

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

РОМАНКО ОЛЬГА ВОЛОДИМИРІВНА

Система раннього виявлення небезпечних речовин з
використанням IoT сенсорів / Early detection system for
hazardous substances using IoT sensors

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

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
МТІРЗ – 41/1 О.В. Романко

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

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«___» _____ 2026р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

Тернопіль - 2026

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

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

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Завідувач кафедри СКС

_____ А.І. Сегін
“ ” _____ 2025р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Романко Ользі Володимирівні
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Система раннього виявлення небезпечних речовин з використанням IoT сенсорів / Early detection system for hazardous substances using IoT sensors

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

затверджені наказом по університету від «1» грудня 2025р. № 894

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

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Технічні характеристики та принципи роботи сенсорів виявлення небезпечних речовин.
2. Системи вимірювання рівню концентрації небезпечних речовин побудовані з використанням мікроконтролерів.
3. Характеристики сучасних мікроконтролерних засобів.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Особливості побудови та використання пристроїв вимірювання концентрації небезпечних речовин.
2. Проектування структури системи.
3. Розробка вузла (пристрою) вимірювання концентрації небезпечних речовин.
4. Програмно-апаратна IoT системи раннього виявлення небезпечних речовин з використанням мікроконтролерів.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурні схеми сенсорів та пристроїв виявлення небезпечних речовин.
2. Схема апаратної реалізації вимірювання та контролю наявності небезпечних речовин.
3. Електрична схема реалізації сенсорного вузла, побудованого по IoT - технології.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Особливості функціонування IoT сенсорів	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Обґрунтування вибору технічних засобів та мікропроцесорної техніки	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Апаратно-програмна реалізація пристрою	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	

Студент

_____ Романко О.В.
(підпис)

Керівник роботи

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

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження даної кваліфікаційної роботи є процеси вимірювання концентрацій небезпечних речовин у навколишньому середовищі та закономірності зміни їх рівнів у часі.

Предметом дослідження є методи, засоби та алгоритми побудови IoT-системи раннього виявлення небезпечних речовин та оцінкою невизначеності результатів вимірювань.

Метою роботи є розробка системи раннього виявлення небезпечних речовин на базі використання IoT-сенсорів.

У роботі проведено аналіз нормативної бази у сфері вимірювань небезпечних речовин: розглянуто вимоги ДСТУ, санітарні норми ДСН 3.3.6.042-99, стандарти ІЕС 61508 щодо функціональної безпеки, а також методологію оцінки невизначеності вимірювань відповідно до ДСТУ ISO/ІЕС Guide 98-3 (GUM). Виконано огляд сучасних газових і хімічних сенсорів: електрохімічних (для CO, NO₂, SO₂), напівпровідникових металооксидних (MQ-серія для CO, CH₄, LPG), оптичних (NDIR для CO₂) та фотоіонізаційних (PID для летких органічних сполук).

Розроблено архітектуру IoT-системи до складу якої входять: сенсорні вузли збору даних, мікроконтролер ESP32; модуль бездротової передачі даних; серверна частина з базою даних (InfluxDB/PostgreSQL); модуль сповіщень. Програмне забезпечення вузлів розроблено в середовищі Arduino.

Ключовою складовою системи є алгоритм прогнозування часу настання небезпечної ситуації — моменту, коли концентрація небезпечної речовини перевищить встановлену ГДН. Виконано метрологічний аналіз системи з оцінкою невизначеності вимірювань за GUM.

Ключові слова: СИСТЕМА РАННЬОГО ВИЯВЛЕННЯ, НЕБЕЗПЕЧНІ РЕЧОВИНИ, ІОТ, СЕНСОРНА МЕРЕЖА, МІКРОКОНТРОЛЕР, ESP32, БАЗА ДАНИХ, ГРАНИЧНО ДОПУСТИМА НОРМА, ПРОГНОЗУВАННЯ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ.

ABSTRACT

The object of study of this qualification work is the processes of measuring concentrations of hazardous substances in the environment and the patterns of changes in their levels over time.

The subject of the study is methods, tools and algorithms for building an IoT system for early detection of hazardous substances and assessing the uncertainty of measurement results.

The purpose of the work is to develop a system for early detection of hazardous substances based on the use of IoT sensors. The work analyzes the regulatory framework in the field of measurements of hazardous substances: the requirements of DSTU, sanitary standards DSN 3.3.6.042-99, IEC 61508 standards on functional safety, as well as the methodology for assessing measurement uncertainty in accordance with DSTU ISO/IEC Guide 98-3 (GUM). A review of modern gas and chemical sensors was performed: electrochemical (for CO, NO₂, SO₂), semiconductor metal oxide (MQ-series for CO, CH₄, LPG), optical (NDIR for CO₂) and photoionization (PID for volatile organic compounds). An IoT system architecture was developed, which includes: sensor data collection nodes, ESP32 microcontroller; wireless data transmission module; server part with database (InfluxDB/PostgreSQL); notification module. The node software was developed in the Arduino environment. A key component of the system is an algorithm for predicting the time of occurrence of a dangerous situation - the moment when the concentration of a hazardous substance exceeds the established GDN. A metrological analysis of the system was performed with an assessment of measurement uncertainty according to GUM.

Keywords: EARLY DETECTION SYSTEM, HAZARDOUS SUBSTANCES, IoT, SENSOR NETWORK, MICROCONTROLLER, ESP32, DATABASE, LIMIT PERMITTED NORMS, FORECASTING, MEASUREMENT UNCERTAINTY.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1. Огляд небезпечних речовин та методів їх виявлення	12
1.1. Класифікація небезпечних речовин	12
1.2 Технології Internet of Things	20
1.3. Вибір оптимального підходу для розробки системи	26
2. Проектування компонентів системи	28
2.1. Архітектура системи	28
2.2 Вибір апаратних компонентів	32
2.4. Проектування бази даних	39
3. Програмне забезпечення системи та реалізація системи збору даних	42
3.1 Розробка прошивки мікроконтролера при вимірюванні небезпечних речовин	42
3.2 Обробка вимірних даних та формування тривожних повідомлень	46
3.3 Розробка бази даних	50
ВИСНОВКИ	56
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	58

					ДП.МТІР.10658763.00.00.00.000 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Романко О.В.			Система раннього виявлення небезпечних речовин з використанням IoT сенсорів / Early detection system for hazardous substances using IoT sensors			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевірів.		Масляк Б.О.								6	62
Консульт.								ЗУНУ ФКІТ МТІРз-41			
Н. Контр.		Масляк Б.О									
Затверд.		Сегін А.І.									

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ADC	Analog-to-Digital Converter	— аналого-цифровий перетворювач
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter	— універсальний асинхронний приймач-передавач
SPI	Serial Peripheral Interface	— послідовний периферійний інтерфейс
I ² C	Inter-Integrated Circuit	— міжмікросхемний інтерфейс
RAM	Random Access Memory	— оперативна пам'ять
Flash	Flash Memory	— енергонезалежна флеш-пам'ять
API	Application Programming Interface	— інтерфейс програмування застосунків
БД	База даних	
ПЗ	Програмне забезпечення	
АЦП	Аналого-цифровий перетворювач	
МК	Мікроконтролер	
ПК	Персональний комп'ютер	

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний стан розвитку промисловості, транспортної інфраструктури та урбанізованих територій характеризується постійним зростанням ризиків, пов'язаних із використанням, зберіганням і транспортуванням хімічно небезпечних речовин. Аварії на хімічних підприємствах, витіки токсичних газів у виробничих приміщеннях, а також застосування небезпечних сполук становлять серйозну загрозу для здоров'я людей та стану навколишнього середовища. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, у світі від впливу хімічних речовин щороку потерпають близько мільйона осіб. Більшість із цих випадків є наслідком несвоєчасного виявлення небезпечних концентрацій токсичних сполук та запізненого реагування відповідних служб. Саме тому створення систем раннього попередження є одним із пріоритетних завдань у галузі безпеки праці, цивільного захисту та екологічного моніторингу.

Традиційні методи хімічного аналізу — лабораторна газова хроматографія, мас-спектрометрія, ІЧ-спектроскопія — забезпечують високу точність результатів, однак потребують дорогого обладнання, кваліфікованого персоналу та значного часу на проведення аналізу. Традиційні системи нездатні забезпечити оперативний моніторинг у режимі на значних територіях і в умовах можливої динаміки забруднень [1-3].

Принципово новим підходом до вирішення цієї проблеми є використання технологій Інтернету речей (IoT). Концепція IoT, сформульована К. Ештоном у 1999 р., передбачає взаємодію фізичних об'єктів, які оснащені відповідними сенсорами та мікроконтролерами, через мережі різного типу без участі людини. На сьогодні ця технологія набула масового поширення: за прогнозами аналітичної компанії Statista, кількість підключених IoT-пристроїв у світі до 2030 року перевищить 29 мільярдів одиниць [4]. Застосування IoT-сенсорів для виявлення небезпечних речовин відкриває широкі можливості: низька вартість апаратних компонентів, можливість розгортання розподіленої сенсорної мережі

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

на великих площах, безперервний збір даних у режимі реального часу, автоматична передача інформації до центру обробки та можливість дистанційного керування системою. Поєднання цих переваг з алгоритмами мультисенсорної обробки та машинного навчання для аналізу вимірянних даних дозволяє підвищити як точність ідентифікації речовин, так і швидкість реагування на небезпечні ситуації [5].

Незважаючи на значний науковий інтерес до цієї тематики, відображений у роботах вітчизняних і зарубіжних дослідників (Губаренко О.В., Мороз І.В., Kumar S., Zanella A. та ін.), питання побудови комплексних, економічно доступних та надійних систем раннього виявлення небезпечних речовин на базі IoT-платформ залишається недостатньо вивченим. Зокрема, бракує рішень, які б ефективно поєднували мультисенсорний аналіз, хмарну обробку даних та адаптивні алгоритми прийняття рішень в єдиній архітектурі. Усе зазначене підтверджує актуальність обраної теми дослідження.

Мета і завдання дослідження.

Метою бакалаврської роботи є проєктування та розроблення програмно-апаратної системи раннього виявлення небезпечних речовин на основі IoT-сенсорів, що забезпечує безперервний моніторинг хімічного складу повітря, автоматичну класифікацію виявлених речовин і своєчасне сповіщення відповідальних осіб про перевищення допустимих концентрацій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) провести аналіз існуючих методів і засобів виявлення небезпечних хімічних речовин, визначити їх переваги, недоліки та сфери застосування;
- 2) здійснити огляд і порівняльний аналіз сучасних IoT-платформ, протоколів бездротової передачі даних та типів хімічних сенсорів;
- 3) розробити архітектуру системи, обґрунтувати вибір апаратних компонентів та топологію сенсорної мережі;
- 4) розробити програмне забезпечення вбудованих модулів для збору та первинної обробки сенсорних даних;

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

5) розробити серверну частину системи для агрегації, зберігання та аналізу даних із сенсорних вузлів;

6) реалізувати модуль сповіщення про небезпечну ситуацію.

Об'єкт та предмет дослідження.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого виявлення небезпечних хімічних речовин у повітряному середовищі промислових об'єктів та відкритих просторів за допомогою розподіленої мережі IoT-сенсорів.

Предметом дослідження є методи та алгоритми збору, передачі й аналізу даних хімічних сенсорів, архітектурні рішення побудови IoT-систем моніторингу, а також програмні засоби класифікації небезпечних речовин на основі мультисенсорних сигналів.

Методи дослідження.

У процесі виконання бакалаврської роботи передбачається використання системного аналізу для дослідження структури та функціонування систем моніторингу небезпечних речовин, методи аналізу та вибору технічних рішень, а також методи моделювання архітектури системи. Практична перевірка системи здійснювалась із застосуванням експериментальних методів дослідження з подальшою статистичною обробкою результатів.

Наукова новизна бакалаврської роботи полягає:

1) запропонованій архітектурі системи раннього виявлення небезпечних речовин, що поєднує мультисенсорні вузли на базі IoT із хмарним сховищем та механізмом формування порогових значень тривоги;

2) запропоновано метод мультисенсорної обробки для підвищення достовірності ідентифікації речовин та зниження рівня хибних спрацювань.

Практична цінність роботи визначається можливістю реального впровадження розробленої системи в таких сферах: охорона праці на хімічних та переробних підприємствах; системи цивільного захисту та служби надзвичайних ситуацій; екологічний моніторинг атмосферного повітря в міських агломераціях; охорона периметру об'єктів критичної інфраструктури.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

Використання мікроконтролерних платформ (ESP32, Arduino, ESP32), протоколів передачі виміряних даних (MQTT, ZigBee, HTTP) та хмарних сховищ дозволяє знизити вартість розробки та впровадження системи, зберігаючи при цьому прийнятний рівень точності та надійності. Модульна архітектура системи забезпечує її масштабованість і можливість адаптації до конкретних умов застосування без суттєвих змін у базовій реалізації.

Результати роботи можуть бути використані підприємствами та організаціями під час проєктування власних систем моніторингу, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти як практичний приклад реалізації IoT-системи.

Бакалаврська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі здійснено аналіз предметної області та огляд існуючих рішень. Другий розділ присвячено обґрунтуванню технічних рішень та проєктуванню архітектури системи. У третьому розділі описано реалізацію програмно-апаратного комплексу. Загальний обсяг роботи становить __ сторінок, з яких __ сторінок основного тексту. Робота містить __ рисунків, __ таблиць. Список використаних джерел налічує __ найменувань.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1. ОГЛЯД НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН ТА МЕТОДІВ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ

1.1. Класифікація небезпечних речовин

Небезпечні речовини являють собою широкий спектр хімічних сполук, здатних заподіяти шкоду здоров'ю людини, тваринам або навколишньому середовищу при контакті, вдиханні чи потраплянні до організму. Згідно з ДСТУ 4500:2006 «Речовини небезпечні. Номенклатура небезпечних властивостей», небезпечною вважається речовина, яка за своїми хімічними, фізичними або біологічними параметрами може викликати небажані наслідки для людей, тварин, рослин, а також майнових цінностей чи навколишнього природного середовища. Для цілей систем автоматичного моніторингу найбільш практичною є класифікація за агрегатним станом та механізмом поширення в просторі.

Гази є найбільш поширеним і небезпечним класом шкідливих речовин з точки зору швидкості поширення та складності локалізації. Основними класами небезпечних газів є:

- токсичні гази, до яких належать чадний газ CO, аміак NH₃, хлор Cl₂, ціаністий водень HCN, сірководень H₂S;
- вибухонебезпечні гази, до яких належать водень H₂, метан CH₄, пропан C₃H₈), а також вуглекислий газ CO₂, азот N₂.

Чадний газ (CO) посідає перше місце серед причин смерті від отруєння газами у побутових і виробничих умовах. Він утворюється при неповному згорянні органічного палива, є безбарвним і не має запаху, що унеможливорює його виявлення органолептичними методами. Гранично допустима концентрація (ГДК) для робочої зони становить 20 мг/м³ (17 ppm). Сірководень (H₂S) є характерним забруднювачем підприємств нафтопереробної, целюлозно-паперової та гірничодобувної промисловості і спричиняє миттєву втрату свідомості та зупинку дихання при концентраціях близько 700 ppm. Характерний запах відчувається тільки при низьких концентраціях, а вже при 150 ppm людина втрачає нюх, що унеможливорює самостійне виявлення небезпеки без приладів.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

Аміак (NH_3) широко використовується в холодильних установках, сільськогосподарській промисловості та при виробництві добрив. Характеризується різким запахом, що дозволяє виявити його присутність вже за концентрацій 5–10 ppm, однак небезпечні для здоров'я рівні настають при 25 ppm (ГДК для тривалого впливу) і 35 ppm (ГДК короткочасного впливу).

Леткі хімічні сполуки починають виділяти шкідливі випари задовго до того, як рідина нагріється до температури кипіння. На відміну від звичайних газів, така пара є конденсованою формою речовини і в разі охолодження або зміни тиску знову перетворюється на рідину. Особливу загрозу для здоров'я людини та довкілля становлять випари органічних розчинників, серед яких найчастіше зустрічаються бензол, толуол, ксилол, ацетон та дихлоретан. Не менш небезпечним є вдихання повітря, забрудненого парами концентрованих кислот (соляної, сірчаної чи азотної), а також високотоксичними випарами важких металів, зокрема ртуті та свинцю. Особливу небезпеку представляють ВТЕХ-сполуки. ВТЕХ — це аббревіатура, яка об'єднує групу летких органічних сполук, а саме бензол, толуол, етилбензол та ксилоли. Ці речовини є моноциклічними ароматичними вуглеводнями, які мають у своїй хімічній основі одне бензольне кільце. Усі вони являють собою безбарвні легкозаймисті рідини зі специфічним солодкуватим або різким бензиновим запахом, які швидко випаровуються в повітря і погано розчиняються у воді.

У природі та промисловості ці сполуки найчастіше зустрічаються разом у складі сирової нафти, автомобільних бензинів та різноманітних розчинників, лаків чи клеїв. Через широке використання нафтопродуктів сполуки групи ВТЕХ належать до найпоширеніших забруднювачів навколишнього середовища. Основними джерелами їх потрапляння в екосистему є вихлопні гази автомобільного транспорту, викиди нафтопереробних підприємств, а також приховані витoki палива з підземних резервуарів на автозаправних станціях.

В екологічному моніторингу ці речовини контролюють з особливою суворістю, оскільки вони мають високу токсичність для живих організмів. Найбільшу небезпеку серед них становить бензол, який є доведеним

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

канцерогеном і може провокувати розвиток лейкозу у людини. Інші три компоненти цієї групи — толуол, етилбензол та ксилоли — негативно впливають на роботу центральної нервової системи, викликаючи запаморочення і слабкість, а за умови тривалого контакту уражають печінку, нирки та органи дихання. Оскільки ці хімічні сполуки здатні легко просочуватися крізь ґрунт і швидко мігрувати разом із підземними водами, аналіз їхньої концентрації є обов'язковою умовою під час перевірки екологічного стану промислових зон та територій навколо АЗС.

Аерозолі являють собою дисперсні системи, в яких тверді або рідкі частинки розподілені в газоподібному середовищі (переважно в повітрі). До небезпечних аерозолів відносять: промисловий пил (азбестовий, кварцовий, металевий), туман кислот і лугів, дими від зварювання та плавлення металів, а також радіоактивні аерозолі. Особливу загрозу становлять аерозолі, що містять важкі метали (свинець, кадмій, хром шестивалентний), оскільки вони здатні акумулюватися в організмі та спричиняти хронічні захворювання – таблиця 1.1.

Моніторинг аерозолів є технічно складнішим завданням порівняно з виявленням газів і парів, оскільки потребує вимірювання не лише концентрації, а й гранулометричного складу часток. Сучасні IoT-рішення для контролю аерозолів базуються переважно на оптичних методах — лазерному розсіюванні та нефелометрії.

Таблиця 1.1 – Класи небезпечних речовин

Клас речовини	Підклас	Типові представники	ГДК
Гази	Токсичні	CO, H ₂ S, NH ₃ , Cl ₂ , HCN	0,05–20 мг/м ³
	Вибухонебезпечні	CH ₄ , C ₃ H ₈ , H ₂	НКМЗ 5–15 %
Пари	Органічних розчинників	Бензол, толуол, ацетон	5–200 мг/м ³
	Кислот і лугів	HCl, H ₂ SO ₄ , NaOH	0,5–2 мг/м ³
Аерозолі	Тверді частинки	PM2.5, PM10, пил Si	0,07–4 мг/м ³
	Металевий дим	Pb, Cd, Cr(VI)	0,005–0,5 мг/м ³

Сучасний ринок сенсорних технологій пропонує широкий спектр детекторів для виявлення небезпечних речовин. Вибір типу детектора визначається характером речовини, що визначається, вимогами до чутливості, діапазону вимірювань, часом відгуку, умовами експлуатації та вартістю обладнання. Розглянемо основні типи детекторів, що застосовуються в IoT-системах моніторингу.

Електрохімічні детектори

В основі роботи електрохімічних сенсорів лежить процес перетворення хімічної взаємодії безпосередньо в електричний сигнал. Коли цільовий газ потрапляє на чутливий елемент, на ньому відбувається реакція окиснення або відновлення, внаслідок чого генерується струм, величина якого прямо залежить від щільності газу в повітрі. Конструктивно такий перетворювач зазвичай складається з трьох ключових компонентів — робочого, допоміжного та порівняльного електродів, які функціонують у спільному середовищі електроліту. При взаємодії цільового газу з робочим електродом відбувається електрохімічна реакція, що генерує струм, величина якого пропорційна концентрації газу. Перевагами цього принципу є висока чутливість (до часток ppm), висока селективність до конкретних газів, відносно низьке енергоспоживання та прийнятна вартість. Серед недоліків слід відзначити обмежений термін служби (2–5 років), залежність від температури та вологості, а також можливість перехресного впливу інших газів. Електрохімічні сенсори є найпоширенішим типом детекторів для визначення CO, H₂S, NO₂, O₃, NH₃ та SO₂.

У контексті IoT-систем електрохімічні сенсори відзначаються сумісністю з мікроконтролерними платформами завдяки аналоговому або цифровому (I²C, UART) виходу. Серед поширених модулів: MQ-7 (CO), MQ-135 (комплексний аналіз повітря), а також спеціалізовані модулі SPEC Sensors з цифровим виходом.

Функціонування напівпровідникових давачів ґрунтується на зміні електричного опору металооксидного шару (зазвичай на основі діоксиду олова, оксиду цинку, вольфраму, титану або індію) під час взаємодії його поверхні з молекулами газу. У процесі роботи чутливий елемент підігрівається до 200–

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15

500°C, що змушує кисень із довкілля осідати на напівпровідниковій структурі й створювати потенційний бар'єр для носіїв заряду. Коли в повітрі з'являються гази-відновники, вони вступають у реакцію з цим адсорбованим киснем, внаслідок чого висота енергетичного бар'єру падає, а загальний опір сенсора помітно зменшується. Напівпровідникові сенсори вирізняються широким діапазоном ідентифікації газів, простотою схемотехнічного оформлення та невисокою вартістю. Серія сенсорів MQ (MQ-2 для пропану/бутану/метану, MQ-4 для метану, MQ-6 для LPG, MQ-9 для CO та горючих газів) є одним із найпопулярніших рішень в аматорських та напівпрофесійних IoT-системах завдяки доступності та сумісності з Arduino та ESP32 [5].

Основними обмеженнями напівпровідникових сенсорів є знижена селективність (реагування на широкий спектр газів), залежність показань від вологості та температури навколишнього середовища, необхідність тривалого прогріву (15–30 хвилин).

Робота інфрачервоних сповіщувачів базується на здатності молекул газу вибірково поглинати ІЧ-випромінювання певної довжини хвилі. Кожна хімічна сполука має унікальний спектр поглинання, що визначається частотою природних валентних чи деформаційних коливань її внутрішніх зв'язків і слугує своєрідним «молекулярним відбитком пальця». Для визначення концентрації потрібного компонента пристрій фіксує, наскільки послабився оптичний сигнал заданої частоти після того, як промені пройшли крізь шар досліджуваної газової суміші. Найбільш поширені ІЧ-детектори типу NDIR (Non-Dispersive Infrared) широко використовуються для вимірювання CO₂, CO, CH₄ та інших вуглеводнів. Вони відзначаються високою точністю ($\pm 2\text{--}5\%$ від діапазону), тривалим терміном служби (понад 10 років), відсутністю споживання реагентів та стабільністю нуля. Серед недоліків — відносно висока вартість (20–150 дол. США для модулів рівня IoT), нездатність визначати атомарні гази та гази без дипольного моменту (H₂, O₂, N₂).

Популярними модулями для IoT-застосувань є SCD30 та SCD41 (Sensirion) для CO₂, MH-Z19B для CO₂, а також модулі Amphenol SGX для детектування

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

вуглеводнів. Останнім часом популярністю користуються лазерні ІЧ-детектори типу Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), які забезпечують низькі рівні небезпечних речовин, однак їх вартість суттєво перевищує можливості масових IoT-рішень [3].

Робота фотоіонізаційних детекторів (PID) базується на розщепленні молекул органічних речовин під впливом ультрафіолетового випромінювання. Вбудована УФ-лампа випромінює фотони з енергетичним потенціалом у діапазоні 10,0–10,6 еВ, що дозволяє ефективно іонізувати більшість летких органічних сполук (ЛОС). Отримані в результаті цього процесу заряджені частинки фіксуються вимірювальними електродами, створюючи електричний струм, величина якого прямо вказує на вміст досліджуваного газу в повітрі. PID-детектори є особливо ефективними для виявлення ароматичних вуглеводнів (BTEX), хлорованих розчинників, альдегідів та інших летких органічних сполук. Вони характеризуються надзвичайно широким динамічним діапазоном (від 1 ppb до тисяч ppm), швидким часом відгуку (1–5 секунд) та відсутністю споживання сенсорного матеріалу.

Обмеженням PID є нездатність визначати метан та інші аліфатичні вуглеводні з потенціалом іонізації вище 10,6 еВ. Крім того, висока вологість (понад 90 %) може знижувати чутливість сенсора через поглинання УФ-випромінювання. Для IoT-систем інтерес представляють мініатюрні PID-модулі, зокрема MOCON MultiRAE та Alphasense PID-AH2) з цифровими виходами, проте їх вартість суттєво обмежує масове використання.

Вибір оптимального методу детектування для конкретного застосування є комплексним завданням, що потребує врахування низки критеріїв: цільова речовина та її концентраційний діапазон, необхідна точність і чутливість, умови експлуатації (температура, вологість, наявність перехресних перешкод), вимоги до часу відгуку, бюджет проєкту та вимоги до технічного обслуговування.

Аналіз даних таблиці 1.2 свідчить, що жоден тип детектора не є універсальним рішенням для виявлення всього спектру небезпечних речовин.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17

Вирішення проблеми пропонується реалізувати за рахунок використання мультисенсорна архітектура, що поєднує детектори різних типів.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика основних типів детекторів

Параметр	Електро-хімічний	Напів-провідниковий	ІЧ (NDIR)	PID	Каталітичний (пелістор)
Цільові гази	CO, H ₂ S, NO ₂ , O ₃	CH ₄ , LPG, ЛОС	CO ₂ , CO, CH ₄	ЛОС, BTEX	Горючі гази
Чутливість	0,1–1 ppm	1–10 ppm	1–50 ppm	1 ppb–10 ppm	100–500 ppm
Час відгуку	< 30 с	< 60 с	< 60 с	1–5 с	< 30 с
Селективність	Висока	Низька	Висока	Середня	Низька
Термін служби	2–5 років	3–10 років	5–15 років	2–4 роки	3–5 років
Вартість модуля	5–50 USD	1–10 USD	20–150 USD	150–400 USD	15–80 USD
Придатність для IoT	Висока	Висока	Середня	Середня	Висока

З урахуванням вимог до систем раннього виявлення на базі IoT-платформ найбільш збалансованим підходом є комбінування електрохімічних сенсорів (для точного вимірювання конкретних токсичних газів — CO, H₂S, NO₂) з напівпровідниковими (для широкосмугового моніторингу горючих газів та ЛОС) та оптичними датчиками частинок (для контролю аерозолів PM2.5/PM10). Такий ансамблевий підхід дозволяє досягти прийнятного балансу між точністю, собівартістю та енергоспоживанням системи.

Пелістори традиційно використовуються для виявлення метану, пропану, бутану та інших горючих газів у діапазоні від нижньої концентраційної межі займання (НКМЗ) до 100 % НКМЗ. Вони відзначаються стійкістю до впливу силіконів та галогенорганічних сполук, однак можуть отруюватися сірковмісними сполуками при тривалій дії.

На основі проведеного порівняльного аналізу можна сформулювати рекомендації щодо вибору типів детекторів для різних сценаріїв застосування IoT-системи раннього виявлення небезпечних речовин:

- 1) для промислових об'єктів з ризиком витоку токсичних газів (CO, H₂S, NH₃) — електрохімічні сенсори з цифровим виходом I²C/UART;
- 2) для контролю горючих газів та запобігання вибухам — поєднання каталітичних (пелісторних) та напівпровідникових сенсорів;
- 3) для моніторингу якості повітря в міському середовищі — оптичні лазерні датчики частинок (PM2.5/PM10) у поєднанні з NDIR-сенсорами CO₂;
- 4) для об'єктів нафтохімічної промисловості з ризиком витоку ЛОС — PID-сенсори у поєднанні з напівпровідниковими детекторами.

Вибір конкретних моделей сенсорів для розроблюваної системи детально обґрунтовується в розділі 2 цієї роботи з урахуванням технічних вимог до системи.

За результатами проведеного аналізу предметної області зроблено такі висновки:

1. Небезпечні речовини поділяються на три основні класи за агрегатним станом — гази, пари та аерозолі, кожен з яких вимагає специфічних методів виявлення та різних типів сенсорів.

2. Існує чотири основні принципи детектування, що застосовуються в IoT-сенсорах: електрохімічний, напівпровідниковий, інфрачервоний та фотоіонізаційний, кожен з яких має специфічні переваги та обмеження.

3. Порівняльний аналіз методів підтверджує доцільність використання мультисенсорної архітектури, що поєднує детектори різних принципів дії для розширення спектру виявлюваних речовин і підвищення достовірності результатів.

4. Електрохімічні та напівпровідникові сенсори є найбільш придатними для масового розгортання в IoT-системах завдяки їх відносно низькій вартості, малим габаритам і сумісності з поширеними мікроконтролерними платформами.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

Таким чином, в даному розділі здійснено аналіз небезпечних речовин та оцінки перспективних методів їх виявлення

1.2 Технології Internet of Things

Поняття Internet of Things позначає технологічну парадигму, за якої фізичні об'єкти набувають здатності самостійно збирати дані про навколишнє середовище та обмінюватись ними з іншими вузлами без участі людини-оператора. Ericsson у своєму щорічному звіті зафіксував перевищення позначки 18 млрд підключених пристроїв у 2024 році і прогнозує подальший щорічний приріст на рівні 13-15 відсотків до 2028 року. Ця динаміка зумовлює потребу в стандартизованих архітектурних підходах, здатних впорядкувати взаємодію між гетерогенними компонентами систем різного масштабу [4].

Для структурування IoT-рішень галузева спільнота виробила чотирирівневу модель, де кожен рівень відповідає за окремий клас задач. Найнижчий рівень – сенсорний – безпосередньо взаємодіє з фізичним середовищем і перетворює хімічні або фізичні параметри на цифрові сигнали. Транспортний рівень несе відповідальність виключно за доставку пакетів від польового вузла до точки агрегації, не торкаючись семантики вмісту. Рівень обробки виконує фільтрацію, нормалізацію та аналіз потоків даних, застосовуючи бізнес-логіку. Рівень представлення перетворює результати аналізу на зрозумілі для кінцевого користувача форми: інтерактивні панелі, push-сповіщення або аналітичні звіти.

Сенсорний рівень проектованої системи спирається на чотири класи первинних перетворювачів з різними фізико-хімічними принципами дії. Резистивні напівпровідникові сенсори серії MQ змінюють свій опір у відповідь на адсорбцію газових молекул на поверхні легованого оксиду олова: що більша концентрація цільового газу, то нижчий опір чутливого елемента.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

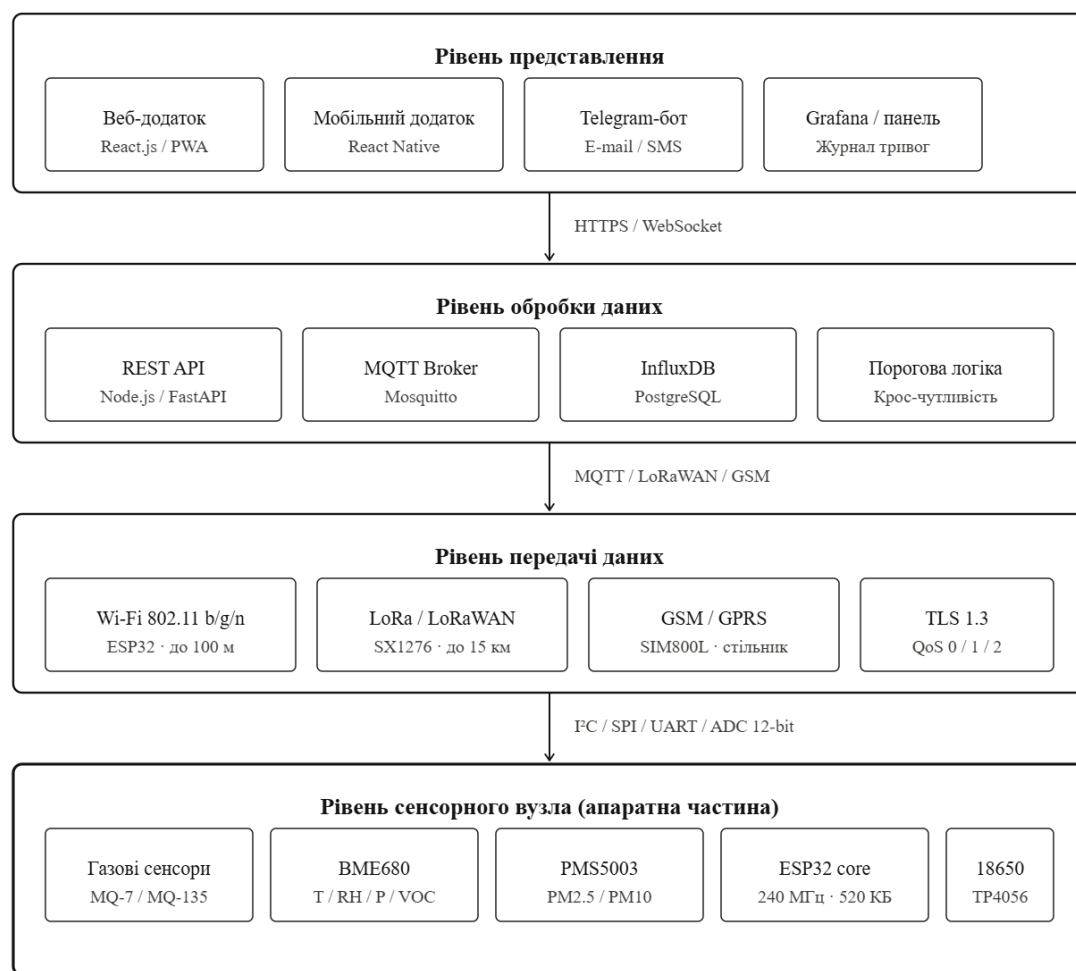


Рисунок 1.1 – Чотирирівнева архітектура розроблюваної IoT-системи раннього виявлення небезпечних речовин

Інтегрований сенсор BME680 виробництва Bosch Sensortec поєднує пьезорезистивний барометр, ємнісний гігрометр, резистивний термометр та металооксидний датчик летких органічних сполук в єдиному корпусі LGA-8, що суттєво зменшує габарити вузла [3]. Оптичний лічильник частинок PMS5003 реалізує метод лазерної дифракції для підрахунку аерозольних часток у діапазонах PM1.0, PM2.5 та PM10.

Транспортний рівень визначає енергетичний баланс і радіус покриття системи, тому вибір протоколу передачі даних є одним із найвагоміших проектних рішень. Технологія LoRa реалізує метод модуляції з розширеним спектром на основі чірп-сигналів, що забезпечує стійкий зв'язок при значному перевищенні рівня шуму над сигналом: стандартний приймач SX1276 упевнено

декодує пакети. Поверх фізичного рівня LoRa надбудовується протокол LoRaWAN, що запроваджує адресацію пристроїв, класи активності (А, В, С) та механізми автоматичного керування швидкістю передачі.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика протоколів передачі даних у IoT-системах

Протокол	Транспорт	QoS	Споживання	Дальність	Застосування
MQTT	TCP/IP	0/1/2	Низьке	Мережа	IoT вузли
CoAP	UDP	0/1	Дуже низьке	Мережа	MCU з ОЗП < 256 КБ
HTTP/REST	TCP/IP	--	Середнє	Мережа	Хмарні API
LoRaWAN	LoRa PHY	0/1	Мінімальне	До 15 км	Польові вузли
NB-IoT	LTE-M	Мережевий	Низьке	Стільниковий	Міська забудова

Протокол MQTT у версії 5.0 запроваджує механізм властивостей повідомлення, що дозволяє передавати метадані (мітку часу, ідентифікатор вузла, тип корисного навантаження) безпосередньо в заголовку пакета без включення до основного payload. Це скорочує розмір корисного навантаження і спрощує маршрутизацію на стороні брокера. CoAP (RFC 7252) орієнтований на пристрої з ОЗП менше 10 КБ і забезпечує REST-подібний інтерфейс через UDP, однак слабше підходить для асинхронних потоків даних, характерних для систем безперервного моніторингу.

Вибір апаратної платформи для польового вузла визначається компромісом між обчислювальною потужністю, вартістю та споживаною потужністю. Серед розглянутих варіантів мікроконтролер ESP32 виробництва Espressif Systems демонструє найкращий баланс: він розміщує на одному кристалі двоядерний процесор, повний стек Wi-Fi і Bluetooth, дванадцятирозрядний АЦП з шістьма незалежними каналами та апаратний акселератор криптографічних операцій – рисунок 1.3.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

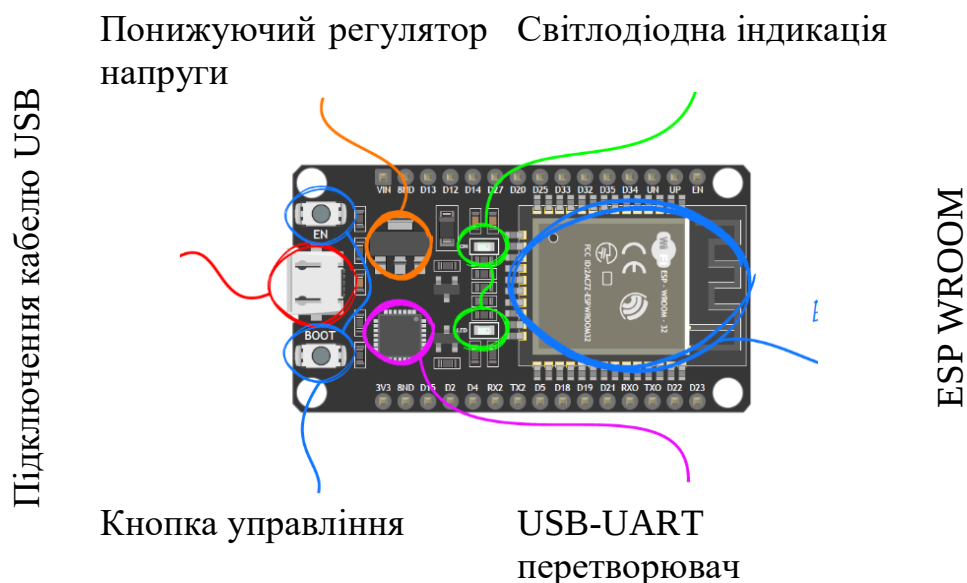


Рисунок 1.3 – Структурна схема периферії мікроконтролера ESP32 у складі вузла моніторингу

Ключовою перевагою для польового застосування є режим глибокого сну зі споживанням близько 10 мкА, що на три-чотири порядки менше, ніж у активному режимі.

Таблиця 1.2 – Зіставлення апаратних платформ за ключовими критеріями вибору

Платформа	Ядро	Wi-Fi/BT	Сильні сторони	Слабкі сторони
Arduino Uno	ATmega328P 16 МГц	Зовнішній модуль	Мінімальний поріг входу, 500+ бібліотек	Немає Wi-Fi, 2 КБ ОЗП
ESP32	Xtensa LX6 x2 240 МГц	Вбудований	Wi-Fi + BT, ADC 12-біт, режим сну 10 мкА	Споживання у Tx-режимі ~240 мА
Raspberry Pi 4	ARM Cortex-A72 1.8 ГГц	Вбудований	Linux, повноцінний стек ПЗ, USB 3.0	5 Вт споживання, висока ціна

Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 засновано на процесорі ARM Cortex-A72, що належить до класу серверних ядер і забезпечує продуктивність, достатню для виконання задач машинного навчання безпосередньо на вузлі. Проте для роботи операційної системи Raspberry Pi OS та мінімально необхідного стека сервісів потрібно не менше 5 Вт, що майже унеможливорює

тривале батарейне живлення без зовнішнього підзарядного пристрою. Raspberry Pi доцільно застосовувати як шлюзовий компонент системи, де висока обчислювальна потужність корисна, а вимоги до енергоефективності менш жорсткі.

Промисловий ринок стаціонарних газоаналізаторів сформувався як відповідь на вимоги технологічної безпеки нафтохімічних, гірничодобувних та металургійних підприємств. Провідні виробники – Draeger, MSA Safety, Honeywell Analytics – пропонують закінчені продуктові лінійки, де апаратна частина, програмне забезпечення та сервісне обслуговування утворюють єдину власницьку екосистему. Газоаналізатор Draeger Polytron 8700 є характерним представником цього класу: датчик на основі двопроменевого IR-поглинання забезпечує похибку вимірювання менше двох відсотків від шкали та не схильний до дрейфу нуля, типового для резистивних аналогів [10]. Разом із тим вартість одного вузла разом із підключенням до диспетчерської системи регулярно перевищує три тисячі доларів США, що робить розгортання мережі з десятків точок моніторингу економічно недоцільним для широкого класу практичних задач.

MSA Safety позиціонує свою лінійку Fixed Gas and Flame Detection як промисловий стандарт для безперервного контролю горючих та токсичних газів у зонах класу 0 і 1. Струмовий інтерфейс 4-20 мА, на якому базується значна частина продуктів компанії, гарантує передачу сигналу на відстань до двох кілометрів без спотворень та забезпечує автоматичну діагностику обриву лінії [11]. Принцип перетворення вимірюваної концентрації C у вихідний струм I описується лінійним рівнянням:

$$I = 4 + (C - C_{\min}) / (C_{\max} - C_{\min}) * 16 \text{ [мА]}$$

де $C_{\min}$ та $C_{\max}$ визначаються паспортним діапазоном конкретного чутливого елемента.

Незважаючи на надійність аналогового каналу, він принципово не підтримує передачу метаданих, часових міток або ідентифікаторів вузлів, що ускладнює побудову систем із централізованою журналізацією подій.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		24

Академічне середовище протягом двох десятиліть формує власний науковий фронт у сфері IoT-моніторингу ґрунту та навколишнього середовища. Дослідницька мережа SoilNet, що розробляється з 2006 року в Карлсруському технологічному інституті, стала однією з перших великомасштабних польових апробацій стандарту IEEE 802.15.4 у задачах агроекологічного моніторингу. До 2020 року мережа охоплювала понад 200 вузлів на трьох дослідницьких майданчиках Німеччини та накопичила понад десять років безперервних спостережень за водним режимом та температурою ґрунту [12]. Проте спектр вимірюваних параметрів обмежений фізичними характеристиками ґрунтового профілю і не включає газові або хімічно-токсичні показники, що звужує застосовність системи для задачі, яка вирішується в цій роботі.

Паралельно розвивається напрям SmartSoil, репрезентований роботами Данського технічного університету: вузли на базі LPWAN-технологій вимірюють вміст нітратів і фосфатів із допомогою іонселективних електродів та ведуть моніторинг летких органічних сполук металооксидними сенсорами. Ключовим досягненням проекту є підтверджена автономність вузлів протягом 18 місяців від первинного джерела живлення ємністю 3,6 Агод, що стало можливим завдяки стратегії адаптивного вибору коефіцієнта розширення спектру LoRa залежно від поточного рівня сигналу [13]. Mekala та Viswanathan запропонували концепцію Smart Farming із дворівневою обробкою на крайовому шлюзі, де перевірка на перевищення порогів виконується локально без затримок, характерних для маршруту до хмарного серверу [14].

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз існуючих систем виявлення небезпечних речовин

Система	Принцип вимір.	Канал	Сильні сторони	Слабкі сторони
Draeger Polytron 8700	Електрохімічний, IR	Modbus RTU	похибка < 2%, АTEX-сертифікат	Закрита екосистема, ціна > 3000 USD

MSA Fixed Gas	Каталітичний, IR	4-20 мА	Гальванічна розв'язка, EMC- стійкість	Лінійна топологія, немає хмари
SoilNet / KIT	Ємнісний, TDR	IEEE 802.15.4	200+ вузлів, 10 років спостережень	Лише водний режим ґрунту
SmartSoil / DTU	Іонселективний, МОП	LoRa LPWAN	18 міс. автономності	Немає газових каналів
Пропонована система	Резистивний, електрохім.	LoRa + Wi- Fi + GSM	7 параметрів, відкритий стек	Прототип, потребує калібрув.

Переважна кількість розробників систем моніторингу обирають Wi-Fi як основний канал передачі, хоча ця технологія не є оптимальною для польових умов з нестабільним покриттям та електропостачанням. Лише дванадцять відсотків переходять до LPWAN-рішень, незважаючи на очевидні переваги для дальнього польового застосування.

Узагальнення наведених даних дозволяє виявити три структурні прогалини в наявному ландшафті рішень. Промислові системи задовольняють вимоги до метрологічної точності, але є надмірно дорогими та закритими для кастомізації. Академічні прототипи демонструють енергетичну ефективність і наукову верифікацію, однак зосереджені переважно на ґрунтових фізичних параметрах, не охоплюючи газового складу приземного шару атмосфери над забрудненими ділянками. Жоден із розглянутих варіантів не поєднує мультигазове виявлення, відкритий протокольний стек та ціновий діапазон, прийнятний для масового розгортання.

1.3. Вибір оптимального підходу для розробки системи

Виявлені особливості безпосередньо формують вимоги до розробки нової системи. Цільовий сценарій застосування – моніторинг приземного шару повітря та поверхневого горизонту ґрунту в місцях потенційного забруднення токсичними речовинами промислового або антропогенного походження.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		26

Система повинна функціонувати як самостійний пристрій, що не потребує постійної присутності оператора, і передавати виміряні дані у хмарне сховище з достатньою частотою для оперативного реагування на аномалії.

Функціональні вимоги сформульовано виходячи з нормативних порогів небезпечних концентрацій, закріплених у ДСТУ EN 45544-1:2017 та ДСТУ EN 50271:2010. Система зобов'язана вимірювати концентрацію оксиду вуглецю з нижньою межею виявлення не більше 5 ppm, що відповідає рівню дії за ДСН 3.3.6.042-99. Виявлення летких органічних сполук виконується інтегральним показником IAQ (Indoor Air Quality) сенсора BME680, а кількісна характеристика аерозольного забруднення здійснюється роздільно за фракціями PM2.5 та PM10. Час реакції системи від моменту перевищення порогової концентрації до активації тривожної індикації нормується значенням не більше п'яти секунд – вимога класу 2 за EN 45544. Зведені вимоги до системи раннього виявлення небезпечних речовин приведені у таблиці 1.4. Технічні обмеження розробки визначаються передусім метрологічними характеристиками обраних сенсорів. Металооксидні датчики серії MQ реагують не лише на цільовий газ, а й на ряд супутніх сполук – явище, відоме як перехресна чутливість.

Пропускна здатність LoRaWAN накладає фізичне обмеження на максимально досяжну частоту вимірювань. Регламент використання радіочастотного ресурсу в діапазоні EU868 обмежує коефіцієнт заповнення ефіру значенням один відсоток для більшості субсмуток, що при типовому часі перебування пакета у повітрі 370 мс для SF10 дозволяє формувати не більше 27 повідомлень на годину від одного вузла. Для компенсації цього обмеження вузол реалізує локальне буферування вимірювань у flash-пам'яті ESP32 та агрегує кілька послідовних замірів у одне повідомлення.

Таблиця 1.4 – Зведені вимоги до системи раннього виявлення небезпечних речовин

N	Вимога	Деталізація / нормативна основа	Метрика прийому
---	--------	---------------------------------	-----------------

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

1	Виявлення CO, CO ₂ , VOC, PM _{2.5} /PM ₁₀	ДСТУ EN 45544-1:2017, клас 2	Тривога ≤ 5 с
2	Локальна індикація та звукова тривога	OLED 128x64, зумер 85 дБ	Видимість 3 м, чутність 10 м
3	Передача даних до хмари	MQTT QoS 1 поверх LoRaWAN / Wi-Fi / GSM	Затримка ≤ 10 с (норм.), ≤ 3 с (тривога)

Обґрунтованість вибору конкретних компонентів підтверджується кількісним зіставленням альтернатив. ESP32 обрано замість Arduino через наявність вбудованого Wi-Fi, вдвічі більшого обсягу ОЗП та режиму глибокого сну. LoRaWAN обрано замість NB-IoT через незалежність від стільникової інфраструктури та можливість розгортання власного шлюзу. InfluxDB обрано замість реляційної СУБД через нативну підтримку часових рядів і можливість виконувати агрегаційні запити по мільйонам точок менш ніж за секунду. Сукупність цих рішень утворює технічно узгоджений і економічно обґрунтований варіант для реалізації системи раннього виявлення небезпечних речовин.

2. ПРОЕКТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ

2.1. Архітектура системи

Проектування системи раннього виявлення небезпечних речовин розпочинається з визначення її загальної архітектури, яка має відповідати вимогам масштабованості, відмовостійкості та реального часу реагування. Запропонована архітектура є чотирирівневою і відповідає загальноприйнятій концепції побудови IoT-систем промислового класу: від безпосередніх точок вимірювання до кінцевого користувача.

Багаторівнева модель IoT-архітектури включає рівні вимірювання, мережевої взаємодії, обробки та застосування є узагальненим підходом до

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		28

проектування розподілених сенсорних систем моніторингу. Вона забезпечує чітке розмежування відповідальності між компонентами та спрощує масштабування окремих рівнів незалежно один від одного. Для розроблюваної системи ця концепція адаптована таким чином, щоб кожен рівень міг функціонувати автономно при тимчасовій недоступності вищого рівня ієрархії – рисунок 2.1.

Нижній рівень архітектури являє собою сукупність автономних сенсорних вузлів, кожен з яких є самодостатнім пристроєм збору первинних даних. Кожен вузол об'єднує мікроконтролер, набір хімічних і фізичних сенсорів, модуль бездротового зв'язку та систему автономного живлення. На цьому рівні здійснюється первинна обробка сигналів — аналогово-цифрове перетворення, медіанна фільтрація та попередня класифікація. Ключовою особливістю реалізації є наявність локальної логіки прийняття рішень: навіть у разі відсутності зв'язку з сервером сенсорний вузол здатний самостійно активувати звукову та світлову тривогу при перевищенні порогових значень.

Другий рівень забезпечує транспортування зібраних даних від сенсорних вузлів до центрального сервера обробки. Архітектура комунікаційного рівня є гетерогенною та підтримує три канали передачі залежно від умов розгортання. У приміщеннях з наявною Wi-Fi інфраструктурою використовується стандарт 802.11 b/g/n із протоколом MQTT поверх TCP/IP — він забезпечує низьку затримку (менше 100 мс) і підтримує три рівні якості доставки (QoS 0, 1, 2).

Для об'єктів на відкритому повітрі або у промислових зонах без Wi-Fi передбачено LoRaWAN-модулі, які зпрацюють на відстані до 15 км у прямій видимості та до 3–5 км у міській інфраструктурі при споживанні струму менше 50 мА під час передачі. Резервним каналом виступає модуль GSM/GPRS (SIM800L), що гарантує передачу критичних тривог навіть за повної відсутності локальної інфраструктури.

Третій рівень — серце всієї системи — відповідає за агрегацію вхідного потоку даних від усіх сенсорних вузлів, їх валідацію, збереження та аналіз.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		29

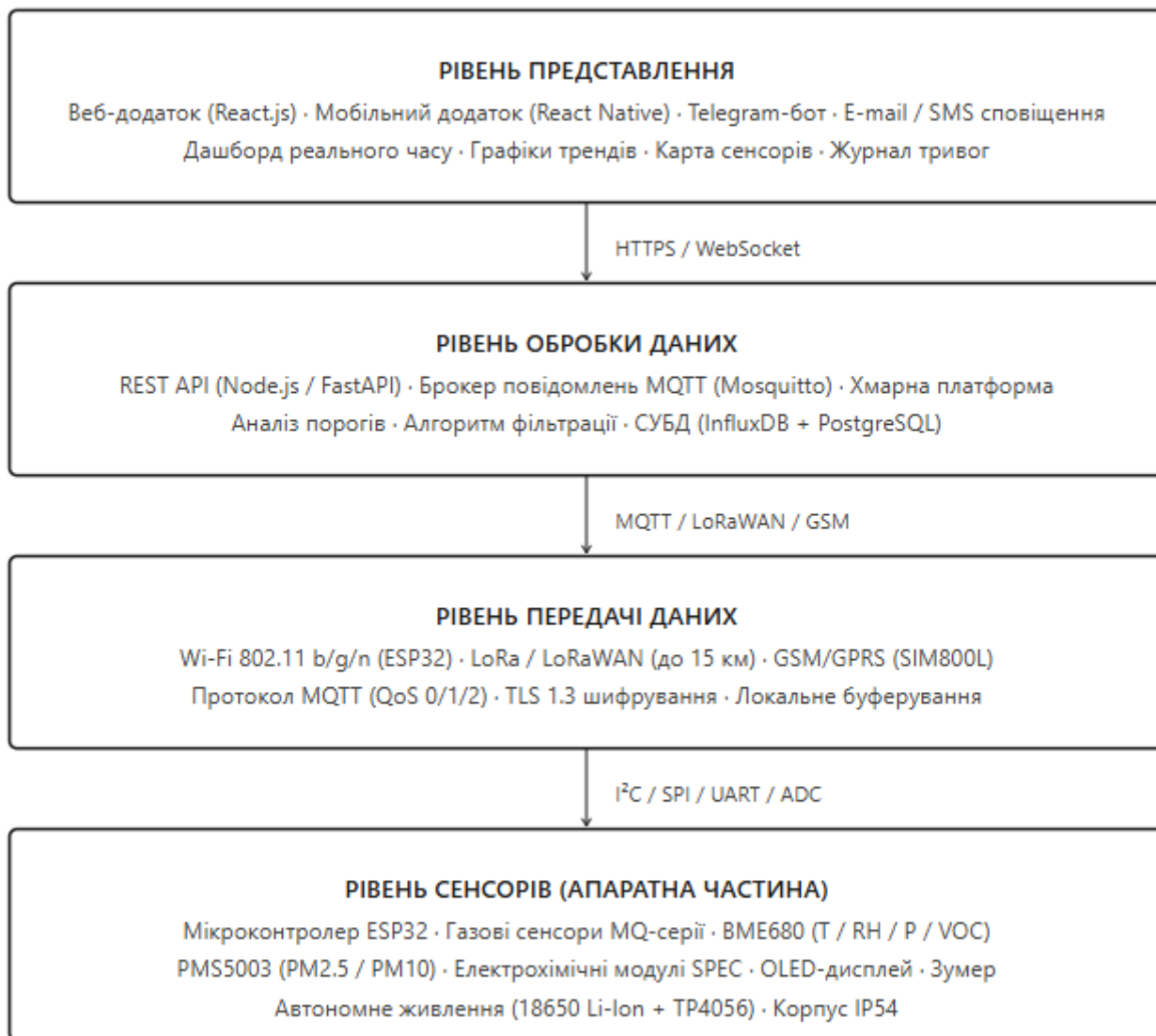


Рисунок 2.1 – Чотирирівнева архітектура IoT-системи раннього виявлення небезпечних речовин

Вхідний потік MQTT-повідомлень обробляється брокером Mosquitto, далі дані передаються до сервісу, який перевіряє структуру JSON-пакетів і записує їх до бази даних часових рядів. Паралельно працює сервіс аналізу порогів – рисунок 2.2 [12].

Архітектура серверної частини побудована за мікросервісним принципом із використанням контейнеризації.

Його завданням є порівняння поточних вимірних значень та їх трендів з нормативними показниками гранично допустимих концентрацій та формує тривогу у випадку перевищення порогового значення протягом певного періоду.

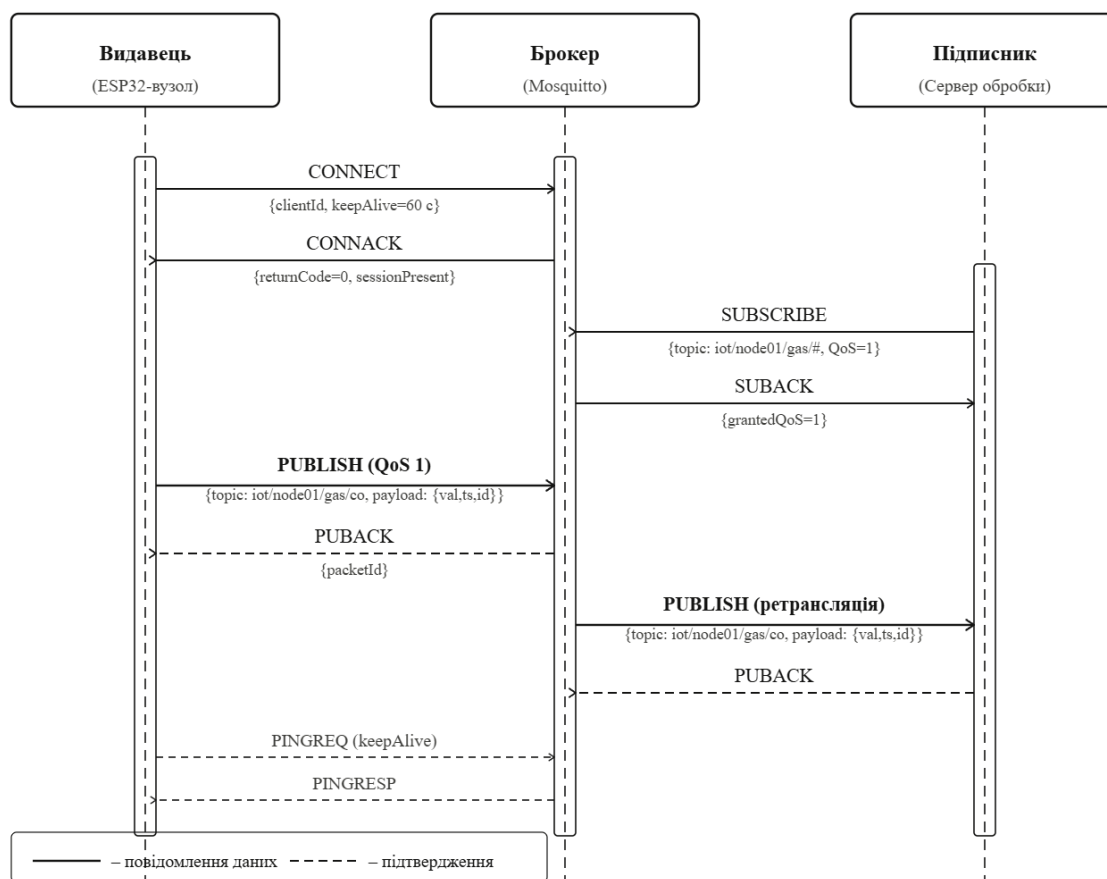


Рисунок 2.2 – Послідовність обміну повідомленнями по MQTT

Для уникнення хибних тривог застосовується логіка підтвердження: тривога генерується лише після N послідовних вимірювань, що перевищують поріг.

Верхній рівень архітектури надає кінцевим користувачам зручний інтерфейс для моніторингу стану системи та реагування на події. Веб-додаток реалізовано на фреймворку React.js і використовує WebSocket-з'єднання для відображення даних у реальному часі без необхідності оновлення сторінки. Основні функціональні елементи інтерфейсу включають інтерактивну карту розміщення сенсорних вузлів на основі Leaflet.js, часові графіки концентрацій для кожного сенсора, журнал тривог із можливістю фільтрації та панель керування пороговими значеннями. Мобільний додаток, розроблений на React Native, забезпечує push-сповіщення операторам при виникненні критичних ситуацій незалежно від того, відкритий у цей момент браузер чи ні.

2.2 Вибір апаратних компонентів

Вибір апаратних компонентів для сенсорного вузла проводився за критеріями відповідності технічним вимогам системи, доступності на ринку, наявності відкритої документації та бібліотек для програмування, а також прийнятної вартості для масового тиражування. Нижче детально обґрунтовано вибір кожної з ключових компонентних груп.

Центральним обчислювальним елементом сенсорного вузла обрано мікроконтролер ESP32 виробництва Espressif Systems. Ця платформа виявилася оптимальним вибором завдяки поєднанню ряду ключових характеристик. Двоядерний процесор Xtensa LX6 із тактовою частотою до 240 МГц дозволяє паралельно виконувати завдання збору даних і мережевої комунікації без взаємних блокувань. Вбудований Wi-Fi-модуль та Bluetooth дозволяють і суттєво зменшити габарити та вартість вузла і уникнути використання зовнішніх комунікаційних мікросхем – рисунок 2.2.

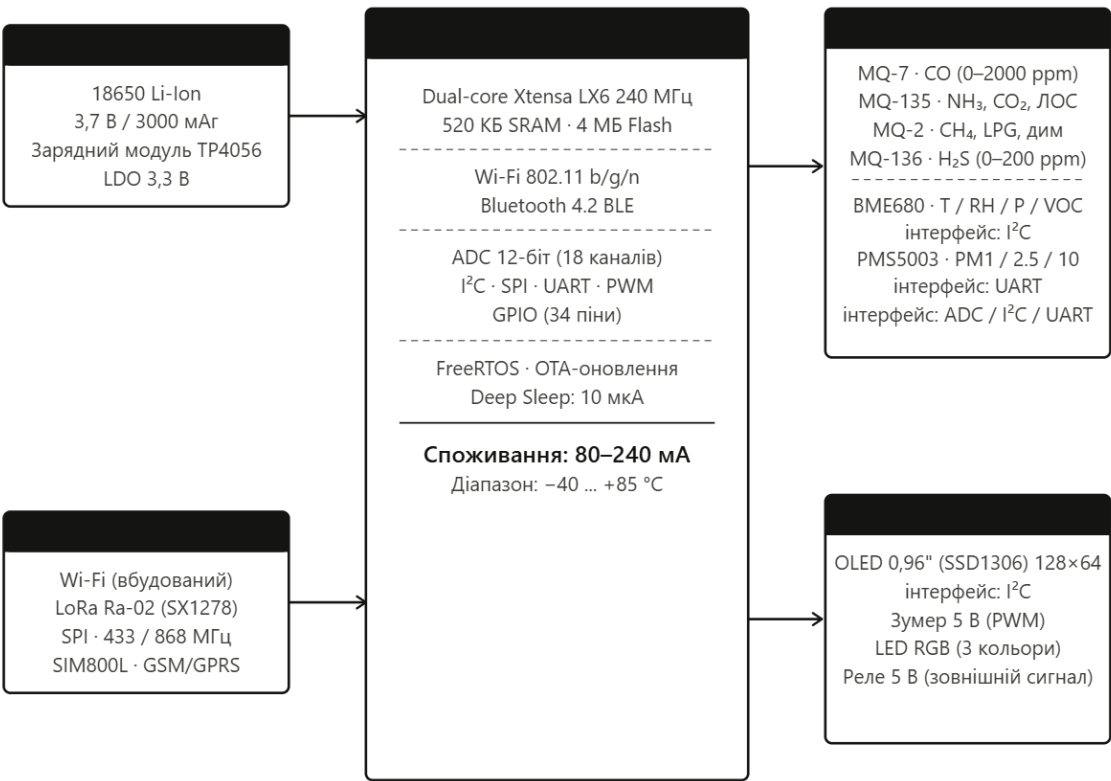


Рисунок 2.2 – Структурна схема апаратного сенсорного вузла

Суттєвою перевагою ESP32 є наявність 18 каналів 12-бітного АЦП, що забезпечує підключення великої кількості аналогових сенсорів без зовнішніх мультиплексорів [10-11]. Підтримка апаратних інтерфейсів I²C, SPI та UART дозволяє одночасно підключати цифрові сенсори різних типів. Режим глибокого сну із споживанням всього 10 мкА критично важливий для вузлів з автономним живленням — він дає змогу розтягнути заряд батареї на тижні при роботі в режимі переривчастих вимірювань.

Порівняльний аналіз альтернативних платформ наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика мікроконтролерних платформ

Критерій	ESP32	ESP8266	Arduino Mega	STM32F4
Ядра / частота	2 × 240 МГц	1 × 80 МГц	1 × 16 МГц	1 × 168 МГц
ОЗП / Flash	520 КБ / 4 МБ	80 КБ / 4 МБ	8 КБ / 256 КБ	192 КБ / 1 МБ
Wi-Fi вбудований	Так (802.11 b/g/n)	Так (802.11 b/g/n)	Ні	Ні
Кількість АЦП	18 × 12-біт	1 × 10-біт	16 × 10-біт	16 × 12-біт
Deep Sleep	10 мкА	20 мкА	Немає	2,4 мкА
Вартість модуля	~3–5 USD	~2–3 USD	~10–15 USD	~5–12 USD
Екосистема / бібліотеки	Дуже широка	Широка	Широка	Середня

Для виявлення токсичних і горючих газів у розроблюваній системі застосовані сенсори серії MQ на основі оксиду олова (SnO₂). Кожен тип сенсора характеризується індивідуальним профілем чутливості та призначений для специфічної групи речовин. MQ-7 виявляє монооксид вуглецю (CO) у діапазоні 20–2000 ppm і є основним засобом контролю загазованості в приміщеннях з горючим обладнанням. MQ-2, чутливий до метану, пропану, водню та диму від горіння, слугує раннім індикатором пожежної небезпеки. MQ-136 спеціалізований на виявленні H₂S — речовини, що є характерним забруднювачем

каналізаційних колекторів, нафтопереробних і харчових підприємств. MQ-135 використовується як широкосмуговий детектор якості повітря, реагуючи на аміак, CO₂ та леткі органічні сполуки – рисунок 2.3 [5, 10].



Рисунок 2.3 - Широкосмуговий детектор якості повітря

Враховуючи, що сенсори серії MQ мають чутливість до кількох газів одночасно, їх об'єднання у багатосенсорній системі з подальшим програмним аналізом вимірюваних значень дозволяє значно підвищити достовірність виявлення конкретної речовини.

Цифровий мультифункціональний сенсор BME680 виробництва Bosch Sensortec є принципово іншим за конструкцією: він вимірює температуру (точність $\pm 1^{\circ}\text{C}$), відносну вологість ($\pm 3\%$), атмосферний тиск та концентрацію летких органічних сполук (VOC) за показником індексу якості повітря IAQ (0–500) – рисунок 2.4.

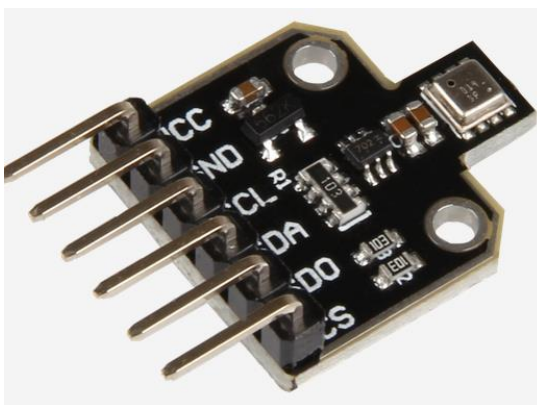


Рисунок 2.4 - Цифровий мультифункціональний сенсор BME680

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

Показник IAQ, що обчислюється за вбудованим алгоритмом BSEC (Bosch Sensortec Environmental Cluster), який враховує базову лінію для конкретного середовища та автоматично адаптується до умов експлуатації протягом 28-денного навчального циклу.

Система живлення сенсорного вузла розроблена з урахуванням необхідності автономної роботи протягом щонайменше 30 діб без підзарядки. Акумулятор типу 18650 ємністю 3000 мАг при середньому споживанні вузла 8 мА забезпечує теоретичний термін роботи понад 375 годин (близько 15 діб) у безперервному режимі. Завдяки активному використанню режиму Deep Sleep ESP32 — коли мікроконтролер прокидається лише на 2 секунди кожні 5 хвилин для вимірювання та передачі — фактичне середнє споживання знижується до 1,2 мА, що збільшує автономність до 100 діб. Зарядний модуль TP4056 із захистом від перерозряду та перегріву підключається до панелі сонячних елементів потужністю 3 Вт для вузлів, розміщених на вулиці.

Для зовнішнього LoRa-зв'язку використовується модуль Ra-02 на базі чипа SX1278, що підтримує частоти 433 МГц та 868 МГц. Протокол LoRaWAN забезпечує дуплексний зв'язок. Резервний GSM-модуль SIM800L підключається до ESP32 через UART і активується автоматично, якщо протягом 60 секунд не вдалося встановити MQTT-з'єднання через Wi-Fi або LoRa.

2.3 Розробка алгоритмів роботи

Програмне забезпечення вбудованого мікроконтролера реалізує кілька взаємопов'язаних алгоритмів, що функціонують у рамках операційної системи реального часу FreeRTOS. Це дозволяє виконувати вимірювання, комунікацію та управління пристроями паралельно, не допускаючи взаємного блокування задач. Основний цикл вимірювань запускається кожні 60 секунд. Спочатку

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

мікроконтролер виводить сенсорні вузли зі стану сну та очікує 2 секунди для стабілізації показань. Зчитування даних аналогових сенсорів MQ-серії виконується через АЦП з усередненням 10 послідовних вибірок з інтервалом 10 мс, що дозволяє компенсувати аналоговий шум і дрейф нуля – рисунок 2.3.

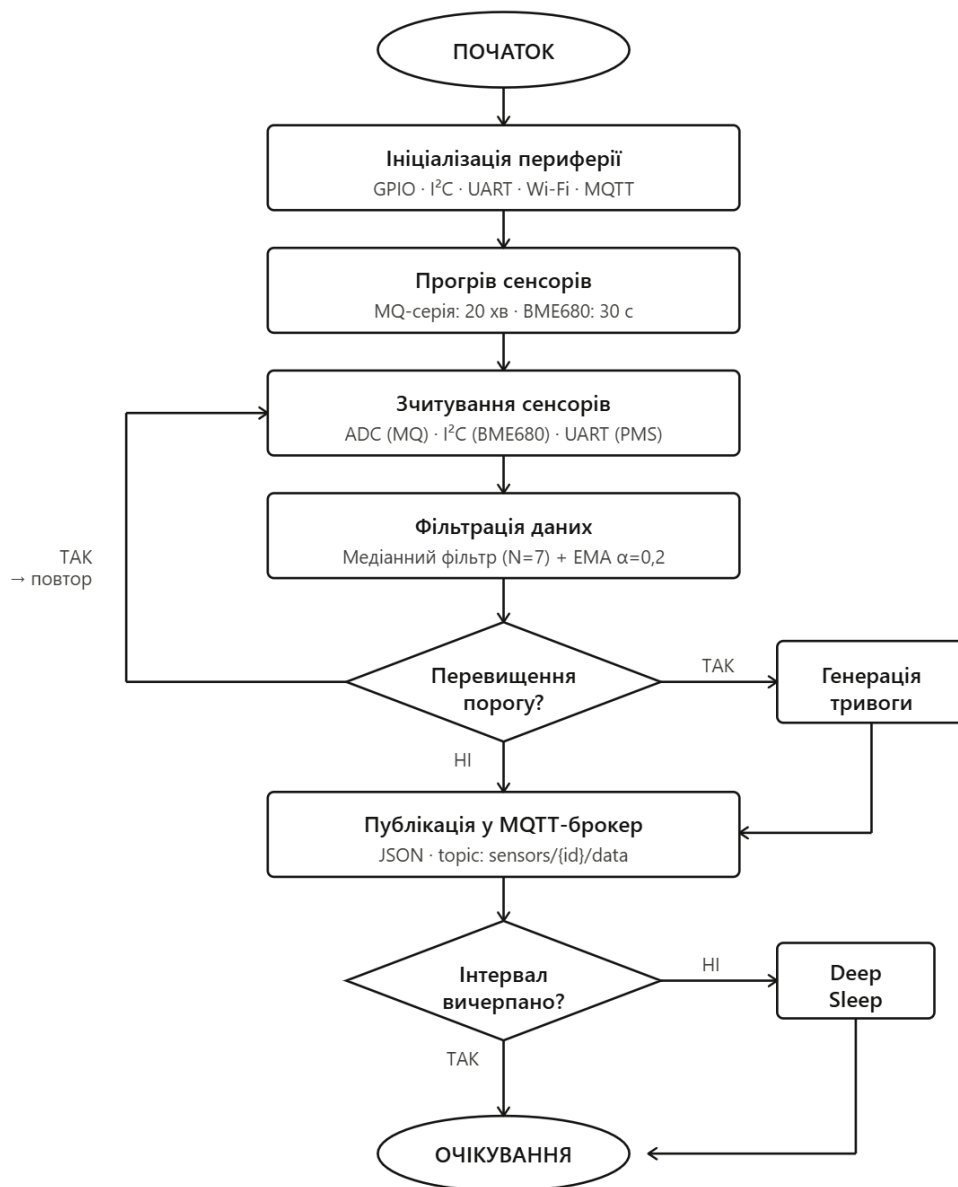


Рисунок 2.3 – Алгоритм основного циклу зчитування та обробки даних сенсорів

Цифрові сенсори опитуються через I²C та UART за відповідними протоколами обміну. Після зчитування сирих значень виконується перетворення відповідно до калібрувальної кривої кожного сенсора.

Напівпровідникові сенсори MQ-серії вимагають обов'язкового калібрування перед введенням в експлуатацію. Методика калібрування передбачає вимірюванні опору зразкового R_0 у чистому повітрі після прогріву сенсора протягом 20 хвилин. Значення R_0 зберігається у пам'яті та використовується для обчислення відношення R_s/R_0 , за яким по апромакиаційній кривій визначається концентрація шкідливого газу.

Методика калібрування передбачає вимірюванні опору зразкового R_0 у чистому повітрі після прогріву сенсора протягом 20 хвилин. Значення R_0 зберігається у пам'яті та використовується для обчислення відношення R_s/R_0 , за яким по апромакиаційній кривій визначається концентрація шкідливого газу — рисунок 2.4.

Повторне калібрування виконується автоматично раз на період, якщо протягом попередніх 12 годин не було зареєстровано жодної тривоги — тоді вважається, що повітря в зоні вимірювання є умовно чистим і придатним для оновлення базової лінії.

Для придушення шуму в сигналах сенсорів реалізований двоступеневий фільтр. На першому ступені застосовується медіанний фільтр із вікном 7 вибірок: сім послідовно отриманих значень сортуються і повертається центральне (четверте за порядком). Медіанний фільтр ефективно усуває імпульсні викиди — аномально великі або малі значення, зумовлені електромагнітними завадами або тимчасовими нестабільностями сенсора. На другому ступені відфільтровані значення обробляються експоненційним ковзним середнім (ЕМА) із коефіцієнтом згладжування $\alpha = 0,2$: нове значення $ЕМА = \alpha \times raw + (1-\alpha) \times prev_ЕМА$. Такий підхід зберігає реакцію системи на справжні зміни концентрації, одночасно пригнічуючи повільний шум і дрейф.

Система реалізує триступеневу шкалу тривожності: «Попередження» (Warning) — концентрація перевищила 75 % від ГДК; «Небезпека» (Danger) — перевищена ГДК; «Критично» (Critical) — концентрація перевищує ГДК більше ніж удвічі.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

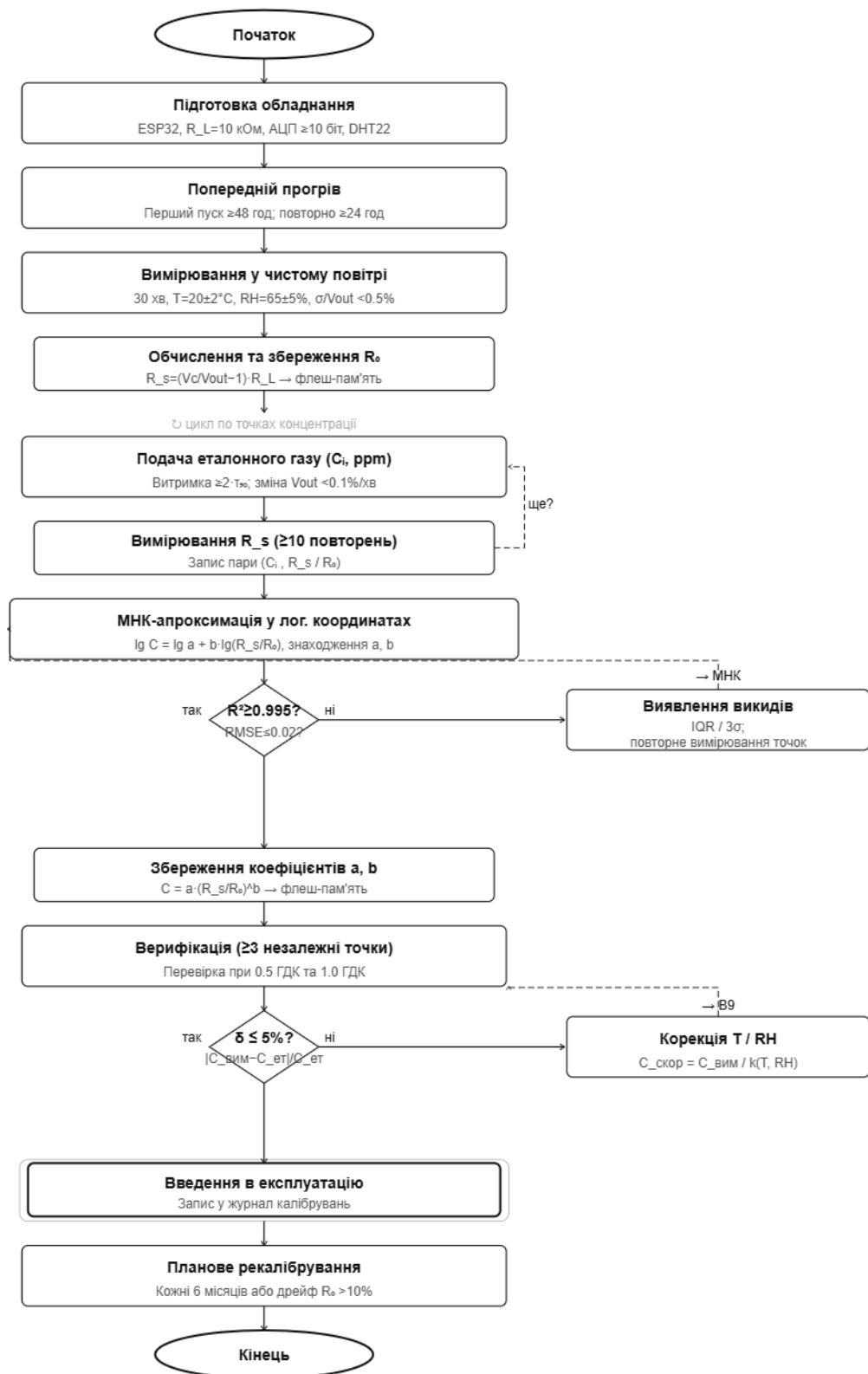


Рисунок 2.4 - Алгоритм калібрування сенсорів серії MQ

Для уникнення помилкових спрацювань тривога для кожного рівня формується у випадку, якщо перевищення порогового значення підтверджується

трьома послідовними вимірюванням. При вимірюванні концентрації нижче порогового значення тривога скасовується лише після 5 послідовних вимірювань у нормі — це техніка гістерезису.

2.4. Проектування бази даних

Вибір архітектури бази даних є одним із ключових технічних рішень системи, оскільки від нього залежать швидкодія записування потоку даних від сенсорів, ефективність виконання аналітичних запитів і вартість зберігання. Оскільки основний тип даних у системі — часові ряди сенсорних вимірювань — має специфічні характеристики (висока частота запису, монотонне зростання часових міток, рідкісне оновлення старих записів), для їх зберігання доцільно застосовувати спеціалізовані системи управління базами даних часових рядів.

Бази даних часових рядів використовуються для зберігання і відповідей на запити значень з часовими мітками. Для зберігання безпосередніх вимірювань обрано InfluxDB — провідну відкриту TSDB, яка підтримує автоматичне видалення застарілих даних (retention policy) та ефективні запити на агрегацію за часовими вікнами. Метадані пристроїв і конфігурація системи зберігаються в реляційній PostgreSQL — надійній і широко поширеній СУБД із підтримкою повнотекстового пошуку, зовнішніх ключів та тригерів.

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика СУБД для задач IoT-моніторингу

Параметр	InfluxDB	TimescaleDB	MongoDB	PostgreSQL
Тип СУБД	TSDB	TSDB + SQL	NoSQL (документна)	Реляційна
Швидкість запису	Дуже висока	Висока	Висока	Середня
Стиснення даних	До 20× (вбудоване)	До 12×	Немає	Немає

Retention Policy	Вбудована	Вбудована	TTL-індекси	Вручну
SQL-запити	InfluxQL / Flux	Так (PostgreSQL)	Ні	Так
Відкритий код	Так	Так	Так	Так
Призначення в системі	Вимірювання сенсорів	Альтернатива	Не обрано	Метадані, тривоги

Реляційна частина бази даних у PostgreSQL складається з трьох основних таблиць – рисунок 2.5 [13, 14].

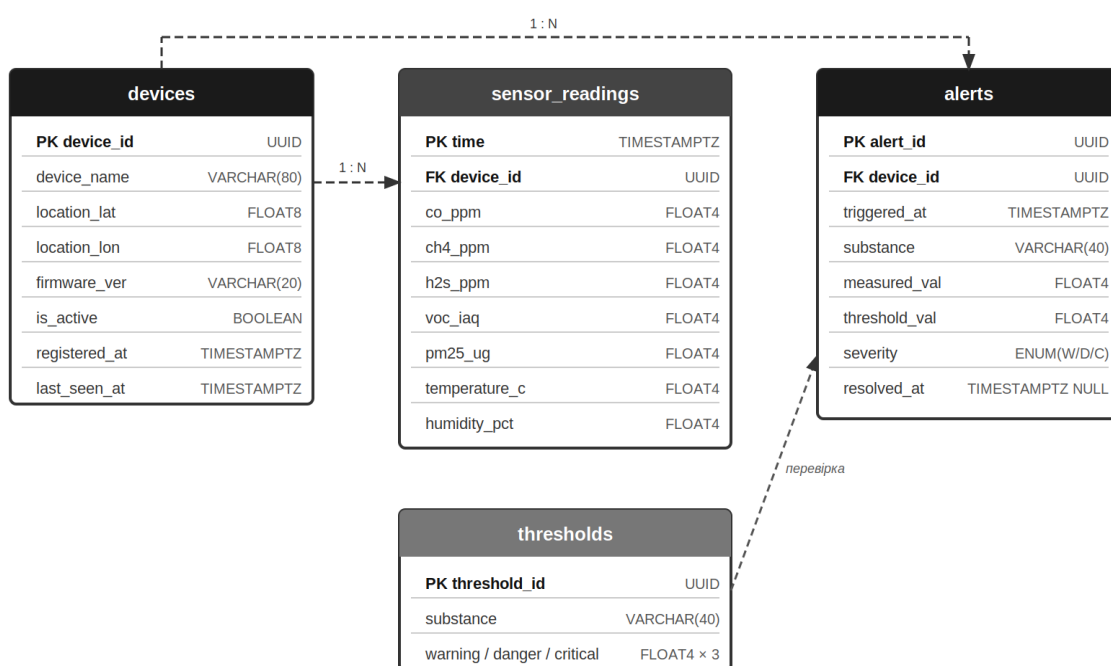


Рисунок 2.5 – Схема реляційної бази даних системи (PostgreSQL)

Таблиця **devices** зберігає реєстраційні дані кожного сенсорного вузла: унікальний ідентифікатор (UUID), назву, географічні координати, версію прошивки та часові мітки реєстрації і останнього підключення. Таблиця **thresholds** містить налаштовувані порогові значення ГДК для кожної речовини з трьома рівнями тяжкості: попередження, небезпека і критичний. Таблиця **alerts** є журналом усіх зафіксованих тривожних подій, для кожної з яких зберігається час виникнення та вирішення, назва речовини, виміряне значення, перевищений поріг і рівень серйозності. Зв'язок між таблицями здійснюється через зовнішні

ключі з обмеженнями FOREIGN KEY та відповідними індексами для прискорення запитів.

Ефективне зберігання потоку сенсорних вимірювань є критичним аспектом проєктування. При мережі із 50 вузлів, що передають дані кожну хвилину, щоденний обсяг записів складає 72 000 рядків.

Для управління обсягом даних налаштована ієрархічна політика утримання. Необроблені дані зберігаються з повною роздільною здатністю (1 вимірювання/хвилину) протягом 30 діб. Після цього запускається завдання безперервного агрегування (continuous query), яке усереднює дані до 5-хвилинних інтервалів і зберігає агреговані значення ще протягом одного року. Дані річної давнини усереднюються до погодинних значень і зберігаються необмежено для статистичного аналізу та звітності. Завдяки такій стратегії кінцевий розмір бази даних для мережі 50 вузлів складає приблизно 2 ГБ на рік, що є цілком прийнятним для розгортання на хмарних серверах початкового рівня.

Таким чином, у другому розділі розроблено та обґрунтовано ключові компоненти системи раннього виявлення небезпечних речовин. Запропонована чотирирівнева архітектура забезпечує чітке розмежування функцій між підсистемами та дозволяє масштабувати кожен рівень незалежно. Вибір ESP32 як центрального мікроконтролера підтверджено порівняльним аналізом альтернатив. Мультисенсорна конфігурація (MQ-7, MQ-2, MQ-136, MQ-135, BME680) охоплює широкий спектр небезпечних речовин при прийнятному бюджеті вузла. Розроблені алгоритми двоступеневої фільтрації та гістерезисної логіки тривоги мінімізують частоту хибних спрацювань. Гібридна СУБД-архітектура (InfluxDB + PostgreSQL) з ієрархічною політикою агрегування забезпечує ефективне довгострокове зберігання даних при мінімальних вимогах до дискового простору.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ

3.1 Розробка прошивки мікроконтролера при вимірюванні небезпечних речовин

Вибір середовища розробки є першим практичним кроком до реалізації вбудованого програмного забезпечення системи раннього виявлення. У даній роботі як основну платформу обрано PlatformIO у складі редактора Visual Studio Code, що забезпечує зручне керування залежностями, підтримку системи збирання на базі CMake та інтеграцію з системою контролю версій Git. Поряд із цим Arduino IDE 2.x залишається альтернативним середовищем для швидкого прототипування окремих функцій: воно не вимагає налаштування середовища та пропонує вбудований монітор послідовного порту. PlatformIO обрано як основне середовище через підтримку файлу конфігурації platformio.ini, що дозволяє відтворювати збірку на будь-якому комп'ютері без ручного встановлення бібліотек [15].

Мікроконтролер ESP32-WROOM-32 є центральним обчислювальним вузлом системи. Він поєднує двоядерний процесор Xtensa LX6 з тактовою частотою 240 МГц, вбудований WiFi-стек IEEE 802.11 b/g/n та Bluetooth 4.2, що робить його придатним для IoT-застосувань без зовнішніх модулів зв'язку. Вбудований 12-бітний АЦП з шістьма доступними каналами на першому банку (ADC1) забезпечує роздільну здатність 4096 рівнів в діапазоні 0–3.3 В, що достатньо для точного вимірювання вихідної напруги резистивних газових сенсорів серії MQ.

Налаштування середовища починається зі створення файлу platformio.ini, в якому зазначається цільова платформа (espressif32), плата (esp32dev), швидкість монітора послідовного порту (115200) та список залежних бібліотек: DHT sensor library від Adafruit для датчика DHT22, PubSubClient для протоколу MQTT та ArduinoJson для серіалізації даних у форматі JSON. Усі залежності

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

завантажуються автоматично з реєстру PlatformIO Library Registry при першому складанні проєкту.

Ключовим аспектом програмної ініціалізації є коректне налаштування АЦП ESP32. Стандартна функція `analogRead()` без додаткового налаштування повертає нелінійні значення через внутрішню атенюацію. Щоб отримати лінійну характеристику в діапазоні 0–3.3 В, необхідно явно викликати `analogSetAttenuation(ADC_11db)` та `analogReadResolution(12)` до першого вимірювання. Крім того, ESP32 має відомий артефакт у значеннях АЦП поблизу 0 В та 3.3 В (нелінійність на кінцях шкали), тому програмна фільтрація початкових та кінцевих значень є необхідною мірою для забезпечення метрологічної коректності.

Зчитування даних з сенсорів реалізовано у функції `readConcentration()`, яка виконує десять послідовних вимірювань з інтервалом 5 мс і повертає їх середнє значення. Такий підхід зменшує вплив теплового шуму АЦП та власних флуктуацій сенсора. Після усереднення аналогова напруга перераховується у фізичний опір R_s за формулою дільника напруги, після чого застосовується калібрувальна степенева модель для отримання концентрації у частинах на мільйон (ppm). Поправочний коефіцієнт $k(T, RH)$ враховує вплив поточної температури та вологості на чутливість сенсора.

$$C = a \cdot (R_s / R_0)^b / k(T, RH), \text{ де } k = 1 + 0.015 \cdot (T - 20) + 0.003 \cdot (RH - 65)$$

Основний цикл `loop()` виконується кожні 5 секунд та реалізує повний вимірювальний цикл: зчитування температури і вологості з DHT22, вимірювання концентрацій усіх підключених сенсорів, серіалізація результатів у JSON-рядок та публікація у відповідний MQTT-топiк. Вибір 5-секундного інтервалу обумовлений характеристичним часом відгуку сенсорів MQ ($\tau_{90} = 30\text{--}60$ с), що дозволяє фіксувати зміни концентрації з достатньою часовою роздільністю без надмірного навантаження на мережу та базу даних [16].

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

Лістинг 3.1 — Прошивка ESP32: ініціалізація сенсорів та основний цикл вимірювань

```
// === Лістинг 3.1 — Ініціалізація та основний цикл (ESP32, Arduino framework) ===
#include <Arduino.h>
#include <DHT.h>
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h> // MQTT
#include <ArduinoJson.h>
```

```
// _____ Конфігурація
```

```
constexpr uint8_t PIN_MQ7 = 34; // ADC1_CH6
constexpr uint8_t PIN_MQ135 = 35; // ADC1_CH7
constexpr uint8_t PIN_DHT = 4;
constexpr uint8_t DHT_TYPE = DHT22;
constexpr float VCC = 3.3f; // живлення АЦП
constexpr float RL_MQ7 = 10000.f; // Ом
constexpr float RL_MQ135 = 20000.f;
constexpr uint32_t SAMPLE_MS = 5000; // інтервал вимірювань
```

```
// _____ Калібрувальні коефіцієнти (визначені при 20°C, 65%RH)
```

```
struct SensorCalib { float R0; float a; float b; };
SensorCalib mq7 = { .R0 = 2500.f, .a = 99.042f, .b = -1.518f };
SensorCalib mq135 = { .R0 = 9500.f, .a = 116.6f, .b = -2.769f };
```

```
DHT dht(PIN_DHT, DHT_TYPE);
WiFiClient wifiClient;
PubSubClient mqtt(wifiClient);
```

```
// _____ Зчитування та перерахунок концентрації
```

```
float readConcentration(uint8_t pin, const SensorCalib& cal, float rl) {
    // Середнє за 10 вимірюваннями для зменшення шуму АЦП
    float sum = 0.f;
    for (int i = 0; i < 10; i++) { sum += analogRead(pin); delay(5); }
    float adc = sum / 10.f;
    float vout = adc * (VCC / 4095.f);
    if (vout < 0.01f) return -1.f; // захист від ділення на нуль
    float rs = (VCC / vout - 1.f) * rl;
    float ratio = rs / cal.R0;
    // Степенева модель: C = a * (Rs/R0)^b
    return cal.a * powf(ratio, cal.b);
}
```

```
// _____ Температурно-вологісна корекція
```

```
float tempHumCorrection(float c, float T, float rh) {
```

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44

```

// k(T,RH) = 1 + 0.015*(T-20) + 0.003*(RH-65)
float k = 1.f + 0.015f*(T-20.f) + 0.003f*(rh-65.f);
return c / k;
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  dht.begin();
  analogSetAttenuation(ADC_11db); // діапазон 0–3.3 В
  analogReadResolution(12); // 12-біт
  WiFi.begin(SSID, PASSWORD);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) delay(500);
  mqtt.setServer(MQTT_BROKER, 1883);
}

void loop() {
  float T = dht.readTemperature();
  float rh = dht.readHumidity();
  float co = tempHumCorrection(
    readConcentration(PIN_MQ7, mq7, RL_MQ7), T, rh);
  float nh3 = tempHumCorrection(
    readConcentration(PIN_MQ135, mq135, RL_MQ135), T, rh);
  publishMQTT(co, nh3, T, rh);
  delay(SAMPLE_MS);
}

```

Наведений лістинг реалізує повний цикл вимірювання від зчитування АЦП до публікації скоригованого значення концентрації через MQTT. Функція `readConcentration()` є універсальною і приймає як параметри номер піна, структуру калібрувальних коефіцієнтів та значення навантажувального резистора, що дозволяє підключати сенсори різних типів без дублювання коду. Захист від ділення на нуль (перевірка `vout < 0.01f`) запобігає аварійному завершенню програми при відключенні або несправності сенсора.

3.2 Обробка вимірюваних даних та формування тривожних повідомлень

Обробка даних у реальному часі здійснюється на сервері збору даних, що отримує вимірювання через брокер повідомлень Mosquitto за протоколом MQTT.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		45

Архітектурне рішення про виконання обробки на стороні сервера, а не на мікроконтролері, обумовлено кількома міркуваннями. По-перше, сервер має значно більші обчислювальні ресурси для статистичного аналізу часових рядів. По-друге, централізована обробка дозволяє порівнювати показники від кількох сенсорів одночасно. По-третє, логіку обробки можна оновлювати без перепрошивки кожного пристрою окремо.

Логіка перевірки порогових значень реалізована у функції `check_threshold()`, яка отримує назву аналіту та поточне значення концентрації і повертає цілочисельний код рівня тривоги: 0 відповідає нормальному стану, 1 — перевищенню попереджувального рівня (зазвичай 0.4–0.5 ГДК), 2 — перевищенню ГДК і 3 — перевищенню аварійного порогу (чотирикратне ГДК). Порогові значення зберігаються у словнику `THRESHOLDS`, що спрощує їх оновлення без зміни логіки обробки.

Таблиця 3.1 — Порогові значення концентрацій для сенсорів серії MQ

Модель	Газ	Попереджувальний рівень	ГДК	Аварійний рівень	Застосування
MQ-7	CO	20 ppm	50 ppm	200 ppm	Шахти, гаражі
MQ-2	LPG	300 ppm	1000 ppm	5000 ppm	Побутовий газ
MQ-135	NH ₃	10 ppm	25 ppm	100 ppm	Хімівиробництво
MQ-136	H ₂ S	1 ppm	10 ppm	50 ppm	Нафтопереробка
MQ-8	H ₂	100 ppm	500 ppm	1000 ppm	Воднева енергетика

Прогнозування моменту перевищення порогового рівня реалізовано методом лінійної регресії за ковзним вікном часового ряду. Для кожного аналіту на сервері підтримується буфер останніх N вимірювань (за замовчуванням $N = 12$, тобто 1 хвилина при 5-секундному інтервалі). Функція `forecast_exceedance()` перетворює часові мітки у відносні відліки в секундах від першого елемента вікна, виконує лінійну регресію методом найменших квадратів та екстраполює лінійний тренд до моменту досягнення порогового значення.

$$t^* = (C_{\text{thresh}} - \hat{b}) / \hat{a}, \text{ де } C(t) = \hat{a} \cdot t + \hat{b} \text{ — МНК-оцінка тренду}$$

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

Прогноз вважається надійним лише тоді, коли коефіцієнт детермінації R^2 перевищує 0.7 і нахил регресії є додатним. Це запобігає хибним тривогам при спадаючому або нелінійному тренді. Розрахований момент t^* повертається у форматі `datetime` та включається до тексту сповіщення, щоб оператор міг вчасно вжити запобіжних заходів. Точність прогнозу зростає із збільшенням розміру вікна та стабільністю тренду, тому для аналізу з нестабільним сигналом рекомендується збільшити вікно до 20–30 точок.

Система сповіщень реалізована у вигляді багатоканального модуля, що підтримує паралельне відправлення повідомлень електронною поштою через SMTP та за допомогою Telegram Bot API. Електронна пошта використовується для детальних звітів із зазначенням поточної концентрації, рівня тривоги, прогнозованого часу досягнення аварійного рівня та рекомендацій. Telegram-сповіщення є більш лаконічними і призначені для оперативного інформування чергового персоналу. Для запобігання spam-ефекту реалізовано механізм дедублікації: повторне сповіщення для одного аналізу надсилається не раніше ніж через 5 хвилин після попереднього, якщо рівень тривоги не підвищився. Лістинг 3.2 — Серверна обробка даних: перевірка порогів, прогноз і сповіщення.

// === Лістинг 3.2 — Логіка порогових значень і прогнозування (Python, сервер)

```
import numpy as np
from datetime import datetime, timedelta
from scipy.stats import linregress
import paho.mqtt.client as mqtt
import pycpg2, json, smtplib
from email.message import EmailMessage

# Порогові значення, ppm
THRESHOLDS = {
    "CO": {"warn": 20, "gdp": 50, "alarm": 200},
    "NH3": {"warn": 10, "gdp": 25, "alarm": 100},
    "H2S": {"warn": 1, "gdp": 10, "alarm": 50},
    "H2": {"warn": 100, "gdp": 500, "alarm": 1000},
```

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		47

```

    "LPG": {"warn": 300, "gdp": 1000, "alarm": 5000},
}

# Перевірка порогу
def check_threshold(gas: str, value: float) -> int:
    t = THRESHOLDS.get(gas, {})
    if value >= t.get("alarm", float("inf")): return 2 # аварія
    if value >= t.get("gdp", float("inf")): return 1 # перевищення ГДК
    if value >= t.get("warn", float("inf")): return 0 # попередження
    return 0

# Прогноз моменту перевищення ГДК (лінійна регресія часового ряду)
def forecast_exceedance(timestamps: list, values: list,
                        threshold: float) -> datetime | None:
    """
    Повертає розрахунковий момент досягнення threshold або None,
    якщо тренд від'ємний чи  $R^2 < 0.7$ .
    """
    if len(values) < 6:
        return None
    x = np.array([(t - timestamps[0]).total_seconds() for t in timestamps])
    y = np.array(values, dtype=float)
    slope, intercept, r, _, _ = linregress(x, y)
    if slope <= 0 or r**2 < 0.7:
        return None
    # t* = (threshold - intercept) / slope
    t_star = (threshold - intercept) / slope
    return timestamps[0] + timedelta(seconds=t_star)

# MQTT callback
def on_message(client, userdata, msg):
    data = json.loads(msg.payload)
    gas, val = data["gas"], data["concentration"]
    level = check_threshold(gas, val)
    save_to_db(data, level)

```

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48

```

if level >= 1:
    send_alert(gas, val, level,
               forecast_exceedance(
                   userdata["ts"][gas], userdata["vals"][gas],
                   THRESHOLDS[gas]["gdp"]))

# Email-сповіщення
def send_alert(gas, val, level, eta=None):
    msg = EmailMessage()
    subject = f"[{'АВАРІЯ' if level==2 else 'ПОПЕРЕДЖЕННЯ'}] {gas} = {val:.1f} ppm"
    body = (f"Зафіксовано перевищення ГДК для {gas}.\n"
            f"Поточна концентрація: {val:.1f} ppm.\n")
    if eta:
        body += f"Прогноз перевищення аварійного рівня: {eta:%Y-%m-%d %H:%M}.\n"
    msg.set_content(body)
    msg["Subject"], msg["From"], msg["To"] = subject, FROM_ADDR, TO_ADDR
    with smtplib.SMTP_SSL("smtp.gmail.com", 465) as s:
        s.login(FROM_ADDR, APP_PASSWORD); s.send_message(msg)

```

Функція `forecast_exceedance()` приймає два списки однакової довжини: часові мітки у форматі `datetime` та відповідні значення концентрації. Результатом є або об'єкт `datetime` із розрахунковим часом перевищення, або `None` у разі непридатності тренду для прогнозування. Виклик `scipy.stats.linregress` забезпечує обчислення нахилу, зміщення та коефіцієнта кореляції за одну операцію, що є обчислювально ефективним для вбудованого циклу обробки повідомлень.

Архітектура системи сповіщень передбачає три рівні ескалації. На першому рівні (попереджувальний) генерується запис у журналі тривоги бази даних та надсилається Telegram-повідомлення черговому оператору. На другому рівні (перевищення ГДК) додатково надсилається електронний лист керівнику об'єкта та активується звуковий сигнал на локальному пристрої IoT через GPIO-вихід ESP32. На третьому рівні (аварійний) задіюються всі канали сповіщення, а до повідомлення додається прогноз часу досягнення критичної концентрації та

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		49

автоматично формується заявка на відключення ураженої зони технологічного процесу.

3.3 Розробка бази даних

Для зберігання вимірювань з IoT-сенсорів обрано реляційну СУБД PostgreSQL 16 розширену модулем TimescaleDB 2.x. Вибір PostgreSQL обумовлений зрілістю системи, повноцінною підтримкою стандарту SQL, широкими можливостями індексування та розвиненою екосистемою інструментів адміністрування. Розширення TimescaleDB перетворює звичайну PostgreSQL-таблицю на гіпертаблицю з автоматичним партиціонуванням за часовою міткою, що суттєво прискорює запити до часових рядів великого обсягу за рахунок обмеження пошуку лише релевантними часовими фрагментами (чанками).

Схема бази даних складається з чотирьох взаємопов'язаних таблиць. Таблиця devices зберігає перелік зареєстрованих IoT-пристроїв, їх фізичне розташування та дату введення в експлуатацію. Центральна таблиця measurements містить усі вимірювання і є гіпертаблицею з денним інтервалом партиціонування. Таблиця alerts зберігає журнал тривожних подій із рівнем тривоги, вимірним значенням та розрахованим прогнозом. Таблиця calibration зберігає актуальні калібрувальні коефіцієнти для кожної пари пристрій–сенсор і оновлюється при черговому калібруванні.

Таблиця 3.2 — Структура таблиці measurements бази даних

Поле	Тип даних	Обмеження	Призначення
id	BIGSERIAL	PK	Унікальний ідентифікатор запису

Поле	Тип даних	Обмеження	Призначення
device_id	VARCHAR(32)	NOT NULL	Ідентифікатор пристрою ESP32
sensor_type	VARCHAR(16)	NOT NULL	Модель сенсора (MQ-7, MQ-135 тощо)
gas_type	VARCHAR(16)	NOT NULL	Тип аналіту (CO, NH3, H2S тощо)
concentration	REAL	NOT NULL	Виміряна концентрація, ppm
raw_adc	INTEGER	NOT NULL	Сирий код АЦП (0–4095)
temperature	REAL		Температура навколишнього середовища, °C
humidity	REAL		Відносна вологість, %
alert_level	SMALLINT	DEFAULT 0	0-норма, 1-попередження, 2-аварія
ts	TIMESTAMPTZ	NOT NULL DEFAULT now()	Часова мітка UTC

Поле ts оголошено з типом TIMESTAMPTZ, що зберігає часову мітку з інформацією про часовий пояс. Усі записи зберігаються в UTC, а конвертація у місцевий час виконується на рівні клієнтського застосунку. Поле alert_level зберігається у форматі SMALLINT (2 байти), що достатньо для чотирьох рівнів тривоги і є економнішим за INTEGER при великих обсягах даних. Поле raw_adc зберігає сирий код АЦП для можливості повторної обробки даних із оновленою калібрувальною моделлю без повторного фізичного вимірювання. Лістинг 3.3 — DDL-скрипт схеми бази даних PostgreSQL / TimescaleDB.

-- === Лістинг 3.3 — DDL схеми бази даних PostgreSQL / TimescaleDB ===

```
CREATE EXTENSION IF NOT EXISTS timescaledb;
```

```
-- Пристрої IoT
```

```
CREATE TABLE devices (
    device_id VARCHAR(32) PRIMARY KEY,
    location TEXT,
    installed DATE NOT NULL DEFAULT CURRENT_DATE
```

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51

);

-- Основна таблиця вимірювань

CREATE TABLE measurements (

id BIGSERIAL,

device_id VARCHAR(32) NOT NULL REFERENCES devices,

sensor_type VARCHAR(16) NOT NULL,

gas_type VARCHAR(16) NOT NULL,

concentration REAL NOT NULL,

raw_adc INTEGER NOT NULL,

temperature REAL,

humidity REAL,

alert_level SMALLINT NOT NULL DEFAULT 0,

ts TIMESTAMPTZ NOT NULL DEFAULT now(),

PRIMARY KEY (id, ts)

);

-- TimescaleDB гіпертаблиця (партиціонування за часом по 1 добі)

SELECT create_hypertable('measurements', 'ts', chunk_time_interval => INTERVAL '1 day');

-- Журнал тривог

CREATE TABLE alerts (

id BIGSERIAL PRIMARY KEY,

device_id VARCHAR(32) NOT NULL REFERENCES devices,

gas_type VARCHAR(16) NOT NULL,

level SMALLINT NOT NULL,

value_ppm REAL NOT NULL,

eta TIMESTAMPTZ, -- прогноз перевищення аварійного рівня

notified BOOLEAN DEFAULT FALSE,

ts TIMESTAMPTZ NOT NULL DEFAULT now()

);

-- Таблиця калібрувальних коефіцієнтів

CREATE TABLE calibration (

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

device_id VARCHAR(32) NOT NULL REFERENCES devices,
sensor_type VARCHAR(16) NOT NULL,
R0      REAL NOT NULL,
a_coeff REAL NOT NULL,
b_coeff REAL NOT NULL,
calibrated TIMESTAMPTZ NOT NULL DEFAULT now(),
PRIMARY KEY (device_id, sensor_type)
);

```

-- Індекси

-- BRIN: компактний для часових рядів зі зростаючим ts

```

CREATE INDEX idx_measurements_ts
ON measurements USING BRIN (ts);

```

-- B-Tree: запити за конкретним пристроєм + часовий діапазон

```

CREATE INDEX idx_measurements_device_ts
ON measurements (device_id, ts DESC);

```

-- Partial index: тільки тривожні записи (alert_level > 0)

```

CREATE INDEX idx_measurements_alert
ON measurements (device_id, ts DESC)
WHERE alert_level > 0;

```

```

CREATE INDEX idx_alerts_device_ts
ON alerts (device_id, ts DESC);

```

```

CREATE INDEX idx_calibration_device_sensor
ON calibration (device_id, sensor_type);

```

-- Безперервний агрегат (1-хвилинні середні)

```

CREATE MATERIALIZED VIEW measurements_1m
WITH (timescaledb.continuous) AS
SELECT time_bucket('1 minute', ts) AS bucket,
       device_id, gas_type,
       AVG(concentration) AS avg_ppm,

```

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

MAX(concentration) AS max_ppm,
MIN(concentration) AS min_ppm
FROM measurements
GROUP BY bucket, device_id, gas_type
WITH NO DATA;

SELECT add_continuous_aggregate_policy('measurements_1m',
start_offset => INTERVAL '10 minutes',
end_offset => INTERVAL '1 minute',
schedule_interval => INTERVAL '1 minute');

```

Безперервний агрегат `measurements_1m` автоматично обчислює середню, максимальну та мінімальну концентрації за кожну хвилину для кожного пристрою та аналіту. Це матеріалізоване представлення обслуговує запити дашборду, де відображаються актуальні тренди, і дозволяє уникнути агрегування мільйонів сирих рядків при кожному запиті. TimescaleDB оновлює агрегат автоматично за розкладом кожну хвилину, з урахуванням даних, що надійшли із запізненням до 10 хвилин (`start_offset`).

Стратегія індексування розроблена з урахуванням трьох типових сценаріїв запитів: перегляд даних за часовим діапазоном, фільтрація по конкретному пристрою та відбір лише тривожних записів. BRIN-індекс на полі `ts` є оптимальним для гіпертаблиці, оскільки значення часу строго зростають і блокова структура BRIN відповідає фізичному розташуванню рядків у чанках. Складений B-Tree-індекс (`device_id, ts DESC`) прискорює запити, типові для дашборду: «показати останні N вимірювань пристрою X». Частковий індекс з умовою `WHERE alert_level > 0` обслуговує запити до журналу тривог і займає в десятки разів менше місця, ніж індекс по всій таблиці.

Резервне копіювання бази даних реалізовано засобами `pg_dump` у щоденному режимі з ротацією за 30 діб. Для TimescaleDB-гіпертаблиць рекомендується використовувати утиліту `timescaledb-backup` замість

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		54

стандартного `pg_dump`, оскільки вона враховує внутрішню структуру чанків і відновлює стиснені дані коректно.

Таблиця 3.3 — Індеси бази даних та їх призначення

Назва індексу	Тип	Призначення
<code>idx_measurements_ts</code>	BRIN	Пошук за часовим діапазоном (time-series)
<code>idx_measurements_device_ts</code>	B-Tree	Запити за конкретним пристроєм + час
<code>idx_measurements_alert</code>	Partial	Фільтрація тільки тривожних записів
<code>idx_alerts_device_ts</code>	B-Tree	Журнал тривог за пристроєм і часом
<code>idx_calibration_device_sensor</code>	B-Tree	Пошук актуальних коефіцієнтів

Додатково налаштовано потокову реплікацію PostgreSQL на резервний сервер у режимі `hot standby`, що забезпечує безперервність доступу до даних при відмові основного вузла.

Безпека даних забезпечується на кількох рівнях. На рівні бази даних кожен сервіс має власний PostgreSQL-користувач з мінімальними необхідними привілеями: сервіс збору даних має права лише на `INSERT` до таблиці `measurements`, сервіс дашборду — лише на `SELECT` до вибраних представлень. На рівні мережі брокер MQTT та сервер PostgreSQL не доступні з публічної мережі Internet — вони розміщені у приватній підмережі з доступом лише через VPN-тунель. Дані між ESP32 та брокером передаються по протоколу MQTT over TLS 1.3 з взаємною аутентифікацією за сертифікатами X.509.

Таким чином, в даному розділі реалізовано програмне забезпечення системи раннього виявлення небезпечних забруднень.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи вирішено комплекс науково-технічних задач, пов'язаних із розробкою IoT-системи раннього виявлення небезпечних речовин із функцією прогнозування перевищення ГДН. За підсумками виконаних досліджень сформульовано такі висновки:

1. Проведено аналіз нормативної бази та сучасного стану засобів вимірювання концентрацій небезпечних речовин. Встановлено, що чинні санітарні норми ДСН 3.3.6.042-99 регламентують ГДН для понад 1300 шкідливих речовин у повітрі робочої зони, однак традиційні стаціонарні газоаналізатори не забезпечують безперервного моніторингу у розподіленому середовищі через високу вартість і відсутність мережевих інтерфейсів. Обґрунтовано доцільність застосування IoT-підходу для вирішення цього завдання.

2. Виконано порівняльний аналіз типів сенсорів небезпечних речовин за принципом дії, діапазоном вимірювань, чутливістю, селективністю та вартістю. Обґрунтовано вибір сенсорів.

3. Розроблено архітектуру та структурну схему IoT-системи раннього виявлення небезпечних речовин. Система реалізує трирівневу архітектуру: рівень сенсорних вузлів (ESP32 + сенсори), рівень передачі даних та рівень зберігання й аналізу. Запропонована архітектура забезпечує масштабованість до необмеженої кількості вузлів моніторингу в межах однієї Wi-Fi-мережі.

4. Розроблено програмне забезпечення сенсорних вузлів у середовищі Arduino IDE. Реалізовано алгоритми циклічного опитування сенсорів.

5. Розроблено та реалізовано алгоритм прогнозування часу настання небезпечної ситуації — перевищення ГДН. Алгоритм формує попереджувальний сигнал за налаштованим часом випередження, що дозволяє завчасно вжити заходів безпеки до фактичного перевищення ГДН.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		56

6. Виконано метрологічний аналіз системи та оцінку невизначеності вимірювань концентрації небезпечних речовин відповідно до ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3.

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бетлей І. Д., Галасіс В.І., Романко О.В., Псуй В.Б. Моніторингові мережі на основі сенсорів ІоТ для автономного екологічного та промислового контролю - Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (АКІТ - 2026)», Тернопіль, 2026 – **с. 68-70.**
2. 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.
3. 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.
4. Основи метрології та вимірювальної техніки / Лис, О.М., Якименко, М.В., Шинкаренко [та ін.]. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 424 с.
5. Ванько В. М., Поліщук Є. С., Дорожовець М. М., Яцук В. О., Яцук Ю. В. Вимірювальні перетворювачі (сенсори) : підручник / за ред. Є. С. Поліщука, В. М. Ванька. — Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2015. — 580 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. Белова, 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:

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		58

https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25320/1/Obrobka_rezult._fizych._vymiriuvan.pdf.

10. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet v4.6. 2023. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

11. Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi Hardware Documentation. 2024. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>.

12. MQTT.org. MQTT Version 5.0 Specification. — OASIS Standard, 2019. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>.

13. PostgreSQL Global Development Group. PostgreSQL 16 Documentation. — 2024. URL: <https://www.postgresql.org/docs/16/>.

14. Mosher C., Kohn A. Telegraf + InfluxDB vs TimescaleDB: IoT Time-Series Benchmark. — Timescale Blog, 2023. URL: <https://www.timescale.com/blog/timescaledb-vs-influxdb-for-time-series-data-benchmarks-cost-performance/>

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

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

					ДП.МТІР.1065863.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		59