

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

БЕТЛЕЙ ІГОР ДМИТРОВИЧ

IoT-система виявлення хімічних загроз / IoT system for detecting chemical threats

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

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
МТІР – 41 І.Д.Бетлей

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
Бетлея Ігоря Дмитровича
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

IoT-система виявлення хімічних загроз / IoT system for detecting chemical threats

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 хімічних забруднень.
2. Обґрунтування вибору сенсорів для ідентифікації та вимірювання хімічних забруднень
3. Системи вимірювання концентрації шкідливих речовин з використанням мікроконтролерів.
4. Характеристики сучасних мікроконтролерів

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Особливості побудови пристроїв вимірювання хімічних забруднень.
2. Структура IoT-системи виявлення хімічних загроз.
3. Технологія передачі даних про хімічні загрози.
4. Програмно-апаратна реалізація вузла вимірювання хімічних забруднень.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема IoT-системи виявлення хімічних загроз.
2. Схема підключення сенсорів.
3. Електрична схема вимірювального вузла.

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 1 грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Особливості побудови IoT – систем виявлення хімічних загроз	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.	
4	Апробація та оформлення роботи	1.05.26р. – 25.05.26р.	

Студент

_____ Бетлей І,Д.
(підпис)

Керівник роботи

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

РЕФЕРАТ

Стрімкий розвиток промисловості, транспорту та підвищення техногенних ризиків зумовлюють необхідність створення ефективних засобів безперервного моніторингу небезпечних хімічних речовин у навколишньому середовищі. Традиційні стаціонарні системи хімічного аналізу відрізняються значною вартістю та обмеженою гнучкістю розгортання, тоді як мережі IoT-сенсорів дозволяють організувати розподілений моніторинг у режимі реального часу.

Мета роботи — розробка IoT-системи виявлення хімічних загроз і передачею даних до мобільного клієнта.

У роботі вирішено завдання аналізу фізико-хімічні властивостей небезпечних речовин та методи їх виявлення, розглянуто принципи побудови мікроконтролерних вимірювальних систем із сенсорами серій MQ та TGS; досліджено методику оцінювання невизначеності вимірювань відповідно до настанов GUM, розроблено структурні схеми та алгоритми функціонування системи та описано апаратно – програмну реалізацію запропонованих рішень, проведено метрологічний аналіз системи та визначено її основні характеристики.

Методи дослідження. Використано методи системного аналізу, теорії вимірювань та метрології при оцінюванні похибок і невизначеностей; методи програмування при розробці програмного забезпечення; статистичні методи при обробці результатів вимірювань.

Структура роботи. Бакалаврська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить ____ сторінок, з яких основного тексту ____ сторінок. Робота містить ____ рисунків, ____ таблиць, ____ бібліографічних посилань.

Ключові слова: ІОТ-СИСТЕМА, ХІМІЧНІ ЗАГРОЗИ, ГАЗОВІ СЕНСОРИ, ESP32, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ, МІКРОКОНТРОЛЕР, MQTT, МОБІЛЬНИЙ КЛІЄНТ, МОНІТОРИНГ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН, МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.

ABSTRACT

The rapid development of industry, transport and the increase in technogenic risks necessitate the creation of effective means of continuous monitoring of hazardous chemicals in the environment. Traditional stationary chemical analysis systems are characterized by significant cost and limited flexibility of deployment, while IoT sensor networks allow for the organization of distributed monitoring in real time.

The purpose of the work is to develop an IoT system for detecting chemical threats and transmitting data to a mobile client. The work solves the problem of analyzing the physicochemical properties of hazardous substances and methods for their detection, considers the principles of building microcontroller measuring systems with MQ and TGS series sensors; investigates the methodology for assessing measurement uncertainty in accordance with the GUM guidelines, develops structural diagrams and algorithms for the system's operation, describes the hardware and software implementation of the proposed solutions, conducts a metrological analysis of the system and determines its main characteristics.

Research methods. Methods of system analysis, measurement theory and metrology were used in the assessment of errors and uncertainties; programming methods in software development; statistical methods in processing measurement results. Structure of the work. The bachelor's thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used and appendices. The total volume of the work is _____ pages, of which the main text is _____ pages.

The work contains _____ figures, _____ tables, _____ bibliographical references.

Keywords: IOT-SYSTEM, CHEMICAL THREATS, GAS SENSORS, ESP32, UNCERTAINTY OF MEASUREMENT, MICROCONTROLLER, MQTT, MOBILE CLIENT, MONITORING OF HAZARDOUS SUBSTANCES, METROLOGICAL SUPPORT.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
Розділ 1. Аналіз хімічних загроз та особливостей їх виявлення	14
1.1. Класифікація небезпечних викидів та джерела їх виникнення	14
1.2. Методи вимірювання концентрації газоподібних шкідливих речовин	17
1.3. Аналіз існуючих систем моніторингу повітря	21
1.4. Системи інтернету речей та постановка задачі.	25
Розділ 2. Проектування апаратно-програмного забезпечення системи	27
2.1. Розробка архітектури IoT-системи та структурної схеми вимірювального модуля	27
2.2. Обґрунтування та вибір елементної бази модуля	30
2.3. Аналіз метрологічних характеристик та невизначеності вимірювань	37
Розділ 3. Розробка програмних компонентів системи інтернету речей	39
3.1. Організація Mesh-мережі автономних сенсорних вузлів	39
3.2 Програмна реалізація збору інформації сенсорів	46
3.3. Реалізація процесів обробки даних та формування попереджень	50
Висновки	54
Список використаних джерел	55
ДОДАТКИ	57

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	IoT-система виявлення хімічних загроз/ IoT system for detecting chemical threats	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Бетлей І.Д.						
Перевірів.		Масляк Б.О.					6	62
Консульт.						ЗУНУ.ФКІТ. МТІР-41		
Н. Контр.		Масляк Б.О						
Затверд.		Сегін А.І.						

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ХНО - хімічно небезпечні об'єкти;
СДОР - сильнодіючі отруйні речовини;
ІоТ – технологія інтернету речей;
ГДК – гранично допустимі концентрації;
МК – мікроконтролер;
С – сенсор;
ВК – вимірювальний канал;
АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
І – інтерфейс передачі інформації;
ПЗ – програмне забезпечення;

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

У сучасному світі техногенні та екологічні загрози набувають безпрецедентних масштабів і непередбачуваності. Глобалізація промислового виробництва, інтенсивне використання хімічних речовин у різних галузях, старіння інфраструктури, а також наслідки воєнних дій суттєво підвищують ймовірність аварій з викидами небезпечних газів [1, 2]. В Україні ситуація особливо гостра через повномасштабне вторгнення росії, яке призвело до численних руйнувань критичної інфраструктури, промислових об'єктів та екологічних катастроф. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, з початку повномасштабної війни зафіксовано сотні випадків забруднення повітря, ґрунтів і водойм токсичними речовинами.

Серед найрезонансніших інцидентів — влучання в цистерни з аміаком на підприємстві «Сумихімпром» у березні 2022 року, що спричинило утворення зони ураження радіусом до 2,5 км і потребувало евакуації населення; підриви резервуарів з азотною кислотою в Рубіжному та Сєвєродонецьку в квітні 2022 року, які призвели до витоку хімікатів і отруєння ґрунтів та водних об'єктів; масові пожежі на нафтобазах (наприклад, у Крячках на Київщині), що супроводжувалися викидами понад 20 тис. тонн забруднюючих речовин в атмосферу; а також руйнування Каховської ГЕС у червні 2023 року, яке спричинило затоплення 620 км² територій, вимивання важких металів, пестицидів і добрив у Дніпро та Чорне море. Крім того, інтенсивне використання пестицидів і мінеральних добрив у сільському господарстві, посилене воєнними умовами (затоплення полів, ерозія ґрунтів від техніки та вибухів), призводить до систематичного забруднення поверхневих і підземних вод, де концентрації нітратів, фосфатів та органічних сполук перевищують норми в рази.

Ці події не є поодинокими — вони відображають системну проблему: воєнні дії руйнують склади хімікатів, трубопроводи, очисні споруди, що спричиняє витoki токсичних речовин (аміак, азотна кислота, нафтопродукти), масове забруднення ґрунтів важкими металами (свинець, мідь, цинк),

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

пестицидами та залишками вибухівки, а також отруєння водойм. Традиційні стаціонарні системи моніторингу, обмежені кількістю державних постів, виявляються недостатньо ефективними: вони не забезпечують достатнього просторового покриття, часто мають значну затримку в отриманні даних і не здатні оперативно реагувати на локальні, але дуже небезпечні події, такі як раптовий витік метану, чадного газу чи сірководню.

Саме тому оперативний, безперервний і розподілений моніторинг концентрації небезпечних газів (CO, CH₄, H₂S, NO₂, SO₂, леткі органічні сполуки, хлор) перетворився на одну з ключових потреб суспільства. Такий моніторинг необхідний не лише для промислових об'єктів (хімічні, нафтогазові, металургійні підприємства, склади, котельні), а й для міських, екологічно вразливих зон, прикордонних територій, транспортних коридорів та місць масового скупчення людей. Затримки у виявленні перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) навіть на кілька хвилин може призвести до масових уражень, пожеж, вибухів або хронічного отруєння населення.

Значний прогрес у вирішенні цієї проблеми забезпечує технологія Інтернету речей (IoT). Завдяки мініатюризації сенсорів, зниженню їхньої вартості, появі енергоефективних мікроконтролерів (ESP32, STM32, Raspberry Pi Pico), розвитку низькоенергетичних широкосмугових мереж передачі інформації (LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M) та потужним хмарним платформам (AWS IoT, Google Cloud IoT, ThingSpeak, Azure IoT Hub) стало можливим створювати розподілені, масштабовані системи моніторингу, які працюють у реальному часі, охоплюють великі території та автоматично генерують сповіщення при досягненні критичних значень. За прогнозами аналітиків на 2025–2030 роки, ринок IoT-систем для моніторингу якості повітря та виявлення небезпечних газів зростатиме з темпами 20–30% на рік, досягаючи десятків мільярдів доларів. Це зумовлено як посиленням екологічних регуляцій (нові директиви ЄС щодо граничних концентрацій шкідливих викидів), так і широким впровадженням концепції «розумних міст» та «індустрії 4.0».

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

У контексті розробки IoT-систем моніторингу важливе значення мають українські та міжнародні стандарти щодо гранично допустимих концентрацій (ГДК) небезпечних газів в атмосферному повітрі населених пунктів. В Україні основні нормативи встановлені Державними санітарними правилами охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами), затвердженими наказом МОЗ України від 09.07.1997 № 201 (зі змінами), а також відповідними наказами МОЗ та постановами Кабінету Міністрів. Для ключових газів, що є об'єктом моніторингу в цій роботі, діють такі значення (мг/м³):

- Оксид вуглецю (CO): максимально разова ГДК — 5,0; середньодобова — 3,0.
- Діоксид сірки (SO₂): максимально разова — 0,5; середньодобова — 0,05.
- Діоксид азоту (NO₂): максимально разова — 0,2; середньодобова — 0,04.
- Сірководень (H₂S): максимально разова та середньодобова — 0,008.
- Метан (CH₄) та багато інших вуглеводнів: як правило, не мають жорстких ГДК в атмосферному повітрі населених пунктів (на відміну від повітря робочої зони), але контролюються за сумарним впливом або як вибухонебезпечні речовини.

Ці нормативи спрямовані на запобігання рефлексним реакціям (максимально разова ГДК) та загальнотоксичній, мутагенній, канцерогенній дії (середньодобова ГДК). Вони гармонізуються з європейськими вимогами в рамках Угоди про асоціацію Україна–ЄС та поступово адаптуються до Директиви 2008/50/ЄС про якість атмосферного повітря.

На міжнародному рівні ключовими є рекомендації Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) у Global Air Quality Guidelines 2021, які встановлюють суворіші рівні для захисту здоров'я населення [1, 2]:

- NO₂: річний — 10 мкг/м³; 24-годинний — 25 мкг/м³.
- SO₂: 24-годинний — 40 мкг/м³.
- CO: 24-годинний — 4 мг/м³.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

Для озону та РМ також суттєво знижені рекомендації, але для токсичних газів як H_2S чи CH_4 ВООЗ фокусується на контексті промислової безпеки та специфічних ризиків.

Ці рекомендації ВООЗ 2021 року є орієнтиром для національних стандартів у багатьох країнах, включаючи ЄС (де граничні значення для NO_2 — річний 40 мкг/м^3 , але з тенденцією до зниження), і слугують основою для оцінки ризиків у розроблюваній системі. Розробка IoT-системи враховує необхідність порівняння виміряних значень як з українськими ГДК (для відповідності національному законодавству), так і з рекомендаціями ВООЗ (для оцінки реального впливу на здоров'я та потенційної гармонізації з європейськими нормами).

Метою бакалаврської роботи є розробка функціональної IoT-системи для виявлення та оперативного оповіщення про небезпечні хімічні речовини в атмосферному повітрі. Система повинна поєднувати мережу компактних сенсорних вузлів, локальну обробку даних на базі мікроконтролерної платформи, надійну бездротову передачу інформації та хмарний сервіс для агрегації, аналізу, візуалізації даних, зберігання історії вимірювань і автоматичного формування тривожних повідомлень (push-повідомлення, email, SMS, інтеграція з Telegram-ботами тощо).

Для реалізації мети передбачається послідовно вирішити комплекс взаємопов'язаних завдань. Насамперед буде проведено ґрунтовний аналіз основних типів хімічних загроз, що виникають у повітрі промислових і міських зон, а також сучасних методів їх виявлення — від класичних хімічних реактивних трубок до сучасних електрохімічних, напівпровідникових, оптичних та PID-сенсорів. Далі детально досліджуються метрологічні характеристики, переваги, недоліки та особливості застосування різних типів газових сенсорів (MQ-серія, Figaro, Alphasense, SPEC Sensors, Sensirion тощо) саме в умовах IoT-систем з урахуванням чутливості, селективності, часу відгуку, енергоспоживання, дрейфу нуля та потреби в періодичній калібровці.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

На основі отриманих даних проектується загальна архітектура системи моніторингу, яка включає рівні: сенсорний (периферійні вузли), шлюзовий (агрегація та первинна обробка), транспортний (протоколи LoRaWAN / Wi-Fi / MQTT), хмарний (зберігання, аналітика, візуалізація) та клієнтський (веб-дашборд, мобільний додаток). Наступний етап — розробка апаратної частини: вибір компонентної бази, складання принципової та монтажною схем, виготовлення прототипу сенсорного вузла з урахуванням захисту від зовнішніх впливів (IP54–IP65), забезпечення автономного живлення (акумулятори + сонячні панелі) та мінімізації енергоспоживання.

Паралельно виконується програмування мікроконтролера: реалізація зчитування аналогових/цифрових сигналів сенсорів, фільтрація шумів, компенсація температурної та вологісної залежності (за потреби), калібрувальні коефіцієнти, формування пакетів даних, реалізація протоколу передачі даних. Окремий блок робіт присвячується налаштуванню каналу передачі даних у хмарне середовище з гарантуванням надійності (ретрансляція, буферизація), безпеки (шифрування, автентифікація) та мінімізації трафіку.

Об'єктом дослідження є процес безперервного моніторингу концентрації небезпечних газів у навколишньому повітряному середовищі в умовах потенційних техногенних загроз. Предметом дослідження виступають методи, алгоритми та технічні засоби побудови розподілених IoT-систем, призначених для точного вимірювання, оперативного виявлення та інформування про перевищення концентрацій хімічно небезпечних речовин.

У роботі застосовується ряд методів: теоретичний аналіз науково-технічної літератури, стандартів; аналіз метрологічних характеристик сенсорів; математична та статистична обробка масивів вимірювань (фільтрація, регресійний аналіз, визначення похибок); програмування вбудованих систем (C/C++, Arduino IDE); моделювання поведінки системи.

Практичне значення розробленої системи полягає в її універсальності та потенціалі застосування в кількох критичних сферах. Вона може ефективно використовуватися для постійного моніторингу якості атмосферного повітря в

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

містах, промислових зонах, біля доріг з інтенсивним рухом. Система придатна для раннього виявлення витоків газу на підприємствах, у котельнях, складах, гаражах, житлових будинках. Вона суттєво підвищує рівень промислової та екологічної безпеки на хімічних, нафтогазових, енергетичних об'єктах, де ризик аварій з викидом токсичних речовин залишається високим. Крім того, розробка може стати технічною основою для створення локальних, регіональних або галузевих систем раннього попередження про хімічні загрози — як у мирний час, так і в умовах надзвичайних ситуацій техногенного чи воєнного характеру.

Таким чином, створення доступної, масштабованої та надійної IoT-системи виявлення хімічних загроз є своєчасним науково-технічним завданням, що органічно поєднує сучасні досягнення інформаційних технологій, сенсорики та хмарних обчислень з нагальними вимогами забезпечення безпеки людини, охорони довкілля та стійкості критичної інфраструктури в умовах зростаючої техногенної та геополітичної напруги.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

Розділ 1. АНАЛІЗ ХІМІЧНИХ ЗАГРОЗ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ

1.1. Класифікація небезпечних викидів та джерела їх виникнення

Небезпечні хімічні викиди, зокрема викиди сильнодіючих отруйних речовин (СДОР), становлять одну з ключових техногенних загроз для населення, довкілля та економіки України. Вони виникають унаслідок аварій на промислових об'єктах, транспортних інцидентів або руйнувань інфраструктури, що призводить до масового ураження людей, забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і водних об'єктів, а також до довгострокових екологічних наслідків. У контексті розробки IoT-системи виявлення хімічних загроз розуміння класифікації СДОР, основних джерел їх виникнення та територіального розподілу ризиків дозволяє оптимізувати вибір сенсорів (газоаналізатори для хлору, аміаку, сірководню тощо), алгоритми обробки даних, порогові значення тривоги та географічне розміщення вузлів моніторингу в зонах максимального ризику [1, 2].

Класифікація небезпечних хімічних речовин здійснюється за кількома основними критеріями. За ступенем небезпеки для здоров'я людини (згідно з ГОСТ 12.1.007-76 – скасований 01.01.2019, однак його класифікація використовується до сьогодні) та Технічним регламентом класифікації небезпечності... (постанова КМУ № 539 від 10.05.2024), гармонізований з CLP/GHS «...речовини поділяються на чотири класи залежно від гранично допустимої концентрації (ГДК) у повітрі робочої зони:

- I клас – надзвичайно небезпечні (ГДК < 0,1 мг/м³, наприклад, фосген, синильна кислота);
- II клас – високонебезпечні (ГДК 0,1–1,0 мг/м³, наприклад, хлор, акролеїн);
- III клас – помірнонебезпечні (ГДК 1,1–10,0 мг/м³, наприклад, сірководень);

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

- IV клас – малонебезпечні ($\text{ГДК} > 10,0 \text{ мг/м}^3$, наприклад, аміак, оксид вуглецю)».

«За характером токсичної дії на організм людини СДОР класифікують на сім груп:

- 1) речовини переважно удушливої дії (хлор, фосген, хлорпікрин);
- 2) речовини загальнотоксичної дії (оксид вуглецю, синильна кислота);
- 3) речовини комбінованої удушливої та загальнотоксичної дії (сірководень, оксиди азоту);
- 4) нейротропні отрути (фосфорорганічні сполуки, сірковуглець);
- 5) речовини з удушливою та нейротропною дією (аміак);
- 6) метаболічні отрути (етиленоксид, метилбромід);
- 7) речовини, що порушують обмін речовин (діоксан)».

Додатково застосовується класифікація за фізичним станом (гази, пари, аерозолі, рідини), стійкістю в довкіллі (стійкі/нестійкі) та за Глобально гармонізованою системою класифікації та маркування хімічних речовин (GHS), що впроваджується в Україні через Технічний регламент CLP - український нормативний документ, який регулює класифікацію небезпечності, маркування та пакування хімічної продукції. GHS виділяє фізичні небезпеки (вибуховість, займистість), небезпеки для здоров'я (токсичність, корозійність) та небезпеки для довкілля (аккумуляція в біосфері).

Найпоширенішими СДОР в Україні є аміак (близько 183 тис. т) та хлор, сірководень, фосген, синильна кислота, оксиди азоту та сірчаний ангідрид. Джерелами їх викидів виступають переважно антропогенні об'єкти:

- хімічні та нафтохімічні підприємства (виробництво добрив, кислот, хлору, нафтопереробка);
- склади та резервуари з великими запасами СДОР;
- транспортні системи (автоцистерни, залізничні вагони, аміакопроводи «Тольятті–Одеса»);
- сільськогосподарські комплекси (склади пестицидів, гербіцидів, аміачної селітри);

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15

- холодильні установки, очисні споруди та водоканали (аміак, хлор для дезінфекції).

Аварії виникають через розгерметизацію ємностей, помилки персоналу, корозію обладнання, транспортні інциденти, стихійні лиха або зовнішні впливи (військові дії, терористичні акти). В Україні функціонує понад 700–1500 хімічно небезпечних об'єктів (ХНО), на яких зберігається та використовується понад 285 тис. т СДОР.

Територіальний розподіл ризиків хімічних викидів в Україні є нерівномірним і залежить від концентрації промисловості, наявності ХНО та транспортних магістралей. Найвищий рівень хімічної небезпеки спостерігається в промислово розвинених східних і південних регіонах:

- Донецька область — найбільша кількість ХНО (близько 149–158 об'єктів), значні запаси аміаку, хлору та інших СДОР;

- Дніпропетровська область — близько 108 об'єктів, високий ризик через металургію, хімію та нафтопереробку;

- Харківська область — 80–103 ХНО, великі обсяги аміаку (до 15 тис. т), хлору (до 1 тис. т), проходить аміакопровід;

- Запорізька область — значна концентрація хімічних і металургійних підприємств;

- Одеська область — ризик через «Одеський припортовий завод», аміакопровід та портову інфраструктуру.

Підвищений ризик характерний для Луганської, Сумської, Полтавської, Черкаської та Івано-Франківської областей. Середній і низький рівень небезпеки — у західних регіонах (Тернопільська, Хмельницька, Чернівецька, Закарпатська, Волинська області), де переважає аграрний профіль і значно менше ХНО. У Київській області та м. Києві ризик підвищений через 18+ об'єктів у столиці (хлор, аміак), що потенційно загрожує великій кількості населення (понад 2,2 тис. осіб у зонах ураження). Загалом у зонах можливого хімічного зараження проживає понад 7–10 млн осіб (18–25% населення країни).

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

Території з нижчим ризиком — це переважно західні та північні регіони з меншою промисловою насиченістю, де домінують сільське господарство та туризм. Однак навіть тут існують локальні ризики через склади пестицидів, водоканали та транспорт.

Таким чином, класифікація СДОР дозволяє IoT-системі диференціювати сигнали сенсорів за типом речовини (наприклад, окремі канали для хлору та аміаку), а аналіз джерел і територіального розподілу ризиків — формувати «карту хімічної загрози» для пріоритетного розміщення датчиків. Найвища щільність вузлів моніторингу повинна бути в промислових центрах сходу та півдня (Донецька, Дніпропетровська, Харківська, Запорізька, Одеська області), біля аміакопроводів, великих складів і транспортних вузлів. У регіонах з нижчим ризиком достатньо менш щільної мережі для раннього попередження. Такий підхід значно підвищує швидкість виявлення, точність локалізації та ефективність реагування на потенційні викиди, мінімізуючи наслідки для населення та довкілля.

1.2. Методи вимірювання концентрації газоподібних шкідливих речовин

Виявлення газоподібних сильнодіючих отруйних речовин (СДОР) у реальному часі є основою IoT-системи моніторингу хімічних загроз. Головне завдання — оперативно реєструвати перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) таких газів, як аміак (NH_3), хлор (Cl_2), сірководень (H_2S), оксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO_2), фосген (COCl_2), синильна кислота (HCN), оксиди сірки (SO_2/SO_3) та інші токсичні та/або вибухонебезпечні сполуки. Вихідний сигнал сенсора перетворюється в електричну величину (струм, напругу, опір, ємність чи частоту), яка пропорційна концентрації газу, після чого обробляється мікроконтролером, нормалізується, компенсується за температурою/вологістю та передається в хмарну платформу для аналізу, візуалізації, генерації тривоги та прогнозування поширення хмари ураження [5].

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Сучасні газові сенсори класифікуються за принципом дії, а ключовим аспектом є саме характер вихідного сигналу та спосіб його отримання. Нижче розглянуто основні їх типи з акцентом на механізм генерації сигналу, типові вихідні параметри та їх адаптацію до IoT-систем [3-5].

Електрохімічні сенсори - найпоширеніший і найбільш надійний тип для низькоконцентраційного виявлення токсичних газів (ppm та ppb-рівень для виявлення мільйонної та мільярдної часток). Принцип: цільовий газ дифундує через капілярну мембрану до робочого електрода, де відбувається окиснення (для відновлювальних газів, наприклад CO, H₂S, NH₃) або відновлення (для окиснювальних, наприклад Cl₂, NO₂, O₃) з участю електроліту. Реакція генерує електронний потік (анодний або катодний струм), пропорційний кількості молекул газу, що прореагували (закон Фарадея).

Вихідний сигнал: мікроамперний струм (зазвичай 0,1–10 μA/ppm залежно від газу та чутливості), який перетворюється в напругу через вхідний підсилювач (TIA). Типові діапазони: 0–100/500/1000 ppm.

Переваги: висока селективність (завдяки вибору електроліту та потенціалу), низьке енергоспоживання (10–100 μW), лінійність, швидка реакція (5–30 с).

Недоліки: чутливість до вологості (компенсується вбудованим датчиком або алгоритмом), обмежений термін служби (2–5 років), потреба в кисні для деяких реакцій.

Приклади в IoT:

- NH₃: ME3-NH3, SPEC Sensors NH3 — струм ~0,5–1 μA/ppm;
- Cl₂: Alphasense CL2-A1 — ~0,4 μA/ppm;
- H₂S: Winsen ME4-H2S — ~1 μA/ppm;
- CO, NO₂, SO₂, HCN — аналогічні моделі від Membrapor, City Technology.

У IoT-вузлах сигнал зчитується через АЦП (12–16 біт), обробляється для компенсації та передається по LoRaWAN/NB-IoT.

Метал-оксидні напівпровідникові сенсори (MOS / MOX)

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

Принцип: тонка плівка оксиду металу (SnO_2 , ZnO , WO_3 , In_2O_3) нагрівається до 200–400 °C. На поверхні адсорбується кисень з повітря, утворюючи негативно заряджені іони O^-/O_2^- , що створює зону збіднення носіями заряду та підвищує опір. При контакті з відновлювальним газом (CO , H_2 , NH_3 , H_2S , CH_4) відбувається реакція, що віддає електрони в зону провідності → опір падає. Окиснювальні гази (NO_2 , O_3) забирають електрони → опір зростає (для n-типу; p-тип поводить протилежно).

Вихідний сигнал: зміна опору сенсора (від кількох кОм до МОм), яка вимірюється як зміна напруги в дільнику напруги або струму через сенсор. Часто виводиться як аналогова напруга (0–5 В) або цифровий сигнал після вбудованого перетворювача.

Переваги: низька вартість (1–10 USD), простота інтеграції.

Недоліки: низька селективність (перехресна чутливість), високе споживання нагрівача (100–500 мВт), повільна реакція (10–60 с), дрейф вимірювального каналу.

Приклади: MQ-135 (NH_3/CO_2), MQ-136 (H_2S), Figaro TGS-серія. В IoT використовуються як попередні детектори або в мультисенсорних масивах з подальшою обробкою ML для розпізнавання патернів.

Фотоіонізаційні детектори (PID)

Принцип: УФ-лампа (10,0–11,7 eV) випромінює фотони, які іонізують молекули газу, якщо їх енергія іонізації (IP) нижча за енергію лампи. Утворюються позитивні іони та вільні електрони, які під дією електричного поля збираються на електродах. Вихідний сигнал: іонний струм (фемтоампер – наноампер), пропорційний концентрації іонізованих молекул. Перетворюється в напругу або цифровий сигнал.

Переваги: висока чутливість (ppb-рівень), швидка реакція (<3 с), широкий спектр VOC та деяких СДОР.

Недоліки: висока вартість лампи, обмежений ресурс (500–1000 годин), чутливість до вологості.

Застосування: виявлення хлору, аміаку, VOC у промислових зонах.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

Недисперсійні інфрачервоні сенсори (NDIR)

Принцип: базується на законі Ламберта-Бера — поглинання ІЧ-випромінювання на характерних довжинах хвиль газом. Джерело ІЧ хвиль випромінює широкий спектр, фільтр пропускає лише поглинальну смугу газу, детектор (термопара, термопіле, PbSe) вимірює інтенсивність, що дійшла. Порівнюється з референтним каналом (без поглинання). Вихідний сигнал: напруга термопіле (мкВ–мВ), пропорційна інтенсивності світла після поглинання. Після підсилення та обробки — аналоговий (0–5 В, 4–20 мА) або цифровий (UART/I²C) вихід.

Переваги: висока стабільність, селективність, термін служби >10 років.

Недоліки: висока вартість, великі габарити, споживання 50–200 мВт.

Застосування: рідше для СДОР, частіше для CO₂, але можливе для CO, CH₄.

Оптичні методи високої чутливості (TDLAS, DOAS. Принцип: лазер (TDLAS — tunable diode laser) сканує вузьку лінію поглинання газу, детектор фіксує ослаблення або гармоніки (lock-in amplification). DOAS — широкосмуговий аналіз. Вихідний сигнал: інтенсивність світла (фотодіод → струм/напруга), друга гармоніка (2f) для підвищення чутливості (ppb–ppt). У IoT — UART/RS-485 вихід.

Застосування: моніторинг аміакопроводів, великих промислових зон.

У розроблюваній IoT-системі пропонується для підвищення точності застосовувати: компенсацію Т/в (DHT22 + алгоритми), періодичне калібрування, ML для зменшення перехресної чутливості, мультисенсорні модулі (ZE03, SMX100). Це забезпечить чутливість 0,1–1 ppm, час реакції <30 с, автономність до місяців та інтеграцію з бездротовими мережами. Такий підхід критично важливий для регіонів України з високим ризиком аварій.

Аналіз методів та сенсорів вимірювання концентрації газоподібних шкідливих речовин (СДОР) показав, що на сьогоднішній день існує достатній арсенал технічних рішень для створення ефективної IoT-системи виявлення хімічних загроз. Електрохімічні сенсори забезпечують найвищу селективність і чутливість на рівні 0,1–1 ppm при мінімальному енергоспоживанні, метал-

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

оксидні — дешевий попереднє виявлення проблем, PID і NDIR — підтвердження мінімальних рівнів забруднення.

Таким чином, проблема оперативного виявлення газоподібних хімічних загроз в Україні може бути ефективно вирішена вже сьогодні за допомогою доступних і недорогих сенсорів у складі IoT-системи.

1.3. Аналіз існуючих систем моніторингу повітря

Сучасна інфраструктура екологічної безпеки базується на розгалуженій мережі пристроїв, які класифікуються за рівнем точності, мобільністю та сферою їхнього безпосереднього застосування. Основним рушієм створення таких систем стала потреба у постійному контролі промислових зон та міських агломерацій, де концентрація шкідливих речовин може змінюватися миттєво через аварії або порушення технологічних процесів. На сьогоднішній день виділяють три ключові типи архітектур: стаціонарні державні пости, комерційні муніципальні рішення та громадські волонтерські мережі. Кожна з цих систем орієнтована на власний перелік хімічних сполук та використовує специфічні методи передачі телеметрії [5, 7-9].

Професійні промислові системи, наприклад, іспанської компанії Libelium – рисунок 1.1, що спеціалізуються на виявленні високотоксичних агентів, серед яких пріоритетними є аміак, хлор, сірководень та фосфін.



Рисунок 1.1 – Технічні рішення фірми Libelium

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

Ці речовини є надзвичайно небезпечними навіть у малих концентраціях, тому такі системи мають високу селективність і захист корпусу за стандартом IP67.

Відомі також переносні газові детектори різного призначення – частина з них приведена на рисунку 1.2.



Газовий детектор ОЗ (0–20 ppm)



Промисловий датчик хлору з сигналізацією (0–50 ppm, 4–20mA/RS485, світлова та звукова сигналізація)



Газовий детектор формальдегіду та ЛОС (НСНО, TVOC)

Рисунок 1.2 – Переносні аналізатори якості повітря

На відміну від них, муніципальні та громадські проекти, такі як польська мережа Airly або українська EcoCity, зосереджують увагу на продуктах горіння палива та міському смогу. Вони вимірюють вміст діоксиду азоту, чадного газу, озону та дрібнодисперсного пилу фракцій.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз систем моніторингу хімічних загроз

Назва системи	Речовини, що виявляються	Допустимі значення (ГДК)	Реакція системи та оповіщення	Архітектура та радіус покриття
Libelium Plug & Sense (Іспанія)	Cl ₂ , NH ₃ , H ₂ S, PH ₃	Cl ₂ : 0,1 мг/м ³ ; NH ₃ : 0,2 мг/м ³ ; H ₂ S: 0,008 мг/м ³	Активация реле (сирени, вентиляція), LoRaWAN/4G повідомлення на пульт ДСНС.	Промислова, автономна, IP67. Радіус LoRa до 15 км.
Airly Sensor (Польща)	NO ₂ , O ₃ , PM _{2,5} , PM ₁₀ , CO	NO ₂ : 0,2 мг/м ³ ; O ₃ : 0,16 мг/м ³ ; CO: 5,0 мг/м ³	Push-повідомлення, зміна кольору LED-індикатора.	Муніципальна, 220 В, GSM/LTE. Радіус точки ~500 м.

Назва системи	Речовини, що виявляються	Допустимі значення (ГДК)	Реакція системи та оповіщення	Архітектура та радіус покриття
EcoCity Oxygen (Україна)	НСНО, радіація, CO, NH ₃ , PM	НСНО: 0,035 мг/м ³ ; радіація: >30 мкЗв/год; NH ₃ : 0,2 мг/м ³	Telegram-боти, API для SaveEcoBot, візуалізація карті.	Волонтерська мережа, Wi-Fi/MQTT. Покриття залежить від щільності датчиків.
IAir AirVisual (Швейцарія)	CO ₂ , PM _{2,5} , PM ₁₀ , вологість	CO ₂ : 1000 ppm; PM _{2,5} : 25 мкг/м ³	Прогноз на 72 год, сповіщення на смартфон, вивід на LCD-екран.	Побутова/офісна, Wi-Fi, акумулятор. Для приміщень та відкритого повітря.

Примітка. ГДК — гранично допустима концентрація; VOC — леткі органічні сполуки; PM — тверді зважені частинки; MQTT — протокол передачі даних для IoT-пристроїв.

Відомі також вітчизняні розробки виявлення хімічно шкідливих речовин — таблиця 1.1, що зумовлено підвищеними техногенними ризиками в умовах воєнного стану.

Таблиця 1.1 – Вироби українських підприємств

Вид хімічної загрози	Вітчизняна розробка
Чадний газ (CO)	ДУГ-14
Аміак, H ₂ S, NO, Cl ₂ , SO ₂	ДОЗОР-С серія
Вибухонебезпечні гази	АНТ-3М, ДОЗОР-С-Пв
Формальдегід	Переважно лабораторний аналіз

Важливим параметром будь-якої системи є радіус її територіального покриття. Стаціонарні станції мають значні метрологічні переваги, проте їхній реальний радіус ефективного моніторингу обмежений кількома сотнями метрів у щільній міській забудові. Це створює проблему «інформаційних плям», коли між двома станціями можуть існувати зони з високим рівнем забруднення, які не фіксуються обладнанням. Сучасні IoT-рішення на базі протоколу LoRaWAN вирішують цю проблему набагато ефективніше, оскільки один шлюз забезпечує збір даних з автономних датчиків у радіусі до 5 кілометрів у місті та до 15 кілометрів на відкритій місцевості. Водночас громадські Wi-Fi мережі мають

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

найменшу стабільну зону покриття, яка повністю залежить від розташування домашніх роутерів користувачів.

Аналіз телеметрії (збору даних з попередньою обробкою) та способів реагування на надзвичайні ситуації показує значну невизначеність результатів вимірювань. Головною слабкою стороною бюджетних сенсорів є їхня чутливість до змін вологості та температури. Наприклад, під час сильного туману лазерні сенсори часто помилково фіксують критичне забруднення пилом, оскільки краплі води розсіюють промінь подібно до твердих часток. Крім того, електрохімічні сенсори газів схильні до так званого «дрейфу нуля», коли з часом їхня точність падає на кілька відсотків на місяць через природний знос хімічних реагентів всередині пристрою. Це створює серйозні метрологічні ризики, адже система може показувати хибну безпеку або, навпаки, провокувати паніку через помилкові тривоги.

Ще одним критичним недоліком існуючих систем є їхня вразливість перед перебоями в інфраструктурі зв'язку та електропостачання. Більшість громадських пристроїв припиняють передачу даних у момент вимкнення Wi-Fi або електрики, що робить їх неефективними саме в моменти реальних катастроф. Також спостерігається значна затримка у часі між фіксацією газу сенсором та появою інформації на карті. Цей проміжок може сягати десяти хвилин, що є критично довгим терміном для організації евакуації у випадку викиду хлору чи аміаку. Більшість систем працюють за принципом пасивного збору даних і не здатні самостійно приймати рішення про небезпеку на локальному рівні без зв'язку із центральним сервером.

З огляду на виявлені недоліки, перспективним напрямком вдосконалення є створення автономних IoT-вузлів із використанням технологій «обчислень на межі». Це передбачає перенесення логіки аналізу загрози безпосередньо на мікроконтролер пристрою. Перспективна система повинна автоматично корегувати показники хімічних величин залежно від погодних умов, нівелюючи вплив вологості на результати. Також необхідно забезпечити динамічну зміну частоти опитування сенсорів: у стані спокою пристрій економить енергію, але

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		24

при найменшій підозрі на витік газу він має миттєво переходити в режим реального часу та активувати локальні засоби сповіщення, такі як сирени чи світлові сигнали.

Таким чином, майбутнє систем моніторингу хімічних загроз передбачає повну автономність та мережеву живучість. Використання Mesh-технологій, де кожен датчик може передавати інформацію через своїх «сусідів», та незалежних протоколів зв'язку типу LoRaWAN дозволить створити надійну інформаційну сітку над небезпечними об'єктами. Результатом використання таких систем стане зменшення часу реакції на надзвичайні ситуації, підвищення точності вимірювань та забезпечення безперервного контролю екологічного стану навіть у найскладніших умовах експлуатації.

1.4. Системи інтернету речей та постановка задачі.

В результаті аналізу предметної області можемо констатувати, що сучасний стан техногенної та екологічної безпеки характеризується зростанням ризиків виникнення хімічних надзвичайних ситуацій як промислового, так і терористичного походження. Промислові підприємства хімічної, нафтопереробної та металургійної галузей, а також об'єкти критичної інфраструктури є потенційними джерелами витоку небезпечних хімічних речовин. За даними аналітичних звітів, щорічно у світі реєструється понад 200 000 інцидентів, пов'язаних із аварійними викидами токсичних сполук, що призводить до людських жертв, екологічних катастроф та значних матеріальних збитків [6].

Традиційні системи хімічного моніторингу мають суттєві недоліки: вони є стаціонарними, вимагають дорогого обладнання та кваліфікованого персоналу для обслуговування, а передача даних здійснюється із значними часовими затримками. Відсутність безперервного автоматизованого контролю не дозволяє

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

своєчасно виявляти перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) небезпечних речовин і оперативно реагувати на загрозу.

Концепція Інтернету речей (IoT) відкриває принципово нові можливості для побудови розподілених систем моніторингу навколишнього середовища. Мережа малопотужних сенсорних вузлів із бездротовою передачею даних та хмарною обробкою інформації дозволяє охопити великі площі, забезпечити безперервність спостереження та мінімізувати операційні витрати. Інтеграція IoT із методами машинного навчання відкриває можливості для прогностичного аналізу та автоматичного розпізнавання причин хімічного забруднення.

Визначення вимог до системи здійснено на підставі аналізу нормативних документів у сфері промислової безпеки, зокрема ДСТУ EN 45544-1:2019 «Прилади для виявлення токсичних газів» та ДСТУ EN 60079-29-1:2012 «Вибухозахищені прилади для виявлення горючих газів», а також можуть уточнюватися за результатами обстеження типових умов розгортання систем хімічного контролю.

Завданням наступних розділів є розробка IoT-системи виявлення хімічних загроз, яка забезпечує безперервний моніторинг концентрацій небезпечних речовин у повітрі, автоматичне розпізнавання аномальних станів та своєчасне сповіщення про перевищення допустимих рівнів забруднення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих підходів до хімічного моніторингу та IoT-архітектур для систем безпеки;
- визначити перелік хімічних речовин для детектування та відповідні типи газових сенсорів;
- розробити алгоритм виявлення аномалій та системи сповіщення;
- реалізувати апаратну архітектуру сенсорного вузла на базі мікроконтролера з підтримкою бездротового зв'язку;
- спроектувати програмне забезпечення для збору, передачі та обробки даних із сенсорів;

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		26

- реалізувати компоненти серверної частини системи з хмарним зберіганням даних та веб-інтерфейсом моніторингу;
- провести тестування та оцінювання ефективності розробленої системи.

Функціональні вимоги передбачають: вимірювання концентрацій щонайменше чотирьох класів небезпечних речовин; забезпечити частоту опитування сенсорів не рідше одного разу на хвилину; передачу даних на сервер у режимі реального часу з використанням протоколу MQTT; генерацію сповіщень при перевищенні порогових значень ГДК протягом не більше 10 секунд від моменту виявлення; збереження архівних даних упродовж не менше 12 місяців. Нефункціональні вимоги включають: автономну роботу сенсорного вузла від акумулятора; діапазон робочих температур від -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$; підтримку топології мережі з одночасним підключенням не менше 50 вузлів.

Розділ 2. ПРОЕКТУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

2.1. Розробка архітектури IoT-системи та структурної схеми вимірювального модуля

Система виявлення хімічних загроз є критично важливим інфраструктурним об'єктом, призначеним для безперервного моніторингу концентрацій шкідливих та небезпечних хімічних речовин у навколишньому середовищі. На відміну від класичних стаціонарних та переносних хімічних аналізаторів, запропонована концепція базується на розподіленій мережі автономних вимірювальних модулів, об'єднаних у самоорганізовану Mesh-мережу з хмарним сховищем даних – рисунок 2.1. Для її побудови скористаємося можливостями ППП PlantUML [6].

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

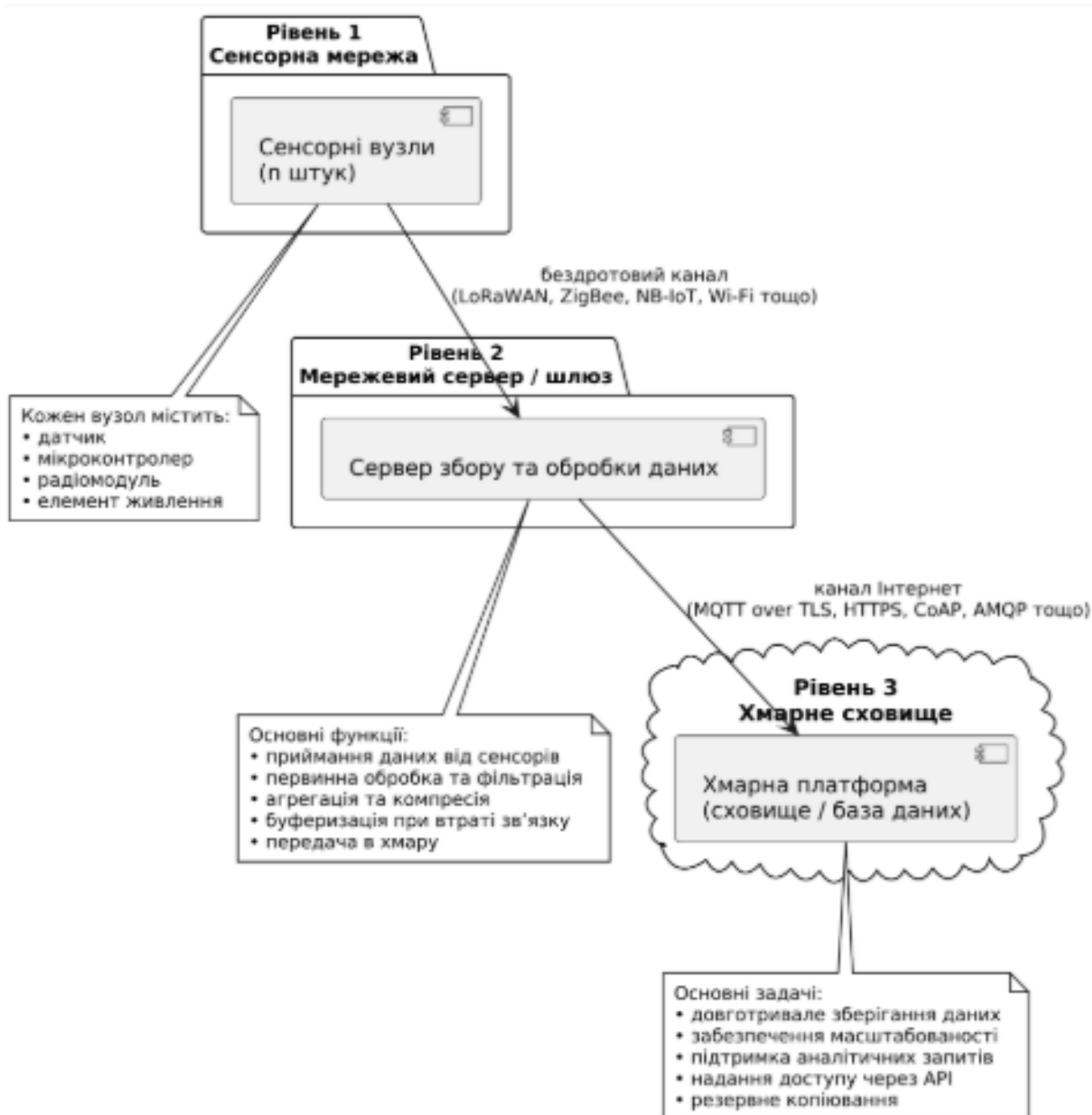


Рисунок 2.1 – Архітектура IoT системи виявлення хімічних загроз

Для реалізації даної системи запропонована архітектура побудована на основі чотирирівневої моделі, яка є загальноприйнятою у сфері промислового Інтернету речей (IIoT) і відповідає рекомендаціям Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) версії 1.9. Згідно даного стандарту для кожного рівню архітектури чітко визначені функції та процеси взаємодії з суміжними рівнями через стандартизовані інтерфейси, що забезпечує слабку зв'язність компонентів і незалежність їх розвитку – відкрита архітектура.

Графічне відображення взаємодії між усіма рівнями системи наведено на
рисунку 2.1.

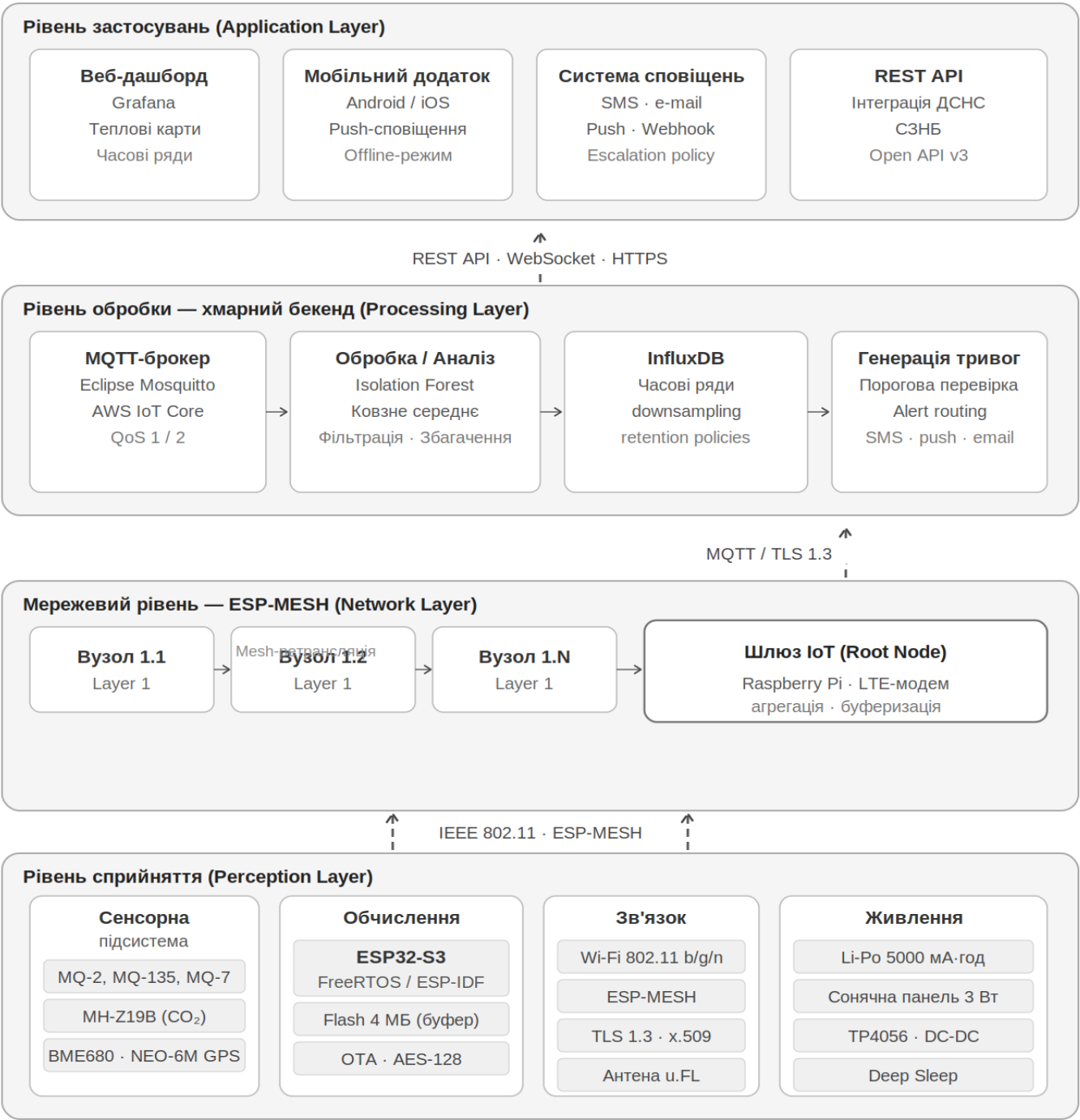


Рисунок 2.2 — Багаторівнева архітектура IoT-системи виявлення хімічних
загроз

Схема відображає ієрархічну структуру — від рівня сприйняття (вимірювальні модулі) через мережевий рівень (ESP-MESH та шлюз) до хмарного сховища й рівня застосувань.

Рівень сприйняття представлений автономними вимірювальними вузлами. Кожен вузол є функціонально завершеним пристроєм, здатним самостійно збирати, здійснювати первинну обробку та зберігання дані з підключених сенсорів. Центральним елементом вузла є мікроконтролер, наприклад ESP32, STM чи Raspberry Pi.

Мережевий рівень забезпечує утворення самоорганізованої Mesh-мережі, у якій кожен вузол може виступати як кінцевим пристроєм, так і ретранслятором, що розширює ефективний радіус покриття без додаткової інфраструктури. Мережа має деревоподібну топологію з одним або кількома кореневими вузлами (Root Node), які виконують функцію шлюзу між Mesh-сегментом і хмарою. Один або кілька виділених вузлів із наявністю широкосмугового підключення (Ethernet, LTE-модем або Wi-Fi доступ до мережі Інтернет) виконують роль шлюзу IoT. Шлюз агрегує пакети від усіх вузлів дерева, формує MQTT-повідомлення та зберігає їх у хмарі.

Хмарний рівень приймає потоки телеметрії (виміряної інформації) від усіх шлюзів. Дані зі сховища можуть поступати у конвеєр обробки, що включає модуль фільтрації та валідації, модуль збагачення даних, базу даних часових рядів, модуль аналізу та виявлення аномалій (метод ковзного середнього), модуль генерації тривоги.

2.2. Обґрунтування та вибір елементної бази модуля

Автономний сенсорний модуль є центральним апаратним вузлом IoT-системи виявлення хімічних загроз. Для його реалізації доцільно обрати готову апаратну платформу — модуль або плату розробки, що об'єднує мікроконтролер, радіотрансивер, пам'ять та опціонально допоміжні компоненти в єдиному корпусі з сертифікацією.

На підставі вимог, сформульованих у розділі 1.4, до апаратної платформи сенсорного модуля висуваються такі технічні критерії відбору:

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- наявність вбудованого Wi-Fi-трансивера (IEEE 802.11 b/g/n) з нативною підтримкою (вбудованою) протоколу ESP-MESH без додаткових зовнішніх радіомодулів;
- не менше 12–16 аналогових входів (АЦП) для підключення газових датчиків серії MQ та зовнішнього АЦП підвищеної роздільної здатності;
- наявність інтерфейсів I²C (×2), SPI, UART (×2 або більше) для цифрових датчиків (MH-Z19B, BME680, GPS) та дисплея;
- режим Deep Sleep зі споживанням менше 100 мкА для забезпечення автономної роботи;
- розширений температурний діапазон (не вужче –20...+70 °C);
- зрілий фреймворк для розробки програмних скетчів.

Для порівняльного аналізу відібрано три платформи, що широко застосовуються в IoT-рішеннях промислового та дослідницького рівня та мають вбудований або тісно інтегрований Wi-Fi. Це ESP32-C6-WROOM1 (Espressif Systems), Raspberry Pi Pico та STM32 NUCLEO-WB55RG (STMicroelectronics).

ESP32-C6-WROOM1 — це компактний модуль від компанії Espressif, призначений для створення IoT-пристроїв – рисунок 2.4 [11]. Він побудований навколо двоядерного мікроконтролера ESP32-D0WD-V3 (або подібного варіанту V3), який працює на частоті до 240 МГц. Модуль поєднує в собі Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth (включаючи BLE), що дозволяє легко підключати пристрої до інтернету або обмінюватися даними з смартфонами. На борту є вбудована PCB-антена (у версії 32E), SPI-флеш-пам'ять об'ємом 4, 8 або 16 МБ, а також до 26 доступних GPIO-пінів.

У програмі можна читати як аналоговий рівень (для точного вимірювання концентрації за допомогою калібрувальних формул), так і цифровий сигнал для простого тригера тривоги. ESP32-C6-WROOM1 дозволяє легко відправляти дані з MQ-датчиків через Wi-Fi на хмарні сервіси (Blynk, ThingsBoard, MQTT) або відображати їх на OLED-дисплеї.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

Завдяки потужному процесору, бездротовим можливостям і зручним аналоговим входам ESP32-C6-WROOM1 стає відмінною основою для створення чутливих і розумних систем виявлення забруднень.

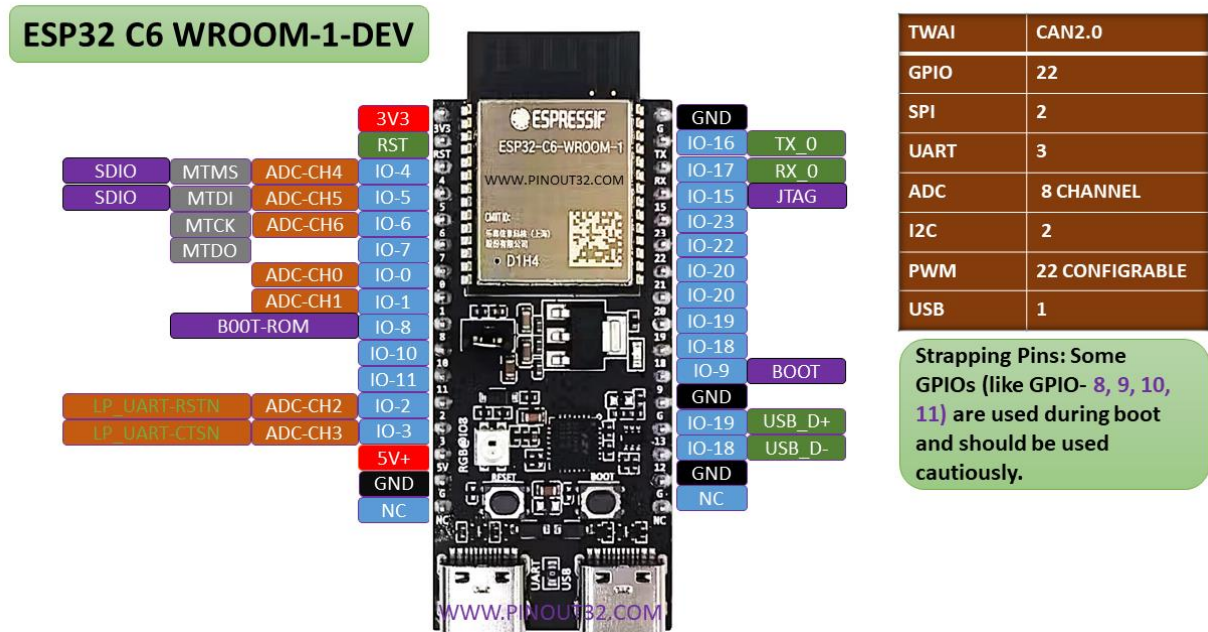


Рисунок 2.4 – Комп’ютерна платформа ESP32-C6-WROOM1

Завдяки потужному процесору, бездротовим можливостям і зручним аналоговим входам ESP32-C6-WROOM1 стає відмінною основою для створення чутливих і розумних систем виявлення газів.

Raspberry Pi Pico W — плата розробки (21×51 мм) на базі RP2040 (dual-core Cortex-M0+, до 133 МГц) з модулем Wi-Fi/BT Infineon CYW43439 (802.11 b/g/n, BT 5.2). Переваги: низька ціна (~6\$), унікальна підсистема вводу/виводу для нестандартних інтерфейсів, підтримка MicroPython. Недоліки: RP2040 має лише 4 АЦП-канали з яких 3 доступні на пінах не підтримує MESH і офіційної Wi-Fi Mesh бібліотеки для Raspberry Pi Pico W немає. В режимі сну споживає ~180 мкА (значно більше за ESP32), відсутні апаратне шифрування Flash та Secure Boot.

NUCLEO-WB55RG — плата розробки Nucleo-64 (70×120 мм) на базі STM32WB55RG (dual-core: Cortex-M4 @ 64 МГц + Cortex-M0+ @ 32 МГц для радіошару) – рисунок 2.5. Підтримує BLE 5.2, Zigbee, Thread (IEEE 802.15.4).

Переваги: найменше споживання у сні (~0,6 мкА Shutdown), потужна безпека (AES-256, Secure Boot), ST-LINK on-board. Недоліки для даної системи: Wi-Fi відсутній повністю — немає можливості реалізувати MESH - мережу; BLE Mesh або Thread Mesh потребують шлюзу для кожного вузла, що суперечить концепції системи; розмір плати 70×120 мм неприйнятний для польового корпусу; вартість ~40–45 \$. STM32WB55 має лише 10 АЦП-каналів, але без Wi-Fi цей критерій вже не актуальний.



Рисунок 2.5 - Плата розробки NUCLEO-WB55RG

За результатами порівняльного аналізу, для реалізації автономного сенсорного модуля обрано платформу ESP32-C6-WROOM1 виробництва Espressif Systems.

В результаті аналізу номенклатури газових сенсорів хімічного забруднення для побудови сенсорного вузла використаємо комбінацію кількох датчиків серії MQ. Це дозволить охопити широкий спектр небезпечних речовин: токсичні гази, леткі органічні сполуки (VOC), вибухонебезпечні гази, дим та специфічні отруйні речовини. MQ-сенсори недорогі, добре інтегруються з комп'ютерними платформами і дають змогу створити систему моніторингу. З цією метою

використаємо MQ-135, MQ-7 та MQ-2. MQ-135 — основний датчик для загальної хімічної загрози та якості повітря

MQ-135 виявляє: аміак (NH_3), сульфід, бензол, формальдегід, толуол, дим, CO_2 , NO_x та багато інших шкідливих VOC. MQ-7 виявляє CO — один з найнебезпечніших токсичних газів (без запаху і кольору). Він часто є маркером пожежі або витоку в хімічних процесах. MQ-2 виявляє: дим, пропан, бутан, метан, LPG, водень, алкоголь та реагує на дим і вибухонебезпечні гази, які можуть супроводжувати хімічні інциденти (витік пального або пожежа).

Кожен з сенсорів серії MQ має чотири виводи на модулі: VCC (живлення), GND (земля), A0 (аналоговий вихід) і D0 (цифровий вихід) - рисунок 2.3.



MQ-135



MQ-7



MQ-2

Рисунок 2.3 – Сенсори виявлення хімічно шкідливих речовин

A0 (аналоговий сигнал) підключають до будь-якого аналогового входу ESP32, наприклад GPIO34, GPIO35, GPIO32, GPIO33, GPIO36 (SENSOR_VP) або GPIO39 (SENSOR_VN). Ці піни належать до АЦП і добре працюють для вимірювання напруги. D0 (цифровий сигнал) можна підключити до будь-якого цифрового GPIO (наприклад, GPIO13 або GPIO14), якщо потрібна проста сигналізація «газ виявлено/не виявлено». Поріг спрацювання на цифровому виводі D0 регулюють потенціометром.

Модуль живиться від напруги 3,0–3,6 В і має невеликі розміри (приблизно $18 \times 25,5 \times 3,1$ мм), що робить його зручним для вбудовування в різні проекти. ESP32-C6-WROOM1 підтримує широкий набір периферії: аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП), цифро-аналогові (DAC), сенсори дотику, PWM, I²C, SPI, UART, I²S та інші інтерфейси.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

Підключення виконується згідно рисунку 2.4 наступним чином:

- VCC датчика підключають до джерела 5 В (рекомендовано зовнішнє стабільне живлення 5 В, оскільки нагрівальний елемент датчика потребує саме такої напруги; ESP32 сам живиться від 3,3 В).
- GND з'єднують із спільною землею ESP32.
- A0 (аналоговий сигнал) підключають до будь-якого аналогового входу ESP32, наприклад GPIO32-GPIO36 (SENSOR_VP) або GPIO39 (SENSOR_VN). Ці піни належать до АЦП1 і добре працюють для вимірювання напруги.
- D0 (цифровий сигнал) можна підключити до будь-якого цифрового GPIO (наприклад, GPIO13 або GPIO14), якщо потрібна проста сигналізація «газ виявлено/не виявлено». Поріг спрацювання на D0 регулюють потенціометром на модулі датчика.

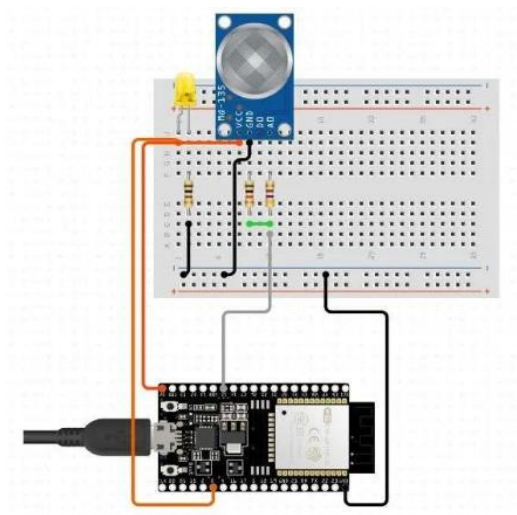


Рисунок 2.4 – Приклад схеми підключення сенсора

Схему з'єднань сенсорів з мікроконтролерною платформою приведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Виводи підключення сенсорів до виводів ESP32

Сенсор	VCC	GND	A0 (аналог)	D0 (цифровий / аварійний)
MQ-2	+5V	GND	GPIO34 + подільник	GPIO25 + дільник

Сенсор	VCC	GND	A0 (аналог)	D0 (цифровий / аварійний)
MQ-7	+5V	GND	GPIO35 + подільник	GPIO26 + дільник
MQ-135	+5V	GND	GPIO32 + подільник	GPIO27 + дільник
ESP32	3.3V	GND	—	—

Датчики серії MQ потребують прогрівання (warm-up) протягом 20–60 секунд або навіть кількох хвилин перед стабільними показаннями, тому в коді варто додати затримку на початку. Аналоговий сигнал з A0 змінюється залежно від концентрації газу — його зчитують через функції АЦП1_get_raw() або analogRead() в Arduino IDE. Оскільки ESP32 має 12-бітний АЦП, точність вища, ніж у багатьох інших мікроконтролерів.

Для живлення кількох MQ-датчиків одночасно краще використовувати окремий стабілізатор 5 В з достатньою потужністю (щонайменше 500–1000 мА), бо нагрівальні елементи споживають струм. Обов'язково з'єднуйте всі землі (ESP32 і датчиків) разом.

Таким чином, в даному розділі виконано обґрунтування та вибір елементної бази автономного сенсорного модуля IoT-системи виявлення хімічних загроз. За результатами порівняльного аналізу трьох апаратних платформ (ESP32-C6-WROOM1, Raspberry Pi Pico W, STM32 NUCLEO-WB55RG) обрано модуль ESP32-C6-WROOM1 виробництва Espressif Systems. Визначальними факторами вибору стали: єдина серед кандидатів вбудована підтримка протоколу ESP-MESH без зовнішніх радіомодулів та наявність АЦП (12 біт). Для виявлення широкого спектру хімічного забруднення обрано сенсори серії MQ, тобто MQ-135, MQ-7, MQ-2.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

2.3. Аналіз метрологічних характеристик та невизначеності вимірювань

У розробленій IoT-системі виявлення хімічних загроз основними вимірювальними елементами є напівпровідникові газові сенсори серії MQ-135, MQ-7 і MQ-2, сигнал з яких зчитується вбудованим 12-бітним аналогово-цифровим перетворювачем мікроконтролера ESP32-C6-WROOM1. Метрологічний аналіз цих компонентів дозволяє оцінити точність і надійність системи при визначенні концентрацій небезпечних речовин, таких як аміак, чадний газ, леткі органічні сполуки, дим і горючі гази.

Датчики серії MQ працюють на принципі зміни електричного опору чутливого шару діоксиду олова (SnO_2) під дією цільових газів. Кожен сенсор підключається через резистивний дільник напруги з навантажувальним резистором. Виробники заявляють для MQ-135 діапазон виявлення аміаку від 10 до 300 ppm, бензолу від 10 до 1000 ppm, а також високу чутливість до диму та інших шкідливих домішок. Сенсор MQ-7 призначений переважно для вимірювання чадного газу в діапазоні 10–2000 ppm, а MQ-2 ефективно реагує на дим, пропан, бутан, метан та інші горючі гази в межах від кількох сотень до кількох тисяч ppm. Усі датчики потребують стабільної напруги живлення нагрівача 5 В і тривалого періоду прогрівання від 24 до 48 годин для стабілізації показань.

Метрологічні характеристики датчиків мають суттєві особливості. Чутливість описується логарифмічною залежністю між відношенням опорів R_s/R_o і концентрацією газу. Проте датчики демонструють значну перехресну чутливість, коли один сенсор реагує на кілька різних газів одночасно. Крім того, покази сильно залежать від температури та відносної вологості навколишнього середовища, а також зазнають дрейфу з часом, який може сягати 10–15 % протягом кількох місяців експлуатації.

Аналогово-цифровий перетворювач ESP32-C6-WROOM1 має роздільну здатність 12 біт і номінальний діапазон вхідної напруги від 0 до 3,3 В. Реальна опорна напруга може коливатися в межах 1,0–1,2 В залежно від конкретного

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

кристала. Без додаткового калібрування ефективна точність АЦП знижується через нелінійність, шум і вплив роботи бездротового модуля Wi-Fi. Для підвищення метрологічних показників рекомендується застосовувати вбудовану калібрувальну бібліотеку `esp_АЦП_cal` та усереднювати результати кількох десятків вимірювань.

Основними джерелами невизначеності вимірювань є похибки самих датчиків, нелінійність і шум АЦП, нестабільність напруги живлення нагрівачів, толеранс навантажувальних резисторів, а також вплив зовнішніх факторів – температури і вологості. Комбінована стандартна невизначеність для MQ-135 становить приблизно 18–25 %, для MQ-7 – 15–22 %, а для MQ-2 – 20–28 %. При коефіцієнті охоплення $k = 2$ розширена невизначеність вимірювання концентрації газів у ppm досягає 30–56 %. У діапазоні низьких концентрацій ця невизначеність стає ще вищою через нелінійний характер характеристик сенсорів.

Отримані результати свідчать, що система на базі датчиків MQ і платформи ESP32 забезпечує прийнятну метрологічну надійність для завдання раннього виявлення та сигналізації про хімічні загрози. Вона дозволяє своєчасно реєструвати перевищення порогових рівнів небезпечних речовин. Водночас для точного кількісного визначення концентрацій газів у ppm необхідне індивідуальне калібрування кожного датчика в газовій камері, введення у вимірювальне коло схем компенсації температури та вологості, а також застосування додаткових алгоритмів цифрової обробки сигналу.

Таким чином, в результаті аналізу метрологічних характеристик та рівню невизначеності результату вимірювань слід відмітити придатність обраних компонентів для створення функціональної IoT-системи моніторингу хімічних загроз, але водночас необхідно приймати міри для подальшого вдосконалення процесу вимірювань з метою підвищення точності.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		38

Розділ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

3.1. Організація Mesh-мережі автономних сенсорних вузлів

Mesh-мережа (від англ. mesh — сітка) являє собою самоорганізовану бездротову мережу, у якій кожен вузол є одночасно кінцевим пристроєм і ретранслятором. Ключовими властивостями Mesh-мережі є багатошляхова маршрутизація, автоматичне виявлення сусідів, динамічна перебудова маршрутів при відмові окремих вузлів та масштабування без центральної точки управління. Саме ці властивості роблять Mesh-мережу оптимальною архітектурою для розподілених систем збору даних [6, 9, 12].

ESP32 є популярною апаратною платформою для побудови вузлів Mesh-мереж завдяки вбудованому Wi-Fi, підтримці режимів глибокого сну та широкій екосистемі бібліотек. Залежно від обраного протоколу зв'язку можливі різні варіанти реалізації Mesh: на базі Wi-Fi (протокол ESP-MESH), на базі власного низькорівневого протоколу ESP-NOW з прикладною маршрутизацією, а також із залученням зовнішнього ZigBee-радіомодуля. Нижче розглядаються ці три варіанти, кожен з яких реалізує повноцінну Mesh-топологію, але відрізняється протоколом, енергоспоживанням та характеристиками маршрутизації.

Протокол ESP-MESH розроблений компанією Espressif Systems і реалізований поверх стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi). Кожен вузол мережі одночасно функціонує у режимах точки доступу (SoftAP) і клієнта (Station), що дозволяє йому підключатися до сусідніх вузлів і приймати підключення від інших — саме так формується повноцінна Mesh-топологія без виділеної точки доступу. Один вузол виконує роль кореневого (root): він підключається до зовнішнього Wi-Fi-маршрутизатора і є точкою виходу в Інтернет для всіх інших вузлів мережі.

Маршрутизація в ESP-MESH є повністю автоматичною: протокол самостійно будує таблиці шляхів на основі якості каналів між сусідами і динамічно перебудовує маршрути при відмові будь-якого вузла, обираючи

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		39

обхідний шлях. Якщо кореневий вузол стає недоступним, протокол автоматично обирає новий корінь із числа активних вузлів. Мережа підтримує до 1000 вузлів і до 25 рівнів глибини. Разом із тим постійна активність Wi-Fi-радіо (споживання ~80-160 мА) робить ESP-MESH малопридатним для вузлів із батарейним живленням: режим глибокого сну не може бути використаний без відключення від Mesh, оскільки вузол виконує функцію ретранслятора для сусідів.

На рисунку 1 зображено топологію ESP-MESH Mesh-мережі: всі вузли рівноправні та з'єднані між собою по кількох шляхах. Виділений активний маршрут від вузла 4 до кореневого вузла є лише поточним оптимальним шляхом — при відмові будь-якої ланки протокол автоматично переключиться на резервний канал.

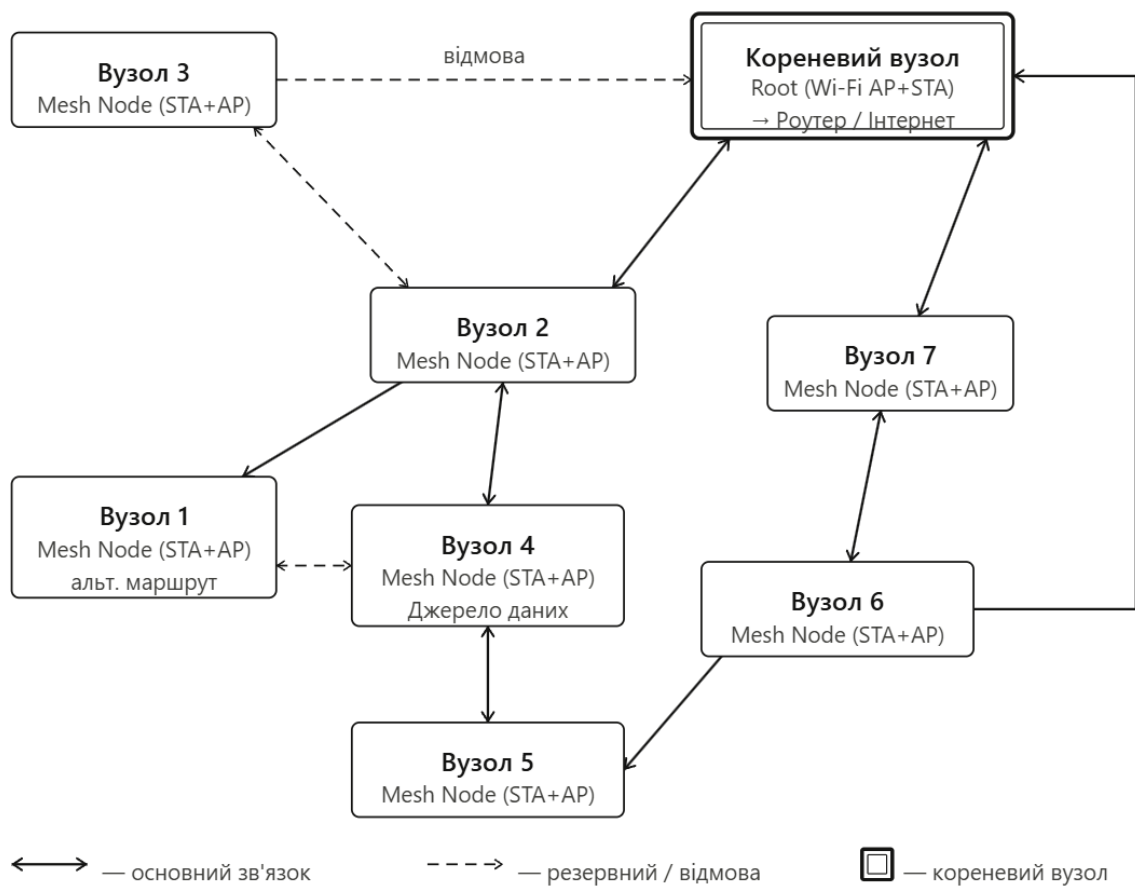


Рисунок 3.1 — Mesh-мережа ESP-MESH

ESP-NOW — це власний протокол Espressif, що забезпечує пряму передачу пакетів між вузлами на фізичному рівні Wi-Fi (802.11) без встановлення асоціації з точкою доступу та без задіяння повного Wi-Fi-стека. Пакети обсягом до 250 байт передаються напрямку між MAC-адресами з затримкою близько 1 мс, споживаючи значно менше енергії, ніж повноцінний Wi-Fi.

Mesh-маршрутизацію в ESP-NOW необхідно реалізувати на прикладному рівні самостійно. Кожен вузол зберігає у flash-пам'яті таблицю маршрутів: MAC-адреса призначення і MAC-адреса наступного стрибка (next hop). При отриманні пакету вузол звіряє адресу призначення з таблицею й ретранслює пакет далі. Таким чином реалізується багатострибкова (multi-hop) передача, характерна для Mesh-мережі. При відмові одного з каналів протокол сам по собі не має механізму перебудови маршруту — цю логіку розробник реалізує вручну, наприклад, через широкомовні RREQ/RREP-повідомлення за аналогією з протоколом AODV.

Вагомою перевагою ESP-NOW для автономних вузлів є можливість глибокого сну між сеансами передачі: вузол прокидається за таймером, виконує вимірювання, надсилає пакет найближчому ретранслятору і повертається у сон. Струм у режимі сну складає ~10 мкА, що забезпечує роботу від акумулятора ємністю 2000 мА-год протягом 1-3 років при інтервалі передачі кожні 5 хвилин. Ретрансляційні вузли мережі при цьому залишаються активними постійно.

Варіант на основі протоколу ZigBee є рекомендованим для побудови автономної сенсорної Mesh-мережі за сукупністю трьох ключових критеріїв: мінімальне енергоспоживання вузлів, стандартизована вбудована Mesh-маршрутизація та достатня дальність зв'язку для практичних застосувань — рисунок 3.2.

ZigBee — відкритий стандарт бездротового зв'язку (IEEE 802.15.4), спеціально розроблений для малопотужних сенсорних мереж. Він визначає повний мережевий стек від фізичного рівня до рівня застосунків, включаючи вбудований протокол Mesh-маршрутизації.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

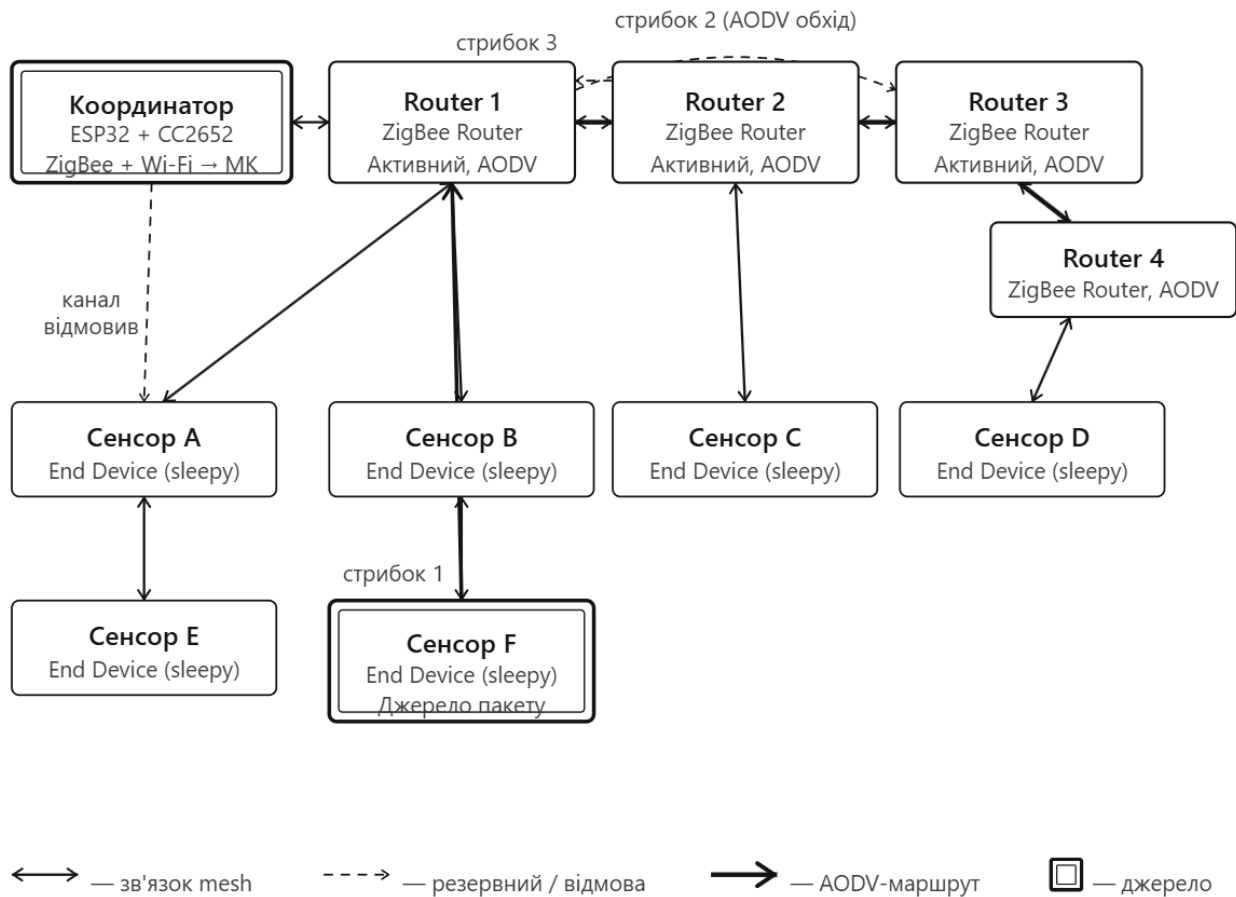


Рисунок 3.3 — ZigBee Mesh-мережа

Мережа ZigBee включає три функціональні ролі вузлів. Координатор (Coordinator) — один на всю мережу, формує Mesh, присвоює адреси, веде мережеву базу даних і виконує роль шлюзу до IP-інфраструктури. Маршрутизатори (Routers) — повністю активні вузли, що беруть участь у Mesh-маршрутизації та ретрансляції пакетів, розширюючи зону охоплення мережі. Кінцеві пристрої (End Devices, режим Sleepy End Device) — сенсорні вузли, що більшу частину часу перебувають у режимі глибокого сну і передають дані лише у заплановані моменти часу.

Mesh-маршрутизація у ZigBee реалізована вбудованим протоколом AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) на рівні ZigBee-стека, без участі мікропрограми розробника. При виникненні нового маршруту або відмові існуючого вузли автоматично обмінюються службовими повідомленнями, будують або оновлюють таблиці маршрутів і продовжують передачу по

обхідному шляху. Це принципова відмінність від ESP-NOW, де маршрутизацію потрібно кодувати вручну.

Струм споживання ZigBee End Device у режимі сну становить 1-5 мкА, а тривалість одного сеансу передачі — лише 10-50 мс при споживанні 15-30 мА. При інтервалі вимірювання 10 хвилин розрахунковий середній струм вузла не перевищує 20-30 мкА. Від двох батарей типу АА (3000 мА-год) такий вузол здатен працювати 3-7 років без обслуговування. Мережа підтримує до 65 000 вузлів у межах одного PAN-ідентифікатора, а завдяки Mesh-топології з кількома маршрутизаторами загальна зона покриття може охоплювати кілька сотень метрів або декілька поверхів будівлі.

Аналіз трьох варіантів реалізації Mesh-мережі показує, що для системи автономних сенсорних вузлів із вимогами низької швидкості передачі, тривалої роботи від акумулятора та надійної самоорганізованої маршрутизації оптимальним є варіант на основі протоколу ZigBee.

З точки зору швидкості передачі даних усі три варіанти є надлишковими для типових телеметричних даних (температура, вологість, рівень CO₂ тощо), проте ZigBee найточніше відповідає нижній межі вимог: 250 кбіт/с при тривалості сеансу 10-50 мс дозволяє передавати повний пакет даних із кількох сенсорів за один короткий сеанс. ESP-MESH (1-54 Мбіт/с) і ESP-NOW (1 Мбіт/с) значно перевищують цю потребу, але через Wi-Fi-радіо споживають суттєво більше енергії навіть під час передачі.

З точки зору надійності маршрутизації ZigBee має вирішальну перевагу: вбудований стандартизований протокол AODV автоматично виявляє відмови каналів і перебудовує маршрути без жодного рядка коду з боку розробника. В ESP-MESH маршрутизація також автоматична, але прив'язана до Wi-Fi і несумісна з режимом сну. В ESP-NOW розробник зобов'язаний самостійно реалізувати механізм виявлення відмов і перебудови маршрутів, що суттєво ускладнює розробку і збільшує ймовірність помилок у production-системі.

Таким чином, ZigBee Mesh забезпечує оптимальний баланс між низьким енергоспоживанням, надійністю Mesh-маршрутизації, масштабованістю та

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

простотою розгортання. Координатор ZigBee на базі ESP32 + CC2652R виконує роль шлюзу між ZigBee Mesh-мережею та IP-інфраструктурою, передаючи зібрані дані через Wi-Fi-маршрутизатор до хмарного сервісу.

Після виконання вимірювання сенсорним вузлом дані проходять п'ять послідовних етапів до їх збереження у хмарній базі даних. Кожен етап реалізований на відповідному рівні технологічного стека і є логічним продовженням попереднього – рисунок 3.3.



Рисунок 3.3 — П'ятистадійний процес передачі даних сенсорного вузла

На першому етапі сенсорний вузол (ZigBee End Device) прокидається за сигналом внутрішнього таймера, виконує вимірювання фізичного параметру через відповідний датчик, формує корисне навантаження у форматі JSON: ідентифікатор вузла, виміряні значення, напруга живлення, значення RSSI та мітка часу. Готовий пакет передається по стандарту IEEE 802.15.4 батьківському ZigBee-маршрутизатору. Тривалість активної фази вузла — 10-50 мс, після чого він негайно повертається у режим Sleepy End Device.

На другому етапі ZigBee-маршрутизатори мережі ретранслюють пакет по Mesh-ланцюжку до координатора. Маршрут визначається протоколом AODV автоматично: кожен маршрутизатор переглядає таблицю маршрутів і передає пакет наступному вузлу у напрямку координатора. У разі недоступності будь-якого вузла на маршруті AODV ініціює пошук нового шляху через сусідів.

На третьому етапі координатор (ESP32 + CC2652R) приймає ZigBee-фрейм, розпаковує корисне навантаження, виконує агрегацію пакетів від кількох

вузлів у спільний буфер і формує MQTT-повідомлення. Далі ESP32 підключається до локальної Wi-Fi-мережі та публікує дані до MQTT-брокера через TCP-з'єднання із шифруванням TLS 1.3. При відсутності зв'язку з Інтернетом пакети буферизуються у flash-пам'яті ESP32 і відправляються при відновленні підключення.

На четвертому етапі Wi-Fi-маршрутизатор отримує TCP/IP-пакети від координатора, виконує мережеву трансляцію адрес (NAT) і передає їх через Інтернет-канал до MQTT-брокера. Для захисту каналу застосовується шифрування TLS 1.3 із взаємною автентифікацією за сертифікатами X.509.

На п'ятому, фінальному, етапі MQTT-брокер (Eclipse Mosquitto, HiveMQ, AWS IoT Core, Google Cloud IoT або Azure IoT Hub) отримує повідомлення з рівнем якості QoS 1 (гарантована доставка хоча б один раз) і розподіляє їх між підписаними клієнтами: часовою базою даних (InfluxDB, TimescaleDB), системою візуалізації (Grafana, Node-RED Dashboard) або REST API для реалізації автоматичних сповіщень і керуючих дій.

Таким чином, в даному розділі розглянуто три варіанти реалізації Mesh-мережі автономних сенсорних вузлів на базі ESP32: з використанням протоколу ESP-MESH (Wi-Fi IEEE 802.11), протоколу ESP-NOW з прикладною Mesh-маршрутизацією та протоколу ZigBee (IEEE 802.15.4). Усі три варіанти реалізують повноцінну Mesh-топологію з багатошляховою маршрутизацією, однак відрізняються рівнем споживання, складністю реалізації маршрутизації та строком автономної роботи вузлів. Обгрунтовано вибір ZigBee Mesh як оптимального варіанту, що забезпечує струм сну 1-5 мкА, вбудовану автоматичну маршрутизацію AODV і строк служби вузла 3-7 років від батареї. Описано п'ятистадійний процес передачі телеметричних даних від ZigBee-сенсора через Mesh-мережу, координатор-шлюз і Wi-Fi-маршрутизатор до хмарного MQTT-брокера.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3.2 Програмна реалізація збору інформації сенсорів

Сенсорний вузол, реалізований на базі мікроконтролера ESP32-C6-WROOM-1 з підключеними до нього газовими датчиками MQ-135, MQ-7 та MQ-2, становить автономний елемент розподіленої системи моніторингу хімічних загроз, що функціонує в умовах Mesh-мережі на основі протоколу ZigBee. Процес його роботи починається з початкової ініціалізації апаратних і програмних компонентів, під час якої мікроконтролер завантажує необхідні бібліотеки, налаштовує АЦП для зчитування сигналів з сенсорів, а також активує стек протоколу ZigBee для приєднання до Mesh-мережі. ESP32-C6-WROOM-1 забезпечує стабільну роботу як у ролі кінцевого вузла, так і потенційного маршрутизатора, що дозволяє вузлу не лише збирати дані, а й ретранслювати інформацію від сусідніх пристроїв без додаткового апаратного втручання. Після завершення ініціалізації вузол переходить у безперервний операційний цикл, де основна увага приділяється регулярному збору даних про концентрацію шкідливих газів у повітрі. Блок-схема алгоритму роботи автономного сенсорного вузла приведена на рисунку 3.5 [11].

Кожний цикл вимірювань розпочинається з послідовного опитування трьох датчиків. Для датчика MQ-135, який реагує на широкий спектр забруднювачів, таких як аміак, оксиди азоту, бензол, дим і чадний газ, мікроконтролер спочатку активує відповідний аналогово-цифровий канал, забезпечуючи стабільну напругу живлення нагрівача датчика (зазвичай 5 В через зовнішній стабілізатор, оскільки ESP32-C6 працює на рівні 3,3 В). Потім виконується серія з десяти послідовних зчитувань аналогового сигналу з виходу

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

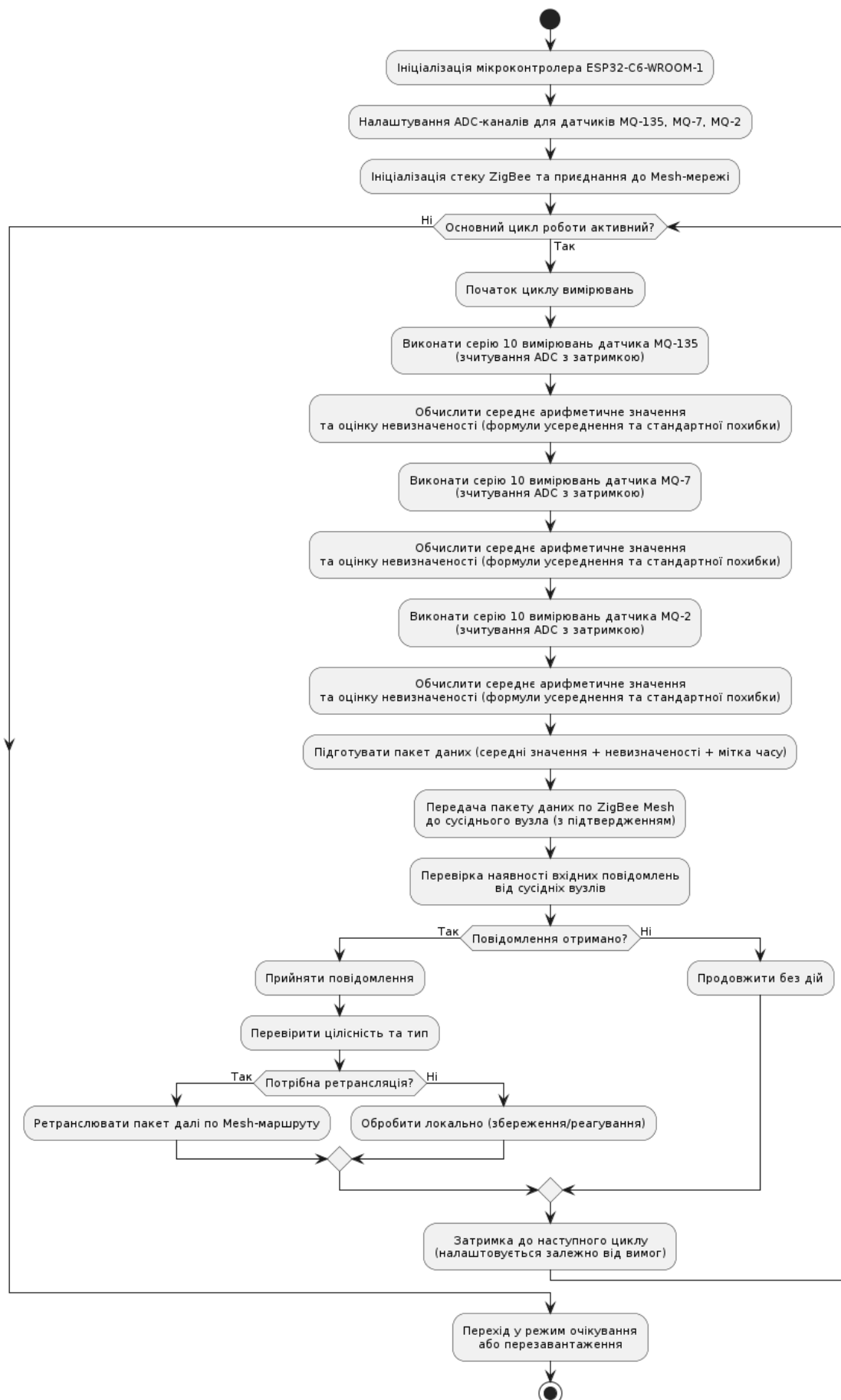


Рисунок 3.5 – Блок-схема функціонування автономного сенсорного вузла

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ

Арк.

47

датчика. Кожне зчитування супроводжується невеликою затримкою в кілька мілісекунд, необхідною для стабілізації сигналу та уникнення впливу перехідних процесів у ланцюзі. Аналогічним чином обробляються датчики MQ-7, чутливий переважно до чадного газу, та MQ-2, який реєструє дим, пропан, метан та інші горючі речовини: для кожного з них мікроконтролер повторює процедуру десятикратного опитування відповідного АЦП-каналу. Такий підхід до багаторазового вимірювання обумовлений необхідністю зменшення впливу випадкових шумів, спричинених електромагнітними перешкодами, коливаннями температури чи нестабільністю напруги живлення, що є типовим для аналогових газових сенсорів.

Ініціалізації вузла в середовищі Arduino IDE починається з ініціалізації апаратної частини – рисунок 3.6.

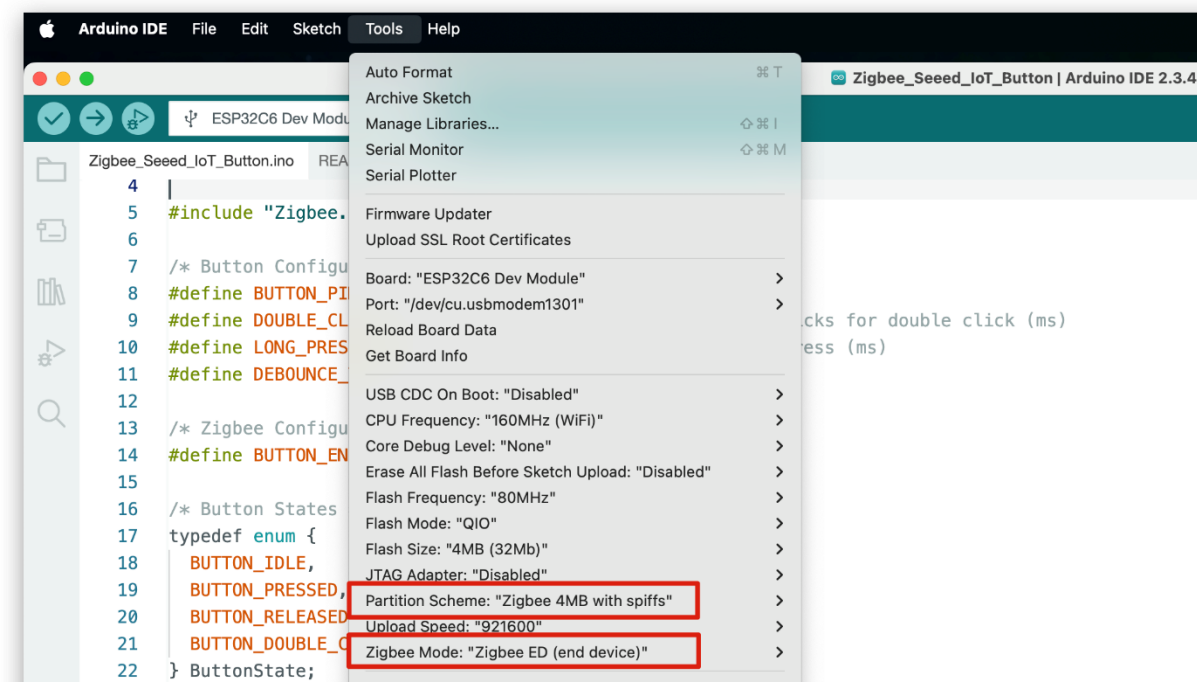


Рисунок 3.6. Налаштування ZigBee mode та Partition Scheme в Arduino IDE

До плати розробки, на якій встановлений модуль ESP32-C6-WROOM-1, підключають три газові датчики. Датчик MQ-135 з'єднують з виводом GPIO4,

датчик MQ-7 — з GPIO5, а датчик MQ-2 — з GPIO6. Нагрівачі датчиків живлять від окремого стабілізованого джерела напругою 5 вольт.

Після цього в середовищі Arduino IDE встановлюють пакет підтримки для мікроконтролерів ESP32. Після цього в меню обирають плату ESP32C6 Dev Module – рисунок 3.6. Потім налаштовують два важливих параметри: вибирають режим ZigBee (End Device або Router) і схему розподілу пам'яті Zigbee 4MB with spiffs. Ці налаштування необхідні для правильної роботи ZigBee-мережі.

Після цього підключають плату до комп'ютера через USB та програмують роботу сенсорного вузла.

Після цього починається основний процес роботи сенсорного вузла в Mesh-мережі. Кожний цикл роботи починається з вимірювання даних. Мікроконтролер виконує десять послідовних вимірювань з кожного датчика. Потім він обчислює середнє арифметичне значення отриманих даних. Крім того, проводиться оцінка невизначеності результату: спочатку розраховується стандартне відхилення, а потім невизначеність середнього значення. Такий підхід дозволяє отримати більш надійні результати і зменшити вплив випадкових перешкод.

Після обробки даних вузол формує пакет, який містить середні значення трьох датчиків та їхні оцінки невизначеності. Цей пакет передається по ZigBee Mesh-мережі до сусіднього вузла. Завдяки технології Mesh дані можуть автоматично знаходити шлях через інші вузли, якщо прямий зв'язок відсутній. Одночасно вузол постійно знаходиться в режимі прийому. Він прослуховує мережу і приймає повідомлення від сусідніх пристроїв. Якщо отримане повідомлення потрібно передати далі, вузол здійснює ретрансляцію. Якщо повідомлення призначене для нього, він обробляє його на місці.

Весь цикл — вимірювання, обробка даних, передача власного пакету та прийом повідомлень від інших вузлів — повторюється регулярно. Зазвичай між циклами робиться пауза близько тридцяти секунд, щоб вузол економно витрачав енергію. Завдяки багаторазовому усередненню і розрахунку невизначеності результату, що передаються мережею, стають точнішими. Підтримка Mesh-

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

мережі робить усю систему стійкою: навіть якщо один вузол тимчасово перестає працювати, дані можуть обійти його іншим маршрутом.

Після завершення процесу ініціалізації вузол працює повністю автономно. Він самостійно збирає інформацію про якість повітря, обробляє її за описаним алгоритмом і обмінюється даними з іншими вузлами в мережі. Йому більше не потрібне постійне підключення до комп'ютера.

Такий підхід забезпечує надійну та довготривалу роботу сенсорного вузла в розподіленій системі моніторингу забруднення повітря. Весь процес ініціалізації, розробки скетчу та роботи в Mesh-мережі є послідовним і може бути легко відтворений.

3.3. Реалізація процесів обробки даних та формування попереджень

Робота IoT-системи розпочинається з встановлення зв'язку між сенсорним вузлом і віддаленим сховищем. У даній роботі як безкоштовне рішення пропонується використовувати хмарне середовище Firebase Realtime Database, яке дозволяє організувати безперервний обмін даними без розгортання власного серверного обладнання. Firebase Realtime Database — це хмарна NoSQL-база даних від Google (частина Firebase), яка працює в режимі реального часу. Дані зберігаються у вигляді великого JSON-дерева, і будь-яка зміна в базі миттєво синхронізується з усіма підключеними клієнтами (мобільні додатки, веб, десктоп, сервери).

Після запуску мікроконтролера першою дією є встановлення з'єднання з бездротовою мережею. Блок-схема роботи системи з хмарним середовищем приведена на рисунку 3.7. Цей етап є критично важливим, оскільки без стабільного каналу зв'язку подальша передача даних є неможливою. Як тільки з'єднання встановлено, програма переходить до ініціалізації доступу до хмарного сервісу. На цьому етапі використовується адреса бази даних і ключ доступу, які фактично відкривають сеанс взаємодії між пристроєм та віддаленим

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 3.7 - Блок-схема роботи системи з хмарним середовищем

сховищем. Після встановлення доступу система не одразу передає дані, а спочатку формує їх у структурований вигляд. Це означає, що результат вимірювання концентрації газу доповнюється ідентифікатором вузла та часовою міткою, після чого перетворюється у формат JSON. Такий підхід забезпечує універсальність, оскільки JSON однаково добре обробляється як мікроконтролерами, так і веб-сервісами. Для наочного пояснення описаного

процесу використовується блок-схема алгоритму, представлена у вигляді коду PlantUML.

Коли дані підготовлені, виконується їх передача у сховище за допомогою HTTP-запиту. Якщо сервер підтверджує прийом інформації, процес вважається завершеним і система переходить у режим очікування наступного вимірювання. Якщо ж відповідь не отримана або містить помилку, відбувається повторна спроба передачі, що дозволяє підвищити надійність системи в умовах нестабільного зв'язку.

Таким чином, запис даних є не одноразовою дією, а циклічним процесом, який постійно повторюється протягом усього часу роботи сенсорного вузла.

Після накопичення даних у сховищі, система переходить до іншого важливого процесу — їх аналізу з метою виявлення небезпечних ситуацій. На відміну від попереднього етапу, де ініціатором дій був сенсорний вузол, тут активну роль відіграє сервер або хмарна функція, яка відслідковує зміни у базі даних. Кожного разу, коли у сховищі з'являється новий запис, система звертається до нього та аналізує значення концентрації – рисунок 3.8.

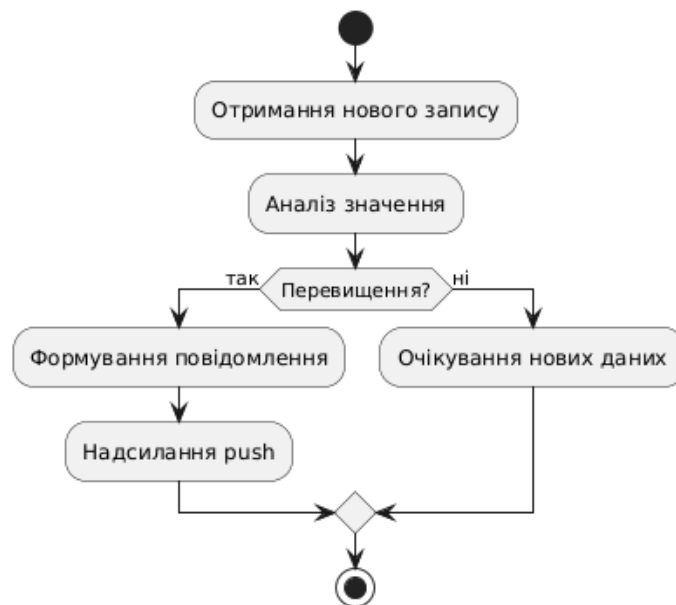


Рисунок 3.8 – Блок-схема формування оповіщень для мобільних додатків

Якщо це значення не перевищує допустимий рівень, ніяких додаткових дій не відбувається, і система продовжує спостереження. Проте у випадку

перевищення формується спеціальне повідомлення, яке містить інформацію про небезпечний параметр, його значення та місце вимірювання. Сформоване повідомлення не залишається у межах бази даних, а передається далі до підсистеми оповіщення. Якщо мова йде про мобільні додатки, використовується механізм push-повідомлень, який дозволяє миттєво доставити інформацію користувачу.

```
int main() {
    double value = 25.0;
    double limit = 10.0;

    if (isDanger(value, limit)) {
        std::string msg = createMessage(value);

        // Імітація відправки
        std::cout << "Push повідомлення: " << msg << std::endl;
        std::cout << "Web повідомлення: " << msg << std::endl;
    }

    return 0;
}
```

Рисунок 3.9 – Приклад формування Push-повідомлень

Якщо ж необхідно забезпечити відображення у глобальній мережі, дані передаються через API або оновлюють веб-інтерфейс у реальному часі.

Отже, у даному розділі послідовно розглянуто два взаємопов'язані процеси: запис даних у хмарне сховище та їх подальше використання для формування тривожних повідомлень. Особливістю запропонованого підходу є те, що всі дії виконуються автоматично та безперервно, що забезпечує оперативне реагування на зміни стану довкілля. Така організація системи дозволяє не лише накопичувати інформацію, але й перетворювати її у корисні сигнали для користувачів у режимі реального часу.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53

ВИСНОВКИ

В результаті виконання бакалаврської роботи на тему «IoT-система виявлення хімічних загроз» здійснено аналіз проблематики виявлення хімічних загроз, обґрунтовано актуальність застосування розподілених IoT-систем для моніторингу концентрацій небезпечних речовин у режимі реального часу. Встановлено, що електрохімічні та резистивні газові сенсори є оптимальним вибором для портативних IoT-вузлів завдяки поєднанню прийнятної чутливості, малого енергоспоживання та низької вартості.

З цією метою розроблено структуру IoT-системи виявлення хімічних загроз. Система побудована за ієрархічним принципом і включає: вузли первинного перетворення на базі мікроконтролера ESP32 із газовими сенсорами MQ-2, MQ-7, MQ-135; брокер повідомлень MQTT для передачі даних; серверний рівень зберігання та обробки інформації; мобільний клієнт для відображення результатів і сповіщень оператора.

Запропоновані рішення реалізовані при апаратно-програмній реалізації системи, зокрема, в програмному середовищі Arduino IDE реалізовано аналогово-цифрове перетворення сигналів сенсорів, обчислення концентрацій за апроксимаційними характеристиками, а також механізм порогових сповіщень. Виконано метрологічний аналіз системи відповідно до методології GUM.

Практична цінність роботи полягає у створенні функціональної масштабованої IoT-системи, яка може бути використана для хімічного моніторингу на промислових підприємствах, складах зберігання небезпечних речовин, у житлових і громадських будівлях, а також як основа для подальшого розширення переліку визначуваних компонентів та інтеграції з системами цивільного захисту.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		54

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бетлей І. Д., Галасіс В.І., Романко О.В., Псуй В.Б. Моніторингові мережі на основі сенсорів IoT для автономного екологічного та промислового контролю - Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (АКИТ - 2026)», Тернопіль, 2026 – **с. 68-70.**
2. Global Air Quality Guidelines 2021 - Рекомендації Всесвітньої організації охорони здоров'я - [Електронний ресурс]: - Режим доступу: [https://www-who-int.translate.google/publications/i/item/9789240034228?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=uk&_x_tr_hl=uk&_x_tr_pto=sc](https://www-who.int.translate.google/publications/i/item/9789240034228?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=uk&_x_tr_hl=uk&_x_tr_pto=sc).
3. ДСТУ EN 45544-1:2019 «Прилади для виявлення токсичних газів» - [Електронний ресурс]: - Режим доступу: <https://online.budstandart.com/ua/catalog/>.
4. ДСТУ EN 60079-29-1:2012 «Вибухозахищені прилади для виявлення горючих газів» - [Електронний ресурс]: - Режим доступу: <https://online.budstandart.com/ua/catalog/>.
5. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища: підруч. / Г. І. Гринь, В. І. Мохонько, О. В. Суворін та ін. – Сєверодонецьк : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2019. – 420 с.
6. The Industrial Internet of Things Vocabulary. - [Електронний ресурс]: - Режим доступу: <https://www.iiconsortium.org/pdf/Vocabulary-Report-2.3.pdf>
7. Основи метрології та вимірювальної техніки / Лис, О.М., Якименко, М.В., Шинкаренко [та ін.]. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 424 с.
8. Метрологія, вимірювання та контроль: Навчальний посібник / О.В. Белова, Ю.І. Гринюк, М.С. Ємельянов. - К.: Видавничий дім "Паливода А.С.", 2020. – 193с.
9. 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.
10. Обробка результатів фізичних вимірювань: навч. посібник / І.Ф.Скіцько, О.І.Скіцько. - КПІ ім .Ігоря Сікорського. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		55

- 88 с. [Електронний ресурс]: - Режим доступу:
https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25320/1/Obrobka_rezult._fizych._vymiriuvan.pdf.

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

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.

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Код для побудови блок-схеми алгоритму функціонування сенсорного вузла на базі ESP32-C6-WROOM-1 для програми PlantUML

```
@startuml
title Блок-схема алгоритму функціонування сенсорного вузла на базі ESP32-C6-WROOM-1
skinparam monochrome true
skinparam shadowing false
skinparam defaultFontSize 11
skinparam defaultTextAlignment center

start

:Ініціалізація мікроконтролера ESP32-C6-WROOM-1;
:Налаштування АЦП-каналів для датчиків MQ-135, MQ-7, MQ-2;
:Ініціалізація стеку ZigBee та приєднання до Mesh-мережі;

while (Основний цикл роботи активний?) is (Так)
    :Початок циклу вимірювань;

    :Виконати серію 10 вимірювань датчика MQ-135\n(зчитування АЦП з затримкою);
    :Обчислити середнє арифметичне значення\пта оцінку невизначеності (формули усереднення та стандартної похибки);

    :Виконати серію 10 вимірювань датчика MQ-7\n(зчитування АЦП з затримкою);
    :Обчислити середнє арифметичне значення\пта оцінку невизначеності (формули усереднення та стандартної похибки);

    :Виконати серію 10 вимірювань датчика MQ-2\n(зчитування АЦП з затримкою);
    :Обчислити середнє арифметичне значення\пта оцінку невизначеності (формули усереднення та стандартної похибки);

    :Підготувати пакет даних (середні значення + невизначеності + мітка часу);

    :Передача пакету даних по ZigBee Mesh\ndo сусіднього вузла (з підтвердженням);

    :Перевірка наявності вхідних повідомлень\nвід сусідніх вузлів;

    if (Повідомлення отримано?) then (Так)
        :Прийняти повідомлення;
        :Перевірити цілісність та тип;
        if (Потрібна ретрансляція?) then (Так)
            :Ретранслювати пакет далі по Mesh-маршруту;
        else (Hi)
            :Обробити локально (збереження/реагування);
        endif
    else (Hi)
```

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		57

:Продовжити без дій;
endif

:Затримка до наступного циклу\п(налаштовується залежно від вимог);
endwhile (Hi)

:Перехід у режим очікування\пабо перезавантаження;
stop

@enduml

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ДОДАТОК Б

Програма скетчу роботи автономного сенсорного вузла

```

/*
 * Сенсорний вузол на ESP32-C6-WROOM-1 + MQ-135, MQ-7, MQ-2
 * Реалізує алгоритм з бакалаврської роботи:
 * - 10 вимірювань на датчик
 * - усереднення + оцінка невизначеності
 * - передача по ZigBee Mesh
 * - прийом повідомлень від сусідніх вузлів
 * Автор: на основі опису з чату
 * Для Arduino IDE + ESP32 core 3.x
 */

#include <Arduino.h>
#include <Zigbee.h>      // Бібліотека Zigbee з arduino-esp32

// Піни датчиків (ADC-канали ESP32-C6)
#define MQ135_PIN 4
#define MQ7_PIN 5
#define MQ2_PIN 6

// Структура для зберігання результатів
struct SensorData {
    float average;    // Середнє значення (у вольтах)
    float uncertainty; // Невизначеність типу А ( $u = s / \sqrt{10}$ )
};

// Глобальні дані
SensorData mq135, mq7, mq2;

// Функція читання 10 значень, обчислення середнього та невизначеності
void readAndProcessSensor(uint8_t pin, SensorData &data) {
    const int NUM_READINGS = 10;
    float readings[NUM_READINGS];
    float sum = 0.0;

    // 1. Серія з 10 вимірювань
    for (int i = 0; i < NUM_READINGS; i++) {
        readings[i] = analogRead(pin) * (3.3f / 4095.0f); // 12-бітний ADC → Вольти
        delay(10); // стабілізація сигналу
        sum += readings[i];
    }

    // 2. Середнє арифметичне
    data.average = sum / NUM_READINGS;

    // 3. Стандартне відхилення s
    float sq_diff = 0.0;
    for (int i = 0; i < NUM_READINGS; i++) {
        sq_diff += pow(readings[i] - data.average, 2);
    }

```

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		59

```

}
float s = sqrt(sq_diff / (NUM_READINGS - 1));

// 4. Невизначеність  $u = s / \sqrt{N}$ 
data.uncertainty = s / sqrt(NUM_READINGS);
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial) delay(10);

  Serial.println("=== Ініціалізація сенсорного вузла ESP32-C6 ===");

  // Ініціалізація ZigBee (Mesh-мережа)
  Zigbee.begin();           // Стек запускається автоматично
  // Якщо потрібно явно вказати роль (End Device / Router) — обирається в Tools

  Serial.println("ZigBee стек запущено. Приєднання до Mesh-мережі...");
  // Стек автоматично шукає та приєднується до мережі (координатор відкриває мережу)

  Serial.println("Вузол готовий до роботи.");
  Serial.println("Цикл: 10 вимірювань → усереднення → передача по ZigBee");
}

void loop() {
  unsigned long start = millis();

  // === ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА ===
  Serial.println("\n--- Початок циклу вимірювань ---");

  readAndProcessSensor(MQ135_PIN, mq135);
  readAndProcessSensor(MQ7_PIN, mq7);
  readAndProcessSensor(MQ2_PIN, mq2);

  // Вивід результатів у Serial (для налагодження)
  Serial.printf("MQ-135: avg = %.3f V, u = %.5f V\n", mq135.average, mq135.uncertainty);
  Serial.printf("MQ-7:   avg = %.3f V, u = %.5f V\n", mq7.average, mq7.uncertainty);
  Serial.printf("MQ-2:   avg = %.3f V, u = %.5f V\n", mq2.average, mq2.uncertainty);

  // === ПІДГОТОВКА ПАКЕТУ ТА ПЕРЕДАЧА ПО ZIGBEE MESH ===
  // Тут можна використовувати будь-який приклад з бібліотеки (Zigbee_CarbonDioxide_Sensor
  тощо)
  // Для спрощення — відправляємо дані через атрибут-репорт (стек сам маршрутизує до
  сусіда/координатора)

  // Приклад відправки (адаптуйте під свій кластер, наприклад, custom cluster 0xFF00)
  // zigbee.sendAttributeReport(0xFF00, 0x0001, (uint8_t*)&mq135.average, sizeof(float)); // тощо

  Serial.println("Пакет даних відправлено по ZigBee Mesh (стек обробляє маршрутизацію);");

  // === ПРИЙОМ ПОВІДОМЛЕНЬ ВІД СУСІДНІХ ВУЗЛІВ ===
  // ZigBee стек автоматично приймає та обробляє вхідні пакети:

```

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```
// - Якщо пакет для ретрансляції — передає далі (Mesh-роутінг).
// - Якщо для локальної обробки — викликає callback (можна додати).
// Для моніторингу вхідних повідомлень можна зареєструвати callback у Zigbee.addEndpoint()

Serial.printf("Час циклу: %lu мс\n", millis() - start);

// Затримка до наступного циклу (налаштуйте за потребою)
delay(30000); // 30 секунд — типовий інтервал для моніторингу повітря
}
```

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		61

ДОДАТОК В

Код для побудови блок-схеми алгоритму взаємодії IoT-системи з хмарним середовище для програми PlantUML

@startuml

```
skinparam defaultFontName Arial
skinparam defaultFontSize 14
skinparam backgroundColor white
skinparam activity {
    BackgroundColor white
    BorderColor black
    FontColor black
    DiamondBackgroundColor white
    DiamondBorderColor black
}
```

start

:Запуск мікроконтролера;

:Підключення до Wi-Fi мережі;

repeat

repeat while (З'єднання встановлено?) is (ні)

->так;

:Ініціалізація доступу до хмарного сервісу\n(адреса БД + ключ доступу);

while (Пристрій працює?) is (так)

:Зчитування концентрації газу;

:Формування JSON\n(вузол + часова мітка + значення);

repeat

:Надсилання HTTP-запиту до сховища;

repeat while (Сервер підтвердив прийом?) is (ні)

->так;

:Перехід у режим очікування\nп наступного вимірювання;

endwhile

stop

@enduml

					ДП.МТІР.10661192.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		