

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

ЛУЦАК АНДРІЙ РУСЛАНОВИЧ

Методи калібрування IoT сенсорів для вимірювання
фізичних параметрів / Methods for calibrating IoT sensors for
measuring physical parameters

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

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
МТІР – 41 А.Р. Луцак

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

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«___» _____ 2025р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

Тернопіль - 2025

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

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

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Завідувач кафедри СКС

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

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Луцак Андрію Руслановичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Методи калібрування IoT сенсорів для вимірювання фізичних параметрів /
Methods for calibrating IoT sensors for measuring physical parameters

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

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

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

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Державні стандарти України
2. Система забезпечення єдності вимірювань
3. Методи калібрування

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз методів калібрування IoT-сенсорів.
2. Автоматизовані методи калібрування IoT-сенсорів.
3. Розробка та експериментальна перевірка методики калібрування IoT-сенсорів.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема ієрархії еталонів та системи передачі розміру фізичних величин.
2. Схема підключення MAX31855 до мікроконтролера.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз положень українських та міжнародних стандартів до проведення повірок та калібрувань	12.2024р. – 01.2025р.	
2	Особливості автоматизованого калібрування IoT - сенсорів	02.2025р. – 03.2025р.	
3	Апаратно-програмна реалізація процесу калібрування	04.2025р. – 05.2025р.	

Студент

(підпис)

Луцак А.Р.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Масляк Б.О.

РЕФЕРАТ

Робота виконана на 62 сторінках та містить 3 рисунки, 15 джерел за переліком посилань.

Мета роботи. Методи калібрування IoT сенсорів для вимірювання фізичних параметрів.

Результати роботи. В роботі було узагальнено й систематизовано підходи до калібрування сенсорів: традиційні лабораторні методи, експрес-калібрування в польових умовах, а також сучасні підходи, що включають алгоритми самокалібрування, адаптивної корекції похибок і моделі самонавчання сенсорних пристроїв. Значну увагу було приділено можливостям хмарних сервісів для віддаленого зберігання еталонних даних, порівняння показів сенсорів, синхронізації калібрувальних параметрів та прогнозування змін метрологічних характеристик у процесі експлуатації. Запропоновано загальний підхід до формування рекомендацій щодо міжповірочних інтервалів на основі аналізу статистичних даних з хмари.

У практичній частині роботи була розроблена методика калібрування сенсора температури, орієнтована на його використання у складі IoT-систем із мікроконтролером. Для цього описано експериментальну установку з використанням термопари типу К (хромель-алюмель), мікросхеми MAX31855 для цифрової обробки термоелектричної напруги, а також еталонного калібратора Fluke 714B Thermocouple Calibrator, що забезпечив високоточне відтворення температури для порівняння. Методика калібрування передбачає використання вимірювань для визначення відхилень, визначення коригуючої функції температурного сенсора, яка може бути використана для подальших вимірювань.

Ключові слова. ПОВІРКА, КАЛІБРУВАННЯ, СЕНСОР, IoT, ТЕРМОПАРА, МІКРОКОНТРОЛЕР, КАЛІБРАТОР, ПРОГРАМНИЙ СКЕТЧ.

ABSTRACT

The work is completed on 62 pages and contains 3 figures, 12 sources according to the list of references.

Purpose of the work. Methods of calibration of IoT sensors for measuring physical parameters.

Results of the work. The work summarized and systematized approaches to sensor calibration: traditional laboratory methods, express calibration in field conditions, as well as modern approaches, including self-calibration algorithms, adaptive error correction and self-learning models of sensor devices. Considerable attention was paid to the capabilities of cloud services for remote storage of reference data, comparison of sensor readings, synchronization of calibration parameters and prediction of changes in metrological characteristics during operation. A general approach to the formation of recommendations for inter-calibration intervals based on the analysis of statistical data from the cloud was proposed.

In the practical part of the work, a temperature sensor calibration method was developed, focused on its use as part of IoT systems with a microcontroller. For this purpose, an experimental setup using a type K thermocouple (chromel-alumel), a MAX31855 microcircuit for digital processing of thermoelectric voltage, as well as a Fluke 714B Thermocouple Calibrator, which provided a highly accurate reproduction of the temperature for comparison, is described. The calibration method involves the use of measurements to determine deviations, determine the corrective function of the temperature sensor, which can be used for further measurements.

Keywords: VERIFICATION, CALIBRATION, SENSOR, IoT, THERMOCOUPLE, MICROCONTROLLER, CALIBRATOR, SOFTWARE SKETCH.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
Вступ	8
1. Аналіз методів калібрування IoT-сенсорів	11
1.1. Загальні положення теорії невизначеності результатів вимірювань	11
1.2. Особливості експлуатації та класифікація IoT-сенсорів за типами фізичних параметрів	14
1.3. Загальні підходи до калібрування сенсорів IoT	22
1.4. Використання калібрувальних моделей та постановка задачі	27
2. Характеристики автоматизованих методів калібрування IoT-сенсорів	33
2.1. Особливості системи забезпечення єдності вимірювань	33
2.2. Використання алгоритмів самокалібрування та самонавчання	37
2.3. Хмарні сервіси для дистанційного калібрування сенсорів	40
2.4. Аналіз міжповірочних інтервалів та прогнозування метрологічних характеристик сенсорів	43
3. Розробка та експериментальна перевірка методики калібрування IoT-сенсорів	46
3.1. Обґрунтування та вибір об'єкта дослідження (тип сенсорів, параметри калібрування)	46
3.2. Розробка методики та алгоритму калібрування	48
3.3. Програмна реалізація калібрування	54
Висновки	60
Перелік використаних джерел	61

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ			
З	А	№ докум.	Підпи	Д				
Розроб.	Луцак А.Р.				Методи калібрування IoT сенсорів для вимірювання фізичних параметрів / Methods for calibrating IoT sensors for measuring physical parameters	Літ.	Арк.	Акрушів
	Масляк						6	62
						ЗУНУ.ФКІТ.МТІР-41		
Н. Контр.	Масляк							
Затверд.	Сегін А.І.							

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АС – автоматизована система

МК – мікроконтролер;

ТП – технологічний процес

ВК – вимірювальний канал

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро - аналоговий перетворювач

ПЗ – програмне забезпечення

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
						7
З	А	№ докум.	Підп	Д		

ВСТУП

Актуальність теми

У сучасних умовах цифровізації ключових сфер економіки стрімко зростає значення технологій Інтернету речей (Internet of Things, IoT), які передбачають широке використання сенсорних пристроїв для дистанційного вимірювання фізичних параметрів навколишнього середовища та технічних об'єктів. Ці сенсори інтегруються в розподілені інформаційно-керуючі системи, забезпечуючи безперервне збирання, передавання та аналіз даних у режимі реального часу.

Проте масштабне застосування таких пристроїв супроводжується зростаючими викликами щодо забезпечення єдності та достовірності вимірювань — фундаментального принципу метрології, без якого неможливе ефективне прийняття рішень у автоматизованих системах управління, моніторингу й діагностики.

Особливістю IoT-сенсорів є їх робота в умовах, далеких від лабораторних: змінна температура, вологість, вібрації, вплив електромагнітних завад, обмежене енергоспоживання, автономність, нестабільність зв'язку тощо. Крім того, багато сенсорів встановлюються у важкодоступних місцях або на рухомих об'єктах, що ускладнює проведення періодичного калібрування традиційними методами. Це обумовлює необхідність розробки нових підходів до калібрування, придатних для реалізації в умовах обмежених ресурсів, без фізичного доступу до пристрою, з урахуванням деградації його метрологічних характеристик у процесі експлуатації.

Одним із перспективних напрямів є застосування алгоритмів самокалібрування та самонавчання, які дозволяють сенсорам автоматично оцінювати і коригувати власні похибки на основі статистичного аналізу вхідних даних, використання внутрішніх або зовнішніх еталонів, порівняння з іншими сенсорами, а також за допомогою моделей цифрової компенсації.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		8

Суттєву роль у підтримці метрологічної надійності IoT-систем відіграє використання хмарних сервісів для збору, зберігання, аналізу та візуалізації даних калібрування та експлуатації сенсорів. Це дозволяє реалізувати механізми віддаленого калібрування, верифікації та синхронізації показів на основі історичних і порівняльних даних. Особливо важливими є прогнозування метрологічних характеристик, зокрема зміни похибки з часом, оцінка залишкового ресурсу точності та формування рекомендацій щодо міжповірочних інтервалів. Такий підхід є основою концепції інтелектуальної метрології та є ключовим фактором підвищення ефективності експлуатації IoT-систем.

Усе це зумовлює актуальність комплексного дослідження методів калібрування IoT-сенсорів із урахуванням сучасних викликів, технологічних обмежень та потреб адаптивного управління якістю вимірювань.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та аналіз методів калібрування IoT-сенсорів для вимірювання фізичних параметрів, з акцентом на практичні способи компенсації похибок, самокалібрування, використання хмарних сервісів та прогнозування метрологічних характеристик.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести огляд типів фізичних параметрів, що вимірюються в IoT-системах, та відповідних типів сенсорів.
2. Проаналізувати джерела похибок та фактори, що впливають на зміну метрологічних характеристик сенсорів у реальних умовах.
3. Дослідити сучасні методи калібрування, включаючи лабораторні, польові, автоматизовані та віддалені підходи.
4. Розглянути принципи роботи алгоритмів самокалібрування та самонавчання сенсорів.
5. Вивчити можливості хмарної інфраструктури для реалізації калібрування, зберігання еталонних даних і прогнозу стану сенсорів.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		9

6. Сформулювати рекомендації щодо вибору та поєднання методів калібрування з урахуванням умов експлуатації та вимог до достовірності вимірювань.

Об'єктом дослідження є сенсорні пристрої для вимірювання фізичних величин (температури, тиску, вологості, освітленості, струму тощо), що застосовуються в системах Інтернету речей для моніторингу та управління технічними процесами.

Предметом дослідження є методи калібрування, цифрової компенсації, адаптивної корекції та прогнозування метрологічних характеристик IoT-сенсорів, включаючи алгоритми самокалібрування та використання хмарних сервісів для забезпечення єдності вимірювань в умовах практичного використання.

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі проведено теоретичний аналіз особливостей використання сенсорів IoT та підходів до забезпечення їх метрологічних характеристик. У другому розділі здійснено аналіз методів калібрування даного виду сенсорів із врахуванням специфіки інтернету речей. У третьому розділі описано реалізацію методики та алгоритму калібрування, включаючи апаратну та програмну частини.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		10

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ІОТ-СЕНСОРІВ

1.1. Загальні положення теорії невизначеності результатів вимірювань

У сучасній метрологічній практиці поняття невизначеності вимірювань є фундаментальним для забезпечення достовірності результатів. На відміну від класичного уявлення про похибку як відхилення від істинного значення, яке, як правило, залишається невідомим, невизначеність дозволяє кількісно оцінити довіру до результату вимірювання. Такий підхід ґрунтується на методології, викладеній у Міжнародному керівництві з вираження невизначеності вимірювань (GUM), що має статус стандарту ISO/IEC Guide 98-3:2008. Цей документ набув чинності також в Україні у вигляді ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2009 і є базовим при аналізі точності вимірювань у технічних і наукових дослідженнях [1-4].

Згідно з GUM, результат вимірювання слід подавати у вигляді оцінки значення величини разом з невизначеністю, яка охоплює діапазон можливих істинних значень. Центральним поняттям є стандартна невизначеність, яка може бути визначена на основі статистичного аналізу або із застосуванням апріорної інформації. У першому випадку йдеться про невизначеність типу А, що базується на серії повторних вимірювань та характеризується дисперсією спостережуваних значень. Тип А базується на статистичному аналізі результатів серії вимірювань. Для n незалежних спостережень $x_1, x_2, \dots, x_n$, оцінка стандартної невизначеності типу А визначається як:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad \text{де } s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

де:

- s — стандартне відхилення вибірки,
- $\bar{x}$ — середнє арифметичне результатів.

Цей тип невизначеності застосовується, коли доступна достатня кількість повторних вимірювань.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		11

У другому — про невизначеність типу В, яка відображає наше знання про можливий діапазон значення величини на основі технічної документації, результатів калібрування, специфікацій виробника, досвіду або інших обґрунтованих джерел. Невизначеність типу В оцінюється на основі апріорної інформації, що не має статистичної природи: паспортні їх характеристик засобів вимірювальної техніки; результатів калібрування; специфікації виробника; допусків; наукових публікацій; експертної оцінки. Залежно від джерела інформації, вибирають тип розподілу (рівномірний, нормальний, трикутний тощо). Важливо розуміти, що невизначеність типу В не є менш надійною, ніж типу А — вона лише спирається на інші методи оцінювання. Наприклад, похибка, вказана в технічному паспорті мікросхеми або сенсора, часто передбачає рівномірний розподіл можливих значень у межах заданого інтервалу. Наприклад, для рівномірного розподілу:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

де a — половина інтервалу, у межах якого, імовірно, знаходиться істинне значення.

Для такого розподілу оцінка стандартної невизначеності проводиться із застосуванням статистичних співвідношень, як-от поділ напівширини інтервалу на корінь квадратний з трьох.

Коли результат вимірювання залежить від кількох вхідних величин, оцінку повної невизначеності проводять із застосуванням закону поширення невизначеності.

$$u_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \cdot u(X_i) \right)^2}$$

А розширена невизначеність визначається як:

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		12

$$U = k \cdot u_c$$

Такий підхід дозволяє обчислити складену стандартну невизначеність результату, що враховує вклад всіх вхідних параметрів та їх чутливість до вихідної величини. Для зручності інтерпретації результатів у технічних документах зазвичай застосовується розширена невизначеність, яка є добутком складеної стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення, значення якого обирають відповідно до бажаного рівня довіри (найчастіше — 95%).

Поряд із ISO/IEC Guide 98-3, важливу роль у формуванні підходів до оцінювання точності вимірювань відіграє серія стандартів ISO 5725. Вона присвячена аналізу правильності та прецизійності методів вимірювання, тобто оцінює систематичні та випадкові компоненти похибки. В українському законодавчому полі ці документи представлено як ДСТУ ISO 5725-1:2005 та подальші частини. Ці стандарти забезпечують основу для розробки методик випробувань, оцінки відповідності вимірювальних приладів та розрахунку метрологічних характеристик.

Під час аналізу невизначеності у реальних системах вимірювань, зокрема в електронних пристроях на базі мікроконтролерів, особливого значення набуває комбінований підхід до оцінювання типів А і В. Наприклад, вимірювання температури за допомогою термопар і мікросхем MAX31855 супроводжується флуктуаціями цифрових показів, що підлягають статистичному аналізу, а також апріорно відомими характеристиками перетворювачів, які вносять додаткову невизначеність. Таким чином, комплексний розрахунок дозволяє отримати об'єктивну оцінку точності результату з урахуванням усіх джерел впливу.

На практиці невизначеність вимірювань є не лише показником якості результату, а й інструментом обґрунтування технічних рішень, вибору датчиків, визначення періодів калібрування та встановлення довірчих меж при контролі параметрів. Застосування міжнародних і національних метрологічних стандартів

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		13

сприяє уніфікації процедур оцінювання та забезпечує сумісність результатів на глобальному рівні.

Таким чином, Застосування теорії невизначеності є необхідною умовою при обґрунтуванні результатів вимірювань у сучасних системах. Чітке розділення джерел невизначеності на тип А і тип В дозволяє: виявляти найвпливовіші компоненти у вимірювальному каналі; підвищити точність за рахунок усунення або зменшення найбільших внесків у похибку; документувати та захищати наукові або технічні результати на міжнародному рівні.

1.2. Особливості експлуатації та класифікація IoT-сенсорів за типами фізичних параметрів

Сучасні сенсорні технології, що використовуються у сфері Інтернету речей (IoT), розвиваються в умовах інтенсивної глобальної конкуренції, коли від якості, надійності та доступності сенсорної продукції залежить ефективність побудови вимірювальних систем у різних галузях — від побутових до промислових. Провідні світові компанії формують ринок сенсорів, орієнтуючись на мініатюризацію, енергоефективність, точність вимірювань і здатність до роботи в розподілених середовищах з мінімальним втручанням людини.

Серед найбільш впливових виробників варто відзначити компанії Texas Instruments, Analog Devices, Bosch Sensortec, Honeywell, TE Connectivity, а також азійських гігантів, зокрема Sensirion, Omron та Murata. Їхня продукція охоплює широкий спектр сенсорів: температурні, тиску, вологості, прискорення, газів, магнітного поля, освітленості тощо. Визначальною рисою лідерів є інтеграція сенсорів з цифровими інтерфейсами (I²C, SPI, UART), що дозволяє безпосередньо вбудовувати їх у мікроконтролерні системи та IoT-пристрої [4-6].

Наприклад, Bosch Sensortec, дочірнє підприємство відомого німецького концерну, спеціалізується на виробництві MEMS-сенсорів, адаптованих до

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		14

мобільних, носимих та побутових пристроїв. Їхні сенсори, як-от BMP280 або BME688, вирізняються поєднанням температурного, барометричного та газового каналів у одному корпусі. Завдяки високому рівню інтеграції та низькому енергоспоживанню, ці вироби добре підходять для автономних систем у сільському господарстві, екологічному моніторингу та побутовій автоматизації.

Водночас компанія Analog Devices, з багаторічною історією в аналоговій електроніці, виробляє прецизійні сенсори для промислових застосувань, таких як контроль температури, вібрацій або струму. Їхні сенсорні рішення часто містять вбудовані схеми попередньої обробки сигналів, що значно спрощує інтеграцію у складні IoT-системи, включно з системами прогнозування технічного стану обладнання.

Honeywell та TE Connectivity пропонують лінійки сенсорів, розрахованих на роботу в агресивних або небезпечних середовищах, з підвищеними вимогами до точності та механічної міцності. Їхня продукція сертифікована для використання в енергетиці, транспорті, авіації та медичній техніці. Такий сегмент сенсорів, хоча й дорожчий, є критичним для побудови систем із високими вимогами до надійності та безпеки.

Окрему нішу займають виробники компактних, масових сенсорів, зокрема Sensirion (Швейцарія) та Omron (Японія), які розвивають напрями цифрових сенсорів вологості, CO₂, летких органічних сполук та інших фізико-хімічних параметрів. Їхня продукція орієнтована на масовий ринок, зокрема для «розумних» будинків, пристроїв моніторингу якості повітря, холодильного та вентиляційного обладнання.

Однак попри широке глобальне покриття, доступ до цих сенсорів у країнах з менш розвинутою логістикою або з обмеженим виробничим потенціалом може бути ускладненим. В Україні, наприклад, основним каналом постачання є спеціалізовані імпортери та дистриб'ютори (Digikey, Mouser, TME, Elitan тощо), що ускладнює швидке масштабування виробництва або забезпечення безперервності ланцюгів постачання для дослідницьких і освітніх проєктів. Ця

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		15

проблема стає особливо актуальною в умовах територіальної розподіленості виробничих або дослідницьких центрів, де доставка навіть поширених сенсорів може займати кілька тижнів.

Крім того, варто зазначити, що експлуатація сенсорів у розподілених IoT-системах супроводжується низкою обмежень, пов'язаних із енергоспоживанням, стабільністю роботи в польових умовах, чутливістю до зовнішніх чинників (температури, вологості, пилу), а також потребою у періодичному калібруванні. Значна частина масових сенсорів, попри заявлену «каліброваність» на заводі, з часом втрачає точність і потребує додаткового коригування — особливо в умовах нестабільного живлення, перепадів температур чи механічних вібрацій.

Таким чином, вибір сенсорів для систем IoT не обмежується лише технічними характеристиками. Він також враховує доступність компонентів, тривалість і надійність постачання, можливість забезпечення метрологічного супроводу, а також особливості експлуатаційних умов, у яких сенсор повинен стабільно працювати протягом тривалого часу. Відповідно, формування IoT-архітектури потребує комплексного підходу, що поєднує ринковий аналіз, технічну експертизу та знання умов локального використання.

Індустрія Інтернету речей (IoT) неможлива без великої кількості надійних сенсорів, які забезпечують вимірювання фізичних, хімічних та біологічних параметрів у режимі реального часу. Ці сенсори є базовими елементами систем моніторингу, управління, автоматизації, медичних і аграрних платформ. Враховуючи різноманітність умов експлуатації, технічних вимог та глобальну залежність від постачальників електроніки, аналіз ринку провідних виробників сенсорів набуває особливого значення для забезпечення стійкості та ефективності IoT-рішень.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		16

Таблиця 1.2 - Порівняльна таблиця основних характеристик продукції провідних виробників

Виробник	Основна спеціалізація	Типи сенсорів	Типові інтерфейси	Визначальні особливості
Bosch Sensortec	MEMS для споживчої електроніки	Температура, тиск, газ, IMU	I ² C, SPI	Інтегровані модулі, низьке споживання
Analog Devices	Промислові сенсори	Температура, струм, вібрації	SPI, UART	Висока точність, внутрішнє калібрування
Honeywell	Промисловість, транспорт	Тиск, температура, положення	Analog, I ² C	Висока надійність, розширені діапазони
TE Connectivity	Автомобільна та військова сфера	Волога, температура, тиск	Analog, I ² C, CAN	Захист IP67/68, ударостійкість
Sensirion	Smart Home, HVAC	Вологість, CO ₂ , леткі гази	I ² C, UART	Картриджі калібруванням, точність
Omron	Автоматизація	Присутність, світло, газ	Analog, I ² C	Широка номенклатура, дешевизна
Murata	Високочастотна електроніка	Акселерометри, гіроскопи	I ² C, SPI	Компактність, низький рівень шуму

Більшість вищезазначених компаній мають виробництво, зосереджене в Європі, Північній Америці та Азії (Китай, Малайзія, Філіппіни, Тайвань). Для українських розробників основним каналом постачання є онлайн-магазини електроніки: Digi-Key, Mouser, TME, Farnell, а також локальні дистриб'ютори Elitan, Promelectronica та Masteram. Проте через війни, валютні обмеження та логістичні складнощі час доставки може коливатися від 5 днів до кількох тижнів. Це варто враховувати при проектуванні систем, які потребують швидкої заміни або масштабування.

ІоТ-сенсори, особливо ті, що працюють в аграрному або промисловому середовищі, піддаються впливу температурних коливань, вологи, пилу, агресивних газів. Частина сенсорів, як-от ті, що мають корпуси з IP68 або АТЕХ сертифікацію, здатні працювати в екстремальних умовах, однак більшість

побутових моделей (наприклад, BME280 або DHT22) придатні лише для внутрішнього використання.

Більшість сенсорів із заводу калібруються, проте з часом їх характеристики можуть змінюватись внаслідок старіння, дрейфу або механічного впливу. Для промислових рішень застосовують регулярне метрологічне обслуговування з використанням еталонного обладнання.

Нижче наведено таблицю 1.3 для орієнтації щодо діапазону умов експлуатації та потреби в калібруванні

Таблиця 1.3 – Орієнтовна потреба в калібруванні

Сенсор	Робочий діапазон (°C)	Захист IP	Час служби (типовий)	Потреба в калібруванні
BME280 (Bosch)	-40...+85	IP20	до 5 років	бажано щороку
ADT7420 (Analog)	-55...+150	IP54	понад 10 років	рідко
HIH6130 (Honeywell)	-25...+85	IP65	5–8 років	періодично
SCD30 (Sensirion)	0...+50	IP30	3–5 років	рекомендовано щопівроку
D6T-44L (Omron)	0...+80	IP20	до 3 років	обов'язково

В Україні існує декілька підприємств, які займаються виготовленням або складанням IoT-пристроїв (наприклад, UaDevice, Quarta Technologies, однак більшість сенсорів усе ще імпортується. Існує потенціал локального виробництва простих сенсорів (наприклад, аналогових датчиків температури або струму), проте складні MEMS-модулі поки що недоступні для внутрішнього виготовлення через відсутність відповідної мікроелектронної бази.

Аналіз ринку IoT-сенсорів свідчить про його високу динамічність, конкуренцію та технологічну складність. Вибір сенсорів повинен враховувати не лише технічні параметри, але й логістичну доступність, умови експлуатації, тривалість життєвого циклу та можливість метрологічного обслуговування. Продукція провідних світових брендів зазвичай має високу якість

Точність сенсорів, що використовуються в IoT, є фундаментальним фактором, який визначає надійність і коректність зібраних даних. Кожен сенсор має свої властивості, що впливають на його здатність точно вимірювати фізичні параметри, зокрема температурні показники, вологість, тиск чи інші характеристики. До найважливіших параметрів, що описують точність, належать основна похибка, яка відображає систематичну різницю між вимірним і дійсним значенням, а також чутливість, що визначає ступінь реакції сенсора на зміну вхідного сигналу. Крім того, нерідко фіксують дрейф — поступове зміщення показань з часом, що відображає втрату стабільності і якісних характеристик, а також лінійність вихідного сигналу, яка свідчить про відповідність показань сенсора лінійній функції. Не менш важливу роль відіграють випадкові коливання або шум, які можуть знижувати точність і роздільну здатність вимірювань.

Для прикладу, один із широко відомих цифрових сенсорів Bosch BME280 забезпечує точність температури приблизно в межах ± 1 °C, що є прийнятним для багатьох побутових застосувань, тоді як спеціалізовані прецизійні датчики, як-от від Analog Devices, можуть досягати похибок значно нижчого рівня завдяки більш досконалому внутрішньому калібруванню та конструктивним особливостям.

У процесі експлуатації сенсори IoT зазнають впливу різних зовнішніх чинників, які здатні погіршувати їх точність і надійність. Зокрема, температурні коливання можуть викликати механічні напруження в матеріалах, що утворюють сенсор, провокуючи поступове погіршення його характеристик. Волога і агресивні гази сприяють корозії контактів і руйнуванню захисних оболонок, що може призвести до несправностей. Механічні удари та вібрації, особливо у промислових або мобільних пристроях, можуть викликати зсуви калібрувальних параметрів або навіть фізичне пошкодження рухомих частин у MEMS-сенсорах. Також важливим є вплив електромагнітних завад, які можуть спотворювати сигнали, особливо в аналогових пристроях, що призводить до збільшення похибок.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		19

Деградація сенсорів — це сукупність процесів, що з часом змінюють їх метрологічні властивості. Одним із головних чинників є старіння матеріалів, яке відбувається через тривалі температурні та механічні цикли, що викликають окислення металевих контактів, втрату еластичності полімерів та зміну електричних характеристик чутливих елементів. Ці процеси супроводжуються дрейфом базового сигналу, коли вихідний сигнал сенсора поступово зміщується від вихідного калібрувального рівня. Зміна калібрувальних коефіцієнтів під впливом експлуатації призводить до того, що сенсор вже не відтворює початкові заводські характеристики, що знижує якість вимірювань. У деяких випадках фізичні пошкодження, викликані вологістю, пилом чи механічними впливами, можуть стати причиною незворотної втрати працездатності. З часом також збільшується рівень шумів, що виникають через зношення електронних компонентів, що негативно впливає на чутливість і стабільність роботи.

Для забезпечення надійності і тривалості роботи сенсорів у складних умовах застосовують комплексні заходи. Серед них можна виділити регулярне калібрування за допомогою еталонних приладів, що допомагає відновити точність показань. Крім того, багато сучасних IoT-рішень використовують алгоритми моніторингу та аналізу стану сенсорів у режимі онлайн, що дозволяє виявляти та коригувати зміни характеристик у реальному часі. Використання моделей деградації та автоматизованих систем компенсації допомагає прогнозувати і зменшувати вплив дрейфу. Особливо важливо враховувати клас захисту сенсорів, оскільки надійні моделі з високим ступенем герметичності (IP68, ATEX) здатні працювати у складних промислових або аграрних середовищах без втрати метрологічних властивостей.

Цей опис ілюструє, як точність сенсорів формується не лише конструктивними особливостями, але і під впливом умов експлуатації та часу.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		20

Таблиця 1.4 - Типові характеристики точності деяких поширених IoT-сенсорів

Сенсор	Точність температури (°C)	Точність вологості (% RH)	Особливості калібрування
Bosch BME280	±1	±3	Заводське калібрування, періодична перевірка
Analog Devices ADT7420	±0.1	—	Вбудоване калібрування, стабільність понад 10 років
Honeywell HIH6130	±0.5	±3	Рекомендована періодична перекалібровка
Sensirion SCD30	±0.3	±2	Автоматична компенсація, регулярне калібрування
Omron D6T-44L	±1	—	Заводське калібрування, потреба в експлуатаційній калібруванні

Таблиця 1.5 - Основні фактори деградації та їх вплив на характеристики сенсорів

Фактор впливу	Вплив на сенсор	Наслідки для точності	Методи мінімізації
Температурні коливання	Механічні напруження в матеріалах	Дрейф, зміщення базового сигналу	Використання стабілізаторів температури, вибір сенсорів з широким діапазоном
Волога і корозія	Руйнування контактів і корпусу	Несправності, зростання шуму	Герметизація, IP-класифікація
Механічні удари і вібрації	Зсув калібрування, пошкодження	Зниження чутливості, втрата сигналу	Віброізоляція, міцні корпуси
Електромагнітні завади	Спотворення сигналів	Похибки, збільшення шумів	Екранування, використання диференціальних схем

Системний підхід до моніторингу і обслуговування сенсорів дозволяє значно продовжити термін їх коректної роботи в IoT-системах.

1.3 Загальні підходи до калібрування IoT сенсорів

Актуальність перевірки та калібрування сенсорів IoT полягає у забезпеченні достовірності та точності отриманих вимірювальних даних, що є основою для прийняття коректних рішень у різних сферах застосування — від промислового контролю до медичних моніторингів і екологічних досліджень. Через природні процеси старіння, вплив навколишнього середовища та експлуатаційні навантаження характеристики сенсорів можуть поступово змінюватися, що призводить до появи систематичних і випадкових похибок у вимірюваннях. Саме тому регулярна оцінка метрологічних параметрів цих пристроїв через перевірку або калібрування є необхідною для підтримки їх належної роботи та гарантування точності показань [3, 6-8].

Перевірка і калібрування, хоча і тісно пов'язані між собою, мають принципові відмінності. Перевірка — це офіційна процедура, що здійснюється відповідно до нормативних документів і передбачає перевірку відповідності приладу встановленим стандартам і технічним вимогам. Результатом перевірки є підтвердження або відмова у відповідності, часто із внесенням запису до державного реєстру, що дає підставу для використання приладу в офіційних та юридично значущих процесах. В Україні ця діяльність регламентується, зокрема, ДСТУ ISO/IEC 17025, ДСТУ 8.584 та іншими документами, що встановлюють правила та порядок проведення метрологічних перевірок [4].

Калібрування, у свою чергу, є процедурою встановлення або відновлення зв'язку між показаннями сенсора і еталонним значенням. Воно передбачає визначення похибок приладу та, за необхідності, їх корекцію або врахування при обробці результатів вимірювань. Калібрування не має юридичного статусу підтвердження відповідності, але є ключовим елементом у забезпеченні якості вимірювань і підтриманні метрологічної надійності. В рамках калібрування можуть використовуватися різні методи і підходи, залежно від типу сенсора, умов експлуатації та вимог до точності.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		22

Отже, повірка і калібрування є доповнюючими процесами: повірка підтверджує право сенсора на експлуатацію у визначеному режимі, а калібрування забезпечує підтримку точності та мінімізацію похибок у ході експлуатації. Для IoT-сенсорів, які часто працюють у розподілених мережах і складних умовах, системний підхід до цих процедур є гарантією довготривалої надійності та коректності вимірювань.

Повірка та калібрування сенсорів IoT — це два важливі процеси, що забезпечують достовірність і точність вимірювань, які ці пристрої виконують у різних сферах застосування. Суть повірки полягає у офіційній перевірці сенсора на відповідність встановленим технічним стандартам і вимогам. Цей процес є нормативно регламентованим і має на меті підтвердити, що прилад придатний для використання в офіційних, в тому числі юридично значущих, сферах, наприклад, у промисловому контролі якості, медичних вимірах чи екологічному моніторингу. Повірка проводиться відповідно до визначених процедур, що передбачають застосування еталонних засобів вимірювальної техніки, та завершується видачею документів, які засвідчують відповідність пристрою вимогам.

Калібрування, на відміну від повірки, є процедурою, спрямованою на визначення і корекцію похибок сенсора для підвищення точності вимірювань. Воно включає зіставлення показань пристрою з еталонними значеннями та внесення необхідних поправок або встановлення компенсаційних коефіцієнтів. Калібрування не має статусу офіційної перевірки, однак є життєво необхідним етапом підтримки метрологічної надійності, особливо в умовах тривалої експлуатації та зміни характеристик сенсорів через старіння чи зовнішні фактори.

В Україні законодавча основа для повірки і калібрування сенсорів та іншої вимірювальної техніки базується на національних стандартах та законах, зокрема на Законі України «Про метрологію та метрологічну діяльність», а також на ДСТУ ISO/IEC 17025, що регламентує вимоги до організацій, які здійснюють

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		23

калібрування та повірку. Окрім того, існують галузеві стандарти та нормативи, які визначають особливості метрологічного забезпечення для конкретних типів вимірювальних пристроїв.

Проте у сфері IoT існує низка проблем, що ускладнюють впровадження повірки і калібрування. По-перше, багато IoT-сенсорів мають малий розмір і обмежену вартість, що робить традиційні процедури метрологічної перевірки дорогими і трудомісткими. По-друге, розподіленість IoT-пристроїв по великих територіях і складних умовах експлуатації ускладнює їхню своєчасну повірку чи калібрування, особливо коли мова йде про тисячі або мільйони одиниць. Також існує проблема відсутності єдиних підходів до стандартизації і регулювання унікальних типів сенсорів, що швидко розвиваються.

В перспективі поліпшення ситуації можливе за рахунок інтеграції цифрових технологій та автоматизації процесів метрологічного забезпечення. Застосування віддаленого моніторингу стану сенсорів, автоматичного калібрування на основі алгоритмів машинного навчання та впровадження нових нормативних актів, адаптованих до специфіки IoT, дозволить значно підвищити ефективність і доступність цих процедур. Також розвиток самокалібрувальних сенсорів і модулів з вбудованими системами самоперевірки відкриває нові можливості для підтримання точності без значних затрат на традиційні повірочні заходи.

Отже, повірка і калібрування сенсорів IoT є ключовими складовими метрологічного забезпечення, що гарантують надійність даних у сучасних системах, а їхня нормативна підтримка і технологічне вдосконалення залишаються актуальними викликами для науки і промисловості.

Калібрування вимірювальних сенсорів IoT — це фундаментальний процес, спрямований на забезпечення точності та достовірності їхніх показань. Загальні підходи до калібрування таких сенсорів базуються на порівнянні їхніх вимірювань з еталонними значеннями, що отримуються за допомогою високоточних засобів вимірювальної техніки. Ця процедура дозволяє виявити

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		24

систематичні похибки, визначити їх величину і, при потребі, скоригувати показники сенсора або врахувати відомі відхилення при подальшій обробці даних.

У практиці калібрування IoT-сенсорів широко застосовують кілька основних методів. Перший — це статичне калібрування, коли сенсор піддається тестуванню у фіксованих умовах, зокрема за визначених температур, вологості або інших параметрів, що мають суттєвий вплив на його роботу. Це дозволяє створити таблиці або функції корекції, які потім застосовуються під час реальних вимірювань.

Другий підхід — динамічне калібрування, яке враховує змінні умови експлуатації та поведінку сенсора у реальному часі. Воно особливо важливе для IoT-систем, які працюють у непередбачуваних середовищах, де вплив зовнішніх факторів постійно змінюється. Для цього можуть використовуватися моделі, що адаптуються, або алгоритми машинного навчання, які коригують показання автоматично.

Третій напрям — калібрування на основі порівняння в мережі. У великих IoT-мережах дані з численних сенсорів порівнюють між собою для виявлення аномалій і оцінки точності, що дозволяє здійснювати непряму калібрувальну корекцію без необхідності фізичного доступу до кожного пристрою.

При цьому важливо враховувати, що вибір методу калібрування залежить від типу сенсора, його призначення, умов експлуатації, а також вимог до точності і частоти оновлення даних. Відповідно, розробка ефективної стратегії калібрування IoT-сенсорів потребує комплексного підходу, що поєднує стандартизовані метрологічні процедури із сучасними цифровими технологіями.

Таким чином, загальні підходи до калібрування вимірювальних сенсорів IoT охоплюють як традиційні методи порівняння з еталонами, так і інноваційні способи автоматичного коригування у реальному часі, що дозволяє підтримувати високу точність і надійність вимірювань у широкому спектрі застосувань.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		25

Методи калібрування вимірювальних сенсорів IoT включають кілька основних підходів, кожен із яких має свої особливості, переваги та обмеження. Розглянемо їх докладніше.

Первинне калібрування — це перша процедура, що проводиться після виготовлення або встановлення сенсора. Вона має на меті встановити базову точність пристрою, визначити його початкові метрологічні характеристики і забезпечити відповідність стандартам. Основна перевага первинного калібрування полягає у тому, що воно дає надійну відправну точку для подальшого використання сенсора, але водночас цей процес зазвичай є досить трудомістким і вимагає висококваліфікованого обладнання. Повторне калібрування здійснюється протягом експлуатації пристрою з метою контролю стабільності його характеристик і корекції можливих змін. Його перевага — це можливість підтримувати необхідний рівень точності, але часто повторне калібрування ускладнюється віддаленим розташуванням сенсорів або великою кількістю пристроїв у мережі.

Статичне калібрування проводиться в умовах, де параметри навколишнього середовища і вимірювані величини залишаються незмінними протягом тестування. Такий підхід дозволяє точно визначити похибки сенсора за конкретних умов, що робить його ефективним для створення корекційних таблиць або функцій. Головною перевагою статичного калібрування є висока точність та простота виконання, проте воно не враховує змін навколишнього середовища, що може знижувати його ефективність у реальних динамічних умовах. Динамічне калібрування, навпаки, передбачає дослідження роботи сенсора в умовах зміни параметрів, що наближує його до реальних експлуатаційних ситуацій. Цей метод дозволяє отримати більш комплексну інформацію про поведінку пристрою, але вимагає складнішого обладнання і алгоритмів аналізу.

Лабораторне калібрування здійснюється у спеціалізованих метрологічних центрах або лабораторіях, оснащених високоточним обладнанням і

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		26

кваліфікованим персоналом. Це забезпечує високу надійність і відтворюваність результатів, що особливо важливо для сертифікації та офіційної метрологічної атестації. Однак лабораторне калібрування має обмеження у вигляді необхідності транспортування пристроїв до лабораторії, що може бути затратним і часозатратним, особливо для розподілених IoT-систем. Польове калібрування виконується безпосередньо на місці експлуатації сенсорів, що дозволяє швидко оцінити їх точність і внести корективи без відключення системи. Цей підхід зручний для великих і географічно розподілених мереж, але результати польового калібрування можуть бути менш точними через вплив умов навколишнього середовища і обмеження обладнання.

Отже, кожен із методів калібрування має свої сильні і слабкі сторони, і вибір найбільш підходящого підходу залежить від конкретних вимог до точності, умов експлуатації та доступності ресурсів. Найчастіше у практиці застосовується комбінований підхід, який дозволяє максимально ефективно підтримувати якість вимірювань у різних ситуаціях.

1.4. Використання калібрувальних моделей та постановка задачі

У сучасних інформаційних системах, що базуються на Інтернеті речей (IoT), сенсори відіграють ключову роль у зборі даних про навколишнє середовище, технологічні процеси, стан об'єктів та багато іншого. Від їхньої точності та надійності залежить якість прийняття рішень у різних сферах — від промислового моніторингу і екологічного контролю до медицини та «розумних» міст. Однак будь-який вимірювальний пристрій, у тому числі й IoT-сенсор, не може забезпечити ідеальної точності через низку факторів, таких як конструктивні особливості, вплив зовнішніх умов чи старіння компонентів. Саме тому вкрай важливим елементом метрологічного забезпечення є застосування калібрувальних моделей.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		27

Калібрувальна модель — це математичний або алгоритмічний опис зв'язку між показаннями сенсора та дійсними значеннями фізичної величини, яку він вимірює. Іншими словами, калібрувальна модель формалізує закономірності похибок, що виникають у процесі вимірювання, дозволяючи визначити і кількісно оцінити ці відхилення. Завдяки такій моделі можна компенсувати систематичні похибки, тобто ті, що повторюються і мають певну структуру, підвищуючи таким чином точність і надійність отриманих даних.

У практичному сенсі калібрувальні моделі є необхідними для корекції результатів, які безпосередньо впливають на якість подальшої аналітики та прийняття управлінських рішень. Якщо уявити собі, що IoT-сенсор у «розумному» місті вимірює рівень забруднення повітря або температуру, неточності у його показах можуть привести до неправильних висновків і, як наслідок, до неефективних або навіть шкідливих рішень. Застосування калібрувальних моделей дозволяє звести до мінімуму подібні ризики, забезпечуючи коректність даних незалежно від умов експлуатації.

Калібрувальні моделі бувають різного ступеня складності — від простих лінійних функцій, які підходять для пристроїв з малою кількістю змінних похибок, до складних нелінійних моделей, що використовують поліноми високих степенів, статистичні методи або алгоритми машинного навчання. Наприклад, у випадках, коли похибки мають складний характер, залежний від температури, вологості чи часу роботи сенсора, прості лінійні корекції виявляються недостатніми, і тоді застосовують моделі, які здатні адаптуватися до цих змін [8-10].

Актуальність використання калібрувальних моделей у системах IoT зростає з огляду на особливості таких систем. По-перше, IoT-сенсори часто розміщуються у віддалених, географічно розподілених і складнодоступних місцях, що ускладнює їхнє регулярне обслуговування і традиційне калібрування. Тому можливість автоматизованої корекції даних за допомогою калібрувальних моделей дає змогу підтримувати якість вимірювань без необхідності фізичного

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		28

втручання. По-друге, умови експлуатації таких сенсорів можуть бути дуже мінливими, тому статичні підходи до корекції стають малоефективними. Застосування адаптивних калібрувальних моделей, що враховують динамічні зміни, дозволяє суттєво покращити точність вимірювань у реальному часі.

Ще одним важливим аспектом є старіння сенсорів та деградація їхніх метрологічних характеристик. З часом компоненти пристроїв зношуються, електронні елементи змінюють свої властивості, що призводить до збільшення похибок. Калібрувальні моделі дозволяють не лише виявляти ці зміни, а й частково компенсувати їх, продовжуючи таким чином ресурс і ефективність сенсорів без потреби частих замін або складного ремонту. Це особливо актуально для великих IoT-мереж, де заміна кожного окремого пристрою є дорогою та логістично складною операцією.

Щодо нормативної бази, застосування калібрувальних моделей відповідає вимогам метрологічної діяльності, які регламентовані законодавством та стандартами, такими як Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» та міжнародні стандарти ISO/IEC 17025, що визначають вимоги до калібрувальних процедур і засобів. Ці документи підкреслюють необхідність регулярного калібрування і забезпечення відтворюваності результатів, чим і займаються калібрувальні моделі в сучасних сенсорних системах.

Завдяки калібрувальним моделям можливе також застосування методів машинного навчання та штучного інтелекту для аналізу великої кількості даних, отриманих від IoT-сенсорів, що сприяє підвищенню адаптивності систем і їх здатності самонавчатися. Ці технології дозволяють не лише автоматично коригувати поточні вимірювання, а й прогнозувати зміни метрологічних характеристик, своєчасно виявляючи необхідність повторного калібрування чи заміни пристроїв.

Таким чином, калібрувальні моделі є не просто інструментом корекції даних, а складовою комплексного підходу до забезпечення метрологічної надійності та довговічності IoT-систем. Вони дозволяють поєднувати традиційні

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		29

принципи метрології з інноваційними цифровими технологіями, забезпечуючи баланс між точністю, оперативністю та витратами на підтримку сенсорної мережі.

Отже, актуальність застосування калібрувальних моделей у вимірювальних системах IoT визначається як зростаючими вимогами до якості даних, так і особливостями експлуатації сенсорів у складних і розподілених середовищах. Використання таких моделей є ключовим чинником для розвитку надійних, ефективних і економічних рішень в галузі Інтернету речей.

Результати порівняльного аналізу калібрувальних моделей приведено в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 - Результати порівняльного аналізу калібрувальних моделей

Тип калібрувальної моделі	Опис	Переваги	Недоліки
Лінійна модель	Описує залежність між показаннями сенсора і істинним значенням у вигляді прямої лінії.	Проста в реалізації, швидка, зрозуміла.	Підходить лише для систем з незначними похибками і лінійною поведінкою.
Поліноміальна модель	Використовує поліноми для опису нелінійних зв'язків між виміряними і справжніми значеннями.	Краща адаптація до складних кривих, висока точність.	Може призводити до переобучення, складніша в налаштуванні.
Статистична модель	Застосовує статистичні методи (наприклад, регресію, гаусівські процеси) для моделювання похибок.	Враховує випадкові і систематичні похибки, дає оцінку невизначеності.	Вимагає значних обсягів даних, складність реалізації.
Модель на основі машинного навчання	Використовує алгоритми ШІ (нейронні мережі, дерева рішень) для створення адаптивних моделей.	Висока точність при складних і динамічних умовах, здатність самонавчання.	Висока обчислювальна складність, потреба у великих даних для тренування.
Таблична модель	Використовує таблиці відповідностей між показаннями сенсора і еталонними значеннями.	Простота, легкість впровадження в пристрої з обмеженими ресурсами.	Обмежена гнучкість, великі обсяги пам'яті для детальних таблиць.

Лінійна модель найчастіше застосовується у простих сенсорах із майже лінійною залежністю між вихідним сигналом і вимірюваною величиною. Наприклад, у датчиках температури на основі термісторів або датчиках вологості початкового рівня лінійна калібрувальна модель дозволяє швидко і недорого коригувати похибки.

Такі моделі ефективні, коли середовище вимірювань стабільне і не відбуваються значні зміни зовнішніх умов. Водночас, якщо сенсор піддається впливу широкого діапазону температур або інших факторів, простота лінійної моделі може призвести до неточностей.

Поліноміальна модель використовується для більш складних випадків, коли залежність показань сенсора від істинної величини має виражену нелінійну форму. Прикладом може бути калібрування газових сенсорів, що реагують на концентрацію газу нелінійно в широкому діапазоні. Застосування поліноміальних моделей дозволяє врахувати криволінійні зміни сигналу і підвищити точність вимірювань. Проте складність такої моделі вимагає більш ретельного збору калібрувальних даних і обробки, а також є ризик «переобучення», коли модель добре працює на тренувальних даних, але гірше — на реальних.

Статистичні моделі особливо корисні в системах, де важливо врахувати як систематичні, так і випадкові похибки. Наприклад, у мережах IoT для моніторингу якості повітря в місті, де окремі сенсори можуть піддаватися різним випадковим впливам (шум, коливання температури), статистичні підходи дають змогу більш адекватно моделювати похибки і отримувати інтервали довіри для вимірювань. Вони також застосовуються в системах діагностики та самоконтролю сенсорів. Недоліком є те, що для статистичного моделювання потрібен великий масив даних, що не завжди можливо отримати в реальному часі.

Моделі на основі машинного навчання дедалі частіше застосовуються для обробки складних і великих обсягів даних у IoT-системах. Наприклад, нейронні

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		31

мережі використовуються для калібрування сенсорів у «розумних» будинках або на виробництві, де одночасно впливають десятки факторів (температура, вологість, електромагнітні завади). Такі моделі здатні навчатися на основі історичних даних, адаптуючись до зміни характеристик сенсорів і умов експлуатації. Хоча ці методи підвищують точність, вони потребують значних обчислювальних ресурсів і великих обсягів даних для навчання, що може бути проблемою для низькоресурсних пристроїв.

Табличні моделі використовують у пристроях з обмеженими ресурсами, де неможливо реалізувати складні алгоритми. Прикладом є прості сенсори у побутових приладах або у вбудованих системах, де калібрувальна інформація зберігається у вигляді таблиць відповідностей між показаннями і еталонними значеннями. Такий підхід простий у впровадженні і забезпечує швидку корекцію, але вимагає великого обсягу пам'яті для збереження даних і не дозволяє легко враховувати динамічні зміни параметрів сенсора.

Таким чином, вибір калібрувальної моделі залежить від конкретних завдань, характеристик сенсора, умов його експлуатації та доступних обчислювальних ресурсів. В умовах розвитку IoT зростає потреба в адаптивних і точних моделях, що здатні працювати в реальному часі і забезпечувати високу якість даних навіть при складних зовнішніх впливах.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		32

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЗОВАНИХ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ІОТ-СЕНСОРІВ

2.1. Особливості системи забезпечення єдності вимірювань

Система забезпечення єдності вимірювань (СЄВ) є фундаментальним елементом метрології, що гарантує точність, надійність та узгодженість результатів вимірювань незалежно від часу і місця проведення. Вона базується на ієрархії еталонів і комплексі процедур, що забезпечують трасованість вимірювань — безперервну ланцюгову передачу розміру одиниці фізичної величини від національних та міжнародних стандартів до робочих приладів і сенсорів [12-14].

Ієрархія еталонів та передача розміру фізичних величин

У системі СЄВ верхній рівень належить основним національним еталонам, які представляють найвищу метрологічну точність – рисунок 2.1.

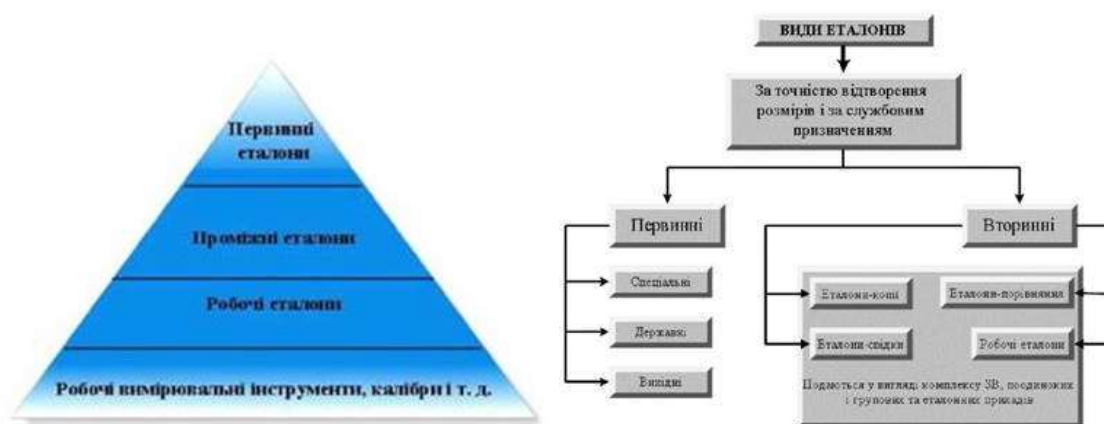


Рисунок 2.1 – Система організації процесу передачі розміру фізичної величини

Вони визначають одиниці фізичних величин у відповідності з міжнародною системою SI, базуючись на фундаментальних фізичних константах або усталених стандартах. Ці еталони передають розмір через вторинні еталони, нормальні елементи і проміжні засоби до калібрувальних приладів, що

безпосередньо використовуються для калібрування робочих вимірювальних пристроїв, зокрема сенсорів IoT. Для класичних фізичних величин, таких як час, довжина, маса, електричні параметри та температура, система еталонів розроблена давно і підтримується міжнародними угодами – рисунок 2.2.



Рисунок 2.2. – Еталони фізичних величин

За рішенням Генеральної конференції з мір і ваги було ухвалено наступне визначення одиниці довжини – метра. Метр це довжина шляху, що проходить світло у вакуумі за $1/299\,792\,458$ частину секунди.

Еталон одиниці маси - кілограм. За міжнародний прототип кілограма прийнято платино- іридієву гирю у вигляді циліндра діаметром і висотою 39 мм.

В даний час, найбільш точними є еталонні цезієві годинники американського Національного інституту стандартів і технології (NIST), забезпечують точність відтворення секунди на рівні $\sim 3,3 \cdot 10^{-16}$. Але перспективу на майбутнє мають оптичні стандарти частоти, засновані на переходах в однократних іонах ртуті, ітербію чи стронцію або в нейтральних атомах стронцію чи ртуті. Їх стабільність в часі, в теорії, перебуває на рівні $10\text{-}17 \cdot 10^{-18}$ с.

– Час визначається національними атомними годинниками (цезієві, водневі мазери), що задають точність секунди. Вторинні еталони — синхронізовані кварцові генератори, GPS-референти.

– Довжина базується на лазерних інтерферометрах, що використовують стабільні довжини хвиль світла (He-Ne лазери). Вторинні еталони — калібровані лінійки, електронні дальноміри.

– Маса представлена вагами Віблі (Kibble balance) і міжнародними прототипами, що забезпечують визначення кілограма через фізичні константи. Вторинні еталони — лабораторні гирі, калібровані ваги.

– Електричні величини мають еталони на основі квантових ефектів: ефект Джозефсона для напруги, ефект Холла для опору. Вторинні еталони — калібратори, лабораторні мультиметри.

– Температура визначається через фіксовані точки плавлення та кипіння речовин за шкалою ITS-90, із застосуванням платинових резисторів і термопар як вторинних еталонів.

– Окрім класичних величин, важливу роль у сучасній метрології відіграють складні параметри — радіоактивність, хімічний склад матеріалів, концентрація газів, де для кожного з них створено власну систему еталонів і нормальних елементів.

– Радіоактивність вимірюється за допомогою стандартизованих джерел з відомою активністю, що служать основними еталонами. Ці джерела застосовуються для калібрування дозиметрів і спектрометрів. Нормальні елементи — допоміжні зразки із сертифікованою активністю, що використовуються для проміжної передачі розміру.

– Хімічний склад і концентрація газів контролюються через стандартизовані зразки речовин та сертифіковані газові суміші. Газові балони із відомим складом становлять нормальні елементи для калібрування газоаналізаторів і сенсорів. Вторинні еталони включають контрольні суміші меншої точності та калібровані робочі проби.

Роль нормальних елементів і проміжних компонентів

Нормальні елементи і проміжні компоненти є невід’ємною частиною системи передачі розміру фізичних величин. Вони забезпечують зв’язок між основними еталонами та робочими вимірювальними пристроями, будучи більш доступними та стабільними, хоч і менш точними за основні еталони. Такі

елементи регулярно калібруються та повіряються у національних метрологічних інститутах для збереження трасованості.

У випадку радіоактивності це сертифіковані джерела активності, у хімічних вимірах — стандартизовані розчини й газові суміші. Проміжні компоненти можуть також включати калібрувальні прилади, робочі еталони, програмні модулі автоматизованого калібрування.

Особливості системи єдності вимірювань для сенсорів IoT

Сенсори IoT широко застосовуються в розподілених системах, часто у великих масштабах та у складних умовах експлуатації. Для забезпечення їх метрологічної надійності критичною є трасованість їх показань до відповідних еталонів.

Через географічну розподіленість і масовість використання IoT-сенсорів системи забезпечення єдності вимірювань повинні враховувати можливості віддаленого калібрування, застосування локальних нормальних елементів, а також використання алгоритмів самокалібрування та самонавчання. Ці підходи дозволяють підтримувати метрологічні характеристики сенсорів на високому рівні без необхідності частого фізичного доступу до них.

Таким чином, Система забезпечення єдності вимірювань — це складна, багаторівнева ієрархія основних і вторинних еталонів, нормальних елементів та проміжних компонентів, яка гарантує точність і надійність вимірювань у всіх галузях. Вона включає як класичні фізичні величини (час, довжина, маса, електричні параметри, температура), так і складні спеціалізовані характеристики (радіоактивність, хімічний склад, газові концентрації).

Застосування такої системи в IoT-сенсорах є запорукою високої якості та достовірності зібраних даних, що важливо для прийняття правильних рішень у промисловості, екології, медицині, безпеці та інших сферах.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		36

2.2. Використання алгоритмів самокалібрування та самонавчання

Використання алгоритмів самокалібрування та самонавчання для сенсорів Інтернету речей (IoT) є одним із найбільш перспективних напрямків розвитку сучасних вимірювальних систем. У класичних підходах калібрування сенсорів виконується вручну або в лабораторних умовах, що часто є трудомістким, дорогим і обмеженим за часом. Натомість впровадження алгоритмів самокалібрування дозволяє сенсорам самостійно оцінювати і коригувати свої метрологічні параметри без участі оператора [13-15].

Самокалібрування базується на тому, що сенсор використовує внутрішні або зовнішні опорні точки, а також аналізує історію своїх власних вимірювань для виявлення зміщень або деградації характеристик. Ці алгоритми здатні адаптуватися до змін навколишніх умов, наприклад, температури, вологості, чи електромагнітних завад, що значно підвищує точність і надійність роботи пристрою у реальному часі. Крім того, самокалібрування може враховувати поступове старіння компонентів сенсора, своєчасно коригуючи вихідні дані для збереження достовірності вимірювань.

Алгоритми самонавчання, які часто базуються на методах машинного навчання, йдуть далі, дозволяючи сенсорам не лише коригувати власні похибки, але й підлаштовуватися під нові умови експлуатації, аналізуючи великі обсяги отриманих даних. Завдяки цьому сенсори можуть прогнозувати можливі несправності, оптимізувати частоту калібрування або навіть підвищувати власну чутливість до важливих параметрів. Це особливо важливо в масштабних мережах IoT, де централізоване управління і регулярна ручна калібрування кожного пристрою є практично неможливими.

Водночас використання таких алгоритмів стикається з низкою викликів. Серед них — необхідність потужних обчислювальних ресурсів, обмежених у більшості IoT-пристроїв, ризик накопичення помилок через невірне навчання, а також потреба у надійних датасетах для початкового тренування моделей. З

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		37

огляду на це, розробка ефективних, енергоефективних та надійних алгоритмів самокалібрування і самонавчання є важливим завданням сучасної метрології та інженерії IoT.

У перспективі такі підходи дозволять значно знизити вартість експлуатації IoT-систем, підвищити їх автономність і точність, а також розширити сферу застосування — від розумних міст і промислових підприємств до медичних пристроїв і екологічного моніторингу. Це відкриває нові можливості для створення більш інтелектуальних, надійних і самодостатніх сенсорних мереж.

Алгоритми самокалібрування полягають у здатності сенсора автоматично визначати свої метрологічні зміщення та коригувати вихідні дані без втручання оператора. Це можна реалізувати різними способами, залежно від можливостей пристрою та доступної інформації.

Одним із базових методів є використання вбудованих еталонних сигналів або опорних точок. Наприклад, сенсор може періодично «перевіряти» свій стан за допомогою внутрішнього стабільного джерела або контрольного параметра, відомого заздалегідь. Це дає змогу порівняти фактичні показники з еталонними і оцінити похибку. Реалізація цього підходу потребує наявності апаратних засобів для генерації опорних сигналів або можливості звертатися до зовнішніх еталонів (інших датчиків із більшою точністю).

Іншим поширеним підходом є використання статистичного аналізу історії вимірювань. Сенсор збирає свої вимірювання за певний проміжок часу і аналізує розподіл значень, виявляючи аномалії чи зсуви, що можуть свідчити про деградацію або зміщення. Цей метод не потребує апаратного опорного сигналу, але вимагає достатнього обсягу даних і алгоритмів обробки, наприклад, фільтрів Калмана або методів регресії.

Для складніших систем застосовують мультимодальні підходи, коли сенсор використовує не одну, а кілька взаємодоповнюючих інформаційних «точок» (внутрішні опорні, зовнішні показники, статистичні закономірності).

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		38

Такий підхід підвищує надійність самокалібрування, але збільшує складність програмної реалізації.

Алгоритми самонавчання виходять за рамки простого коригування і мають на меті адаптувати модель сенсора до нових умов експлуатації. Для їх реалізації широко використовують методи машинного навчання — наприклад, нейронні мережі, дерева рішень, метод опорних векторів.

Реалізація такого алгоритму зазвичай включає кілька ключових кроків:

1. Збір та підготовка даних: Для навчання моделей необхідний значний обсяг якісних даних, що містять приклади вимірювань сенсора у різних умовах, а також відповідні еталонні значення. Це можуть бути дані з лабораторних калібрувань або з мережі сенсорів з відомою точністю.

2. Побудова та тренування моделі: Використовуючи зібрані дані, створюють математичну модель, яка описує залежність між показаннями сенсора і реальними величинами, враховуючи фактори, що впливають на точність. Процес навчання полягає у мінімізації похибки моделі.

3. Інтеграція у пристрій та адаптація у реальному часі: Після тренування модель вбудовується у сенсор або у систему збору даних. Вона продовжує адаптуватися до нових вхідних даних, оновлюючи параметри для підтримки високої точності.

4. Моніторинг і захист від деградації: Самонавчальна система повинна включати механізми виявлення аномалій, щоб не допустити накопичення помилок через неправильне навчання, а також механізми збереження та відновлення відомих коректних станів.

Для реалізації алгоритмів самокалібрування та самонавчання важливо враховувати обмеження апаратних ресурсів типових IoT-пристроїв: обчислювальна потужність, енергоспоживання, обсяг пам'яті. Часто оптимальним є баланс між точністю моделі та складністю алгоритмів.

У практичних застосуваннях широко застосовують гібридні підходи, коли обробка важких обчислень відбувається на сервері чи в хмарі, а сенсор передає

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		39

«сирі» або попередньо оброблені дані. Це дає змогу реалізувати складні моделі машинного навчання без навантаження на пристрій.

В цілому, розробка алгоритмів самокалібрування і самонавчання — це мультидисциплінарне завдання, що поєднує знання з метрології, статистики, машинного навчання та інженерії IoT. Застосування таких алгоритмів здатне значно підвищити автономність і надійність сенсорних мереж, знизити вартість обслуговування і розширити можливості сучасних IoT-систем.

2.3. Хмарні сервіси для дистанційного калібрування сенсорів

Сучасні сенсорні системи, особливо у сфері Інтернету речей (IoT), дедалі частіше використовують хмарні сервіси для забезпечення безперервного контролю, обслуговування та калібрування вимірювальних пристроїв. Одним з ключових напрямів є дистанційне калібрування сенсорів, що дозволяє автоматизувати процес корекції їх показів без необхідності фізичного доступу до пристроїв, які часто встановлюються у віддалених або важкодоступних місцях.

Головна ідея дистанційного калібрування полягає в тому, що калібрувальні параметри сенсора можуть змінюватися або оновлюватися автоматично на основі аналізу його показів у порівнянні з еталонними значеннями. Цей аналіз виконується у хмарному середовищі, де функціонує спеціалізований калібрувальний модуль. Такий модуль приймає поточні покази сенсорів, порівнює їх з еталонними величинами, обчислює поправки, визначає допустимість похибок та формує нові калібрувальні коефіцієнти. У разі необхідності ці параметри передаються назад до сенсора або до його контролера, де зберігаються у пам'яті EEPROM або застосовуються програмно у режимі реального часу.

У дистанційній калібрувальній системі виникає природне запитання: яким чином порівнюються поточні значення сенсора з еталонними? Інакше кажучи,

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		40

звідки беруться ці "еталонні" значення, які є базою для оцінки похибки вимірювань?

На практиці застосовується кілька підходів до формування еталонної інформації для такого порівняння:

1. Порівняння з локальним еталоном

Найбільш класичний підхід передбачає наявність поблизу сенсора еталонного пристрою або калібрувального генератора, який вимірює ту саму фізичну величину з високою точністю. Наприклад, у системах температурного моніторингу біля IoT-сенсора може бути встановлений сертифікований сенсор PT100, підключений до каліброваного інтерфейсу. Обидва пристрої одночасно знімають покази, які передаються у хмару, де калібрувальний модуль обчислює різницю між ними, оцінює її стабільність, і якщо похибка перевищує допустимий рівень, здійснює оновлення калібрувальних коефіцієнтів сенсора. Такий підхід застосовується у відповідальних технологічних об'єктах, де важлива висока точність вимірювань і є можливість забезпечити фізичну присутність еталону.

2. Порівняння з віртуальним еталоном

Другий підхід реалізується через використання моделі або прогнозу значення фізичної величини, яка ґрунтується на даних з інших джерел або на фізичних закономірностях процесу. Наприклад, у разі температурного моніторингу в теплиці, очікуване значення температури в певній точці може бути обчислене на основі аналітичної моделі розсіювання тепла, даних з точніших сенсорів у сусідніх точках або інформації з метеостанції. У цьому випадку хмарний модуль не тільки порівнює виміряні значення з розрахунковими, а й використовує алгоритми штучного інтелекту або машинного навчання для побудови складних моделей прогнозування. Виявлене систематичне відхилення між прогнозованими й виміряними значеннями свідчить про зміну характеристик сенсора та потребу в калібруванні.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		41

3. Порівняння з історичними даними

Третій варіант передбачає використання ретроспективного аналізу — тобто порівняння поточних показів сенсора з раніше задокументованими результатами калібрування або з його типовими характеристиками, зафіксованими у процесі експлуатації. Хмарна система веде історію всіх калібрувань і змін параметрів кожного сенсора, тому може визначити дрейф або деградацію його характеристик у часі. Якщо темп змін перевищує припустимий, це є сигналом до перекалібрування. Такий підхід доцільний у великих розподілених системах моніторингу, де відсутня можливість або економічна доцільність встановлення фізичного еталону.

У кожному з цих підходів хмарний сервіс виступає не як джерело еталону, а як центр керування, аналітики та обробки калібрувальних даних. Саме в хмарі реалізується складна логіка перевірки відповідності, адаптації калібрувальних моделей, зберігання сертифікатів калібрування, а також автоматизоване поширення оновлених параметрів на пристрої. Це дозволяє здійснювати масштабоване обслуговування сенсорних мереж, скорочуючи витрати на фізичне втручання й підвищуючи метрологічну надійність системи.

Особливу роль у цьому процесі відіграє калібрувальний модуль, що функціонує у хмарному середовищі. Він включає наступні логічні компоненти:

- приймання та попередню фільтрацію даних від сенсорів;
- розрахунок похибки шляхом порівняння з еталонним або модельним значенням;
- статистичну оцінку стабільності похибки;
- обчислення калібрувальних коефіцієнтів (лінійна, поліноміальна або експоненціальна корекція);
- верифікацію результатів калібрування;
- формування цифрового калібрувального сертифіката;
- захищену передачу оновлених параметрів на пристрій.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		42

Важливо відзначити, що ефективність такої системи залежить від можливості IoT-сенсора або його мікроконтролера приймати нові параметри калібрування. Це можливо лише у тих випадках, коли передбачено механізм зчитування та запису калібрувальних коефіцієнтів у енергонезалежну пам'ять (наприклад, EEPROM) або застосування їх у процесі обробки сигналу в реальному часі. У разі простіших сенсорів, корекція може здійснюватися на рівні контролера або у хмарі при обробці даних, без втручання у сам сенсор.

Окремої уваги потребує питання безпеки. Передача калібрувальних параметрів до сенсора повинна здійснюватися з використанням шифрування, автентифікації та цифрового підпису, щоб уникнути ризику фальсифікації або несанкціонованої зміни характеристик сенсора. Також важливо забезпечити цілісність цифрових сертифікатів та простежуваність всіх змін, що відбулися протягом експлуатації пристрою.

Таким чином, дистанційне калібрування з використанням хмарних сервісів поєднує гнучкість, масштабованість та високий рівень автоматизації. Воно дає змогу здійснювати ефективне технічне обслуговування великої кількості сенсорів у розподілених системах, знижуючи експлуатаційні витрати та забезпечуючи дотримання вимог до точності вимірювань.

2.4. Аналіз міжповірочних інтервалів та прогнозування метрологічних характеристик сенсорів

Методи аналізу міжповірочних інтервалів та прогнозування метрологічних характеристик сенсорів, таких як похибка та надійність, ґрунтуються на систематичному зборі, обробці та аналізі даних про поведінку сенсорів у реальних умовах експлуатації.

Один із ключових підходів полягає в статистичному аналізі результатів повірок або калібрувань, проведених у різні моменти часу. Це дозволяє

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		43

визначити тенденції зміни метрологічних характеристик сенсора, зокрема дрейф нуля, зміну чутливості або загальне зростання похибки. На основі цих тенденцій за допомогою методів регресійного аналізу, машинного навчання або моделей деградації можна побудувати прогностичні моделі, що оцінюють ймовірний стан сенсора в майбутньому.

Для оцінки надійності сенсорів використовуються методи теорії надійності, зокрема аналіз відмов, середнього часу безвідмовної роботи (MTBF), а також побудова кривих виживання на основі даних про експлуатаційні відмови. При цьому важливим є також урахування умов роботи сенсора, таких як температура, вологість, вібрації тощо, що можуть впливати на швидкість деградації.

Для визначення оптимального міжповірного інтервалу застосовуються ризик-орієнтовані методики. Вони враховують як технічний стан сенсора, так і допустимі межі похибки для конкретного застосування. Це дозволяє уникати як надто частих перевірок, що збільшують витрати, так і надто рідких, що можуть призвести до недостовірних вимірювань.

У сучасних умовах все більшого значення набувають цифрові методи обробки даних, зокрема використання хмарних платформ і цифрових двійників сенсорів. Такі технології дають змогу віддалено моніторити зміну метрологічних характеристик у реальному часі, автоматизувати виявлення аномалій та своєчасно формувати попередження про необхідність калібрування або заміни сенсора.

Цифрові двійники — це віртуальні моделі, які точно відображають структуру, властивості та поведінку реальних фізичних об'єктів. У випадку сенсорів та вимірювальних пристроїв цифровий двійник являє собою програмну копію конкретного сенсора, яка постійно оновлюється на основі даних, отриманих від нього під час експлуатації. Така модель дозволяє відслідковувати технічний стан сенсора в реальному часі, виявляти ознаки деградації та

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		44

прогнозувати можливі зміни метрологічних характеристик, зокрема похибки та надійності.

Цифровий двійник збирає інформацію про параметри роботи сенсора, аналізує її і на основі математичних моделей відтворює поведінку пристрою в різних умовах. Це дозволяє заздалегідь виявити, коли може знадобитися калібрування або технічне обслуговування. Окрім того, цифровий двійник допомагає оцінити вплив зовнішніх факторів, таких як температура чи вологість, на точність вимірювань.

У сучасних системах цифрові двійники інтегруються з хмарними сервісами та інтернетом речей, що дає змогу здійснювати дистанційний моніторинг і керування сенсорами. Завдяки цьому підхід до перевірки стає не лише періодичним, а й стан-орієнтованим — тобто рішення про необхідність калібрування приймається на основі реального стану сенсора, а не лише за календарним графіком. Такий підхід значно підвищує ефективність використання вимірювального обладнання та забезпечує вищу достовірність результатів вимірювань.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		45

3. РОЗРОБКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ ІОТ-СЕНСОРІВ

3.1. Вибір об'єкта дослідження (тип сенсорів, параметри калібрування)

У межах даної бакалаврської роботи як об'єкт дослідження було обрано температурний цифровий сенсор MAX31855 у поєднанні з термопарою типу К, що використовується у складі ІоТ-системи для моніторингу температури.

Сенсорна система на основі MAX31855 широко використовується в галузях, де необхідне віддалене вимірювання температури — наприклад, у промисловій автоматизації, аграрному секторі, системах енергоефективності та вбудованих ІоТ-пристроях. Основні переваги:

- підтримка широкого діапазону температур (від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1350\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- цифровий інтерфейс SPI для надійної передачі даних;
- вбудована схема компенсації холодного спаю;
- відносно низька вартість;
- сумісність з мікроконтролерами ESP32, STM32, Arduino тощо.

Особливості підключення до ІоТ-пристрою

Інтерфейс підключення MAX31855 до мікроконтролера реалізується за допомогою послідовної шини SPI. Типова схема підключення включає:

- термопару типу К, з'єднану з аналоговими входами мікросхеми;
- живлення 3.3 В або 5 В (залежно від модуля);
- лінії SPI: SCK (Serial Clock), CS (Chip Select), SO (Serial Out) до відповідних пінів мікроконтролера;
- заземлення (GND), спільне для сенсора і мікроконтролера.

Сенсор забезпечує дискретне оновлення температурних даних кожні 100 мс, що відповідає типовим вимогам до моніторингу повільно змінних процесів.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		46

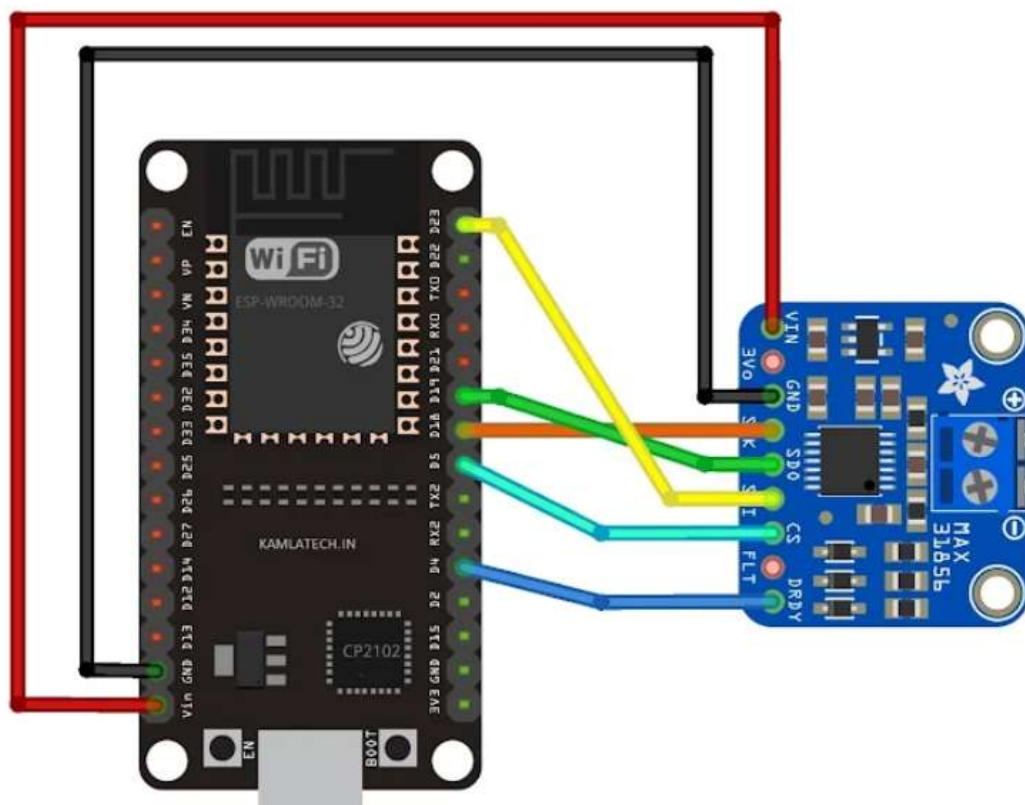


Рисунок 3.1 – Типова схема підключення MAX31855 до мікроконтролера

Джерела похибок вимірювань

У процесі експлуатації сенсора виникають як систематичні, так і випадкові похибки. Основні джерела похибок включають:

- Терморезистивна неоднорідність з'єднань — впливає на точність компенсації холодного спаю;
- Електромагнітні завади — передача сигналу SPI чутлива до шумів, особливо при довгих дротах чи несприятливих умовах (виробничі цехи, зварювання);
- Нестабільність джерела живлення — флуктуації напруги можуть призводити до хибного оцифрування температури;
- Контактний опір з'єднань термопары — вносить додаткову систематичну похибку;

– Вплив навколишнього середовища на корпус сенсора — різка зміна температури повітря чи вологість може впливати на якість вимірювання.

Причини деградації сенсора

З часом характеристики термопари та мікросхеми MAX31855 можуть погіршуватись. До основних причин деградації належать:

- окислення металів термопари при експлуатації у вологому чи агресивному середовищі;
- термічна втома матеріалів термопари при тривалій роботі у високотемпературному режимі;
- зниження точності компенсації холодного спаю внаслідок температурного дрейфу елементів мікросхеми;
- накопичення дрейфу характеристик ацп або внутрішнього опору сенсора;
- пошкодження ізоляції або дроту термопари у місцях механічного навантаження.

Ці чинники обумовлюють необхідність регулярної перевірки сенсора та впровадження методів дистанційного контролю його стану, особливо у складі IoT-систем із тривалим автономним режимом роботи.

3.2. Розробка методики та алгоритму калібрування

З метою забезпечення достовірності вимірювань температури та виявлення деградації характеристик сенсора у складі IoT-системи розроблено методику його перевірки, яка враховує особливості конструкції, тип сенсора, джерела похибок та практичні умови експлуатації.

Вибір еталонного засобу — калібратора

Для перевірки температурного сенсора на базі MAX31855 з термопарою типу К було обрано калібратор температури Fluke 714B Thermocouple Calibrator, що

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		48

відповідає вимогам до точності, сумісності з термопарами та простоти інтеграції в лабораторний стенд.

Таблиця 3.1 -Основні технічні характеристики Fluke 714B

Параметр	Значення
Підтримка термопар	Типи J, K, T, E, R, S, B, N
Діапазон імітації температур (тип K)	від -270 °C до +1372 °C
Похибка імітації (тип K)	±0.5 °C при 0 °C; ±0.9 °C при 1000 °C
Інтерфейс	Ручне введення значень, калібрування в режимі джерела
Живлення	Батарейне
Сертифікація	NIST traceable calibration certificate

Калібратор дозволяє формувати точне значення температури у вигляді електричної напруги, що імітує сигнал термопари, забезпечуючи умови для безконтактного тестування MAX31855 без необхідності створення реального температурного середовища.

Засоби та умови повірки

- Сенсорна система: MAX31855 + термопара типу K;
- Мікроконтролер: ESP32 з SPI-з'єднанням;
- Калібратор: Fluke 714B;
- Еталонний цифровий термометр: наприклад, Testo 735-2 (для контролю зовнішнього середовища);
- Програмне забезпечення: скетч Arduino для зчитування температури з MAX31855, відображення на дисплеї або передача через UART/Wi-Fi;
- Живлення: стабілізоване джерело 3.3 В;
- Оточення: кімната з контрольованою температурою (20 ± 2 °C), низький рівень електромагнітних завад.

Схема стенду:

1. До входу MAX31855 (термопарний вхід) під'єднується калібратор Fluke 714B у режимі симуляції термопари типу K.

2. MAX31855 підключено до ESP32 через SPI.
3. Програмне забезпечення зчитує температуру та виводить її на дисплей або в термінал.
4. Порівнюються значення, задані на калібраторі, та ті, що передає MAX31855.

3.3 Методика проведення повірки

Крок 1. Підготовка до повірки:

- Провести візуальний огляд пристрою.
- Увімкнути калібратор, встановити тип термопари (тип K).
- Перевірити контактність з'єднань.

Крок 2. Імітація стандартних значень температури:

- Задати на калібраторі температури: $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Для кожної температури зняти щонайменше 10 показів із сенсора MAX31855 з інтервалом 1 с.

Крок 3. Обробка результатів:

- Розрахувати середнє значення показів сенсора для кожної контрольної точки.
- Визначити абсолютну похибку як:

$$\Delta T = T_{\text{сенсор}} - T_{\text{калібратор}}$$

- Перевірити, чи не перевищує похибка допустимі межі ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ для даної конфігурації за документацією MAX31855).

Крок 4. Протоколювання результатів:

- Заповнити протокол повірки із зазначенням температур, виміряних значень, похибок і висновку щодо придатності.

3.4 Критерії придатності сенсора

Сенсор вважається таким, що пройшов повірку, якщо:

- абсолютна похибка в усіх точках не перевищує $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$;

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		50

- повторюваність показів у межах кожної точки не перевищує 0.5 °C;
- відсутні ознаки деградації сигналу (сплески, пропуски, дрейф);
- відхилення не мають систематичного характеру (лінійного зміщення по всьому діапазону).

Нижче розглянуто опис методики калібрування, який містить протокол калібрування термопар типу К з аналізом нелінійності, деградації та систематичних дрейфів у розповідному стилі:

Калібрування термопар типу К з аналізом нелінійності, деградації та систематичних дрейфів

Термопар типу К (Хромель-Алюмель) є одним із найпоширеніших типів температурних сенсорів, що широко застосовуються в системах промислового контролю, лабораторних дослідженнях і пристроях Інтернету речей. Вони характеризуються широким діапазоном вимірювання температур (від –200 °C до +1370 °C), відносною простотою конструкції та високою механічною стійкістю. Однак у процесі тривалої експлуатації термопар зазнають низки змін, які впливають на точність вимірювання. Основними факторами деградації є окислення та вигорання електродів, термодифузія компонентів, структурні зміни внаслідок теплового старіння, а також нерівномірність цих процесів уздовж довжини чутливого елемента.

З огляду на це, виникає необхідність у періодичному калібруванні термопар, що дозволяє не лише коригувати їхню покази, але й виявляти прояви деградації, оцінювати нелінійність температурної залежності та прогнозувати довгострокові дрейфи. У цьому розділі наведено типовий протокол калібрування термопар типу К, реалізований з урахуванням вищезазначених чинників.

Загальна методика калібрування

Процедура калібрування термопар проводилася у температурному діапазоні від 0 °C до 1000 °C з використанням сухоблочного калібратора, еталонної термопар типу S (Pt–PtRh10), прецизійного мультиметра для вимірювання ЕДС термопар, а також програмного забезпечення для збору та

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		51

аналізу даних. У кожній із контрольних точок (0 °C, 100 °C, 300 °C, 500 °C, 700 °C, 900 °C та 1000 °C) проводилися багаторазові вимірювання (не менше п'яти) з інтервалом у 30 секунд. Середнє значення використовувалося як результат, а також розраховувалося стандартне відхилення для оцінки випадкової складової похибки.

Похибки визначалися як різниця між температурою, отриманою за допомогою еталонного зонда, та температурою, обчисленою з ЕДС досліджуваної термопари згідно з табличною залежністю типу К. Усі отримані поправки та похибки реєструвалися та використовувалися для побудови графіка температурної похибки по всьому діапазону.

Аналіз нелінійності температурної характеристики

Після обробки отриманих даних було встановлено, що в деяких ділянках температурного діапазону (особливо вище 700 °C) спостерігається суттєве відхилення фактичних показів термопари від табличних значень. Ці відхилення є нелінійними й не можуть бути компенсовані простим лінійним масштабуванням.

Для опису поведінки похибки в залежності від температури використовувалися поліноміальні моделі другого та третього порядку. У випадках складної кривизни застосовувалися апроксимаційні моделі типу Steinhart–Hart, які дозволяють враховувати нелінійність більш точно. Це особливо важливо для застосувань, де потрібна висока точність у широкому діапазоні температур.

Виявлення та аналіз деградаційних змін

Крім аналізу миттєвих похибок, особливу увагу було приділено довгостроковим змінам у характеристиках термопари. Для цього проводився експеримент зі стабілізацією термопари при температурі 700 °C протягом двох годин. Було зафіксовано поступове зниження вихідної ЕДС при сталій температурі, що свідчить про наявність систематичного дрейфу.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		52

Цей дрейф пов'язують з термодифузією легких компонентів сплаву, вигоранням хрому або марганцю, а також із поступовими структурними змінами в провідниках. Для опису температурного дрейфу використовувалися експоненційні та логарифмічні моделі, зокрема:

$$\Delta T_{\text{дрейф}} = A \cdot (1 - e^{-kt}), \quad \text{або} \quad \Delta T_{\text{дрейф}} = \beta \cdot \log(t + t_0),$$

де $\Delta T_{\text{дрейф}}$ — зміна температурного показу в часі, t — час експлуатації, а A , k , β , t_0 — емпіричні коефіцієнти, що підбираються на основі калібрувальних даних.

Крім загального дрейфу, було виявлено й нерівномірність деградації по довжині термопари, особливо у випадках, коли один з електродів піддавався вищому температурному або хімічному навантаженню. Така нерівномірність може спричинити локальні варіації термоелектричної напруги, які не компенсуються звичайним калібруванням.

Коригувальна модель вимірювання температуритемпературного показу

З урахуванням усіх виявлених відхилень була побудована узагальнена модель для обчислення скоригованої температури:

$$T_{\text{кор}} = T_{\text{вимір}} + \Delta T(T) + \Delta T_{\text{дрейф}}(t),$$

де $T_{\text{кор}}$ — скориговане значення температури, $T_{\text{вимір}}$ — обчислене табличне значення температури на основі ЕДС, $\Delta T(T)$ — температурна поправка для компенсації нелінійності, а $\Delta T_{\text{дрейф}}(t)$ — поправка, що враховує деградаційний дрейф з часом.

Ця модель може бути реалізована програмно у мікроконтролерах або серверах збору даних, що дозволить виконувати автоматичну корекцію без необхідності часткої повторної калібровки.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		53

Проведене калібрування показало, що термопара типу К зазнає суттєвих змін характеристик у процесі експлуатації, особливо при високотемпературному навантаженні. Похибка в окремих точках сягала $\pm 2,5$ °С, що є критичним для точних вимірювань. Виявлені нелінійності та дрейфи свідчать про необхідність розробки індивідуальних моделей корекції температури, а також про доцільність періодичного контролю технічного стану сенсорів.

З метою підвищення достовірності вимірювань рекомендовано:

- Проводити візуальний та електричний контроль термопар перед повторним введенням в експлуатацію;
- Використовувати термозахисні гільзи для зменшення впливу агресивного середовища;
- Скорочувати міжповірочні інтервали до 6–12 місяців;
- Застосовувати програмну компенсацію на основі моделей, отриманих шляхом калібрування.

Таким чином, ретельний аналіз похибок термопар типу К, що враховує як нелінійність температурної характеристики, так і систематичні дрейфи внаслідок деградації, є важливою складовою метрологічного забезпечення сучасних вимірювальних систем.

3.3. Програмна реалізація процесу калібрування

У процесі побудови системи точного вимірювання температури, особливу увагу було приділено не лише апаратній реалізації, але й методичному забезпеченню обробки результатів, з урахуванням як вихідної похибки, так і змін метрологічних характеристик, зумовлених тривалим використанням термопар. Базовим елементом температурного перетворювача є термопара типу К — один із найпоширеніших сенсорів для широкого температурного діапазону, особливо в промислових умовах. В якості інтерфейсного елемента використовується

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		54

мікросхема MAX31855, що виконує прецизійне вимірювання термоелектричної ЕРС термопари, одночасно реалізуючи функцію компенсації температури холодного спаю. Цифрове значення температури, розраховане на основі вбудованого аналого-цифрового перетворення, передається мікроконтролеру ESP32 через інтерфейс SPI, що забезпечує швидкий та надійний обмін даними.

Однак, навіть за наявності високоточного перетворювача, значення температури не можна вважати повністю достовірним без врахування похибок, зумовлених індивідуальними відхиленнями чутливості термопари, нелінійністю її характеристики та поступовою зміною її властивостей у процесі експлуатації. Термопари, особливо при роботі у високотемпературному або агресивному середовищі, зазнають процесів деградації. Найчастіше це пов'язано з окисненням електродів, вигоранням матеріалів спаю, дифузією домішок та зміною мікроструктури, що призводить до дрейфу ЕРС при заданій температурі. В результаті виникає систематична похибка, яка з часом може перевищити допустимі межі.

Щоб врахувати ці ефекти, була розроблена методика, яка базується на двох етапах корекції. Перший етап — це класичне лабораторне калібрування. Воно передбачає порівняння показів термопари з еталонними значеннями температури в декількох реперних точках. На основі різниць між виміряними та реальними температурами будуються поправки. Визначені експериментально відхилення апроксимуються квадратичним поліномом, коефіцієнти якого зберігаються в енергонезалежній пам'яті мікроконтролера та застосовуються під час кожного вимірювання. Таким чином, здійснюється адаптація системи до індивідуальних метрологічних характеристик конкретного екземпляра термопари.

Другий етап — врахування довготривалих змін, тобто деградаційних процесів. Їхній характер є поступовим і переважно пов'язаний з експлуатаційним терміном або сумарним тепловим навантаженням. Для опису цієї поведінки було запропоновано емпіричну модель, в основі якої лежить логарифмічна залежність

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		55

зміни ЕРС від часу. Такий підхід базується на численних дослідженнях, що підтверджують повільний, але стабільний дрейф показів з часом, який часто має логарифмічний характер. Емпіричний коефіцієнт цієї моделі встановлюється під час періодичних повторних калібрувань та може автоматично коригуватись на основі результатів довгострокового моніторингу стабільної температури в контрольних умовах.

В результаті кожне вимірне значення температури проходить подвійний етап обробки. Спочатку здійснюється поліноміальна корекція, що компенсує первинну похибку. Потім додається поправка, що враховує деградацію, базуючись на внутрішньому лічильнику часу роботи системи або реєстрах збереженої інформації про кількість годин, відпрацьованих при підвищеній температурі. Таким чином, забезпечується як індивідуальна адаптація, так і адаптація до процесів старіння.

У контексті програмної реалізації, весь алгоритм було втілено у вигляді функції обробки температурних даних, реалізованої на мові C++ у середовищі Arduino IDE. Ця функція не лише зчитує поточне значення температури з MAX31855, але й виконує усі необхідні обчислення корекції в реальному часі. Особливої уваги потребувало керування SPI-інтерфейсом, оскільки MAX31855 не допускає спільного використання лінії CS без належної синхронізації. Значення температури, отримані після обробки, можуть передаватися далі по UART, Wi-Fi або зберігатися у внутрішній пам'яті для подальшого аналізу.

Таким чином, реалізована система не лише забезпечує точне вимірювання температури, але й демонструє адаптивність до зміни характеристик сенсора впродовж усього циклу його життя. Завдяки використанню моделі корекції, що враховує деградаційні процеси, досягається підвищена стабільність результатів вимірювань, що є критично важливим для застосування в умовах, де від точності залежить технологічний процес або безпека.

Для втілення розробленого алгоритму було створено програмний модуль на мові програмування C++ з використанням середовища Arduino IDE, яке

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		56

забезпечує зручну інтеграцію з апаратною платформою ESP32. Код складається з кількох логічних блоків: ініціалізація апаратного інтерфейсу, зчитування сирих даних температури, реалізація корекції за результатами калібрування та врахування довготривалого дрейфу.

Фрагмент програмного коду

```
#include <SPI.h>

#include "Adafruit_MAX31855.h"

// Піни SPI-з'єднання для ESP32
#define MAX31855_CS  5  // Chip Select
#define MAX31855_CLK 18 // Clock
#define MAX31855_DO  19 // Data Output

// Ініціалізація об'єкта термопари
Adafruit_MAX31855  thermocouple(MAX31855_CLK,  MAX31855_CS,
MAX31855_DO);

// Коефіцієнти поліноміальної корекції (визначені експериментально)
const float k0 = -0.45;
const float k1 = 1.02;
const float k2 = -0.0003;

// Емпіричний коефіцієнт деградації (наприклад, 0.01°C/100год)
const float degradationRate = 0.01;
unsigned long hoursWorked = 1500; // збережене або обраховане значення

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

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		57

```

thermocouple.begin();

Serial.println("Система термоконтролю ініціалізована");
}

void loop() {
    // Зчитування температури з термопари (до компенсації)
    double rawTemp = thermocouple.readCelsius();

    if (isnan(rawTemp)) {
        Serial.println("Помилка зчитування термопари!");
        return;
    }

    // Поліноміальна корекція за результатами калібрування
    double correctedTemp = k0 + k1 * rawTemp + k2 * rawTemp * rawTemp;

    // Корекція на основі деградації (дрейф за годинами роботи)
    double driftCorrection = degradationRate * (hoursWorked / 100.0);
    correctedTemp -= driftCorrection;

    // Вивід кінцевого результату
    Serial.print("Скоригована температура: ");
    Serial.print(correctedTemp, 2);
    Serial.println(" °C");

    delay(2000); // період між вимірюваннями
}

```

У наведеному фрагменті програмного забезпечення реалізовано повний цикл вимірювання температури з урахуванням ключових аспектів, що впливають

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		58

на достовірність результатів. Використано бібліотеку Adafruit_MAX31855, яка забезпечує зручне зчитування температури у форматі з компенсацією холодного спаю. Програма ініціалізує SPI-зв'язок між ESP32 і MAX31855, після чого періодично виконує зчитування температури.

Найважливішим етапом є обчислення поправок. Поліном другого порядку дозволяє наближено компенсувати початкову похибку, виявлену під час калібрування, у діапазоні робочих температур. У випадку, якщо потрібна більша точність, може бути використаний поліном вищого порядку або сегментна апроксимація. Після поліноміальної корекції додається поправка на деградацію, яка враховує загальний час роботи термопари або сумарне теплове навантаження. Значення змінної hoursWorked може бути збережене у пам'яті EEPROM та оновлюватися при кожному ввімкненні.

Завдяки такому підходу програмний код не лише реалізує зчитування, а й забезпечує адаптивне підвищення точності вимірювання, включаючи облік процесів старіння сенсора. Система є придатною для довготривалого моніторингу температури в критичних застосуваннях, з можливістю періодичного оновлення коефіцієнтів калібрування без потреби в заміні обладнання.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		59

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи на тему «Методи калібрування IoT сенсорів для вимірювання фізичних параметрів» проаналізовано методи калібрування сенсорів, що застосовуються в системах Інтернету речей.

В роботі було узагальнено й систематизовано підходи до калібрування сенсорів: традиційні лабораторні методи, експрес-калібрування в польових умовах, а також сучасні підходи, що включають алгоритми самокалібрування, адаптивної корекції похибок і моделі самонавчання сенсорних пристроїв. Значну увагу було приділено можливостям хмарних сервісів для віддаленого зберігання еталонних даних, порівняння показів сенсорів, синхронізації калібрувальних параметрів та прогнозування змін метрологічних характеристик у процесі експлуатації. Запропоновано загальний підхід до формування рекомендацій щодо міжповірочних інтервалів на основі аналізу статистичних даних з хмари.

У практичній частині роботи була розроблена методика калібрування сенсора температури, орієнтована на його використання у складі IoT-систем із мікроконтролером. Для цього описано експериментальну установку з використанням термопари типу К (хромель-алюмель), мікросхеми MAX31855 для цифрової обробки термоелектричної напруги, а також еталонного калібратора Fluke 714B Thermocouple Calibrator, що забезпечив високоточне відтворення температури для порівняння. Методика калібрування передбачає використання вимірювань для визначення відхилень, визначення коригуючої функції температурного сенсора, яка може бути використана для подальших вимірювань.

Отримані результати можуть бути використані при розробці та модернізації IoT-систем, де критичною є вимога до точності та відтворюваності результатів вимірювань.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		60

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Возний А., Луцак А., Луцак Б. Методи калібрування сенсорів при вимірюванні фізичних параметрів. - Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (АКІТ - 2025)», Тернопіль, 2025 – с. 68-70.
2. GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>.
3. ДСТУ ISO 5725-1:2005 - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://zakon.isu.net.ua> (пошук по номеру).
4. ISO 5725 - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/11833.html>.
5. Основи метрології та вимірювальної техніки / Лис, О.М., Якименко, М.В., Шинкаренко [та ін.]. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 424 с.
6. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: К.:Знання-Прес, 2018. – 180с.
7. Метрологія, вимірювання та контроль: Навчальний посібник / О.В. Бєлова, Ю.І. Гринюк, М.С. Ємельянов. - К.: Видавничий дім "Паливода А.С.", 2020. – 193с.
8. Метрологія та вимірювання: Навч.посіб. / М. Дорожовець, Р. Івах, В. Мотало [та ін.]; за наук. ред. Б.І. Стадника. - Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 312 с.
9. Обробка результатів фізичних вимірювань: навч. посібник / І.Ф.Скіцько, О.І.Скіцько. - КПІ ім .Ігоря Сікорського. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. - 88 с. [Електронний ресурс]: - Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25320/1/Obrobka_rezult._fizych._vymiruivan.pdf

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		61

- 10.Програмування Arduino / [Електронний ресурс]. / Режим доступу - <https://forum.arduino.ua/viewforum.php?id=1>. - Дата доступу – 08.05.2025.
- 11.Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник / В.П.Бабак, С.В.Бабак, В.С.Еременко и др.; под ред. чл.-кор. НАН Украины В.П.Бабака. – К., 2014. – 832с.
- 12.Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
- 13.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.
- 14.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.
- 15.R. Bartiromo, M. Vincenzi. Electrical Measurements in the Laboratory Practice. – Springer. - 2016. – 301p.

					ДП.МТІР.9702445.00.00.00.000 ПЗ	А
З	А	№ докум.	Підп	Д		62