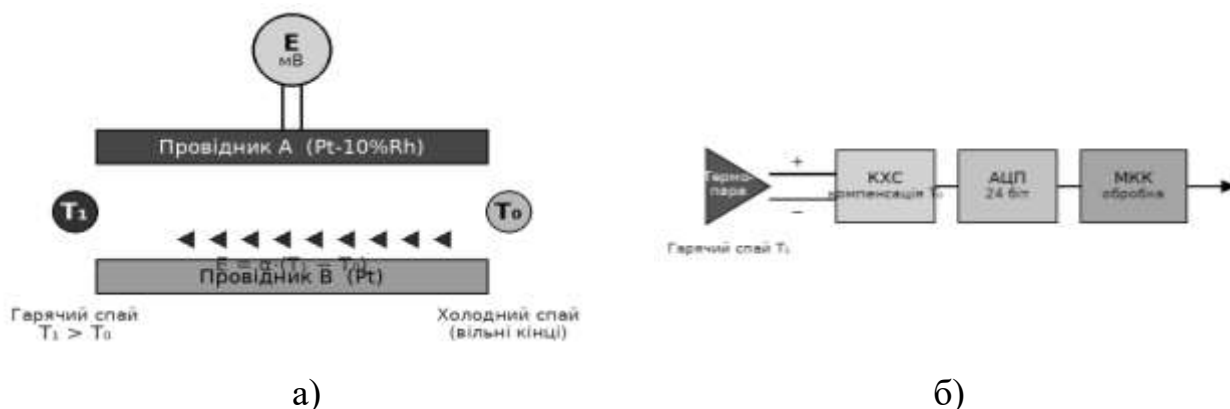


Рисунок 1.2 — Ефект Зеебека – а) та структурна схема вимірювального каналу з термопарою – б)

Термометри опору базуються на залежності електричного опору провідникових матеріалів від температури. Для платинових термометрів опору (ПТО) ця залежність описується рівняннями Калленгера–Ван-Дюзена (для діапазону нижче 0 °С) та поліномом другого порядку (для діапазону вище 0 °С), що встановлені у ДСТУ ІЕС 60751:2010: [9]

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2] \quad (\text{при } T > 0 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

де $R_0 = 100 \text{ Ом}$ — опір при 0 °С для стандартного ПТО Pt100; $A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$. [9] ПТО класу АА (найвищого) має допуск $\pm(0,1 + 0,0017 \cdot |t|) \text{ } ^\circ\text{C}$ у діапазоні від -50 °С до +250 °С, що забезпечує одну з найвищих точностей серед промислових сенсорів [9].

Термістори (NTC та PTC) мають вищу чутливість у вузькому діапазоні температур, проте їх характеристика суттєво нелінійна і описується рівнянням Стейнхарта–Харта [13]. Через низьку стабільність та відсутність міжнародно нормованої НСХ термістори не застосовуються як еталонні засоби вимірювання, але широко використовуються у побутових та промислових пристроях.

Цифровий сенсор температури інтегрує у єдиному мікроелектронному корпусі (ІС) чутливий елемент (термодіод, терморезистор або MEMS-структуру), аналогово-цифровий перетворювач і цифровий інтерфейс передачі даних [13]. На відміну від аналогових перетворювачів, цифровий сенсор не потребує зовнішнього підсилювача та АЦП, що спрощує схемотехніку системи і знижує вплив завад на лінії передачі сигналу [14]

Основним недоліком цифрових сенсорів у порівнянні з аналоговими зразковими перетворювачами є нижча абсолютна точність і менша довготривала стабільність внаслідок виробничого розкиду параметрів інтегральної схеми. Тому цифрові сенсори, як правило, є об'єктами калібрування, а не еталонними засобами вимірювання [5].

Типовими представниками цифрових сенсорів є DS18B20 (Analog Devices / Maxim Integrated); MAX31865; LM75 / PCT2075. В таблиці 1.2 приведено характеристика аналогових та цифрових сенсорів температури [7, 8, 9, 15].

Таблиця 1.2 — Порівняльна характеристика аналогових та цифрових сенсорів температури

№	Параметр	Аналоговий сенсор	Цифровий сенсор
1	Принцип дії	Зміна фізичної властивості (термоЕРС, опір) — безперервний аналоговий сигнал	Вбудований АЦП перетворює аналоговий сигнал у цифровий код усередині корпусу
2	Вихідний сигнал	Аналоговий: напруга (мВ) для термопар; опір (Ом) для ТО і термісторів	Цифровий код за протоколами 1-Wire, ІС або SPI
3	Діапазон вимірювань	Термопари S/R: 0–1600 °C; ПТО: –200–850 °C; термістори NTC: –55–125 °C	DS18B20: –55–125 °C; MAX31865 (ПТО): –200–850 °C; LM75: 0–125 °C
4	Точність	ПТО кл. АА: $\pm(0,1+0,0017 t)$ °C; термопара тип S кл. 1: ± 1 °C або $\pm 0,003 t $	DS18B20: $\pm 0,5$ °C (–10...+85 °C); MAX31865: $\pm 0,1$ °C; зазвичай нижча за аналогові
5	Необхідні зовнішні компоненти	Підсилювач, АЦП, схема компенсації холодного спаю (для термопар)	Не потребують зовнішнього підсилювача та АЦП; лише резистор підтяжки (1-Wire)
6	Метрологічна простежуваність	Висока — НСХ регламентована ДСТУ ІЕС 60584 / ІЕС 60751; застосовуються як еталони	Нижча — виробничий розкид; потребує індивідуального калібрування для точних задач

7	Застосування у системі	Зразкова термопара — опорний канал (еталон) у ІВС	Об'єкт калібрування — цифровий термометр, що перевіряється
---	------------------------	---	--

Передача одиниці температури реалізується через ієрархічну систему еталонів і засобів вимірювальної техніки. Відповідно до *ДСТУ 8021:2015* еталон — це засіб вимірювальної техніки, призначений для відтворення, зберігання і передачі одиниці фізичної величини. Метрологічна простежуваність — властивість результату вимірювання або значення еталона, що встановлює їх зв'язок із зазначеним еталоном через задокументований безперервний ланцюжок калібрувань з відповідними невизначеностями вимірювань [4, 5].

На вершині ієрархії знаходяться первинні еталони — реперні точки ITS-90 та стандартні платинові термометри опору, що зберігаються у національних метрологічних інститутах. В Україні функції національного метрологічного органу виконує ДП «Укрметртестстандарт». Від первинних еталонів одиниця передається до вторинних (зразкових) еталонів — зокрема, до зразкових термопар типів S та R, — а від них до робочих засобів вимірювання шляхом калібрування або повірки [3, 18].



Рисунок 1.3 — Ієрархія передачі одиниці температури та розроблювана ІВС

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		24

Основним методом передачі одиниці температури є метод безпосереднього порівняння показань зразкового та підпорядкованого термометрів в умовах спільного термостату або в одній температурній точці [10]. Принципова відмінність від більшості інших фізичних величин полягає в тому, що температура не є адитивною — еталонну міру не можна «прикласти» до об'єкта, тому єдиним методом є встановлення теплової рівноваги між зразковим і підпорядкованим перетворювачами у спільному термостаті.

Невизначеність передачі одиниці температури визначається сумою невизначеностей усіх ланок ієрархічного ланцюжка відповідно до методології ДСТУ JCGM 100:2015 (GUM).

Інформаційно-вимірювальна система на основі мікроконтролера виконує функцію ланки передачі одиниці температури між зразковою термопарою (еталоном) та цифровими термометрами (об'єктами калібрування). Мікроконтролер здійснює синхронний збір даних з обох каналів, обчислення поправок і невизначеностей, а також передачу метрологічних даних на комп'ютер або сервер для документування.

Ключовою вимогою до такої системи є забезпечення метрологічної простежуваності результатів до ITS-90 через зразкову термопару, атестовану в акредитованій лабораторії. Автоматизація процедури калібрування дозволяє знизити вплив суб'єктивного фактора оператора та скоротити час проведення метрологічних робіт порівняно з ручними методами [10].

У другому розділі розглянуто принципи функціонування аналогових та цифрових сенсорів температури. Встановлено, що термопари та термометри опору є основними аналоговими перетворювачами з нормованими НСХ, що забезпечує їх метрологічну простежуваність і придатність як зразкових засобів вимірювання.

Цифрові сенсори (DS18B20, MAX31865, LM75) мають переваги в інтеграції та простоті підключення, проте поступаються аналоговим за точністю та довготривалою стабільністю. Це визначає їх роль як об'єктів калібрування в ІВС. Передача одиниці температури реалізується через метрологічну ієрархію

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

від реперних точок ITS-90 [2] через зразкові термопари до робочих засобів вимірювання методом порівняння у спільному термостаті.

1.3. Огляд існуючих засобів відтворення та вимірювання температури

Засоби відтворення температури — термостати — є ключовою складовою будь-якої метрологічної системи калібрування термометрів і термопар. Головна функція термостата полягає у створенні робочого об'єму з температурним полем, яке є просторово однорідним і стабільним у часі на рівні, що визначається вимогами процедури передачі одиниці температури. Відповідно до рекомендацій EURAMET cg-03, нестабільність температури у робочій зоні термостата є одним із найвагоміших компонентів бюджету невизначеності при калібруванні термопар. Принцип роботи термостата з замкнутим контуром керування полягає у безперервному порівнянні вимірюної температури у робочій зоні $T_{\text{вим}}$ із заданим значенням $T_{\text{зад}}$. Сигнал розузгодження $\varepsilon(t) = T_{\text{зад}} - T_{\text{вим}}$ обробляється ПД-регулятором, який формує керуючий вплив $u(t)$ на виконавчий пристрій (нагрівач або систему охолодження). Правильне налаштування регулятора термостату дозволяє мінімізувати статичну похибку і перерегулювання. Типова структурна схема термостату приведена на рисунку 1.4.

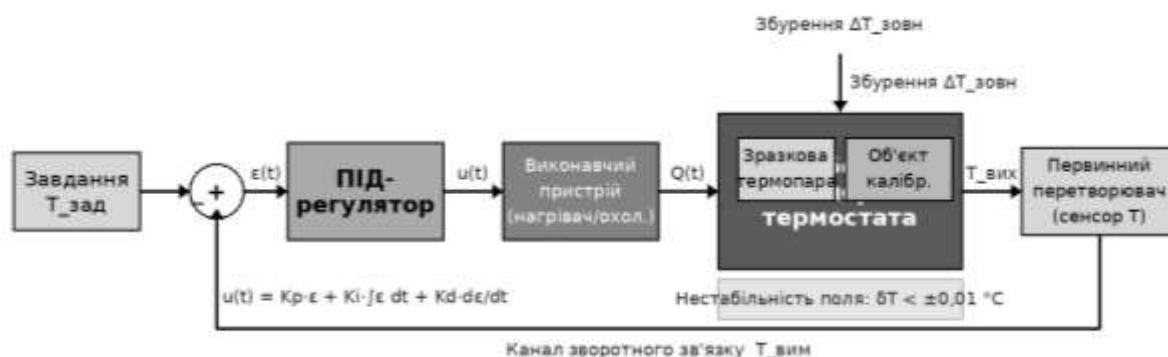


Рисунок 1.4 — Функціональна схема термостата з ПД-регулятором та замкнутим контуром зворотного зв'язку

Термостати, що застосовуються для калібрування термопар та передачі одиниці температури, класифікуються за принципом теплообміну між робочим тілом та об'єктом вимірювання, а також за діапазоном робочих температур [9].

Рідинний термостат (рідинна ванна) є найточнішим типом термостата для діапазону від $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплообмін між нагрівачем, рідиною та зануреними об'єктами (зразковою термопарою і засобом вимірювання, що калібрується) відбувається через рідке теплоносійне середовище з перемішуванням, що забезпечує мінімальну неоднорідність температурного поля.

Для діапазону температур від $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ використовуються термостати на основі розплавів неорганічних солей, переважно нітратних сумішей ($\text{KNO}_3 + \text{NaNO}_2 + \text{NaNO}_3$) [10].

Для калібрування термопар у діапазоні від $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ та вище застосовуються трубчасті електричні печі з вертикальним або горизонтальним розміщенням термоелемента. Основним недоліком стандартних трубчастих печей є значна неоднорідність поля вздовж осі труби — до $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ — і порівняно повільна реакція на регулюючий вплив. [9]

Найвищу відтворюваність температури — на рівні $\pm 0,1 \dots \pm 1\text{ мК}$ — забезпечують комірки затвердіння хімічно чистих металів, що реалізують реперні точки ITS-90: олова ($231,928\text{ }^{\circ}\text{C}$), цинку ($419,527\text{ }^{\circ}\text{C}$), алюмінію ($660,323\text{ }^{\circ}\text{C}$), срібла ($961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$) та міді ($1084,62\text{ }^{\circ}\text{C}$) [2]. Ці пристрої застосовуються для первинної передачі одиниці.

Для вимірювання термо-ЕРС зразкових термопар у діапазоні від одиниць до десятків мілівольт з похибкою менше 1 мкВ (що відповідає похибці вимірювання температури менше $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ для термопар типу S) використовуються спеціалізовані прецизійні вимірювачі. Вимоги до таких приладів регламентовані у настанові EURAMET cg-13: похибка вимірювання напруги не повинна перевищувати частку від загального бюджету невизначеності, що відведена на вимірювальний канал.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

Таблиця 1.3 — Порівняльна характеристика термостатів для калібрування термопар

Тип термостата	Діапазон Т	Стабільність Т	Типове застосування
Рідинний термостат (водяна ванна)	-80...+95 °С	±0,003...±0,01 °С	Низькотемпературне калібрування ПТО, термопар Т, Е
Рідинний термостат (олійна ванна)	+50...+300 °С	±0,01...±0,05 °С	Середній діапазон; термопари К, J, N
Сольовий термостат (розплав нітратів)	+ 150...+600 °С	±0,05...±0,2 °С	Калібрування термопар К, N; перевірка ПТО
Трубчаста піч (сухий блок, суха піч)	+ 50...+1200 °С	±0,1...±1,0 °С	Термопари S, R, B; калібрування промислових ТП
Піч з тепловою трубою (heat pipe furnace)	+ 300...+1100 °С	±0,02...±0,1 °С	Висока однорідність; калібрування зразкових ТП
Комірка затвердіння (реперна точка)	Фіксована Т ITS-90	±0,0001...±0,001 °С	Атестація СПТО та зразкових термопар; первинна передача одиниці

ТП — термоелектричний перетворювач (термопара); ПТО — платиновий термометр опору; КХС — компенсація холодного спаю.

Точний вимірювач термо-ЕРС, структурна схема якого приведена на рисунку 1.5, для роботи із зразковими термопарами містить такі функціональні вузли: вхідний захисний та фільтрувальний каскад — RC-фільтр низьких частот для пригнічення радіочастотних завад та електростатичний захист від перенапруги; блок компенсації холодного спаю (КХС) — вимірює температуру вільних кінців термопари і вводить відповідну поправку до виміряного значення ЕРС; прецизійний вхідний підсилювач — підсилює слабкий сигнал ЕРС термопари (одиниці–десятки мВ) до рівня, необхідного для роботи АЦП. Використовуються операційні підсилювачі із низьким напругою зміщення (< 1 мкВ) та малим дрейфом (< 10 нВ/°С), наприклад *INA128*, *AD8221*. Коефіцієнт підсилення зазвичай становить 100–1000; аналогово-цифровий перетворювач ($\Sigma\text{-}\Delta$ тип), 18–24 розряди — забезпечують роздільчу здатність 0,01–0,1 мкВ при швидкості перетворення 1–60 відліків/с. Ключовою вимогою є низькі власні шуми (< 0,1 мкВ).

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		28

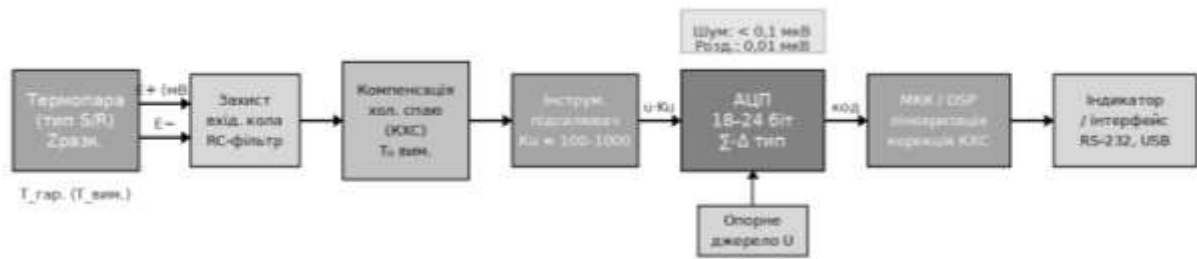


Рисунок 1.5 — Структурна схема точного вимірювача термо-ЕРС для роботи з термопарами

Серед промислових засобів вимірювання ЕРС термопар, що застосовуються у метрологічних лабораторіях і системах передачі одиниці температури, можна виділити такі групи приладів:

Прецизійні термометричні прилади фірми *Fluke 1594A / 1595A Super-Thermometer* є еталонним приладом першого розряду для вимірювання опору СПТО та ЕРС термопар з похибкою $\pm 0,05$ мкВ. [8] Прилад оснащений двома незалежними вимірювальними каналами, автоматичною компенсацією паразитних ЕРС і інтерфейсами RS-232/IEEE-488. Роздільна здатність ЕРС становить 0,01 мкВ, що відповідає роздільній здатності по температурі близько 0,001 °С для термопар типу S.

Fluke 1529 Chub-E4 — чотириканальний зчитувальний блок для ПТО, термопар і термісторів з похибкою вимірювання ЕРС $\pm 0,5$ мкВ. [12] Прилад широко застосовується в акредитованих калібрувальних лабораторіях завдяки портативності та можливості роботи в польових умовах. Інтерфейс RS-232 дозволяє інтеграцію у автоматизовані ІВС. [12]

Нановольтметри фірми *Keithley 2182A* із похибкою вимірювання $\pm 0,01$ мкВ та діапазоном від 10 нВ [9]. Прилад застосовується для прецизійного вимірювання ЕРС зразкових термопар у режимі відносних вимірювань та при роботі з термопарами типів S, R, B у точках затвердіння металів ITS-90. Для забезпечення максимальної точності необхідне застосування зовнішнього блоку КХС.

Багатоканальні системи збору даних Keysight 34970A / 34972A — модульні системи збору даних із мультиплексорними картками на 20 каналів, що підтримують вимірювання ЕРС термопар усіх стандартних типів з вбудованою КХС та похибкою ± 3 мкВ. Інтерфейси GPIB та USB дозволяють повну інтеграцію у комп'ютеризовані ІВС.

Таблиця 3.2 — Порівняльна характеристика засобів вимірювання ЕРС термопар

Прилад / модель	Тип сенсора	Похибка / роздільна здатність	Особливості та застосування
Fluke 1594A / 1595A Super-Thermometer	СПТО, термопари	$\pm 0,05$ мкВ / $0,01$ мкВ	8,5-розрядний мультиметр; два незалежних канали; автоматична компенсація КХС; еталонний прилад першого розряду
Fluke 1529 Chub-E4 Thermometer Readout	ТО, термопари, термістори	$\pm 0,5$ мкВ	4 канали, RS-232; похибка $\leq 0,002$ °C для ПТО; використовується у лабораторіях повірки
Isotech TTI-10 Thermometer	СПТО, ПТО, ТМП	$\pm 0,1$ мкВ	Портативний; автоматичний нуль; до 4 каналів; UKAS акредитація
Keysight 34970A/34972A Data Acquisition	Термопари, ТО	± 3 мкВ	Мультиплексор 20 каналів; інтерфейс GPIB/USB; частота 600 вим/с; широко використовується в ІВС
Measurement Computing USB-TC	Термопари (усі типи)	$\pm 0,02$ °C	USB інтерфейс; 8 каналів; вбудована КХС; 24-бітний АЦП; бюджетне рішення для ІВС
Нанольвольтметр Keithley 2182A	Термопари (прецизійні)	$\pm 0,01$ мкВ	2-канальний; вимірювання до 10 нВ; застосовується з зовнішньою КХС; еталонні вимірювання ЕРС

СПТО — стандартний платиновий термометр опору; КХС — компенсація холодного спаю; ШІМ — широтно-імпульсна модуляція; Σ - Δ АЦП — сигма-дельта АЦП.

Таким чином, в даному розділі проведено огляд засобів відтворення та вимірювання температури, що застосовуються при калібруванні термопар і передачі одиниці температури. Результати аналізу обґрунтовують вибір компонентів для розроблюваної ІВС і підтверджують можливість реалізації автоматизованої передачі одиниці температури з невизначеністю $\pm 0,5... \pm 1$ °C на

рівні метрологічної служби підприємства відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019.

1.4. Обґрунтування напрямку досліджень та побудови інформаційно-вимірювальної системи

Будь-яке вимірювання температури має сенс лише тоді, коли відомо, наскільки можна довіряти його результату. Цей зв'язок між показаннями конкретного приладу і загальноприйнятою міжнародною температурною шкалою ITS-90 називається метрологічною простежуваністю. Зразкова термopapa, атестована в акредитованій лабораторії, стоїть поряд із термометром, який потрібно перевірити, обидва занурені в один термостат — і система порівнює їхні покази. Якщо є відхилення, воно документується як поправка.

Метрологія організована як піраміда. На самій вершині — міжнародні еталони ВІРМ і реперні точки ITS-90 (температури фазових переходів надчистих речовин, що відтворюються з точністю до тисячних часток градуса). Далі ця точність «спускається вниз» через національні метрологічні інститути, акредитовані лабораторії — і зрештою потрапляє до звичайних термометрів на підприємствах.

Розроблювана система займає третій рівень цієї піраміди — між атестованою зразковою термopapoю (вторинний еталон) і цифровими термометрами, які потребують перевірки. Це так званий «робочий еталонний рівень» — не найточніший в абсолютному сенсі, але цілком достатній для потреб метрологічної служби підприємства або невеликої лабораторії.

Традиційно передача одиниці температури — це ручна процедура. Метролог підключає зразкову термopapo, вручну знімає покази, записує їх у журнал, розраховує поправки на калькуляторі або в таблиці Excel. Такий підхід має кілька очевидних слабких місць. Недоліками підходи є:

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

- людський фактор - ручна процедура несе ризик помилки при знятті показань, запису або розрахунку;
- калібрування одного термометра в кількох температурних точках із правильним очікуванням стабілізації термостата може зайняти кілька годин роботи кваліфікованого фахівця;
- ручне оформлення протоколів відповідно до стандарту ISO/IEC 17025 із зазначенням невизначеності, умов вимірювання, ідентифікаційних даних обладнання - окремий трудомісткий процес.

Таким чином, виникає потреба у доступному, автоматизованому рішенні, яке закривало б задачу передачі одиниці на рівні підприємства — без надмірних витрат і без залежності від ручних процедур.

Для вирішення даного питання слід розробити архітектуру інформаційно-вимірювальної системи, обґрунтувати вибір компонентів для реалізації процедури калібрування, розробити відповідне алгоритмичне та програмне забезпечення.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ І ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

2.1. Розробка структурної схеми інформаційної системи

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) відтворення і передачі одиниці температури призначена для реалізації одиниці термодинамічної температури (кельвін) та її передачі робочим засобам вимірювання – цифровим термометрам. У процесі роботи система використовує еталонні (зразкові) термопари, які розміщуються в контрольованому температурному полі термостата. За допомогою даної системи забезпечується метрологічна простежуваність результатів вимірювань відповідно до вимог ДСТУ 3742-98 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Контактні засоби вимірювань температури», а також принципів Міжнародної практичної температурної шкали (МПТШ-90 / ITS-90).

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		32

Структурна схема ІВС відповідає низці важливих вимог. Насамперед, вона має забезпечувати високу стабільність температурного поля в робочому об'ємі термостата з відхиленням не більше $\pm 0,01 \dots 0,05$ °С. Крім того, система повинна виконувати точне вимірювання температури зразковою термопарою з подальшим порівнянням отриманих даних із показаннями цифрових термометрів. Важливим є автоматичний збір, обробка та реєстрація вимірювальної інформації.

Система дозволяє відтворювати температуру в широкому діапазоні – від мінус 50 °С до 1100 °С (залежно від типу застосовуваної термопари та можливостей термостата). При цьому мінімізується вплив зовнішніх збурень електромагнітного, вібраційного та теплового характеру. Загальна структурна схема інформаційно-вимірювальної системи відтворення та передачі одиниці температури розроблена у відповідності зі структурними схемами термостату – рисунок 1.4 та структурною схемою точного вимірювача термо-ЕРС для роботи з термопарами і наведена на рисунку 2.1.

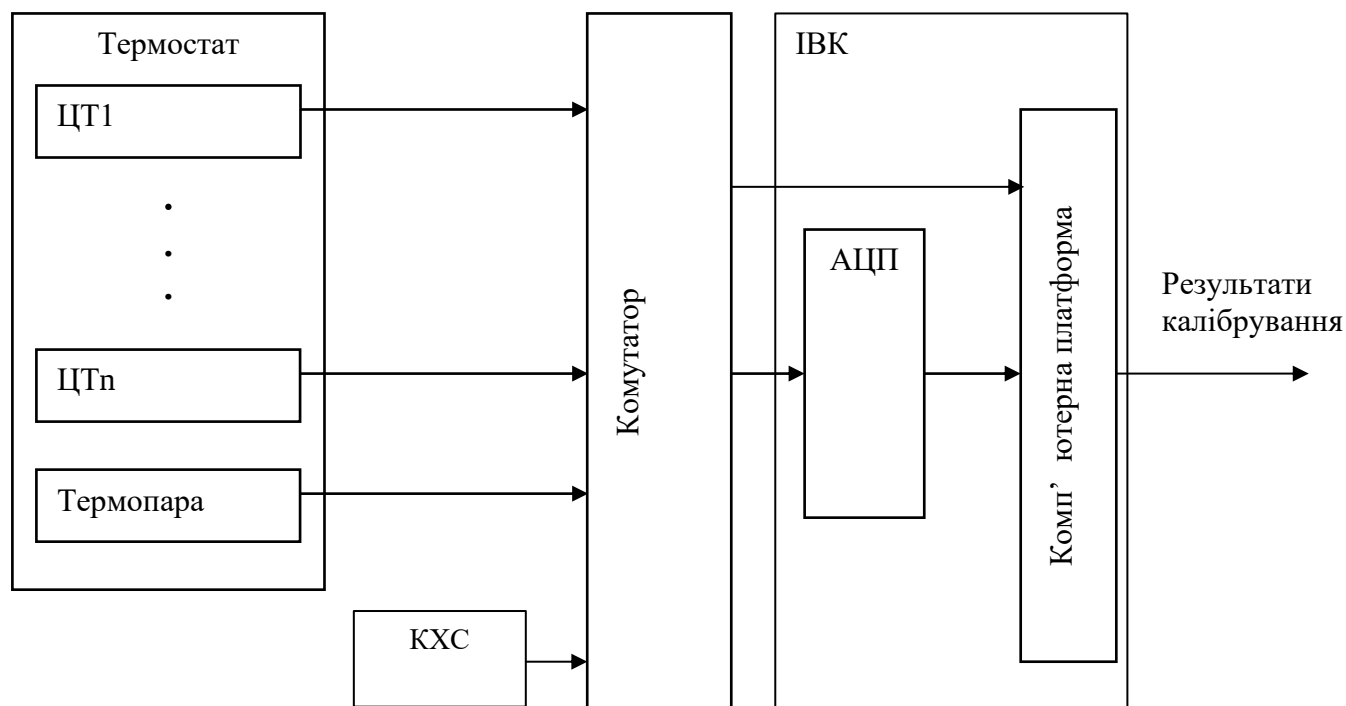


Рисунок 2.1 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи відтворення та передачі одиниці температури

Система складається з чотирьох основних функціональних блоків: термостата, зразкової термопари, цифрових термометрів та інформаційно-вимірювального комплексу, який відповідає за збір і обробку даних. Термостат є основним джерелом стабільного температурного поля. Саме в ньому розміщуються робочий кінець зразкової термопари та чутливі елементи цифрових термометрів. У системі застосовується рідинний або повітряний термостат з примусовою конвекцією (наприклад, моделі типу ТП-300 або їх аналоги). Термостат забезпечує високу рівномірність температурного поля в робочому об'ємі діаметром 60–100 мм і глибиною 200–400 мм. Градієнт температури при цьому не перевищує 0,01 °С/см. Регулювання температури здійснюється мікропроцесорним контролером за принципом ПІД-регулювання. Для додаткового моніторингу та захисту від перегріву термостат оснащений допоміжним датчиком температури. Живлення пристрою здійснюється від мережі 220 В, 50 Гц, а потужність нагрівача становить 1–2 кВт залежно від робочого діапазону.

Зразкова термопара виконує роль еталонного засобу відтворення одиниці температури. Для цієї мети рекомендується використовувати термопару типу S (Pt10%Rh–Pt) або типу R (Pt13%Rh–Pt). Така термопара забезпечує точність $\pm 0,1 \dots 0,3$ °С у діапазоні від 0°С до 1100°С. Робочий спай термопари розміщується в термостаті на одному рівні з чутливими елементами цифрових термометрів. Температуру холодного спаю компенсує електронна система з точністю $\pm 0,05$ °С.

Вихідним сигналом термопари є термо-ЕРС у мілівольтах. Цей сигнал перетворюється в значення температури за допомогою поліноміальних коефіцієнтів МПТШ-90 за формулою:

$$= \sum_{i=1}^n a_i * E^i,$$

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

де E^i – значення термо-ЕРС, а a_i – коефіцієнти полінома, наведені в таблицях МПТШ-90.

Термопару підключають до прецизійного цифрового вимірювача термо-ЕРС. Цифрові термометри виступають робочими засобами вимірювання, які підлягають калібруванню або повірці. Їхні чутливі елементи розміщуються в термостаті разом із зразковою термопарою, що забезпечує ідентичні умови вимірювання. Кожен термометр має вбудований аналого-цифровий перетворювач і мікроконтролер. У системі передбачена можливість одночасного підключення від 4 до 8 цифрових термометрів через комутаційний блок. Похибка цих термометрів до проведення калібрування зазвичай становить $\pm 0,5 \dots 2,0$ °C залежно від класу точності, яку буде мінімізовано в результаті передачі одиниць температури.

Інформаційно-вимірювальний комплекс (ІВК) є центральним блоком усієї системи. Він відповідає за збір, обробку, порівняння та документування вимірювальних даних. До складу ІВК входять аналого-цифровий перетворювач з роздільною здатністю 24 біти (для сигналу зразкової термопари), комутатор каналів для поетапного опитування цифрових термометрів, мікропроцесорний платформа, а також спеціальне програмне забезпечення. Програмне забезпечення дозволяє автоматично порівнювати показання, розраховувати поправки та формувати протоколи калібрування. Крім того, комплекс включає блок живлення та захисту від перешкод (фільтри та гальванічну розв'язку).

Запропонована структурна схема має низку суттєвих переваг. Вона дозволяє проводити одночасне калібрування кількох цифрових термометрів, забезпечує високий рівень автоматизації процесу та суттєво зменшує вплив людського фактора. Крім того, схема відрізняється гнучкістю, оскільки дозволяє легко змінювати тип термопари або термостата.

Серед недоліків можна відзначити можливий вплив теплопровідності з'єднувальних проводів, який усувається застосуванням екранування та термокомпенсації. Електромагнітні перешкоди нейтралізуються завдяки використанню гальванічної розв'язки та спеціальних фільтрів.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

Таким чином, розроблена структурна схема інформаційно-вимірювальної системи повністю вирішує поставлені задачі відтворення та передачі одиниці температури з високою точністю та рівнем автоматизації.

2.2. Аналіз температурних сенсорів та термостатів

В процесі реалізації завдання нам потрібно розглянути питання аналізу технічних характеристик цифрових термометрів, обґрунтувати вибір термостату і зразкової термопари для забезпечення процесу відтворення та передачі одиниці температури.

Цифрові термометри на інтегральних схемах (ІС) широко використовуються в промислових, медичних і наукових системах завдяки компактному виконанню, низькому енергоспоживанню та зручним цифровим інтерфейсам. Проте для вирішення метрологічних задач — зокрема, передачі одиниці температури відповідно до Міжнародної температурної шкали МТШ-90 — важливо розуміти принцип роботи первинного перетворювача кожного датчика, особливості його цифрового тракту та наявні можливості калібрування або самокалібрування. У цьому розділі розглядаються датчики МСР9808, ADT7410, TMP117, MAX31865, TMP102, LM75 і DS18B20, а також додатково описані STS40, PCT2075, MAX31875 і STTS75, що можуть представляти практичний інтерес для задачі відтворення та передачі одиниці температури [12-15].

Датчик МСР9808 побудований на основі кремнієвого р-п переходу і використовує інтерфейс І²С з тактовою частотою до 400 кГц. Датчик вимірює температуру в діапазоні від −40 до +125 °С із роздільною здатністю 0.0625 °С, що відповідає 13-бітному АЦП. Типова точність складає ±0.25 °С в діапазоні 0–60 °С, а максимальна похибка не перевищує ±0.5 °С. Калібрувальна поправка може бути врахована лише програмно у мікроконтролері [1].

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

ADT7410 також побудований на кремнієвому перетворювачі та підключається через I²C (до 400 кГц).. 16-бітний АЦП забезпечує роздільну здатність 0.0078 °C. Точність становить ± 0.5 °C (максимально) у діапазоні $-10...+85$ °C та ± 1 °C у розширеному діапазоні до $-55...+150$ °C. Важливою перевагою є наявність регістра зсуву (offset register), що дозволяє після зовнішнього калібрування записати поправку безпосередньо в пам'ять датчика.

MAX31865 відрізняється принципово: він не є ІС-термометром із вбудованим первинним перетворювачем температури, а являє собою спеціалізований АЦП для перетворення опору зовнішнього RTD (платинового термоопору Pt100 або Pt1000) у цифровий код. 15-бітний АЦП забезпечує роздільну здатність 0.03125 °C. Фактична точність визначається класом RTD та прецизійністю еталонного резистора. Самокалібрування відсутнє — точність повністю залежить від зовнішніх компонентів і процедури метрологічного забезпечення [1].

TMP102 є компактним (корпус SOT-563, 1.6×1.6 мм), низькоспоживаючим датчиком на основі кремнієвого перетворювача. Інтерфейс — I²C/SMBus. 12-бітний АЦП забезпечує роздільну здатність 0.0625 °C, точність ± 0.5 °C у діапазоні $-25...+85$ °C та ± 1 °C у ширшому діапазоні. Можливості збереження калібрувальної поправки немає. Датчик орієнтований передусім на мобільні пристрої та IoT-рішення з обмеженим живленням, де не потрібна висока метрологічна точність.

LM75 — це класичний датчик температури, в якому 9-бітний АЦП забезпечує роздільну здатність 0,5 °C, а типова точність становить ± 2 °C — найнижчий показник серед усіх розглянутих датчиків. Пристрій призначений для функцій захисту від перегріву та простої температурної індикації. Для будь-якого метрологічного застосування він потребує індивідуального калібрування, проте навіть після нього стабільність показів пристроїв різних виробників ускладнює забезпечення простежуваності [2].

DS18B20 побудований на кремнієвому та використовує унікальний однопровідний інтерфейс 1-Wire, де кожен пристрій ідентифікується 64-бітним

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

кодом. Це дозволяє підключати до 125 датчиків на одну шину і навіть жити їх безпосередньо від лінії даних (паразитне живлення). 12-бітний АЦП забезпечує роздільну здатність $0.0625\text{ }^{\circ}\text{C}$, точність $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ у діапазоні $-10...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Калібрувальну поправку можна враховувати лише програмно у мікроконтролері. Датчик широко застосовується у мережах моніторингу, та DIY-проектах [1].

STS40 виробництва Sensirion (Швейцарія) є датчиком з інтерфейсом I²C. Він забезпечує точність $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ та роздільну здатність $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ (16 біт). Суттєва перевага полягає в тому, що Sensirion проводить заводську NIST-трасовану калібровку кожного виробу та надає сертифікат відповідності [2].

PCT2075 виробництва NXP Semiconductors є покращеною версією LM75 з 11-бітним АЦП і роздільною здатністю $0.125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Точність $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, інтерфейс I²C. Датчик орієнтований на сервери та телекомунікаційне обладнання, де потрібен захист від перегріву [3].

MAX31875 виробництва Maxim Integrated (тепер Analog Devices) відзначається найвищою роздільною здатністю серед I²C-датчиків — $0.00390625\text{ }^{\circ}\text{C}$ при 16-бітному АЦП. Проте точність становить лише $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Діапазон вимірювань — до $+145\text{ }^{\circ}\text{C}$.

STTS75 виробництва STMicroelectronics є функціональним аналогом LM75 з 12-бітним АЦП і покращеною точністю $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Інтерфейс I²C. Застосовується у вбудованих системах і пристроях захисту від перегріву.

В таблиці 2.1 приведені узагальнені технічні характеристики всіх розглянутих датчиків, що дозволяє порівняти їх за одними критеріями.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики цифрових сенсорів температури

Датчик	Інтерфейс	Діапазон	Точність	Самокалібрування
MCP9808	I ² C	$-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тип.)	Offset лише у ПЗ
ADT7410	I ² C	$-55...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (макс.)	Регістр зсуву (offset reg)
TMP117	I ² C	$-55...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-20...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Offset reg + NIST-калібровка
MAX31865	SPI	$-200...+850\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (RTD Pt100)	Зовн. еталонний резистор
TMP102	I ² C	$-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-25...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Відсутнє
LM75	I ² C	$-55...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тип.)	Відсутнє

DS18B20	1-Wire	-55...+125 °C	±0.5 °C (-10...+85 °C)	Заводська EEPROM
STS40	PC	-40...+125 °C	±0.2 °C	NIST-трасована заводська
PCT2075	PC	-55...+125 °C	±1 °C (тип.)	Відсутнє
MAX31875	PC	-40...+145 °C	±1 °C (тип.)	Відсутнє
STTS75	PC	-55...+125 °C	±2 °C (тип.)	Відсутнє

Використання термопар типу S (Pt/PtRh 10%), яка добре працює в діапазоні від 0 до 1450–1600 °C і відрізняється високою стабільністю та відтворюваністю результатів, після індивідуальної калібровки її похибка в межах ±0,1–0,5 °C. Тому її можна використати для калібрування сенсорів LM75

Пристрої відтворення температури називають термостатами. Коли потрібна висока точність калібровки цифрових сенсорів разом зі зразковою термопарою типу S, вимоги до термостата зростають. При цьому потрібна як стабільність температури, так і її однорідність (uniformity) по всьому об'єму термостату. Навіть невелика різниця температури між місцем, де стоїть еталонна термопара S, і місцями розташування 8 цифрових датчиків може дати похибку, яка перевищить вимоги.

Тому для цих цілей найкраще підходять великі рідинні калібрувальні ванни з перемішуванням рідини. Вони забезпечують рівномірне температурне поле, де різниця між будь-якими точками в робочому об'ємі не перевищує 0,01–0,05 °C. Це дозволяє безпечно порівнювати показання термопар S з 8 і більше сенсорами одночасно.

Серед відомих термостатів виділяються Isotech Model 820 Large Volume Liquid Bath - ванна великого об'єму саме для одночасної калібровки багатьох датчиків – рисунок 2.2. Робочий об'єм приблизно 185 × 140 × 300 мм (близько 15 літрів), глибина занурення 300 мм. Підходить для температур від +30 до +200 °C (для негативних температур потрібна інша модель або рідина). Багато метрологічних лабораторій використовують її саме для порівняльної калібровки з еталонними термопарами.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		39

WIKA (Mensor) CTB9500 Діапазон $-45...+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (дуже близький до вашого, для більшості калібровок - $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ це прийнятно з невеликим запасом).



а)



б)

Рисунок 2.2 – Термостати фірм Isotech – а) та WIKA – б)

Квадратна ванна 280×280 мм, глибина 200 мм. Стабільність близько $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$. Дозволяє розміщення 8–10 і більше сенсорів + термопари S. Сенсорний екран, сучасне управління, опціональна 5-точкова калібровка контролера. Хороша однорідність завдяки потужному перемішуванню.

При критичній точності $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ і необхідності калібрувати одночасно 8 і більше цифрових сенсорів найкраще підходять великі рідинні ванни, такі як Isotech 820 (для позитивних температур) або WIKA CTB9500 (для $-45...+200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Вони забезпечують необхідну однорідність і стабільність, щоб похибка калібровки залишалася в межах вашої вимоги.

2.3. Обґрунтування та вибір мікроконтролера та аналогової частини

У системі калібрування цифрових термометрів зразкова термопара типу S виконує роль еталонного датчика, що забезпечує високу стабільність і відтворюваність результатів. Термопара типу S у цьому діапазоні генерує малий

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		40

сигнал — від приблизно -0,23 мВ при мінусових температурах до +1,44 мВ при +200 °С. Чутливість термопар становить лише 6–8 мкВ на градус Цельсія. Для досягнення критичної точності калібровки на рівні $\pm 0,1$ °С або краще система повинна надійно розрізняти зміни напруги менше 0,5–0,7 мкВ. При цьому необхідно забезпечити мінімальний рівень власного шуму, температурного дрейфу та точну компенсацію температури холодного спаю. Звичайні вбудовані аналого-цифрові перетворювачі мікроконтролерів з розрядністю 12–16 біт не дозволяють досягти необхідної точності через недостатню роздільну здатність і високий рівень шуму при роботі з мікрвольтовими сигналами. Тому для вимірювання сигналу зразкової термопар типу S доцільно застосовувати зовнішній прецизійний 24-бітний сигма-дельта аналого-цифровий перетворювач у поєднанні з продуктивним мікроконтролером. Після аналізу характеристик сучасних прецизійних АЦП обрано ADS1248 виробництва Texas Instruments – рисунок 2.3.

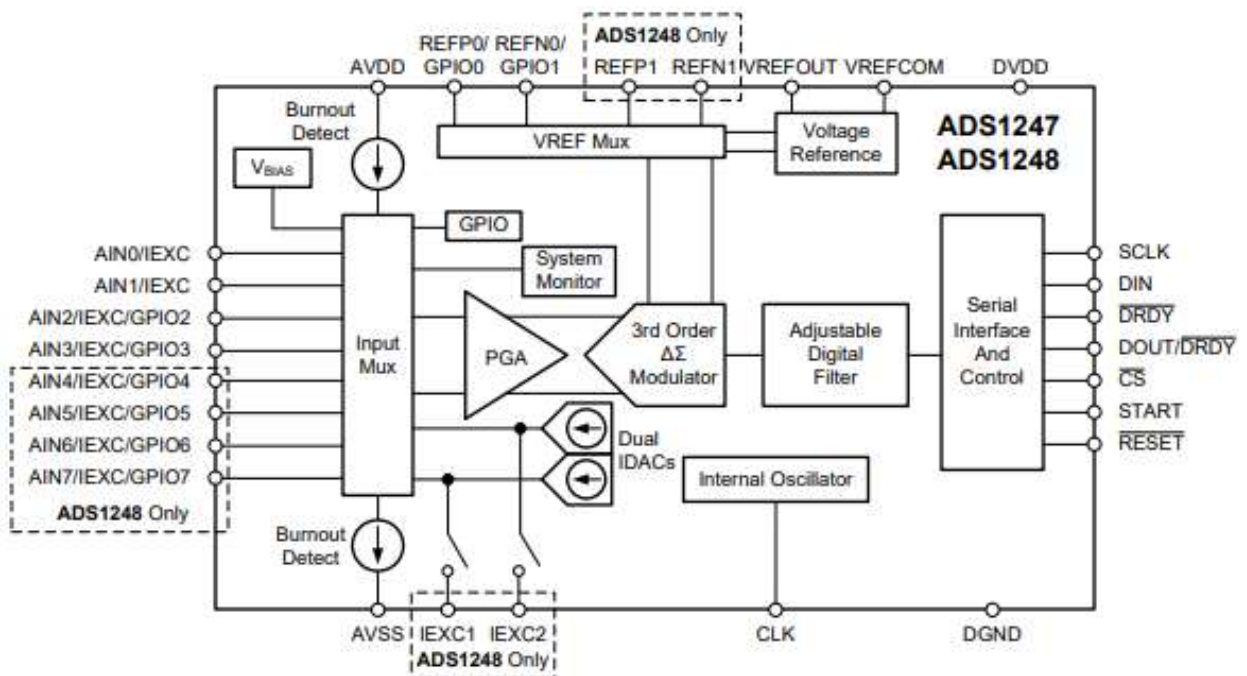


Рисунок 2.3 - АЦП ADS1248 виробництва Texas Instruments

Цей 24-бітний сигма-дельта перетворювач спеціально розроблений для вимірювання сигналів температурних сенсорів, включаючи термопари. Він містить програмований підсилювач з коефіцієнтом підсилення до 128, що дозволяє ефективно «розтягувати» мікрвольтовий сигнал термопари до рівня, зручного для подальшого перетворення. Низький рівень власного шуму (близько 0,5–2 мкВ пік-пік залежно від швидкості вибірки) та вбудовані джерела струму для точного вимірювання температури холодного спаю забезпечують стабільність і повторюваність результатів на рівні, необхідному для досягнення загальної похибки калібровки в межах $\pm 0,1$ °C. Крім того, ADS1248 підтримує автоматичне калібрування зміщення та підсилення, а також містить внутрішній датчик температури, що спрощує реалізацію компенсації холодного спаю.

Для обробки даних з АЦП, виконання складних поліноміальних розрахунків за стандартом ITS-90 для термопари типу S, а також одночасного опитування восьми і більше цифрових сенсорів обрано мікроконтролер сімейства STM32 F4 виробництва STMicroelectronics. Швидкий інтерфейс SPI дозволяє обмінюватися даними з ADS1248 без затримок, а розвинена периферія (I²C, UART, USB) дає можливість паралельно працювати з групою цифрових датчиків. Наявність DMA-контролера та високоточних таймерів гарантує, що процес вимірювання відбувається без втрат продуктивності навіть при великій кількості каналів. Поєднання ADS1248 і мікроконтролера STM32 дозволяє реалізувати повний цикл вимірювання: зняття мікрвольтового сигналу термопари, точну компенсацію температури холодного спаю за допомогою додаткового прецизійного датчика (наприклад, Pt100), застосування поліноміальних коефіцієнтів для перетворення напруги в температуру та порівняння отриманого значення з показаннями каліброваних цифрових сенсорів. Схема підключення АЦП до мікроконтролера приведена на рисунку 2.3 [16].

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

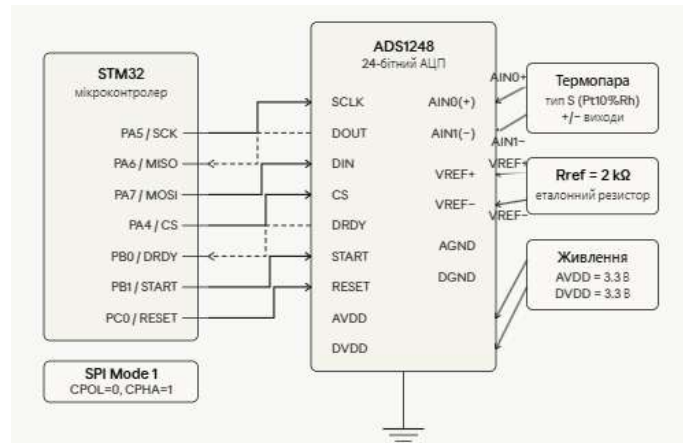


Рисунок 2.3 - Схема підключення АЦП до мікроконтролера

Така архітектура забезпечує необхідну точність і стабільність у всьому робочому діапазоні від -60 до $+200$ °C при одночасній калібровці восьми і більше датчиків у рідинному термостаті. Вибране рішення базується на рекомендаціях виробника та апробованих практиках прецизійних вимірювальних систем. Зокрема, у технічній документації Texas Instruments підкреслюється, що ADS1248 створює повноцінний фронтенд для термопарних вимірювань завдяки інтегрованому підсилювачу, низькому шуму та вбудованим функціям компенсації.

Таким чином, використання мікроконтролера STM32 у поєднанні з АЦП ADS1248 є обґрунтованим і оптимальним вибором для створення високоточної системи передачі одиниці температури на основі зразкової термопари типу S.

3. РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Методика експерименту по відтворенню та передачі одиниці температури

Метою цього розділу є розробка детальної методики проведення експерименту з відтворення та передачі одиниці температури від зразкової платинової термопари типу S групі цифрових датчиків температури у складі інформаційно-вимірювальної системи (ІВС). Методика встановлює порядок

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

підготовки обладнання, проведення вимірювань, математичного опрацювання результатів та оцінювання невизначеності. Передача розміру одиниці від зразкового до робочого засобу вимірювань здійснюється методом безпосереднього порівняння або методом порівняння з еталонним сигналом. Використаємо метод безпосереднього порівняння показань цифрового датчика з показаннями зразкової термопари в умовах термостата. Згідно ДСТУ 2708:2006, п. 3.1 “Передача розміру одиниці вимірювань — операція, що полягає у приведенні показань засобу вимірювальної техніки у відповідність до одиниці вимірювань шляхом його калібрування (повірки) за допомогою еталона або зразкового засобу вимірювань” [17-19].

Кількість точок калібрування визначається двома взаємопов'язаними вимогами: по-перше, необхідністю достовірно відтворити функцію поправки $\delta T(T)$ на всьому робочому діапазоні датчика; по-друге, обмеженнями на трудомісткість процедури.

Для статистично достовірної оцінки коефіцієнтів регресії згідно з рекомендаціями EURAMET cg-13 v.4, кількість точок калібрування повинна бути не менше ніж удвічі більшою за кількість параметрів апроксимуючої функції. Для квадратичного полінома (3 параметри: a_0, a_1, a_2) мінімально рекомендована кількість точок — 6.

Таким чином, обрано 6 точок калібрування рівномірно розподілених у діапазоні $0 \dots +100$ °C з кроком 20 °C. Нижня межа діапазону (0 °C) збігається з першою реперною точкою МТШ-90, верхня (+100 °C) — з другою. Такий вибір забезпечує: рівномірне покриття діапазону специфікованої точності обох датчиків ($-10 \dots +85$ °C), дві незалежні перевірки у реперних точках (0 °C і 100 °C), та достатню кількість рівнянь для квадратичної МНК-апроксимації з оцінкою якості підгонки.

У кожній з шести температурних точок T_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) виконують серію з $N = 20$ відліків температури датчиком $\{T_{д,j}\}$ та зразковою термопарою $\{T_{з,j}\}$. Середні значення обчислюються за формулами:

$$\bar{T}_{д(i)} = (1/N) \cdot \sum_{j=1}^N T_{д,j}(i),$$

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\bar{T}_{_3}(i) = (1/N) \cdot \sum_{j=1}^N T_{_3,j}(i).$$

Поправка у і-й точці:

$$\delta T_{_i} = \bar{T}_{_3}(i) - \bar{T}_{_д}(i).$$

Знак поправки: якщо $\delta T_{_i} > 0$, датчик занижує показання; якщо $\delta T_{_i} < 0$ — завищує. Скоригований результат вимірювання у будь-якій точці:

$$T_{_скор} = T_{_д} + \delta T(T_{_д}),$$

де $\delta T(T_{_д})$ — значення функції поправки, обчислене при температурі $T_{_д}$.

За шістьма парами значень $\{T_{_i}, \delta T_{_i}\}$ будують апроксимаційний поліном другого ступеня:

$$\delta T(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2,$$

де a_0, a_1, a_2 — невідомі коефіцієнти, що визначаються методом найменших квадратів (МНК). Матрична форма системи рівнянь МНК:

$$A = (X^T X)^{-1} \cdot X^T \cdot \delta T,$$

де $A = [a_0, a_1, a_2]^T$ — вектор коефіцієнтів;

$\delta T = [\delta T_1, \dots, \delta T_6]^T$ — вектор поправок у реперних точках;

X — матриця плану розміром 6×3 :

$$X = [[1, T_1, T_1^2], [1, T_2, T_2^2], \dots, [1, T_6, T_6^2]].$$

У розгорнутому вигляді система нормальних рівнянь МНК для трьох невідомих:

$$n \cdot a_0 + a_1 \cdot \sum T_{_i} + a_2 \cdot \sum T_{_i}^2 = \sum \delta T_{_i},$$

$$a_0 \cdot \sum T_{_i} + a_1 \cdot \sum T_{_i}^2 + a_2 \cdot \sum T_{_i}^3 = \sum T_{_i} \cdot \delta T_{_i},$$

$$a_0 \cdot \sum T_{_i}^2 + a_1 \cdot \sum T_{_i}^3 + a_2 \cdot \sum T_{_i}^4 = \sum T_{_i}^2 \cdot \delta T_{_i},$$

де $n = 6$ — кількість точок калібрування, а суми беруться по i від 1 до 6.

Після знаходження коефіцієнтів a_i здійснюють оцінку якості апроксимації обчислюючи залишки:

$$\varepsilon_{_i} = \delta T_{_i} - \hat{\delta T}(T_{_i}) = \delta T_{_i} - (a_0 + a_1 T_{_i} + a_2 T_{_i}^2).$$

Стандартне відхилення залишків (середньоквадратична похибка апроксимації):

$$s_{_апр} = \sqrt{[\sum_i \varepsilon_{_i}^2 / (n - 3)]},$$

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де $(n - 3)$ — кількість ступенів свободи ($n = 6$ точок, 3 параметри). Значення $s_{\text{апр}}$ характеризує похибку інтерполяції між точками i є складовою бюджету невизначеності. Вважається прийнятним, якщо $s_{\text{апр}} \leq 0.1$ °C.

Коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 1 - \sum_i \varepsilon_i^2 / \sum_i (\delta T_i - \delta \bar{T})^2.$$

При $R^2 \geq 0.99$ квадратична апроксимація вважається задовільною. Якщо $R^2 < 0.99$, слід перевірити наявність аномальних значень або розглянути поліном третього ступеня.

Таблиця 3.1 містить покроковий протокол проведення калібрування, що є обов'язковим для виконання у наведеному порядку.

Таблиця 3.1 — Протокол проведення калібрування

Крок	Дія	Опис
1	Підготовка	Увімкнути рідинний термостат. Встановити температуру першої реперної точки. Витримати 30 хв для стабілізації теплового поля.
2	Монтаж	Занурити робочий спай зразкової термопари типу S та датчик у термостат на однакову глибину (різниця не більше 5 мм від дна занурювальної трубки). Перевірити тепловий контакт.
3	Стабілізація	Витримати 15 хв після монтажу. Критерій стабільності: відхилення показань термопари за останні 5 хв не перевищує 0.05 °C.
4	Відліки	Зняти $N = 20$ послідовних відліків з датчика з інтервалом 5 с (для DS18B20 — кожні 750 мс при 12-бітному режимі). Одночасно записати 20 відліків з цифрового вольтметра (термопара).
5	Обробка	Обчислити середні значення $\bar{T}_{\text{д}}$ та $\bar{T}_{\text{з}}$, стандартні відхилення $s_{\text{д}}$ та $s_{\text{з}}$, поправку $\delta T = \bar{T}_{\text{з}} - \bar{T}_{\text{д}}$.
6	Перехід	Встановити наступну температурну точку. Повторити кроки 1–5 для всіх шести точок.
7	Апроксимація	За таблицю $(T_i, \delta T_i)$ побудувати поліноміальну функцію поправки методом найменших квадратів (розділ 3.4 цієї методики).
8	Запис поправки	ADT7410: записати $\delta T(T)$ у offset-регістр через I ² C при кожному ввімкненні. DS18B20: зберегти коефіцієнти поліному у Flash мікроконтролера поряд із серійним номером датчика (64-бітний ROM).

До початку вимірювань датчики слід витримати у включеному стані не менше 30 хвилин для стабілізації теплового режиму напівпровідникового

кристала. Відмова від цієї вимоги може призвести до систематичної похибки за рахунок дрейфу нульового зміщення АЦП у перехідному режимі.

Таким чином, в даному розділі здійснено розробку методики передачі розміру температури від зразкової термопари до сенсорів.

3.2. Програмна реалізація процесу передачі одиниці температури

Програмну реалізацію процесу передачі одиниці температури здійснимо з врахування вибраного мікроконтролера STM32F4. Для розробки коду використаємо STM32CubeIDE. STM32CubeIDE — безкоштовне інтегроване середовище розробки від STMicroelectronics, побудоване на Eclipse CDT з GNU-інструментарієм ARM. Воно забезпечує повний цикл розробки: конфігурацію периферії, генерацію коду, компіляцію та відлагодження для мікроконтролерів STM32 [1]. Головне вікно середовища складається з чотирьох зон (рисунок 3.1):

1. Project Explorer (ліворуч) — дерево файлів проекту;
2. Редактор коду (центр) — C/C++ редактор з підсвіченням синтаксису;
3. Outline / Properties (праворуч) — структура файлу та параметри MCU;
4. Console (знизу) — результати відлагодження.

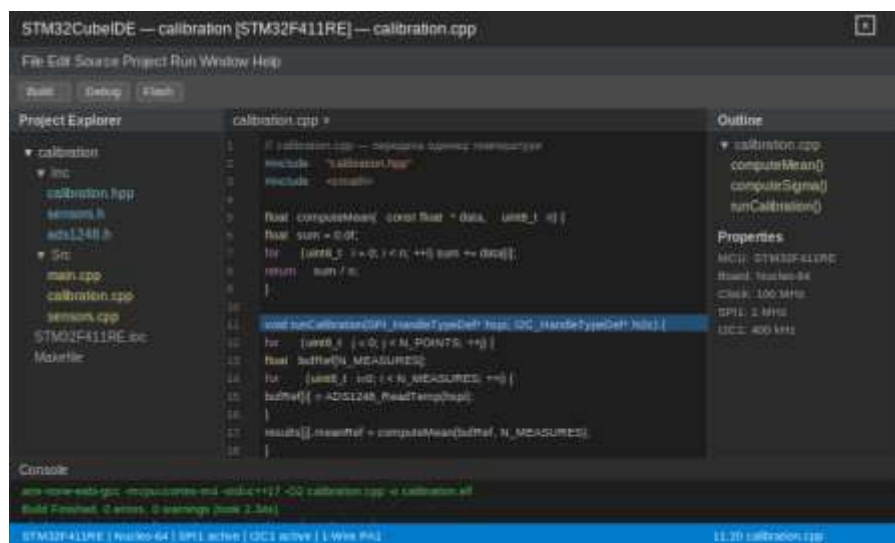


Рисунок 3.1 — Головне вікно STM32CubeIDE з кодом calibration.cpp

Для проекту використано мікроконтролер STM32F411RE (Nucleo-64). Зв'язок з АЦП ADS1248 — SPI1 (PA5–PA7), цифрові сенсори — I²C1 (PB6/PB7) та 1-Wire (PA1). SPI — це синхронний послідовний інтерфейс обміну даними, який широко використовується в мікроконтролерних системах. Він забезпечує швидкий зв'язок між ведучим пристроєм (master) і одним або кількома веденими пристроями (slave).

Передача даних у SPI відбувається за допомогою кількох ліній: тактового сигналу, лінії передачі даних від ведучого до веденого, лінії у зворотному напрямку та окремих ліній вибору пристрою. Обмін є повнодуплексним, тобто дані можуть передаватися одночасно в обох напрямках.

Інтерфейс не має складної адресації — вибір конкретного пристрою здійснюється сигналом вибору, що спрощує реалізацію і підвищує швидкість роботи. Завдяки своїй простоті, високій швидкості та надійності SPI широко застосовується для підключення датчиків, пам'яті та інших периферійних модулів у вбудованих системах.

Інтерфейс I²C — це послідовна шина зв'язку, призначена для обміну даними між мікроконтролером і різними периферійними пристроями. Він використовує лише дві лінії — одну для передачі даних (SDA) і одну для синхронізації (SCL), що робить його простим у реалізації. У системі є ведучий пристрій, який керує обміном, і підлеглі, кожен із яких має власну адресу. Передача даних відбувається пакетами з підтвердженням прийому, а сама шина підтримує кілька режимів швидкості. Налаштування ынтерфейсів приведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Налаштування інтерфейсів у CubeMX

Інтерфейс	Функція	Піни STM32
SPI1	АЦП ADS1248 (термопара S)	PA5/PA6/PA7, PA4
I ² C1	LM75, STTS75	PB6/PB7
UART2	Виведення результатів на ПК	PA2/PA3

Наступним етапом є розробка діаграми алгоритму функціонування програмного забезпечення. Передбачається, що алгоритм реалізує метрологічний метод порівняння: у шести реперних точках (20, 40, 60, 80, 100, 120 °C) виконується по 20 вимірювань зразковою термопарою типу S та кожним із 8 цифрових сенсорів. Далі обчислюється математичне сподівання та систематичне відхилення, описані в розділі 3.1. Для побудови діаграми використаємо програму PlantUML. PlantUML — інструмент генерації UML-діаграм із текстового опису. Нижче наведено код для відтворення діаграми активності онлайн на plantuml.com/plantuml та безпосередньо діаграму алгоритму (рисунок 3.2):

```
@startuml
title Алгоритм передачі одиниці температури
start
:Ініціалізація SPI, I2C, 1-Wire, UART;
repeat
:Встановити Tj (термостат);
:Витримка стабілізації;
repeat
:Зчитати Tref[i] через ADS1248;
:Зчитати Tsens[k][i] k=1..8;
:i = i + 1;
repeat while (i <= 20) is (так) not (ні)
:Обчислити M(Tref), M(Tsens[k]);
:delta[k] = M(Tref) - M(Tsens[k]);
:sigma[k] = sqrt(variance);
:Передати результати UART;
:j = j + 1;
repeat while (j <= 6) is (так) not (ні)
:Вивести зведену таблицю delta[k][j];
stop
@enduml
```

Середовище CubeIDE використовує мову програмування C, іноді C++. Вона орієнтована на розробку вбудованих систем і забезпечує прямий доступ до апаратних ресурсів мікроконтролера. Мова дозволяє ефективно керувати пам'яттю, периферійними пристроями та перериваннями, що є критично важливим для реального часу. У поєднанні з бібліотеками вона спрощує

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		49

налаштування апаратури та прискорює розробку програм для мікроконтролерів STM32.

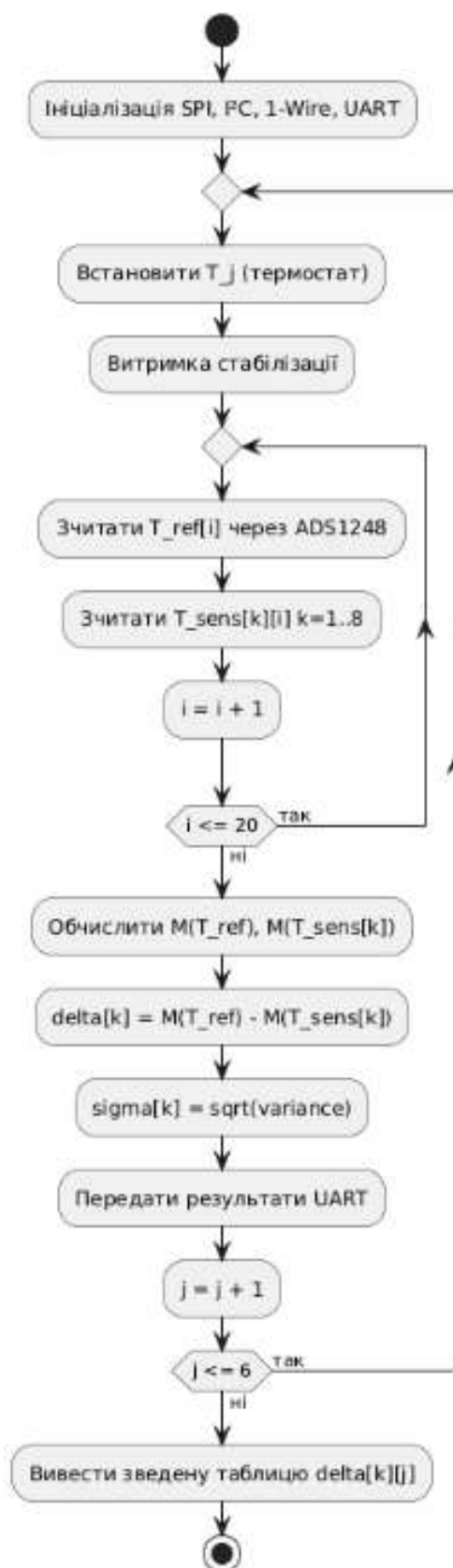


Рисунок 3.2 - Згенерована діаграма алгоритму передачі одиниці температури

Повна реалізація складається з двох файлів. Заголовний файл визначає константи та структуру результатів:

```
// calibration.hpp
#pragma once
#include <array>
#include <cstdint>

constexpr uint8_t N_SENSORS = 8; // кількість сенсорів
constexpr uint8_t N_POINTS = 6; // реперних точок
constexpr uint8_t N_MEASURES = 20; // вимірювань у точці

// Реперні точки, °C
constexpr float REF_POINTS[N_POINTS] =
    { 20.0f, 40.0f, 60.0f, 80.0f, 100.0f, 120.0f };

struct CalibResult {
    float meanRef;          //  $M(T_{ref})$ 
    float meanSens[N_SENSORS]; //  $M(T_{sens}[k])$ 
    float delta[N_SENSORS];  //  $\Delta_k$  — формула (3.2)
    float sigma[N_SENSORS];  //  $\sigma_k$  — формула (3.3)
};
```

Файл реалізації містить функції обчислення та головний цикл калібрування:

```
// calibration.cpp
#include "calibration.hpp"
#include "ads1248.h" // драйвер ADS1248 через SPI
#include "sensors.h" // HAL I2C / 1-Wire
#include <cmath>

CalibResult results[N_POINTS];

// Математичне сподівання — формула (3.1)
static float computeMean(const float* d, uint8_t n) {
    float s = 0.0f;
    for (uint8_t i = 0; i < n; ++i) s += d[i];
    return s / n;
}

// СКВ — формула (3.3)
static float computeSigma(const float* d,
                          uint8_t n, float mean) {
    float s = 0.0f;
    for (uint8_t i = 0; i < n; ++i)
        s += (d[i]-mean)*(d[i]-mean);
    return sqrtf(s / (n - 1));
}

void runCalibration(SPI_HandleTypeDef* hspi,
```

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

```

        I2C_HandleTypeDef* hi2c) {
// Зовнішній цикл: j = 6 реперних точок
for (uint8_t j = 0; j < N_POINTS; ++j) {
    float bufRef[N_MEASURES];
    float bufSens[N_SENSORS][N_MEASURES];

    // Внутрішній цикл: i = 20 вимірювань
    for (uint8_t i = 0; i < N_MEASURES; ++i) {
        bufRef[i] = ADS1248_ReadTemp(hspi);
        for (uint8_t k=0; k<N_SENSORS; ++k)
            bufSens[k][i] = Sensor_Read(hi2c, k);
        HAL_Delay(500); // пауза 0.5 с
    }

    // Обчислення для кожного сенсора
    results[j].meanRef = computeMean(bufRef, N_MEASURES);
    for (uint8_t k = 0; k < N_SENSORS; ++k) {
        float m = computeMean(bufSens[k], N_MEASURES);
        results[j].meanSens[k] = m;
        // формула (3.2)
        results[j].delta[k] = results[j].meanRef - m;
        // формула (3.3)
        results[j].sigma[k] =
            computeSigma(bufSens[k], N_MEASURES, m);
    }
    PrintResults(j, &results[j]); // UART
}
}

```

3.3. Оцінка невизначеності відтворення та передачі одиниці температури

Метою цього розділу є кількісне оцінювання невизначеності результату відтворення та передачі одиниці температури від зразкової платинової термопари типу S цифровим датчикам LM75 та STTS75 у складі інформаційно-вимірювальної системи. Оцінювання виконується відповідно до методології GUM — «Настанова з висловлення невизначеності вимірювань» (JCGM 100:2008), яка є основоположним міжнародним документом у сфері метрологічного забезпечення результатів вимірювань. Термін «невизначеність вимірювання» у контексті GUM позначає параметр, що характеризує розсіювання значень, які можуть бути обґрунтовано приписані вимірюваній

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

величині. На відміну від поняття «похибка», невизначеність не потребує знання істинного значення — вона кількісно описує межі незнання результату на заданому рівні довіри.

Зразкове значення температури T_{ref} , яке передається датчикам LM75, отримується в результаті ланцюжка перетворень, що охоплює чотири фізичні процеси. Кожен з них вносить свій вклад у сумарну невизначеність. Математична модель має вигляд:

$$T_{ref} = f^{-1}_S(E_{meas} + E_{cold}(T_{cold})) + \delta_{therm} + \delta_{ADS} + \delta_{apr}$$

де f^{-1}_S — обернена функція МТШ-90 для типу S;

E_{meas} — термо-ЕРС, виміряна АЦП ADS1248 [мкВ];

$E_{cold}(T_{cold})$ — ЕРС холодних кінців термопари, обчислена за температурою T_{cold} , виміряною термометром Pt100;

δ_{therm} — поправка, пов'язана з нестабільністю термостата;

δ_{ADS} — поправка, пов'язана з нелінійністю АЦП;

δ_{apr} — поправка апроксимації полінома МТШ-90.

Усі поправки δ вважаються нульовими після калібрування системи, але їхня невизначеність входить до бюджету.

Перед складанням бюджету невизначеності необхідно встановити метрологічні характеристики кожного засобу, що бере участь у процесі відтворення та передачі одиниці температури. Таблиця 3.3 містить узагальнену характеристику всіх компонентів ІВС і складена із врахування інформації розділу 2.2.

Таблиця 3.3 — Метрологічні характеристики засобів вимірювань ІВС

Засіб вимірювання	Діапазон	Нормована похибка	$u(k=1)$
Термостат Wika СТВ9500	-40...+200 °C	±0.005 °C	±0.002 °C
Зразкова термопара типу S (Pt10%Rh–Pt)	0...+1064 °C	±0.1...0.3 °C	±0.10 °C

Платиновий термометр опору Pt100 (компенсація XC)	−50...+300 °C	±0.05 °C	±0.025 °C
АЦП ADS1248 (Texas Instruments)	вхід ±2.5 В	±0.01 мкВ (шум)	±0.005 °C
Мікроконтролер STM32H7	—	Подвійна точність FPU	< 0.001 °C
Датчики LM75 (8 шт.)	−55...+150 °C	±0.5 °C (до каліб.)	—

Невизначеність зразкового значення температури T_{ref} є визначальною у ланцюжку передачі одиниці. Вона формується з усіх джерел похибок між первинним еталоном (зразкова термопара) і результатом обчислення T_{ref} у мікроконтролері STM32H7. Таблиця 3.4 містить повний бюджет невизначеності.

Таблиця 3.4 — Бюджет невизначеності зразкового значення T_{ref}

Джерело невизначеності	Позн.	u_i , °C	Тип	Розподіл	c_i	$u_i \cdot c_i $, °C
Невизначеність зразкової термопари типу S (сертифікат калібрування)	u_1	0.050	В	нормальний	1	0.050
Нестабільність термостата Wika СТВ9500 (паспорт: ±0.005 °C)	u_2	0.003	В	рівномірний	1	0.003
Неоднорідність температурного поля у робочій зоні термостата	u_3	0.003	В	рівномірний	1	0.003
Похибка компенсації холодних кінців (Pt100 клас AA, ±0.05 °C, $k=2$)	u_4	0.025	В	нормальний	1	0.025

Складена стандартна невизначеність зразкового значення обчислюється за законом поширення невизначеностей (GUM):

$$u_c(T_{ref}) = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2)} = \sqrt{(0.050^2 + 0.003^2 + 0.003^2 + 0.025^2)} = 0.025$$

Розширена невизначеність при коефіцієнті охоплення $k = 2$ (рівень довіри $\sim 95\%$ за нормального розподілу):

$$U(T_{\text{ref}}) = k \times u_c(T_{\text{ref}}) = 2 \times 0.025 \approx 0.052^\circ\text{C}$$

Після передачі одиниці температури датчику LM75 у результаті калібрування виникає додаткова невизначеність, пов'язана із самою процедурою передачі: квантуванням АЦП датчика, шумом, апроксимацією функції поправки, дрейфом датчика між калібруваннями та самонагріванням.

Загальна невизначеність результату вимірювання температури відкаліброваним датчиком LM75 визначається як складена невизначеність усього ланцюжка: відтворення $\rightarrow$ передача $\rightarrow$ вимірювання. Оскільки невизначеності T_{ref} та T_d є статистично незалежними:

$$u_c(\text{total}) = \sqrt{(u_c^2(T_{\text{ref}}) + u_c^2(T_d))}$$

Аналіз бюджету невизначеності дозволяє виявити домінуючі складові та сформулювати практичні рекомендації для покращення якості передачі одиниці. Найбільший вклад у невизначеність T_{ref} вносить невизначеність самої зразкової термопари. Для мінімізації невизначеності рекомендується використовувати свіжовідкалібровану зразкову термопару з сертифікатом, застосовувати термостат WİKA CTB9500 у режимі стабілізації не менше 30 хвилин після виходу на задану температуру перед початком накопичення відліків, забезпечити однакову глибину занурення термопари та датчиків LM75.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		55

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи розроблено інформаційно-вимірювальну систему відтворення та передачі одиниці температури, а також вирішено низку науково-технічних завдань, пов'язаних із забезпеченням метрологічної простежуваності температурних вимірювань.

У ході роботи виконано аналіз чинної нормативної бази у сфері термометрії та метрологічного забезпечення вимірювань. Встановлено, що вимоги до простежуваності результатів вимірювань і оцінювання невизначеності регламентуються національними та міжнародними стандартами, а передача розміру одиниці температури здійснюється через послідовний ланцюг від еталонів до робочих засобів вимірювальної техніки шляхом калібрування.

На основі порівняльного аналізу температурних перетворювачів обґрунтовано використання термопари типу S як еталонного засобу відтворення температури та цифрового термометра DS18B20 як контрольованого засобу вимірювання. Вибране поєднання забезпечує можливість передачі розміру одиниці температури в широкому діапазоні вимірювань із необхідною точністю.

Розроблено структурну та функціональну схеми інформаційно-вимірювальної системи на базі мікроконтролера. До складу системи входять еталонний вимірювальний канал на основі термопари та перетворювача MAX31855, цифровий термометр DS18B20, засоби компенсації температури холодного спаю та модулі бездротового зв'язку Wi-Fi і Bluetooth для дистанційної передачі результатів вимірювань.

Створено програмне забезпечення, яке реалізує автоматизоване зчитування та оброблення даних, усереднення результатів вимірювань, корекцію систематичних похибок і передачу інформації мережею Wi-Fi з використанням протоколу MQTT. Це забезпечує підвищення точності та зручності експлуатації системи.

Проведено метрологічний аналіз розробленої системи та виконано оцінювання невизначеності результатів вимірювання відповідно до вимог GUM.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		56

Визначено внесок складових невизначеності типів А і В, а отримані результати підтвердили, що розширена невизначеність відтворення температури не перевищує $\pm 0,5$ °С при довірчій імовірності 95 %.

Також розроблено методику калібрування цифрових термометрів із використанням створеної інформаційно-вимірювальної системи. Методика передбачає проведення вимірювань у контрольних точках діапазону, визначення поправок та оформлення результатів калібрування, що забезпечує метрологічну простежуваність засобів вимірювання температури.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання розробленої системи в метрологічних лабораторіях і калібрувальних центрах. Запропоноване рішення характеризується відносно невисокою вартістю, відкритою програмною архітектурою та можливістю подальшого розширення функціональних можливостей, що підтверджує перспективність його впровадження для забезпечення єдності температурних вимірювань.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Франасюк Б.П. Савченко В.І. Інформаційно-вимірювальні системи забезпечення єдності вимірювань: традиційні та альтернативні методи передачі одиниць фізичних величин - Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (АКІТ - 2026)», Тернопіль, 2026 – с. 68-70.
2. Preston-Thomas H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). Metrologia. 1990. Vol. 27. P. 3–10.
3. Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990. BIPM, Sèvres, 2018. 276 p. URL: https://www.bipm.org/documents/20126/-41773843/ITS-90_supplementary_info.pdf.
4. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 05.06.2014 № 1314-VII. Відомості Верховної Ради. 2014. № 30. Ст. 1011.
5. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2019. 36с.
6. ДСТУ JCGM 100:2015 (GUM). Настанова з висловлення невизначеності вимірювання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 136 с.
7. ДСТУ ІЕС 60584-1:2014. Термопар. Частина 1. Таблиці ЕРС. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 153 с.
8. ДСТУ ІЕС 60584-2:2014. Термопар. Частина 2. Допуски. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 24 с.
9. Fluke Corporation. Model 1594A and 1595A Super-Thermometer: Operators Manual. Everett, WA : Fluke Corp., 2012. 148 p.
10. Keithley Instruments. Model 2182A Nanovoltmeter: Reference Manual. Cleveland, OH : Keithley, 2008. 312 p.
11. Ковальчук В. В., Моїсеєнко С. І. Метрологія та вимірювальна техніка : навч. посіб. Київ : Либідь, 2005. 344 с.
12. Модуль цифрового сенсора температури MCP9808. <https://www.joom.com/uk/products>

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		58

13. ADT7410TRZ Analog Devices, Inc. https://www-rscscomponents-kiev-ua.translate.goog/product/adt7410trz_95955.html
14. Maxim Integrated (Analog Devices). DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
15. Texas Instruments. LM75 Digital Temperature Sensor and Thermal Watchdog with Two-Wire Interface. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm75.pdf>.
16. Датчик температури sts40 <https://www.ic-online.com/ru/products/sensirion-ag/sts40-cd1b-r3>.
17. STMicroelectronics. STM32CubeIDE User Guide (UM2609). — 2024. — URL: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2609-stm32cubeide-user-guide-stmicroelectronics.pdf
18. ДСТУ 8021:2015. Метрологія. Еталони одиниць фізичних величин. Основні положення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 12 с.
19. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
20. 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.
21. 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.