

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

Програмно-апаратний засіб відстеження показників температури та вологості повітря з використанням хмарних технологій
Назва теми

КвРКІ 220007.22.02.31 ПЗ
Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»
Назва

Виконав: студент IV курсу, група K12c-22-2
Підпис

Юрій ГУЦАЛЮК
Ініціали, прізвище

Керівник

Підпис, дата

Андрій НІЧЕПОРУК
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

Підпис, дата

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри комп'ютерної
інженерії та інформаційних
систем

Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

«9» червня 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 12 Інформаційні технології

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Гуцалюку ЮРІЮ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Програмно-апаратний засіб відстеження показників температури та вологості повітря з використанням хмарних технологій

Керівник проекту (роботи) Андрій Нічепорук, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. № 23

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Програмно-апаратний засіб відстеження показників температури та вологості повітря з використанням хмарних технологій та постановка задачі щодо удосконалення

Проектування програмно-апаратного засобу відстеження показників температури та вологості

Програмно-апаратна реалізація засобу відстеження показників температури та вологості повітря з використанням хмарних технологій

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

Структурна схема програмно-апаратного засобу відстеження показників температури та вологості повітря

Принципова електрична схема системи

Монтажна схема (розводка та підключення компонентів)

Блок-схеми алгоритмів відстеження показників

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Тетяна КИСІЛЬ, доцент кафедри КПС		
Антиплагіат	Нічепорук А.О., доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2025	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2025	виконано
3	Розділ 1: огляд існуючих рішень віддаленого поливу й моніторингу рівня рідини; постановка задачі.	01.03.2025	виконано
4	Розділ 2: проектування апаратної частини - вимоги, структура, принципова та монтажна схеми; аналіз компонентів.	01.04.2025	виконано
5	Розділ 3: програмна реалізація - налаштування Blynk, розробка й тестування прошивки ESP8266 із GSM і сенсорами.	29.04.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2025	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент

Керівник роботи

Підпис

Підпис

Юрій ГУЦАЛЮК
Ініціали, прізвище

Андрій НІЧЕПОРУК
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Програмно-апаратний засіб відстеження показників температури та вологості повітря з використанням хмарних технологій».

Автор роботи: Гуцалюк Юрій Богданович

Керівник роботи: Нічепорук Андрій Олександрович

Пояснювальна записка: 74 с., 3 рис., 4 дод., 44 джерел.

Графічна частина: 3 креслення

Метою даного дослідження є розробка та впровадження програмно-апаратного засобу відстеження показників якості повітря із збереженням даних у хмарі, що поєднує апаратні компоненти (сенсори PM2.5, CO₂, температури та вологості, мікроконтролер ESP32) та програмну частину (вбудоване ПЗ для передачі даних, хмарна платформа Microsoft Azure, система візуалізації Grafana)

Об'єктом дослідження є апаратно-програмна система екологічного моніторингу в промислових умовах.

Предметом дослідження є методи вимірювання, передавання, збереження та обробки даних про стан повітря, а також способи візуалізації та оповіщення користувачів у разі перевищення допустимих екологічних норм.

Під час проведення дослідження застосовано метод системного аналізу для огляду існуючих рішень у сфері моніторингу якості повітря, методи схемотехнічного проектування для розробки електричних та монтажних схем пристрою, а також експериментальне тестування створеного прототипу з метою перевірки його точності, стабільності та придатності до використання в умовах реального виробництва.



Підпис студента

30.05.2025

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ	5
1.1. Показники якості повітря, їх моніторинг.....	5
1.2. Огляд відомих рішень та засобів для відстеження показників якості повітря із збереженням даних у хмарі.....	11
1.3. Висновки. Постановка задачі	19
2 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО ЗАСОБУ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ	23
2.1. Встановлення вимог	23
2.2. Узагальнена структура програмно-апаратного засобу	29
2.3. Схема електрична принципова	38
2.4. Монтажна схема	46
2.5. Аналіз обраних рішень (прогармних, апаратних, хмарних)	53
2.6. Висновки до другого розділу.....	62
3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО ЗАСОБУ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ	63
3.1 Розгортання та налаштування хмарної платформи.....	63
3.2 Програмна реалізація клієнтської частини	65
3.3. Висновки до третього розділу.....	68
ВИСНОВКИ	69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	70
ДОДАТОК А	75
ДОДАТОК Б	76
ДОДАТОК В	77
ДОДАТОК Г	78

КвРКІ 220007.22.02.31 ПЗ								
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Програмно-апаратний засіб відстеження показників температури та вологості повітря з використанням хмарних технологій	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Юрія ГУЦАЛОК				у		75
Перевідр.		Андрій Нічепорук		9.06.22				
Н.контр.		Тетяна КИСЛІЬ		09.06.22				
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		9.06.22				
						ХНУ, КІ2с-22-2		

ВСТУП

Актуальність дослідження. Проблема забруднення атмосферного повітря набуває особливої гостроти в умовах активної урбанізації та індустріалізації, що спричиняє зростання концентрації шкідливих речовин у повітрі міст і промислових регіонів. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, забруднення повітря є причиною близько 7 мільйонів передчасних смертей щорічно, що підкреслює критичну необхідність ефективного моніторингу якості повітря та своєчасного реагування на погіршення екологічної ситуації. Розвиток технологій інтернету речей (IoT) та хмарних обчислень створює нові можливості для вдосконалення систем моніторингу якості повітря, підвищення їх доступності, масштабованості та функціональності. Низьковартісні датчики у поєднанні з хмарними платформами дозволяють розгортати розгалужені мережі моніторингу з високою географічною роздільною здатністю, що забезпечує детальне картографування забруднення та виявлення проблемних зон. Впровадження таких систем сприяє підвищенню поінформованості населення щодо якості повітря, розробці ефективних заходів покращення екологічної ситуації та формуванню відповідальнішого ставлення до навколишнього середовища як на рівні окремих громадян, так і на рівні місцевих та державних органів влади.

Метою дослідження є розробка програмно-апаратного засобу для відстеження показників якості повітря із збереженням даних у хмарі, що забезпечить ефективний моніторинг концентрації забруднювачів та надасть доступ до аналітичної інформації через веб-інтерфейс та мобільний додаток.

Об'єкт дослідження – процеси моніторингу, збору, передачі та аналізу даних про показники якості повітря.

Предмет дослідження – методи та засоби створення програмно-апаратних комплексів для відстеження показників якості повітря із збереженням даних у хмарі.

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

Методи дослідження. У роботі використано системний аналіз для дослідження існуючих рішень та визначення вимог до розроблюваної системи; методи схемотехнічного проєктування для розробки електричної принципової схеми пристрою; об'єктно-орієнтоване програмування для створення програмного забезпечення мікроконтролера та хмарної платформи; методи статистичної обробки даних для аналізу результатів вимірювань та оцінки точності системи.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці нових методів калібрування низьковартісних сенсорів якості повітря з використанням алгоритмів машинного навчання, що дозволяє підвищити точність вимірювань без значного збільшення вартості пристроїв; удосконаленні архітектури програмно-апаратних засобів моніторингу якості повітря шляхом впровадження периферійних обчислень для попередньої обробки даних, що зменшує навантаження на канали зв'язку та хмарну інфраструктуру.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дослідження можуть бути використані для створення міських мереж моніторингу якості повітря, систем контролю екологічної ситуації на промислових об'єктах, пристроїв для відстеження показників повітря у приміщеннях. Розроблений програмно-апаратний засіб дозволяє розгортати масштабовані системи моніторингу з оптимальним співвідношенням вартості та функціональності.

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

1.1. Показники якості повітря, їх моніторинг

Атмосферне повітря населених пунктів постійно піддається впливу шкідливих речовин різного походження, які потрапляють у нього внаслідок промислових викидів, роботи транспортних засобів, спалювання викопного палива для опалення будівель та природних процесів. Н. Х. Мотлаг та співавтори наголошують на необхідності масштабного моніторингу якості повітря задля забезпечення належних умов життя населення у міських агломераціях [3].

Індекс якості повітря (AQI) став уніфікованим глобальним показником, що дозволяє представити сукупність параметрів забруднення єдиним числом для спрощення сприйняття громадянами. Розрахунок індексу базується на вимірюванні концентрацій основних забруднювачів, серед яких П. Амоатей та К. Гох виділяють тверді частинки PM_{2.5} та PM₁₀, оксид вуглецю, діоксид азоту, діоксид сірки та озон [13, 28]. Для встановлення рівня небезпеки конкретних значень індексу використовують шкалу, розподілену на шість категорій від «добре» до «небезпечно».

Оксиди азоту та сірки представляють групу газоподібних забруднювачів, що утворюються переважно при спалюванні викопного палива. Високі концентрації цих речовин спричиняють подразнення дихальних шляхів, погіршують стан хворих на астму, а також призводять до формування кислотних дощів із негативними наслідками для рослинності та водойм. Дж. Саїні зазначає, що найвищі концентрації цих газів спостерігаються у промислових зонах великих міст та поблизу автомагістралей [47].

Моніторинг вмісту твердих частинок у повітрі визначає рівень запиленості та концентрацію дрібнодисперсних частинок PM₁₀ (діаметром до 10 мкм) та PM_{2.5} (діаметром до 2,5 мкм). Саме мікрочастинки PM_{2.5} становлять особливу небезпеку

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

для здоров'я через здатність проникати глибоко в легеневу тканину та кровоносну систему, викликаючи респіраторні захворювання, проблеми із серцево-судинною системою та навіть певні види раку [47]. Х. Чоер та співавтори встановили, що головними джерелами цих забруднювачів є промислові викиди, автотранспорт, спалювання побутових відходів та будівельні роботи [20].

Концентрація озону у приземному шарі атмосфери утворюється внаслідок фотохімічних реакцій за участі оксидів азоту та летких органічних сполук під впливом сонячного випромінювання. Найвищі значення цього показника фіксуються у літні сонячні дні, особливо у післяполудневий час та за підвищеної інтенсивності автомобільного руху. С. Каівонен і Е. Нгаї провели комплексне дослідження динаміки концентрації озону в міському середовищі протягом доби та виявили пряму залежність між піками дорожнього трафіку та зростанням рівня озону [31].

Вуглекислий газ не вважається прямим забруднювачем, проте підвищення його концентрації у замкнених приміщеннях призводить до зниження працездатності, погіршення концентрації уваги та сонливості. Дослідження, проведене Ф. Дроуткою та колегами у приміщеннях бібліотеки Національної обсерваторії Афін, виявило, що перевищення вмісту CO₂ понад 1000 ppm суттєво знижує когнітивні функції відвідувачів [26].

Моніторинг температури та вологості повітря доповнює інформацію про його стан, оскільки ці параметри впливають на поведінку забруднювачів, їхню концентрацію та токсичність. Підвищена вологість у поєднанні з високими концентраціями забруднювачів створює сприятливі умови для утворення смогу та інших небезпечних сполук у повітрі [11].

У табл. 1.1 представлено основні показники якості повітря, їх значення в нормальних умовах та потенційний вплив на здоров'я людини при перевищенні нормативних значень.

									Арк.
									6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

Таблиця 1.1 – Основні показники якості повітря та їх вплив на здоров'я

людини

Показник	Норма (24-годинна експозиція)	Вплив на здоров'я при перевищенні
PM2.5	< 25 мкг/м ³	Проникнення в альвеоли легень, підвищення ризику серцево-судинних захворювань
PM10	< 50 мкг/м ³	Подразнення слизових оболонок, загострення респіраторних захворювань
Діоксид азоту (NO ₂)	< 40 мкг/м ³	Зниження функції легень, збільшення ризику респіраторних інфекцій
Діоксид сірки (SO ₂)	< 20 мкг/м ³	Бронхоспазм, подразнення дихальних шляхів
Оксид вуглецю (CO)	< 10 мг/м ³	Зниження здатності крові переносити кисень
Озон (O ₃)	< 100 мкг/м ³	Подразнення дихальних шляхів, зниження функції легень
Вуглекислий газ (CO ₂)	< 1000 ppm (у приміщеннях)	Зниження концентрації уваги, втома, головний біль

Системи моніторингу якості повітря поділяються на стаціонарні та мобільні, залежно від можливості їх переміщення. Стаціонарні системи зазвичай встановлюються на постійних локаціях для безперервного збору даних протягом тривалого періоду, що дозволяє аналізувати довгострокові тренди та сезонні зміни показників забруднення. А. Масіч та співавтори впровадили мережу стаціонарних датчиків для моніторингу якості повітря у кількох районах Сараєво, що дозволило створити детальну карту забруднення міста та виявити найбільш проблемні зони [38].

									Арк.
									7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

Мобільні системи моніторингу встановлюються на рухомих об'єктах (автомобілях, дронах, громадському транспорті) або використовуються для точкових вимірювань у різних локаціях. Перевагою такого підходу є можливість охоплення значних територій з меншими фінансовими витратами порівняно з розгортанням мережі стаціонарних станцій. Громадський транспорт, особливо міські автобуси, забезпечує регулярне покриття великих ділянок міської території та дозволяє створити динамічну карту забруднення [31].

Класичні професійні системи моніторингу якості повітря забезпечують найвищу точність вимірювань, але мають високу вартість та потребують спеціалізованого обслуговування. Такі системи зазвичай розміщуються на державних метеорологічних станціях або входять до складу мереж моніторингу навколишнього середовища [52]. Значна вартість обладнання обмежує кількість точок вимірювання, що не дозволяє створити детальну карту забруднення великих міських територій.

Низьковартісні системи на основі мікроконтролерів значно розширюють можливості збору даних про стан повітря через меншу вартість обладнання та простоту встановлення. Незважаючи на нижчу точність порівняно з професійними системами, вони дозволяють розгорнути густу мережу датчиків для більш детального картографування забруднення повітря на рівні мікрорайонів та окремих вулиць [41]. Проєкти громадянської науки, спрямовані на моніторинг якості повітря з використанням недорогих сенсорів, активно розвиваються у багатьох країнах та залучають мешканців до процесу збору даних, підвищуючи їхню обізнаність щодо екологічних проблем [16].

Моніторинг якості повітря у приміщеннях набуває особливого значення з огляду на те, що люди проводять близько 90% часу в закритих просторах. Забруднювачі в приміщеннях можуть походити як із зовнішнього середовища, так і утворюватися внаслідок внутрішніх джерел (будівельні матеріали, меблі, побутова хімія, приготування їжі). Системи моніторингу внутрішнього повітря

									Арк.
									8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

зазвичай включають датчики вуглекислого газу та летких органічних сполук, додатково до стандартних показників якості зовнішнього повітря [22].

Методологія оцінки точності вимірювань систем моніторингу якості повітря передбачає порівняння даних, отриманих з низьковартісних датчиків, із результатами вимірювань професійного обладнання. Х. Чу та Ф. Каррату провели дослідження для калібрування недорогих сенсорів PM2.5 відносно еталонних приладів та розробили методику корекції показників для підвищення точності вимірювань [21, 19]. Калібрування може проводитись як на етапі виробництва датчиків, так і під час їх експлуатації з використанням алгоритмів машинного навчання [36].

Важливим аспектом систем моніторингу є забезпечення цілісності та надійності даних. Датчики в польових умовах піддаються впливу різноманітних факторів, включаючи температурні коливання, вологість, забруднення чутливих елементів пилом, що може призвести до дрейфу показників або виходу з ладу приладів [42]. Методи виявлення аномалій та відмов сенсорів ґрунтуються на аналізі часових рядів даних та порівнянні показників від різних пристроїв, розташованих близько один до одного [30].

Розподілена архітектура сучасних систем моніторингу якості повітря передбачає наявність множини точок збору даних, каналів передачі інформації, серверів для зберігання та обробки, а також інтерфейсів візуалізації для кінцевих користувачів. Протоколи бездротового зв'язку, такі як LoRaWAN, Wi-Fi, Bluetooth, мобільні мережі, забезпечують передачу даних від датчиків до центральних серверів [12]. Вибір конкретної технології зв'язку залежить від відстані між сенсорами та шлюзами, вимог до енергоспоживання та обсягу даних, що передаються [24].

Аналіз даних моніторингу якості повітря передбачає застосування статистичних методів та алгоритмів машинного навчання для виявлення закономірностей, прогнозування змін та надання рекомендацій щодо покращення ситуації. Моделі на основі нейронних мереж демонструють високу ефективність у

									Арк.
									9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

прогнозуванні концентрацій забруднювачів на основі історичних даних та додаткової інформації про погодні умови, інтенсивність дорожнього руху та промислову активність [36, 15].

Архітектура кінцевих пристроїв систем моніторингу ґрунтується переважно на мікроконтролерах, таких як Arduino, ESP32, Raspberry Pi, які забезпечують збір даних з датчиків, первинну обробку інформації та її передачу на сервери [48]. Вибір конкретної платформи залежить від вимог до обчислювальної потужності, енергоспоживання та функціональності пристрою. Для автономної роботи датчиків у польових умовах часто використовують живлення від акумуляторів із підзарядкою від сонячних панелей [51].

Питання конфіденційності та безпеки даних стає особливо актуальним при впровадженні масштабних систем моніторингу на рівні міст. Зібрана інформація може містити дані, що дозволяють відстежувати пересування користувачів мобільних датчиків або визначати присутність людей у певних приміщеннях на основі концентрації вуглекислого газу [52]. Захист даних від несанкціонованого доступу, модифікації та підміни потребує впровадження криптографічних алгоритмів та протоколів аутентифікації на всіх рівнях системи [44].

Формування мереж датчиків якості повітря потребує ретельного планування для забезпечення оптимального покриття території з урахуванням особливостей рельєфу, забудови, розташування джерел забруднення та метеорологічних умов. Методи оптимізації розміщення сенсорів базуються на моделюванні розповсюдження забруднювачів та аналізі просторової кореляції даних між окремими точками вимірювання [55]. Ефективність мережі моніторингу підвищується за рахунок комбінування стаціонарних та мобільних датчиків, що дозволяє охопити більшу територію з меншими витратами [45]. Візуалізація даних про якість повітря представляє окрему важливу складову систем моніторингу, спрямовану на забезпечення зрозумілого представлення інформації для різних груп користувачів – від науковців та екологів до пересічних громадян [46]. Інтерактивні карти забруднення, графіки динаміки показників, індикатори поточного стану у

вигляді кольорових шкал дозволяють швидко оцінити ситуацію та прийняти рішення щодо зміни маршруту пересування або закриття вікон у приміщеннях при високих рівнях забруднення.

1.2. Огляд відомих рішень та засобів для відстеження показників якості повітря із збереженням даних у хмарі.

Професійні системи відстеження показників якості повітря традиційно використовувалися урядовими агенціями та науково-дослідними установами, проте поява доступних компонентів і платформ дозволила розширити перелік рішень для різних сфер застосування – від персонального використання до масштабних міських мереж моніторингу [14, 39].

Застосування різних типів сенсорних пристроїв визначає архітектуру системи моніторингу та методи обробки даних. Електрохімічні датчики виявляють зміни електричного струму, спричинені реакціями цільових газів з електролітом, що дозволяє вимірювати концентрації NO₂, SO₂, O₃, CO та інших забруднювачів. Оптичні датчики визначають концентрацію твердих частинок на основі розсіювання світла при проходженні частинок через вимірювальну камеру, а інфрачервоні аналізатори використовуються для виявлення CO₂ та інших газів, що поглинають інфрачервоне випромінювання [20, 47]. Пристрої передають дані через мережі GSM на хмарну платформу, яка використовує алгоритми машинного навчання для калібрування показників сенсорів та прогнозування якості повітря. Інтерактивні карти забруднення доступні через веб-інтерфейс та мобільний додаток, надаючи користувачам рекомендації щодо уникнення високих рівнів забруднення [27, 37].

Purple Air представляє рішення на основі лазерних лічильників частинок, які вимірюють концентрацію PM₁, PM_{2.5} та PM₁₀. Пристрої підключаються до Wi-Fi мережі та передають дані на хмарну платформу, де вони інтегруються з глобальною картою якості повітря. Система характеризується простотою встановлення та

										Арк.
										11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

використання, що сприяло її популярності серед звичайних споживачів та освітніх установ [17, 36].

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз комерційних систем моніторингу якості повітря

Характеристика	Airly	Purple Air	AirVisual	Atmotube	Clarity
Вимірювані параметри	PM1, PM2.5, PM10, NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , T, H	PM1, PM2.5, PM10, T, H	PM2.5, CO ₂ , T, H, P	PM1, PM2.5, PM10, VOC, T, H	PM2.5, NO ₂ , O ₃ , T, H
Тип пристрою	Стационарний	Стационарний	Стационарний і портативний	Портативний	Стационарний
Зв'язок	GSM, Wi-Fi	Wi-Fi	Wi-Fi, Bluetooth	Bluetooth	GSM, Wi-Fi, LoRa
Хмарна аналітика	Прогнозування, калібрування	Візуалізація	Прогнозування, AQI	Історія даних, AQI	Прогнозування, калібрування
Відкритий API	Так	Так	Обмежений	Ні	Так
Цінова категорія	Середня	Низька	Середня	Низька	Висока
Точність	Висока	Середня	Висока	Середня	Висока

AirVisual від компанії IQAir поєднує стаціонарні та портативні пристрої для вимірювання концентрації PM2.5, а також рівня CO₂, температури, вологості та

атмосферного тиску. Дані передаються на хмарну платформу, яка використовує аналітичні алгоритми для розрахунку індексу якості повітря та прогнозування його змін на основі метеорологічних даних. Кольорове маркування індексу від зеленого до червоного спрощує сприйняття рівня забруднення користувачами різного віку та рівня освіти [48, 52]. Система використовує дані з власної мережі сенсорів, а також інформацію з державних станцій моніторингу по всьому світу для створення глобальної карти якості повітря.

Atmotube розробила лінійку портативних пристроїв для персонального моніторингу якості повітря, які вимірюють концентрацію PM1, PM2.5, PM10, летких органічних сполук, а також температуру та вологість. Прилади з'єднуються зі смартфоном через Bluetooth та надсилають дані на хмарну платформу для аналізу та візуалізації. Можливість постійного носіння пристрою дозволяє користувачам відстежувати якість повітря протягом дня у різних локаціях – вдома, на роботі, у транспорті, на вулиці. Історія вимірювань зберігається у хмарі та доступна для аналізу через мобільний додаток, який також надає рекомендації щодо уникнення забруднених місць [4, 23].

Розробка професором М. Будде системи з відкритим кодом Luftdaten надала можливість ентузіастам створювати власні пристрої для моніторингу якості повітря на основі доступних компонентів – мікроконтролера ESP8266, датчика частинок SDS011 та датчиків температури й вологості DHT22. Дані з пристроїв передаються на центральний сервер через Wi-Fi та візуалізуються на інтерактивній карті. Проєкт об'єднав тисячі учасників по всьому світу та став прикладом успішної ініціативи громадянської науки, спрямованої на вирішення екологічних проблем [16, 17]. Відкрита архітектура системи дозволяє розширювати функціональність приладів та інтегрувати їх з іншими платформами для збору та аналізу даних. Clarity представила комплексне рішення для міських мереж моніторингу якості повітря, що включає стаціонарні датчики, хмарну платформу аналітики та інструменти прийняття рішень. Пристрої вимірюють концентрацію PM2.5, NO₂, O₃, а також метеорологічні параметри, використовуючи GSM, Wi-Fi або LoRaWAN для

									Арк.
									13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

передачі даних. Системи машинного навчання забезпечують калібрування датчиків для підвищення точності вимірювань, а аналітичні алгоритми дозволяють виявляти джерела забруднення та оцінювати ефективність заходів з покращення якості повітря [32, 55].

Система CityOS Air фокусується на створенні масштабних мереж моніторингу для розумних міст з використанням різних типів датчиків – від стаціонарних станцій до мобільних пристроїв на громадському транспорті. Платформа використовує хмарні обчислення для обробки великих обсягів даних та візуалізації результатів на міських інформаційних панелях. Відкритий API дозволяє розробникам створювати додаткові сервіси на основі зібраних даних, включаючи системи сповіщення про небезпечні рівні забруднення та рекомендації щодо планування міської інфраструктури [31, 39].

Розгортання систем моніторингу якості повітря на транспортних засобах дозволяє значно розширити географічне покриття збору даних з меншими витратами порівняно з встановленням стаціонарних станцій. Система Google Street View Cars обладнана додатковими датчиками для вимірювання концентрації забруднювачів під час збору даних для картографічних сервісів. Рішення від С. Каівонена та Е. Нгаї використовує мережу датчиків на міських автобусах для створення динамічної карти забруднення з високою просторовою роздільною здатністю [31].

Таблиця 1.3 – Аналіз технологій зв'язку для систем моніторингу якості повітря

Технологія	Дальність дії	Енергоспоживання	Пропускна здатність	Вартість інфраструктури	Типове застосування
Wi-Fi	50-100 м	Середнє	Висока	Низька	Домашні системи, невеликі мережі в будівлях

якості повітря. Розвинені інструменти машинного навчання дозволяють створювати прогностичні моделі забруднення на основі історичних даних та інформації з інших джерел [25, 44].

Архітектура програмно-апаратних комплексів моніторингу якості повітря еволюціонувала з простої моделі "датчик-сервер" до складних багаторівневих систем з розподіленою обробкою даних. Туманні обчислення забезпечують попередню обробку даних на рівні шлюзів, зменшуючи навантаження на канали зв'язку та хмарні сервери, а також забезпечуючи локальну автономність системи при втраті зв'язку з центральним сервером. Периферійні обчислення дозволяють виконувати складні алгоритми аналізу даних безпосередньо на сенсорних пристроях або шлюзах, забезпечуючи швидку реакцію на зміни якості повітря без необхідності передачі всіх даних у хмару [1, 9].

GAIA Air представляє комплексне рішення для шкіл та освітніх установ, що поєднує моніторинг якості повітря з освітніми програмами. Система включає датчики для вимірювання концентрації PM_{2.5}, CO₂, летких органічних сполук, а також температури, вологості та атмосферного тиску. Дані візуалізуються на інтерактивній платформі, яка використовується для навчання учнів основам екології, аналізу даних та програмування. Проєкт стимулює участь молоді у вирішенні екологічних проблем та формує культуру свідомого ставлення до навколишнього середовища [16, 18]. Аналіз даних про забруднення повітря у поєднанні з інформацією про транспортні потоки дозволяє оптимізувати маршрути та графіки руху громадського транспорту для зменшення впливу забруднювачів на населення. Інтеграція з системами охорони здоров'я забезпечує раннє попередження лікарень та медичних служб про погіршення якості повітря, що дозволяє підготуватися до можливого збільшення кількості пацієнтів з респіраторними проблемами [28, 45].

									Арк.
									16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

Таблиця 1.4 – Порівняння хмарних платформ для систем моніторингу якості

повітря

Платформа	Масштабованість	Аналітичні можливості	Візуалізація	Рівень безпеки	Цінова модель	Підтримка IoT протоколів
ThingSpeak	Середня	Висока (MATLAB)	Середня	Середній	Freemium	MQTT, HTTP
Google Cloud IoT	Дуже висока	Дуже висока	Висока	Високий	Pay-as- you-go	MQTT, HTTP
AWS IoT	Дуже висока	Дуже висока	Висока	Високий	Pay-as- you-go	MQTT, HTTPS, WebSockets
Azure IoT Hub	Дуже висока	Висока	Висока	Високий	Pay-as- you-go	MQTT, AMQP, HTTPS
Ubidots	Висока	Середня	Висока	Середній	Freemium	MQTT, HTTP, TCP
Blynk	Низька	Низька	Середня	Середній	Freemium	HTTP
Thingier.io	Середня	Середня	Висока	Середній	Freemium	MQTT, HTTP
PubNub	Дуже висока	Середня	Низька	Високий	Pay-as- you-go	MQTT, WebSockets

Залучення громадськості до моніторингу якості повітря через проекти громадянської науки суттєво розширює можливості збору даних та підвищує екологічну свідомість населення. Платформа Sensor.Community (раніше відома як Luftdaten) об'єднує тисячі саморобних датчиків по всьому світу, створюючи глобальну мережу моніторингу якості повітря з відкритим доступом до даних. Учасники проєкту виготовляють датчики за детальними інструкціями, використовуючи доступні компоненти, та підключають їх до центральної платформи через Wi-Fi. Зібрані дані візуалізуються на інтерактивній карті та доступні для завантаження через API, що сприяє проведенню досліджень та розробці нових сервісів [16, 25].

Застосування смартфонів як платформи для моніторингу якості повітря демонструє значний потенціал через поширеність цих пристроїв та наявність

вбудованих сенсорів. Додатки AirCasting та HabitatMap дозволяють підключати зовнішні датчики якості повітря до смартфонів через Bluetooth та використовувати GPS для точного визначення місця вимірювання. Дані передаються на хмарну платформу, де вони інтегруються з інформацією від інших користувачів для створення колективної карти забруднення. Використання смартфонів суттєво знижує поріг входження для участі у моніторингу якості повітря та сприяє формуванню активної спільноти екологічно свідомих громадян [4, 27].

Системи моніторингу для промислових об'єктів мають підвищені вимоги до надійності та точності вимірювань, а також додаткові функції контролю відповідності викидів нормативним вимогам. Аналітичні інструменти дозволяють виявляти аномалії у роботі очисного обладнання та оптимізувати виробничі процеси для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище [37, 44]. Імплементация систем моніторингу якості повітря у транспортних засобах дозволяє контролювати середовище всередині салону та інформувати водіїв та пасажирів про рівень забруднення. Системи від Goh C. C. та співавторів використовують нейронні мережі для прогнозування якості повітря всередині автомобіля на основі даних від датчиків та інформації про зовнішнє середовище, автоматично регулюючи роботу систем вентиляції та кондиціонування для забезпечення комфортних та безпечних умов [28]. Рішення також можуть надавати рекомендації щодо вибору маршруту з меншим рівнем забруднення для зменшення впливу шкідливих речовин на здоров'я водія та пасажирів.

Калібрування низьковартісних датчиків залишається одним з ключових викликів для широкомасштабного впровадження систем моніторингу якості повітря. Методи, запропоновані Qin X. та Wang W. C., включають порівняльні вимірювання з еталонними приладами, застосування регресійних моделей для корекції показників та використання алгоритмів машинного навчання для компенсації впливу температури, вологості та інших факторів на роботу сенсорів [43, 54]. Динамічне калібрування в польових умовах з використанням мобільних референсних станцій дозволяє підтримувати точність вимірювань мережі датчиків

									Арк.
									18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

протягом тривалого періоду експлуатації без необхідності демонтажу та лабораторного обслуговування.

Інтеграція даних моніторингу якості повітря з інформацією про здоров'я населення дозволяє оцінювати вплив забруднення на поширення респіраторних та серцево-судинних захворювань, а також розробляти заходи для зменшення негативних наслідків. Системи, що поєднують дані про концентрацію забруднювачів з інформацією від медичних установ та показниками смартфонів і носимих пристроїв, дозволяють виявляти кореляції між якістю повітря та станом здоров'я різних груп населення. Результати таких досліджень використовуються для розробки рекомендацій щодо планування міської інфраструктури, регулювання транспортних потоків та організації медичного обслуговування з урахуванням екологічної ситуації [13, 26].

1.3. Висновки. Постановка задачі

Аналіз сучасного стану технологій моніторингу якості повітря виявив значний прогрес у створенні програмно-апаратних комплексів на основі інтернету речей та хмарних обчислень. Незважаючи на наявність широкого спектру комерційних та відкритих рішень, залишаються актуальними питання розробки систем з оптимальним співвідношенням вартості, точності та функціональності для різних сценаріїв використання. Поширення низьковартісних датчиків надає можливість розгортання масштабних мереж моніторингу з високою географічною роздільною здатністю, проте вимагає вирішення проблем калібрування, забезпечення надійності даних та ефективної обробки великих обсягів інформації.

Розвиток сучасних інформаційних технологій дозволяє підвищити ефективність систем моніторингу якості повітря за рахунок використання хмарних платформ для зберігання та обробки даних, алгоритмів машинного навчання для прогнозування змін забруднення та інтелектуальних інтерфейсів для представлення інформації користувачам. Впровадження таких систем створює

									Арк.
									19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

передумови для покращення екологічної ситуації через підвищення поінформованості населення, оптимізацію міської інфраструктури та прийняття обґрунтованих рішень щодо зменшення викидів забруднюючих речовин.

Головною метою дослідження є розробка та реалізація програмно-апаратного засобу для відстеження показників якості повітря з можливістю зберігання та аналізу даних у хмарному середовищі. Розроблювана система має забезпечувати вимірювання ключових параметрів забруднення атмосферного повітря, включаючи концентрацію твердих частинок, шкідливих газів та метеорологічні параметри, з подальшою передачею зібраної інформації на хмарну платформу для зберігання, аналізу та візуалізації.

Розроблювана система повинна відповідати ряду технічних вимог, які забезпечать її ефективне функціонування в різних умовах експлуатації. Апаратна частина має працювати автономно з використанням акумуляторного живлення або зовнішнього джерела енергії, забезпечувати безперебійне вимірювання параметрів повітря з визначеною періодичністю та передачу даних на хмарну платформу через доступні канали зв'язку, включаючи Wi-Fi, мобільні мережі або спеціалізовані протоколи інтернету речей.

Програмна складова системи повинна забезпечувати надійний збір даних від датчиків з урахуванням їх особливостей та можливих помилок вимірювання, попередню обробку інформації для зменшення обсягу даних, що передаються, шифрування та аутентифікацію для захисту від несанкціонованого доступу, а також механізми відновлення після збоїв з мінімальною втратою інформації. Хмарна платформа має надавати можливість зберігання даних з множини пристроїв, їх аналізу з використанням статистичних методів та алгоритмів машинного навчання, візуалізації результатів у вигляді графіків, карт та інформаційних панелей, доступних через веб-інтерфейс та мобільний додаток.

Основними функціональними вимогами до розроблюваної системи є безперервний моніторинг концентрації забруднювачів у повітрі з можливістю налаштування періодичності вимірювань залежно від вимог конкретного сценарію

									Арк.
									20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ

використання, автоматична калібрування датчиків для забезпечення точності вимірювань, виявлення аномалій та критичних рівнів забруднення з генерацією відповідних сповіщень, збереження даних в енергонезалежній пам'яті при відсутності зв'язку з хмарною платформою з подальшою синхронізацією при відновленні підключення.

Важливою вимогою до системи є масштабованість, що дозволить розгортати мережі з великою кількістю пристроїв для моніторингу якості повітря на значних територіях. Архітектура хмарної платформи повинна підтримувати горизонтальне масштабування для обробки зростаючого обсягу даних без погіршення продуктивності, а програмне забезпечення пристроїв – забезпечувати можливість віддаленого оновлення та конфігурування для адаптації до змінних умов експлуатації.

Розроблювана система спрямована на використання в різних сценаріях, включаючи моніторинг міського середовища, контроль якості повітря в житлових та офісних приміщеннях, спостереження за екологічною ситуацією навколо промислових об'єктів та транспортних магістралей. Гнучкість конфігурації та масштабованість дозволять адаптувати систему до потреб різних користувачів – від окремих громадян та освітніх установ до муніципальних служб та промислових підприємств.

Кінцевим результатом дослідження стане створення функціонального прототипу програмно-апаратного засобу для відстеження показників якості повітря із збереженням даних у хмарі, який демонструватиме практичну реалізацію запропонованої архітектури та технічних рішень. Прототип включатиме апаратний модуль з набором датчиків та мікроконтролером, програмне забезпечення для керування пристроєм та передачі даних, хмарну платформу для зберігання та аналізу інформації, веб-інтерфейс та мобільний додаток для взаємодії з користувачами.

Оцінка ефективності розробленої системи буде проводитися шляхом порівняння результатів вимірювань з даними професійного обладнання, аналізу

						КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			21

надійності роботи в різних умовах експлуатації, вивчення відгуків користувачів щодо зручності використання та функціональності. Результати оцінювання дозволять визначити напрямки подальшого вдосконалення системи та можливості її впровадження в різних сферах для покращення ефективності моніторингу якості повітря та прийняття обґрунтованих рішень щодо покращення екологічної ситуації.

Створення програмно-апаратного засобу для відстеження показників якості повітря із збереженням даних у хмарі дозволить розширити можливості моніторингу забруднення атмосфери за рахунок використання сучасних інформаційних технологій, забезпечить доступ до актуальної інформації про стан повітря для широкого кола користувачів та сприятиме формуванню екологічної свідомості населення. Розроблювана система має потенціал для подальшого розвитку шляхом інтеграції з іншими міськими інформаційними системами, впровадження додаткових аналітичних інструментів для прогнозування змін якості повітря та розширення функціональності для моніторингу інших параметрів навколишнього середовища. Результати дослідження можуть бути використані для створення комерційних продуктів, розвитку проєктів громадянської науки та вдосконалення систем екологічного моніторингу на муніципальному та державному рівнях.

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

2 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО ЗАСОБУ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

2.1. Встановлення вимог до програмно-апаратного засобу

Проєктування ефективного програмно-апаратного комплексу для моніторингу якості повітря потребує чіткого визначення функціональних та нефункціональних вимог, які забезпечать створення надійної системи з оптимальними характеристиками та можливостями. Вимоги формуються на основі аналізу потреб потенційних користувачів, особливостей експлуатації пристроїв у різних умовах середовища, технологічних обмежень та актуальних стандартів вимірювання параметрів атмосферного повітря. Розробка програмно-апаратного засобу відстеження показників якості повітря із збереженням даних у хмарі передбачає створення інтегрованої системи, компоненти якої узгоджено взаємодіють між собою для забезпечення безперервного збору, обробки, передачі та аналізу інформації про стан атмосфери.

Функціональні вимоги до програмно-апаратного комплексу моніторингу якості повітря визначають основні операції та можливості, які повинна забезпечувати система. Апаратний модуль має виконувати збір даних з сенсорів із заданою періодичністю, забезпечувати первинну обробку сигналів для усунення шумів та компенсації впливу зовнішніх факторів, здійснювати тимчасове зберігання інформації при відсутності зв'язку з хмарною платформою. Функціональність програмного забезпечення мікроконтролера включає керування режимами роботи датчиків, форматування даних для передачі, реалізацію протоколів зв'язку з хмарними сервісами, автоматичне відновлення після збоїв. Хмарна платформа повинна забезпечувати прийом та збереження даних від мережі пристроїв, їх структуроване зберігання у базі даних, проведення аналітичних операцій та генерацію звітів, надання інтерфейсів для доступу користувачів до інформації.

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Надійність функціонування апаратної частини системи забезпечується вибором компонентів з відповідними характеристиками стійкості до впливу зовнішнього середовища. Корпус пристрою повинен мати ступінь захисту IP54 або вище для забезпечення роботи в умовах вулиці, включаючи захист від дощу, пилу та прямих сонячних променів. Діапазон робочих температур компонентів має становити від -20°C до $+50^{\circ}\text{C}$, що відповідає кліматичним умовам більшості регіонів України протягом року. Електроніка повинна мати захист від перенапруги та електростатичних розрядів для запобігання виходу з ладу при нестабільному електроживленні або під час грози. Середній час напрацювання на відмову (MTBF) для системи в цілому має становити не менше 50000 годин, що забезпечить тривалу експлуатацію без необхідності заміни компонентів.

Енергоефективність є ключовою вимогою для забезпечення автономної роботи пристроїв моніторингу якості повітря. Споживання енергії апаратним модулем у режимі вимірювання та передачі даних не повинно перевищувати 500 мВт, у режимі очікування – 50 мВт. При живленні від літій-іонного акумулятора ємністю 3000 мАг пристрій має забезпечувати безперервну роботу протягом щонайменше 72 годин при періодичності вимірювань один раз на 5 хвилин. Програмне забезпечення мікроконтролера повинно реалізовувати алгоритми енергозбереження, включаючи переведення неактивних компонентів у режим сну, динамічне керування частотою вимірювань залежно від зміни параметрів повітря, оптимізацію протоколів передачі даних для мінімізації енергетичних витрат на радіозв'язок.

Комунікаційні можливості системи мають забезпечувати надійну передачу даних на хмарну платформу з використанням різних технологій зв'язку залежно від умов розгортання та доступності мереж. Основним каналом зв'язку для стаціонарних пристроїв є Wi-Fi з підтримкою стандартів 802.11b/g/n, що забезпечує високу швидкість передачі даних та інтеграцію з існуючою мережевою інфраструктурою будівель. Мобільні пристрої та системи, розташовані у віддалених місцях, повинні підтримувати передачу даних через мережі

						КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			24

стільникового зв'язку з використанням технологій NB-IoT або LTE-M, які забезпечують низьке енергоспоживання та хороше покриття. Додатковою опцією для створення локальних мереж датчиків може бути використання технології LoRaWAN, що дозволяє організувати енергоефективну передачу даних на відстань до 10 км у міському середовищі.

Питання безпеки та захисту даних потребують особливої уваги при розробці системи моніторингу якості повітря з хмарним зберіганням інформації. Передача даних між пристроями та хмарною платформою повинна здійснюватися із використанням шифрування (TLS 1.3 або новіше) для запобігання перехопленню та підміні інформації. Аутентифікація пристроїв у системі має реалізовуватися через унікальні сертифікати або токени, що генеруються при реєстрації пристрою та зберігаються у захищеній пам'яті мікроконтролера. Хмарна платформа повинна забезпечувати розмежування доступу до даних з використанням ролевої моделі, журналювання всіх операцій з даними для забезпечення аудиту, регулярне резервне копіювання інформації для запобігання втраті при збоях апаратного забезпечення.

Таблиця 2.1 – Функціональні вимоги до програмно-апаратного засобу моніторингу якості повітря

№	Вимога	Опис
1	Вимірювання концентрації забруднювачів	Визначення концентрації твердих частинок (PM2.5, PM10) та газів (CO, NO2, SO2, O3) з заданою точністю та періодичністю
2	Моніторинг метеорологічних параметрів	Вимірювання температури, вологості, атмосферного тиску та швидкості вітру для корекції даних та аналізу впливу погодних умов
3	Автономна робота	Функціонування без зовнішнього втручання протягом тривалого часу з використанням акумуляторного живлення або альтернативних джерел енергії
4	Передача даних на хмарну платформу	Безпечна та енергоефективна передача вимірювань на хмарний сервер через доступні канали зв'язку з оптимізацією обсягу трафіку

Кінець таблиці 2.1 – Функціональні вимоги до програмно-апаратного засобу моніторингу якості повітря

5	Зберігання даних при відсутності зв'язку	Накопичення результатів вимірювань у локальній пам'яті при недоступності підключення до хмарної платформи з подальшою синхронізацією
6	Візуалізація даних	Графічне представлення результатів моніторингу у вигляді графіків, карт забруднення та інформаційних панелей через веб-інтерфейс та мобільний додаток
7	Генерація повідомлень та сповіщень	Автоматичне створення та розсилка сповіщень при виявленні критичних рівнів забруднення або аномальних змін показників якості повітря
8	Аналіз та прогнозування	Обробка історичних даних для виявлення трендів та прогнозування змін якості повітря з використанням статистичних моделей та алгоритмів машинного навчання

Продуктивність хмарної платформи повинна забезпечувати обробку даних від великої кількості пристроїв без суттєвих затримок та втрати інформації. Система має підтримувати одночасну роботу з щонайменше 1000 пристроїв, які надсилають дані з періодичністю 5 хвилин, що відповідає сценарію розгортання мережі моніторингу в межах великого міста. Час відгуку API для запису даних не повинен перевищувати 200 мс при нормальному навантаженні, 500 мс при пікових навантаженнях. Затримка при відображенні даних через веб-інтерфейс має становити не більше 1 секунди для стандартних запитів (останні вимірювання, погодинні графіки) та не більше 3 секунд для складних аналітичних запитів з обробкою історичних даних. Архітектура платформи повинна передбачати горизонтальне масштабування для збільшення продуктивності при зростанні кількості підключених пристроїв та обсягу даних.

Вимоги до інтерфейсу користувача зосереджені на забезпеченні зручного доступу до інформації про якість повітря через різні пристрої та платформи. Веб-інтерфейс має підтримувати адаптивний дизайн для коректного відображення на екранах різного розміру, включаючи комп'ютери, планшети та смартфони.

Мобільний додаток повинен бути доступний для платформ iOS та Android, забезпечувати швидкий доступ до ключової інформації про якість повітря без необхідності авторизації, підтримувати push-сповіщення для оперативного інформування користувачів про критичні зміни показників. Інтерфейс має бути інтуїтивно зрозумілим, надавати візуальне представлення даних у вигляді графіків, діаграм та індикаторів, що дозволяють швидко оцінити стан повітря без необхідності аналізу числових значень.

Економічні аспекти розробки програмно-апаратного засобу відстеження показників якості повітря відіграють суттєву роль при визначенні вимог до системи. Вартість виробництва одного пристрою не повинна перевищувати 100 євро при серійному виробництві, що зробить систему доступною для широкого кола користувачів, включаючи освітні установи, муніципалітети та громадські організації. Експлуатаційні витрати, включаючи електроенергію, передачу даних та обслуговування хмарної інфраструктури, мають становити не більше 5 євро на місяць на один пристрій при стандартному режимі використання. Очікуваний термін служби апаратної частини системи повинен становити не менше 5 років без необхідності заміни основних компонентів, що забезпечить позитивну економічну ефективність впровадження.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики датчиків для вимірювання показників якості повітря

Параметр	Діапазон вимірювання	Точність	Роздільна здатність	Час відгуку
Тверді частинки PM2.5	0-1000 мкг/м ³	±10%	1 мкг/м ³	<10 с
Тверді частинки PM10	0-1000 мкг/м ³	±10%	1 мкг/м ³	<10 с
Оксид вуглецю (CO)	0-1000 ppm	±5%	1 ppm	<30 с
Діоксид азоту (NO ₂)	0-10 ppm	±5%	0.1 ppm	<30 с
Діоксид сірки (SO ₂)	0-20 ppm	±5%	0.1 ppm	<30 с
Озон (O ₃)	0-10 ppm	±5%	0.1 ppm	<30 с
Температура	-40°C до +85°C	±0.5°C	0.1°C	<1 с
Відносна вологість	0-100%	±3%	0.1%	<1 с
Атмосферний тиск	300-1100 гПа	±1 гПа	0.1 гПа	<1 с

Вимоги до програмного забезпечення хмарної платформи включають забезпечення надійного зберігання та обробки даних з мережі пристроїв моніторингу. База даних повинна бути оптимізована для зберігання часових рядів, забезпечувати швидкий доступ до останніх вимірювань та ефективну агрегацію історичних даних для аналізу трендів. Система має підтримувати автоматичне архівування старих даних з можливістю їх відновлення при необхідності проведення ретроспективного аналізу. Платформа повинна надавати REST API для інтеграції з зовнішніми системами та сервісами, включаючи можливість експорту даних у поширені формати (CSV, JSON, Excel) для подальшої обробки. Аналітичний модуль має реалізовувати алгоритми статистичної обробки даних, виявлення аномалій та прогнозування змін якості повітря на основі історичних трендів та зовнішніх факторів.

Нормативні вимоги та стандарти відіграють важливу роль при розробці системи моніторингу якості повітря. Вимірювання концентрації забруднювачів повинно відповідати методикам, визначеним у стандартах ISO 16000 (Якість повітря в приміщеннях) та ISO 4219 (Якість зовнішнього повітря), що забезпечить порівнянність результатів з даними офіційних станцій моніторингу. Передача та зберігання персональних даних користувачів мають відповідати вимогам Загального регламенту про захист даних (GDPR) або аналогічних національних законодавчих актів. Електронні компоненти системи повинні мати сертифікацію відповідності директивам ЄС щодо електромагнітної сумісності (EMC) та обмеження використання небезпечних речовин (RoHS).

Таблиця 2.3 – Порівняння технологій бездротового зв'язку для передачі даних з пристроїв моніторингу

Технологія	Радіус дії	Енергоспоживання	Швидкість передачі	Переваги	Недоліки
Wi-Fi (802.11b/g/n)	До 100 м	Високе	До 150 Мбіт/с	Висока швидкість, поширеність	Високе енергоспоживання, обмежений радіус дії

Кінець таблиці 2.3 – Порівняння технологій бездротового зв'язку для передачі даних з пристроїв моніторингу

Bluetooth Low Energy	До 100 м	Дуже низьке	До 2 Мбіт/с	Енергоефективність, простота підключення	Обмежений радіус дії, потреба в гейтвеї
LoRaWAN	До 10 км	Низьке	0.3-50 кбіт/с	Великий радіус дії, низьке енергоспоживання	Низька швидкість передачі, потреба в інфраструктурі
NB-IoT	До 10 км	Низьке	До 250 кбіт/с	Використання існуючих мобільних мереж, висока проникність сигналу	Вища вартість передачі даних, залежність від мобільного оператора
Zigbee	До 100 м	Низьке	250 кбіт/с	Створення mesh-мереж, енергоефективність	Обмежена дальність, складність масштабування
LTE-M	До 10 км	Середнє	До 1 Мбіт/с	Висока швидкість, широке покриття	Вища вартість передачі даних, вище енергоспоживання порівняно з NB-IoT

Визначення вимог до програмно-апаратного засобу моніторингу якості повітря включало аналіз технічних, функціональних, економічних та нормативних аспектів, які впливають на ефективність та практичну цінність системи. Комплексний підхід до формування вимог забезпечує створення збалансованого рішення, яке поєднує точність вимірювань, надійність функціонування, зручність використання та економічну доцільність впровадження. Програмно-апаратний засіб, розроблений відповідно до визначених вимог, дозволить ефективно відстежувати показники якості повітря в різних середовищах з можливістю аналізу даних та прийняття обґрунтованих рішень щодо покращення екологічної ситуації.

2.2. Узагальнена структура програмно-апаратного засобу

Програмно-апаратний засіб відстеження показників якості повітря представляє собою складну інтегровану систему, компоненти якої взаємодіють між собою для забезпечення безперервного моніторингу, обробки та аналізу екологічних параметрів атмосфери. Структурна організація системи базується на

модульному підході, який забезпечує гнучкість конфігурації, можливість масштабування та адаптації до різноманітних сценаріїв використання без необхідності внесення фундаментальних змін у архітектуру. Кожен функціональний блок виконує специфічний набір завдань, взаємодіючи з іншими компонентами через стандартизовані інтерфейси, що спрощує розробку, тестування та подальше вдосконалення системи.

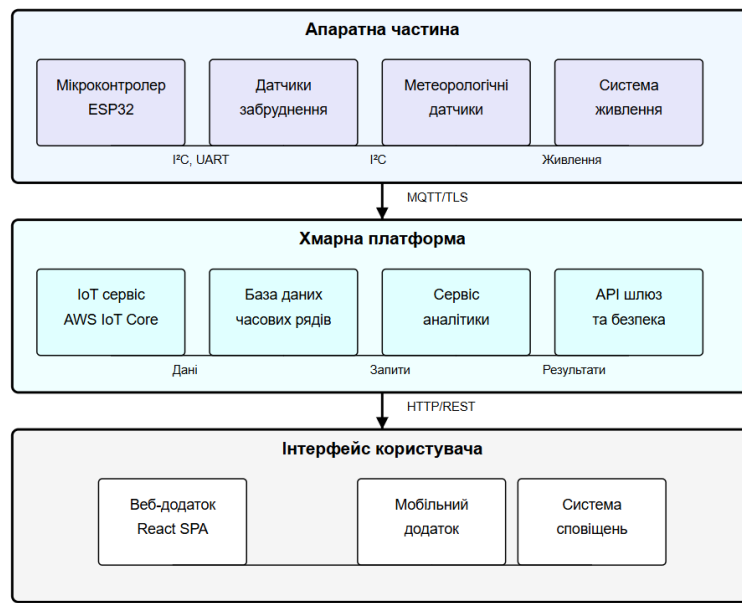


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема програмно-апаратного засобу відстеження показників якості повітря

Загальна архітектура програмно-апаратного засобу складається з трьох основних рівнів: сенсорного рівня, який включає апаратні модулі з датчиками для вимірювання параметрів повітря; комунікаційного рівня, що забезпечує передачу даних від пристроїв до центральної системи; хмарного рівня, який реалізує зберігання, обробку, аналіз інформації та надання доступу користувачам через програмні інтерфейси. Така багаторівнева архітектура дозволяє оптимізувати розподіл обчислювальних ресурсів, мінімізувати навантаження на кінцеві пристрої та забезпечити надійне функціонування системи в умовах нестабільного зв'язку або тимчасових відмов окремих компонентів. Модульна структура забезпечує незалежність розробки та оновлення кожного рівня, що прискорює впровадження нових функцій та усунення виявлених проблем. Апаратний модуль моніторингу

якості повітря складається з мікроконтролерного блоку, набору сенсорів для вимірювання концентрації забруднювачів та метеорологічних параметрів, комунікаційного модуля для передачі даних, блоку живлення та корпусу з елементами кріплення для встановлення пристрою в різних умовах експлуатації. Центральним елементом апаратного модуля є мікроконтролер з низьким енергоспоживанням, який керує роботою всіх компонентів, здійснює збір та попередню обробку даних, забезпечує взаємодію з хмарною платформою. Мікроконтролер повинен мати достатню обчислювальну потужність для виконання алгоритмів калібрування та фільтрації даних, підтримувати інтерфейси для підключення різних типів датчиків (I2C, SPI, UART, аналогові входи), забезпечувати енергоефективні режими роботи для зменшення споживання при відсутності активних вимірювань.

Датчики твердих частинок у повітрі використовують оптичний метод вимірювання, який базується на розсіюванні світла на частинках різного розміру. Лазерний діод генерує промінь світла, який проходить через повітряний потік, створений малогабаритним вентилятором. Фотодетектор реєструє розсіяне світло, інтенсивність якого залежить від кількості та розміру частинок. Спеціалізований мікропроцесор перетворює аналоговий сигнал у цифрову форму та обчислює концентрацію частинок PM2.5 та PM10 у мікрограмах на кубічний метр. Такі датчики мають компактні розміри, низьке енергоспоживання та прийнятну точність для масового моніторингу якості повітря в міському середовищі. Додаткові алгоритми компенсації впливу вологості та температури реалізуються на рівні мікроконтролера для підвищення достовірності вимірювань при різних погодних умовах.

Метеорологічний модуль включає сенсори температури, вологості, атмосферного тиску та опціонально – напрямку і швидкості вітру. Показання цих датчиків використовуються для корекції результатів вимірювання концентрації забруднювачів, аналізу впливу погодних умов на якість повітря та прогнозування розповсюдження забруднень з урахуванням метеорологічних факторів.

									Арк.
									31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Температурний сенсор на основі термістора або цифрової інтегральної схеми забезпечує вимірювання з точністю до 0.5°C. Датчик вологості використовує ємнісний принцип, реєструючи зміни діелектричної проникності полімерного матеріалу залежно від вмісту вологи в повітрі. Барометричний датчик вимірює атмосферний тиск з високою точністю, що дозволяє також оцінювати висоту розташування пристрою над рівнем моря.

Комунікаційний блок апаратного модуля забезпечує передачу даних на хмарну платформу з використанням різних технологій безпроводного зв'язку. Wi-Fi модуль організовує підключення до локальних мереж у будівлях та міських районах з розвиненою інфраструктурою. Модуль стільникового зв'язку (NB-IoT, LTE-M) забезпечує більш широке покриття для пристроїв, розташованих у віддалених місцях. Для створення локальних мереж датчиків з низьким енергоспоживанням можуть використовуватися модулі LoRaWAN або Zigbee, які дозволяють організувати розподілену систему моніторингу з передачею даних через шлюзи.

Блок живлення апаратного модуля може мати різні конфігурації в залежності від умов експлуатації та доступності джерел енергії. Основним варіантом для стаціонарних пристроїв є використання зовнішнього джерела живлення з адаптером 220В/5В та перетворювачем напруги для забезпечення стабільного електроживлення компонентів системи. Портативні та автономні варіанти оснащуються літій-іонними або літій-полімерними акумуляторами з ємністю 3000-5000 мАг, які забезпечують роботу протягом кількох днів при оптимізованому режимі вимірювань. Перспективним рішенням є інтеграція фотоелектричних перетворювачів (сонячних панелей) для підзарядки акумуляторів у денний час, що забезпечить повністю автономну роботу пристроїв протягом тривалого часу без необхідності обслуговування.

Програмне забезпечення мікроконтролера реалізує алгоритми керування режимами роботи датчиків, збору та обробки даних, взаємодії з хмарною платформою. Архітектура програмного забезпечення організована за принципом

									Арк.
									32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

Кінець таблиці 2.4 – Компоненти апаратного модуля системи моніторингу якості повітря

Датчик атмосферного тиску	Вимірювання тиску	300-1100 гПа, точність ±1 гПа	Компенсація температурного впливу
Wi-Fi модуль	Передача даних через локальні мережі	802.11b/g/n, 2.4 ГГц	Підтримка WPA2-Enterprise, енергозберігаючі режими
LTE-M/NB-IoT модуль	Передача даних через мобільні мережі	Підтримка Band 3, 8, 20	Гнучкий вибір оператора, режим PSM для економії енергії
Блок живлення	Забезпечення енергією компонентів системи	Вхід 5-12В, вихід 3.3В/5В	Захист від перенапруги, моніторинг рівня заряду
Акумулятор	Автономне живлення	Li-Ion, 3.7В, 3000-5000 мАг	Схема захисту від перезаряду та глибокого розряду
Корпус	Захист компонентів від зовнішніх впливів	ABS пластик, IP54	Вентиляційні отвори з фільтрами, захист від УФ

Комунікаційний модуль програмного забезпечення мікроконтролера реалізує протоколи для надійної передачі даних на хмарну платформу. Залежно від доступних каналів зв'язку використовуються протоколи MQTT, HTTP/HTTPS або CoAP, які оптимізовані для передачі даних з пристроїв інтернету речей. Механізми буферизації забезпечують збереження даних при тимчасовій втраті підключення з подальшою синхронізацією при відновленні зв'язку. Шифрування даних з використанням TLS або DTLS захищає інформацію від несанкціонованого доступу та підміни. Протоколи стиснення даних дозволяють зменшити обсяг трафіку та енергоспоживання при передачі інформації через мережі з обмеженою пропускнуою здатністю.

Модуль керування енергоспоживанням оптимізує використання ресурсів акумулятора для максимізації автономної роботи пристрою. Алгоритми динамічно регулюють частоту вимірювань та передачі даних залежно від рівня заряду акумулятора, активності змін параметрів повітря та наявності критичних рівнів забруднення. Неактивні компоненти переводяться в режими зниженого енергоспоживання або повністю відключаються в періоди між вимірюваннями.

Планування енергоємних операцій, таких як калібрування датчиків або оновлення програмного забезпечення, здійснюється з урахуванням доступного запасу енергії та прогнозованого графіку використання пристрою.

Збереження даних при відсутності підключення до хмарної платформи організовано з використанням локальної файлової системи у флеш-пам'яті мікроконтролера. Інформація структурується у вигляді журналу записів з часовими мітками, що дозволяє відновити хронологію вимірювань при подальшій синхронізації з хмарою. Реалізовано механізми кільцевого буфера для обмеження обсягу використовуваної пам'яті та запобігання втрати найбільш актуальних даних при заповненні сховища. Періодичне створення контрольних точок забезпечує цілісність даних при раптовому вимкненні живлення або збоях в роботі пристрою.

Хмарна платформа системи моніторингу якості повітря представляє собою багаторівневу програмну інфраструктуру, розгорнуту в середовищі постачальника хмарних послуг. Архітектура хмарної платформи побудована за мікросервісним принципом, який забезпечує гнучкість розгортання, масштабування та оновлення окремих функціональних компонентів без впливу на роботу всієї системи. Контейнеризація сервісів з використанням технологій Docker та Kubernetes дозволяє ефективно використовувати обчислювальні ресурси та забезпечує портативність між різними хмарними середовищами. Балансування навантаження та автоматичне масштабування забезпечують стабільну роботу системи при зміні кількості підключених пристроїв та інтенсивності надходження даних.

API-шлюз є точкою входу для всіх взаємодій з хмарною платформою, забезпечуючи маршрутизацію запитів до відповідних сервісів, аутентифікацію та авторизацію, обмеження кількості запитів для запобігання перевантаженню системи. Шлюз підтримує різні протоколи для взаємодії з пристроями та зовнішніми системами, включаючи HTTP, MQTT, WebSocket, що дозволяє інтегрувати різноманітні джерела даних у єдину екосистему. Каскадні проксі та кешування зменшують навантаження на backend-сервіси та покращують швидкість відгуку для часто запитуваної інформації.

									Арк.
									35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

розробників дозволяє створювати сторонні додатки та інтеграції з використанням даних про якість повітря. Конектори для популярних аналітичних платформ (Power BI, Tableau) спрощують включення даних моніторингу в корпоративні інформаційні панелі та звіти. Модулі експорту даних у стандартні формати (CSV, JSON, Excel) забезпечують можливість використання інформації в наукових дослідженнях, статистичних аналізах, екологічних звітах. Ідентифікація даних через унікальні ідентифікатори та часові мітки дозволяє повторно використовувати інформацію в інших системах.

Безпека та захист даних забезпечуються на всіх рівнях системи. Шифрування даних при передачі з використанням TLS/SSL запобігає перехопленню інформації. Аутентифікація пристроїв на основі сертифікатів або токенів захищає від підключення підроблених датчиків. Авторизація користувачів з використанням ролевої моделі доступу обмежує можливості взаємодії з системою відповідно до рівня повноважень. Аудит дій користувачів та моніторинг аномальної активності дозволяють виявляти потенційні спроби несанкціонованого доступу. Регулярне сканування вразливостей та оновлення компонентів забезпечують підтримку актуального рівня захисту відповідно до сучасних загроз.

2.3. Схема електрична принципова

Електрична принципова схема програмно-апаратного засобу відстеження показників якості повітря втілює взаємозв'язки між функціональними блоками системи на рівні електронних компонентів та їх з'єднань. Процес розробки схеми включав аналіз технічних характеристик датчиків та інших електронних компонентів, оптимізацію рішень для забезпечення надійності функціонування, мінімізацію енергоспоживання та вартості при збереженні необхідної функціональності. Застосування модульного підходу при проектуванні схеми дозволило виділити основні функціональні блоки: мікроконтролерний модуль,

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

блок датчиків забруднювачів повітря, метеорологічний блок, комунікаційний модуль, систему електроживлення та додаткову периферію.

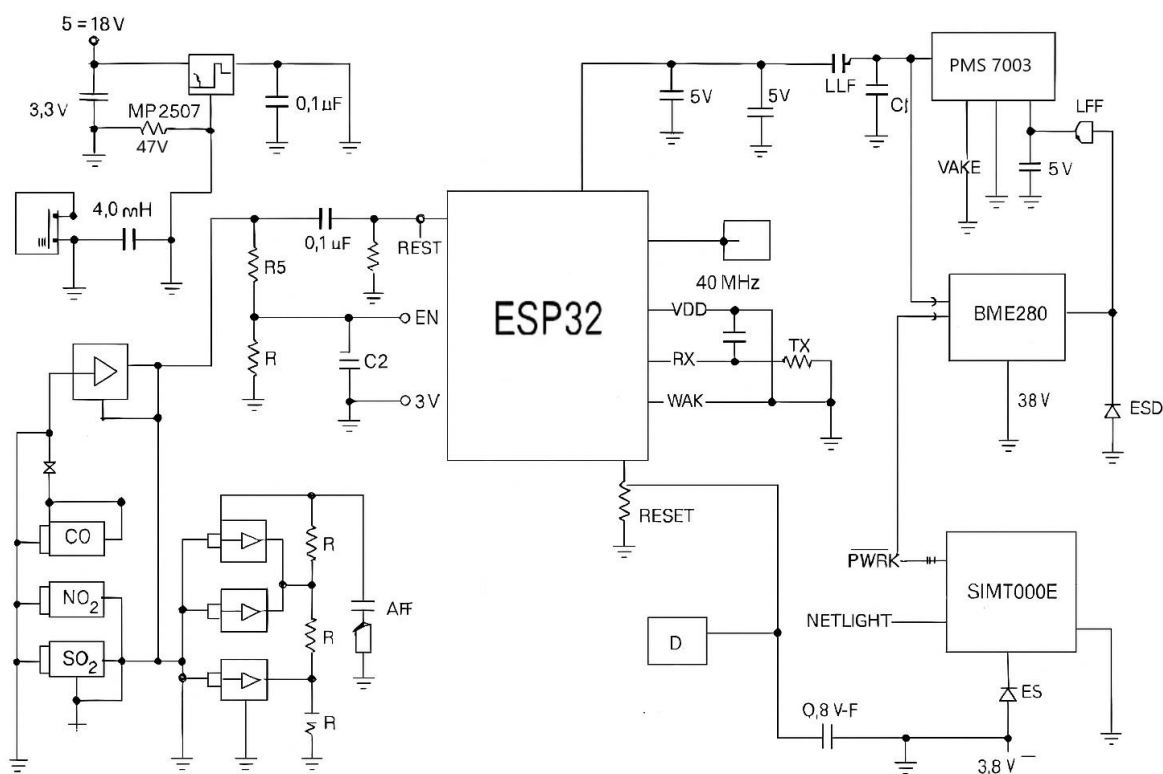


Рисунок 2.2 – Схема електрична принципова програмно-апаратного засобу

Центральним елементом схеми виступає мікроконтролер ESP32, який поєднує високу продуктивність, низьке споживання енергії та розвинені комунікаційні можливості. Обраний мікроконтролер базується на двоядерному процесорі Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, що забезпечує достатню обчислювальну потужність для одночасної обробки сигналів від множини датчиків та підтримки різних комунікаційних інтерфейсів. Внутрішня архітектура ESP32 включає 520 КБ SRAM, можливість підключення зовнішньої флеш-пам'яті обсягом до 16 МБ, апаратну підтримку шифрування AES, SHA та RSA, що критично важливо для забезпечення безпеки передачі даних у системах інтернету речей. Інтегровані модулі Wi-Fi 802.11b/g/n та Bluetooth 4.2 LE спрощують схемотехнічне рішення та зменшують кількість зовнішніх компонентів, одночасно забезпечуючи гнучкість у виборі каналів зв'язку з хмарною платформою.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Датчик твердих частинок PMS7003 інтегрований у схему через UART інтерфейс, що забезпечує надійну передачу даних про концентрацію частинок PM1.0, PM2.5 та PM10 у повітрі. Електрична схема підключення даного датчика включає лінії RX, TX для обміну даними, лінію керування режимом сну для економії енергії та окрему лінію живлення 5В, оскільки внутрішній вентилятор та лазерний діод потребують більшого струму, ніж може забезпечити стандартний вихід мікроконтролера. Для захисту логічних рівнів мікроконтролера (3.3В) при взаємодії з датчиком (5В) використовується двонаправлений конвертер логічних рівнів на основі MOSFETів, що забезпечує безпечну передачу сигналів між компонентами з різною напругою живлення. Лінії живлення датчика захищені від перенапруги TVS-діодом та фільтруються LC-фільтром для мінімізації електромагнітних завад від імпульсного двигуна вентилятора.

Електрохімічні датчики газів CO, NO₂, SO₂ та O₃ підключені до аналогово-цифрового перетворювача мікроконтролера через схеми перетворення струму в напругу та підсилення сигналу. Кожен датчик має індивідуальну схему підсилення на основі операційного підсилювача з низьким рівнем шуму та дрейфу, що забезпечує перетворення наноамперних струмів, генерованих електрохімічними осередками, у відповідний рівень напруги для АЦП. Коефіцієнт підсилення налаштовується індивідуально для кожного типу датчика з використанням прецизійних резисторів з низьким температурним коефіцієнтом для мінімізації впливу коливань температури на результати вимірювань. Додатково реалізовано схему термокомпенсації на основі NTC-термістора, що дозволяє програмно корегувати показання датчиків залежно від температури навколишнього середовища для підвищення точності вимірювань. Датчик температури, вологості та атмосферного тиску BME280 забезпечує вимірювання ключових метеорологічних параметрів з високою точністю. З'єднання з мікроконтролером реалізовано через інтерфейс I2C, що потребує лише двох сигнальних ліній (SDA, SCL) з підтягуючими резисторами 4.7 кОм для забезпечення коректних логічних рівнів. Живлення датчика здійснюється від стабілізованої лінії 3.3В з додатковим

									Арк.
									40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

блокувальним конденсатором 100 нФ для фільтрації високочастотних завад. Опціональний роз'єм для підключення зовнішнього датчика швидкості та напрямку вітру дозволяє доповнити метеорологічні вимірювання при необхідності більш детального аналізу розповсюдження забруднювачів повітря.

Модуль стільникового зв'язку SIM7000E інтегрований у схему для забезпечення передачі даних через мережі NB-IoT/LTE-M у місцях, де відсутнє Wi-Fi покриття. Електрична схема підключення включає виділений UART інтерфейс для обміну командами та даними, лінії керування живленням та сигнал індикації статусу мережі. Враховуючи значне енергоспоживання модуля під час передачі даних (до 2А в імпульсному режимі), реалізовано окремий ланцюг живлення з LDO-регулятором та великими конденсаторами (1000 мкФ) для згладжування пікового споживання струму. Для захисту від електростатичних розрядів, які можуть потрапити через зовнішню антену, використовуються ESD-діоди на високочастотних лініях. Додатково передбачено тримач SIM-карти з відповідними захисними резисторами на сигнальних лініях для забезпечення стабільної роботи з різними мобільними операторами.

Система електроживлення пристрою розроблена з урахуванням вимог до автономної роботи та можливості використання різних джерел енергії. Основою схеми живлення є понижуючий імпульсний перетворювач на базі мікросхеми MP2307, який забезпечує високу ефективність (до 95%) при перетворенні вхідної напруги 5-18В у стабілізовану напругу 3.3В для живлення більшості компонентів системи. Додатковий лінійний регулятор на базі AMS1117-3.3 використовується для живлення аналогових компонентів та датчиків, чутливих до шумів імпульсного перетворення. Схема захисту від зворотної полярності на основі Р-канального MOSFET транзистора запобігає пошкодженню пристрою при неправильному підключенні джерела живлення.

Акумуляторна підсистема включає контролер заряду/розряду літій-іонного акумулятора ємністю 3000-5000 мАг, який забезпечує оптимальні параметри заряду для максимізації терміну служби батареї. Спеціалізована мікросхема

						КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			41

BQ24075 реалізує алгоритм заряду CC/CV (постійний струм/постійна напруга) з температурною компенсацією та захистом від перезаряду. Схема живлення передбачає можливість одночасного заряду акумулятора та роботи пристрою від зовнішнього джерела енергії, що забезпечує безперервність функціонування системи при наявності зовнішнього живлення. Моніторинг стану акумулятора реалізований через аналогово-цифровий перетворювач мікроконтролера, який вимірює напругу батареї через дільник напруги з точно підібраними резисторами.

Для проєктів з розгортанням у віддалених місцях передбачено можливість підключення сонячної панелі через спеціалізований контролер заряду з MPPT (Maximum Power Point Tracking), що забезпечує максимальну ефективність перетворення сонячної енергії. Схема включає захист від глибокого розряду акумулятора, який відключає навантаження при зниженні напруги нижче 3.2В для запобігання незворотному пошкодженню літій-іонної батареї. Індикація стану зарядки та рівня заряду акумулятора реалізована через світлодіоди з обмежувачами струму резисторами, що дозволяє візуально контролювати стан системи живлення при технічному обслуговуванні пристрою.

Схема індикації стану пристрою реалізована на базі RGB-світлодіода, керованого через ШІМ-виходи мікроконтролера для можливості відображення різних станів системи з використанням різних кольорів та режимів світіння. Додатково реалізовано апаратне управління світлодіодами через транзисторні ключі для індикації критичних станів (живлення, заряд, помилка), що працюють незалежно від програмного забезпечення мікроконтролера та можуть відображати стан системи навіть при збоях програмного забезпечення.

Захист від електромагнітних завад та забезпечення електромагнітної сумісності є важливими аспектами при розробці електричної схеми пристрою, що працює з аналоговими сигналами від датчиків. Розділення аналогової та цифрової земель з'єднанням в одній точці (зірка) мінімізує вплив цифрових шумів на чутливі аналогові компоненти. Фільтруючі конденсатори розміщені максимально близько до виводів живлення інтегральних мікросхем для локалізації

									Арк.
									42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

високочастотних струмів. Застосування феритових бісерів на лініях живлення забезпечує додаткову фільтрацію завад у широкому діапазоні частот. Сигнальні лінії аналогових датчиків екрановані та прокладені окремо від високочастотних цифрових сигналів для мінімізації наведень та перехресних завад.

Компонування електричної схеми виконано з урахуванням вимог до надійності та технологічності виробництва. Використання стандартних компонентів з поверхневим монтажем (SMD) розмірами не менше 0603 для пасивних елементів та корпусами SOIC, TSSOP, QFP для інтегральних мікросхем забезпечує баланс між компактністю та можливістю ручного або автоматизованого монтажу на стандартному обладнанні. Розміщення тестових точок у ключових вузлах схеми спрощує налагодження та діагностику пристрою при виробництві та експлуатації.

Таблиця 2.6 – Основні електронні компоненти програмно-апаратного засобу та їх характеристики

Компонент	Призначення	Основні характеристики	Інтерфейс підключення	Особливості схеми
ESP32-WROOM-32D	Мікроконтролер	240 МГц, 2 ядра, 512 КБ RAM, 16 МБ Flash	-	Кварц 40 МГц, захист від перенапруги, схема автоскидання
PMS7003	Датчик твердих частинок	PM1.0/PM2.5/PM10, 0-1000 мкг/м ³	UART	Конвертер логічних рівнів, захист від імпульсних завад
SPEC DGS-CO	Датчик CO	0-1000 ppm, роздільна здатність 1 ppm	Аналоговий	Схема підсилення на OP07, компенсація температури
SPEC DGS-NO2	Датчик NO ₂	0-10 ppm, роздільна здатність 0.1 ppm	Аналоговий	Диференційний підсилювач, фільтрація низьких частот
SPEC DGS-SO2	Датчик SO ₂	0-20 ppm, роздільна здатність 0.1 ppm	Аналоговий	Інструментальний підсилювач, схема зсуву нуля
SPEC DGS-O3	Датчик O ₃	0-10 ppm, роздільна здатність 0.1 ppm	Аналоговий	Прецизійний підсилювач, захист від перевантаження

Кінець таблиці 2.6 – Основні електронні компоненти програмно-апаратного засобу та їх характеристики

BME280	Датчик температури, вологості, тиску	-40°C до +85°C, 0-100% RH, 300-1100 гПа	I ² C	Підтягуючі резистори, блокувальні конденсатори
SIM7000E	Модуль NB-IoT/LTE-M	Multiband LTE Cat-M1/NB-IoT	UART	Стабілізація живлення, ESD захист на РЧ лініях
BQ24075	Контролер заряду Li-Ion	1A max, CC/CV режим, захист від перезаряду	I ² C	Термісторна схема, світлодіодна індикація стану
MP2307	DC-DC перетворювач	Вхід 5-18В, вихід 3.3В, ККД 95%	-	LC фільтр, компенсація ЕМЗ, обмеження пускового струму
W25Q128JVS1Q	Зовнішня флеш-пам'ять	128 Мбіт, SPI інтерфейс	SPI	Схема вибору кристалу, підтягуючі резистори на шині
TPL5110	Таймер режиму сну	Програмований період від 100 мс до 2 год	GPIO	RC схема налаштування періоду, вивід "Done"
TPS61021A	Підвищуючий перетворювач	Вхід 2.3-5.5В, вихід 5В, 5A max	-	Схема м'якого старту, компенсаційна мережа
TPS22918	Високоєфективний ключ	Rds(on) 20 мОм, вхід 5В/3А	GPIO	Керування живленням периферійних компонентів
TXB0104	Конвертер логічних рівнів	4-канальний, двонаправлений	GPIO	Узгодження 3.3В і 5В логіки між МК та датчиками

Застосування імпульсних перетворювачів напруги MP2307 та TPS61021A забезпечує високу енергоефективність системи живлення за рахунок мінімізації втрат на перетворення при різних рівнях вхідної напруги. Схемотехнічне рішення включає оптимізовані LC-фільтри на виході перетворювачів для мінімізації пульсацій вихідної напруги та зменшення електромагнітних завад. Частота перемикання силових ключів вибрана в діапазоні 1.2-1.4 МГц для оптимального балансу між ефективністю перетворення та розмірами індуктивних компонентів. Захист від короткого замикання реалізований через обмеження струму на рівні схемотехніки перетворювачів, а додатковий самовідновлюваний запобіжник на вході системи забезпечує захист від тривалого перевантаження.

Схема управління енергоспоживанням на базі мікросхеми TPL5110 дозволяє реалізувати режим глибокого сну з мінімальним споживанням енергії (менше 50 мкА для всієї системи) під час неактивних періодів. Таймер періодично активує

мікроконтролер для проведення вимірювань та передачі даних, після чого система знову переходить у режим сну. Зовнішня схема на базі RC-ланцюжка визначає періодичність пробудження, яка може бути змінена при виробництві або налаштуванні пристрою. Додатковий контроль живлення периферійних компонентів через високоефективні ключі TPS22918 дозволяє відключати енергоємні елементи (датчики, комунікаційні модулі) в періоди неактивності, що значно збільшує час автономної роботи.

Захист від впливу навколишнього середовища включає елементи схеми, що підвищують надійність роботи пристрою в умовах вологості, температурних коливань та вібрації. Використання роз'ємів з фіксацією та захистом від вологи забезпечує надійне електричне з'єднання компонентів. Конформне покриття друкованої плати створює бар'єр для вологи та агресивних газів. Вибір електронних компонентів з розширеним температурним діапазоном (-40°C до +85°C) забезпечує стабільну роботу системи в різних кліматичних умовах.

Система діагностики та самотестування забезпечує контроль ключових параметрів електричних вузлів пристрою для своєчасного виявлення аномалій та попередження відмов. Вимірювання внутрішньої температури мікроконтролера та критичних компонентів дозволяє виявляти перегрів та вживати заходів для захисту схеми. Моніторинг напруги живлення та струму споживання окремих функціональних блоків дозволяє ідентифікувати відхилення від нормальних режимів роботи. Контроль якості зв'язку з хмарною платформою та періодична перевірка функціональності датчиків забезпечують раннє виявлення деградації компонентів та необхідності технічного обслуговування. Специфікація електричних параметрів системи визначає вимоги до живлення та сигнальних інтерфейсів для забезпечення сумісності з різними зовнішніми пристроями та джерелами енергії. Діапазон вхідної напруги від 5 до 18В дозволяє використовувати різні адаптери живлення або акумуляторні батареї. Максимальне енергоспоживання в активному режимі не перевищує 1.5Вт при одночасній роботі всіх датчиків та передачі даних. У режимі очікування споживання зменшується до

						КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

50мВт, а в режимі глибокого сну – до 1мВт, що забезпечує тривалу автономну роботу від акумулятора. Рівні сигналів на зовнішніх інтерфейсах стандартизовані (3.3В LVTTTL) з захистом від перенапруги до 5В, що забезпечує сумісність з більшістю зовнішніх пристроїв без необхідності додаткових перетворювачів рівнів.

Проект електричної принципової схеми реалізований з використанням сучасних САПР для електроніки, що забезпечує високу точність розрахунків, моделювання критичних ланцюгів та автоматизовану перевірку правил проектування. Бібліотека компонентів оптимізована для використання доступних на ринку електронних елементів з урахуванням їх вартості, поширеності та надійності. Документація на схему включає повний перелік компонентів, специфікацію з вказанням альтернативних елементів для забезпечення гнучкості виробництва в умовах дефіциту окремих комплектуючих, детальні інструкції з налагодження та тестування функціональних блоків.

2.4 Монтажна схема програмно-апаратного засобу

Монтажна схема програмно-апаратного засобу відстеження показників якості повітря визначає фізичне розміщення та з'єднання компонентів системи відповідно до електричної принципової схеми. Створення ефективної монтажною схеми потребувало врахування множини факторів, включаючи електромагнітну сумісність компонентів, теплові режими, механічну надійність конструкції, ергономіку монтажу та обслуговування, оптимізацію вартості виробництва. Розроблена схема забезпечує раціональне розміщення електронних компонентів на друкованій платі з урахуванням функціональної сегментації, мінімізації довжини критичних сигнальних ліній та оптимального розподілу теплового навантаження.

Розробка монтажною схеми базувалася на чотирьохшаровій друкованій платі розміром 80x100 мм, що забезпечує компактність пристрою при збереженні достатньої площі для розміщення всіх необхідних компонентів з урахуванням вимог до трасування сигнальних ліній та розподілу шарів живлення. Вибір

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

чотирьохшарової структури плати обумовлений необхідністю забезпечення якісного розведення сигнальних ліній з контрольованим імпедансом для високочастотних інтерфейсів, ефективного екранування чутливих аналогових сигналів від цифрових шумів, оптимального розподілу шин живлення для мінімізації падіння напруги та зменшення електромагнітних завад. Зовнішні шари використовуються переважно для розміщення компонентів та трасування сигнальних ліній, а внутрішні – для суцільних полігонів землі та живлення, що забезпечує низький імпеданс шин живлення та ефективне екранування.

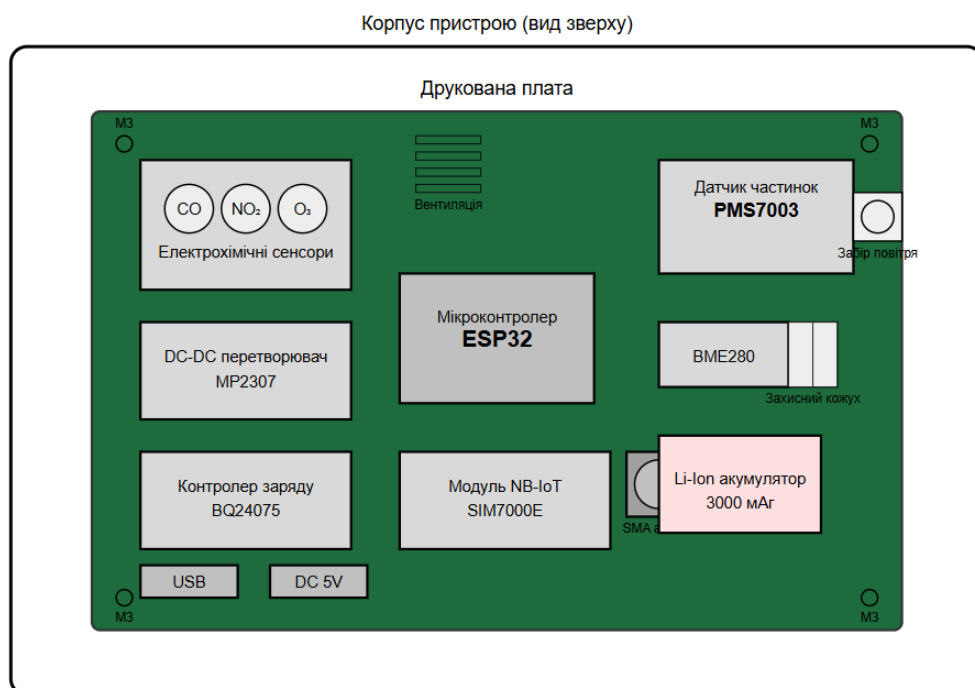


Рисунок 2.3 – Монтажна схема програмно-апаратного засобу відстеження показників якості повітря

Матеріал основи друкованої плати FR-4 з підвищеним показником T_g (температури склування) не менше 170°C забезпечує стабільність механічних та електричних характеристик в широкому діапазоні робочих температур. Товщина фольги на сигнальних шарах становить $35\ \mu\text{m}$, що оптимально для більшості сигнальних ліній, а на шарах живлення – $70\ \mu\text{m}$ для зменшення опору силових шин. Фінішне покриття контактних площадок виконане із застосуванням імерсійного золота (ENIG), що забезпечує відмінну паяємість, стійкість до

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ

Арк.

47

окислення та тривалий термін зберігання плат до монтажу компонентів. Маска зеленого кольору з матовою поверхнею зменшує відблиски при візуальному контролі та покращує контрастність маркування.

Компонування друкованої плати реалізовано за функціональним принципом з виділенням окремих зон для аналогової та цифрової частин, силових ланцюгів живлення, високочастотних комунікаційних модулів. Мікроконтролер ESP32 розміщений у центральній частині плати для мінімізації довжини з'єднань з периферійними компонентами та забезпечення рівномірного розподілу тепла. Кварцовий резонатор та пов'язані з ним конденсатори розташовані максимально близько до виводів мікроконтролера для зменшення довжини чутливих до завад ліній синхронізації. Обв'язка мікроконтролера включає блокувальні конденсатори різноманітних номіналів (від 100 пФ до 10 мкФ), розміщені безпосередньо біля виводів живлення для мінімізації паразитних індуктивностей та ефективної фільтрації широкого спектру завад. Аналогова частина схеми, що включає електрохімічні датчики газів, підсилювачі сигналів та схеми обробки, розміщена в окремій зоні плати з власним полігоном аналогової землі для мінімізації впливу цифрових шумів. Екранування чутливих аналогових сигнальних ліній реалізовано за допомогою полігонів землі на верхньому та внутрішньому шарах, що створює захисний "сендвіч" для вразливих до завад сигналів. Операційні підсилювачі розміщені максимально близько до відповідних електрохімічних датчиків для мінімізації довжини високоімпедансних ліній, що знижує вплив наведень та паразитних ємностей. Аналоговий та цифровий домени землі з'єднані в одній точці біля входу аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера для запобігання утворенню паразитних контурів струму, що можуть спричинити шуми в аналогових сигналах.

Датчик твердих частинок PMS7003 розміщений на краю плати з виведенням повітрязбірника назовні корпусу для забезпечення вільного потоку повітря через вимірювальну камеру. Механічне кріплення датчика реалізовано з використанням спеціальних монтажних отворів та віброізоляційних прокладок для мінімізації

						КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			48

передачі вібрації від вентилятора датчика на інші компоненти системи. Екранування силових ліній живлення вентилятора датчика запобігає поширенню електромагнітних завад від його електродвигуна на чутливі аналогові ланцюги. Додатково передбачено вентиляційні отвори в корпусі пристрою навколо датчика для забезпечення природньої конвекції та запобігання перегріву при тривалій роботі.

Таблиця 2.7 – Характеристики друкованої плати програмно-апаратного засобу

Параметр	Значення	Обґрунтування вибору
Розмір плати	80x100 мм	Оптимальний компроміс між компактністю та зручністю монтажу компонентів
Кількість шарів	4	Забезпечення якісного розведення з екрануванням та контрольованим імпедансом
Матеріал основи	FR-4, $T_g \geq 170^\circ\text{C}$	Стабільність характеристик в широкому діапазоні температур
Товщина плати	1.6 мм	Механічна міцність та стандартна сумісність з роз'ємами
Мінімальна ширина провідника	0.2 мм	Баланс між щільністю монтажу та технологічністю виробництва
Мінімальний зазор	0.2 мм	Відповідність вимогам електричної міцності та технологічним обмеженням
Діаметр металізованих отворів	0.3 мм	Сумісність з виводами компонентів та технологією виробництва
Фінішне покриття	ENIG (імерсійне золото)	Висока паяємість, тривалий термін зберігання, надійність контактів
Маркування	Шовкографія, біла	Висока контрастність, стійкість до стирання та впливу розчинників
Паяльна маска	Зелена, матова	Зменшення відблисків, підвищення контрастності при візуальному контролі
Мінімальний діаметр переходів	0.2 мм	Ефективне використання площі при трасуванні щільних з'єднань
Товщина міді на сигнальних шарах	35 мкм	Стандартна товщина для більшості сигнальних ліній
Товщина міді на шарах живлення	70 мкм	Підвищена струмонесуча здатність для силових ліній

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Метеорологічний модуль з датчиком ВМЕ280 розміщений на краю плати з можливістю виведення сенсора за межі корпусу для забезпечення точного вимірювання параметрів навколишнього середовища без впливу тепла від інших компонентів. Датчик прикріплений до плати через подовжені контактні доріжки, що дозволяють розмістити його на зовнішній стінці корпусу з мінімальним тепловим зв'язком з основною платою. Захисний чохол з гідрофобного матеріалу з мікропорами забезпечує вільний доступ повітря до сенсора при одночасному захисті від краплинної вологи та механічних пошкоджень.

Силова частина схеми, включаючи DC-DC перетворювачі, контролери заряду акумулятора, силові ключі, розміщена в окремій зоні плати з широкими провідниками для силових ліній та масивними полігонами для відведення тепла. Імпульсні перетворювачі напруги MP2307 та TPS61021A розміщені з урахуванням оптимального розташування силових компонентів (індуктивностей, силових ключів, вхідних та вихідних конденсаторів) для мінімізації площі контурів з високими імпульсними струмами, що зменшує електромагнітні завади та підвищує ефективність перетворення. Теплові зони під мікросхемами підсилені масивними полігонами міді, з'єднаними з внутрішніми шарами через множину перехідних отворів для ефективного відведення тепла.

Роз'єми та інтерфейси введення-виведення згруповані по функціональному призначенню та розміщені на краях плати для зручного доступу при монтажі та експлуатації. Основний роз'єм живлення типу DC Jack розташований на одному з країв плати поруч із перетворювачами напруги для мінімізації довжини силових ліній. Роз'єм для підключення акумулятора розміщений поруч із контролером заряду для забезпечення коротких та широких з'єднань з низьким опором. Інтерфейсні роз'єми (UART, I2C, SPI) для підключення зовнішніх пристроїв розташовані на протилежному краю плати з логічним групуванням за типами інтерфейсів та чітким маркуванням функцій кожного виводу.

									Арк.
									50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

Таблиця 2.8 – Механічні характеристики корпусу та монтажних елементів

Параметр	Значення	Призначення
Зовнішні розміри корпусу	120x150x40 мм	Розміщення друкованої плати та додаткових компонентів з урахуванням вентиляції
Матеріал корпусу	ABS-пластик з UV-стабілізаторами	Механічна міцність, стійкість до атмосферних впливів та ультрафіолетового випромінювання
Ступінь захисту	IP54	Захист від пилу та бризок води при зовнішньому монтажі
Робочий діапазон температур	-30°C до +60°C	Забезпечення функціонування в різних кліматичних умовах
Вага пристрою	350 г	Сумарна вага конструкції з урахуванням електронних компонентів та акумулятора
Спосіб монтажу	Настінний, на опору, стаціонарний	Універсальність встановлення в різних умовах експлуатації
Тип з'єднання корпусу	Защіпки + гвинти М3	Забезпечення герметичності та жорсткості конструкції
Матеріал ущільнення	Силіконова гума	Захист від вологи та пилу, стійкість до старіння
Тип кабельних вводів	PG-7 з ущільненням	Герметичне введення кабелів живлення та комунікацій
Кріплення друкованої плати	Стійки М3, висота 10 мм	Механічна фіксація та електрична ізоляція плати від корпусу
Кріплення акумулятора	Тримач з фіксатором	Надійна фіксація при вібрації та транспортуванні
Матеріал радіатора	Анодований алюміній	Ефективне відведення тепла від компонентів з високим тепловиділенням
Тип антенного роз'єму	SMA-female	Стандартне підключення зовнішніх антен для покращення зв'язку
Вентиляційні отвори	6x10 мм з фільтром	Природна вентиляція з захистом від пилу та комах
Тип монтажного кронштейна	U-подібний з регулюванням	Універсальне кріплення до стін, стовпів, огорож

Монтаж компонентів на друковану плату виконаний із застосуванням технології поверхневого та наскрізного монтажу для оптимального поєднання компактності, надійності та технологічності виробництва. Більшість пасивних

компонентів (резистори, конденсатори) мають розмір 0603, що забезпечує компроміс між компактністю та зручністю ручного або автоматизованого монтажу. Мікросхеми в корпусах SOIC, TSSOP, QFP монтуються з використанням стандартних технологій пайки оплавленням з контролем температурного профілю для запобігання перегріву чутливих компонентів. Силкові елементи (індуктивності, силкові транзистори, вхідні та вихідні конденсатори перетворювачів) мають збільшену площу контактних площадок та додаткові перехідні отвори для забезпечення надійного електричного з'єднання та ефективного відведення тепла.

Термічний дизайн плати забезпечує ефективне відведення тепла від компонентів з високим тепловиділенням для запобігання перегріву та деградації характеристик при тривалій роботі в широкому діапазоні зовнішніх температур. Контролер заряду акумулятора BQ24075 та імпульсні перетворювачі напруги MP2307, TPS61021A розміщені на верхньому шарі плати з великими полігонами міді та множиною перехідних отворів до внутрішніх шарів для збільшення ефективної площі розсіювання тепла. Мікроконтролер ESP32 має теплову зону з нижньої сторони корпусу, з'єднану з масивним полігоном на верхньому шарі плати та внутрішніми шарами через перехідні отвори по периметру корпусу.

Корпус пристрою розроблений з урахуванням функціональних вимог до монтажу та експлуатації системи моніторингу якості повітря. Основними матеріалами корпусу є ABS-пластик з добавками для підвищення стійкості до ультрафіолетового випромінювання та полікарбонат для прозорих елементів індикації. Конструкція корпусу забезпечує захист від пилу та вологи на рівні IP54, що дозволяє використовувати пристрій як у приміщеннях, так і на відкритому повітрі під захисним навісом. Верхня та нижня частини корпусу з'єднуються за допомогою фіксуючих защіпок та додаткових гвинтів для забезпечення герметичності та жорсткості конструкції.

Монтажні отвори діаметром 3.2 мм, розташовані по кутах плати, забезпечують надійне механічне кріплення до корпусу та інших конструктивних елементів системи. Навколо монтажних отворів передбачені зони вільні від

									Арк.
									52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ				

компонентів та друкованих провідників для запобігання механічним пошкодженням при монтажі та експлуатації. Додаткові монтажні отвори в центральній частині плати призначені для кріплення масивних компонентів (акумулятор, радіатори) та забезпечення механічної жорсткості конструкції для запобігання вібрації та деформації плати.

Засоби фізичного захисту від несанкціонованого доступу інтегровані в конструкцію корпусу та монтажну схему для забезпечення конфіденційності даних та запобігання вандалізму. Спеціальні гвинти з нестандартним профілем головки ускладнюють несанкціоноване відкриття корпусу без спеціального інструменту. Механічний датчик відкриття корпусу підключений до мікроконтролера для реєстрації спроб несанкціонованого доступу та оповіщення операторів системи. Ключові елементи зберігання даних та конфігурації (мікросхеми флеш-пам'яті, криптографічні модулі) розміщені на внутрішньому боці плати, що ускладнює їх швидкий демонтаж навіть при відкритому корпусі.

Діагностичні елементи монтажної схеми включають тестові точки на ключових вузлах друкованої плати для полегшення налагодження та технічного обслуговування. Маркування компонентів та контрольних точок за допомогою шовкографії на платі спрощує ідентифікацію елементів при ремонті та оновленні. Сервісний роз'єм для підключення діагностичного обладнання доступний через герметичну заглушку на корпусі пристрою, що забезпечує можливість діагностики та оновлення програмного забезпечення без розбирання корпусу.

2.5 Аналіз обраних рішень (програмних, апаратних, хмарних)

Проектування програмно-апаратного засобу відстеження показників якості повітря супроводжувалося детальним аналізом та порівнянням альтернативних підходів до реалізації ключових компонентів системи. Вибір конкретних програмних, апаратних та хмарних рішень ґрунтувався на всебічному розгляді їх технічних характеристик, функціональних можливостей, економічних аспектів,

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

сумісності з іншими елементами системи та відповідності встановленим вимогам. Процес прийняття рішень включав теоретичне моделювання, експериментальне тестування прототипів, аналіз досвіду існуючих подібних систем та консультації з експертами у відповідних галузях. Результатом стало формування оптимального комплексу технічних рішень, які забезпечують досягнення встановлених цілей проекту з раціональним використанням доступних ресурсів.

Модульна архітектура системи дозволяє гнучко конфігурувати пристрій залежно від конкретних вимог до функціональності, умов експлуатації та бюджетних обмежень. Базова конфігурація включає мікроконтролер, датчики твердих частинок та метеорологічний модуль, забезпечуючи мінімально необхідний функціонал для моніторингу якості повітря. Розширена конфігурація додатково включає електрохімічні датчики газів, модуль стільникового зв'язку, сонячну панель для автономного живлення, що істотно розширює можливості системи, але збільшує її вартість та складність. Модульний підхід також спрощує технічне обслуговування, дозволяючи замінювати окремі компоненти без необхідності заміни всієї системи, та забезпечує можливість поступового розширення функціональності пристрою в процесі експлуатації.

Аналіз технологій вимірювання концентрації твердих частинок у повітрі виявив кілька принципово різних підходів, включаючи оптичні, гравіметричні та електростатичні методи. Оптичний метод, заснований на розсіюванні світла частинками різного розміру, був обраний як оптимальний для даної системи завдяки низькій вартості, компактності датчиків та можливості безперервного моніторингу в режимі реального часу. Хоча оптичні датчики мають меншу точність порівняно з професійним лабораторним обладнанням, вони забезпечують достатню достовірність для більшості сценаріїв використання системи при суттєво нижчій вартості та енергоспоживанні. Додаткові алгоритми калібрування та кореляції з еталонними вимірюваннями дозволяють підвищити точність оптичних датчиків до прийняттого рівня для громадського моніторингу якості повітря.

									Арк.
									54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Таблиця 2.9 – Порівняння альтернативних апаратних платформ для центрального обчислювального модуля

Критерій	ESP32	STM32F4	Raspberry Pi Zero	Arduino Nano 33 IoT
Процесор	Xtensa LX6, 2 ядра, 240 МГц	ARM Cortex-M4, 1 ядро, 168 МГц	ARM Cortex-A53, 1 ядро, 1 ГГц	ARM Cortex-M0+, 1 ядро, 48 МГц
ОЗП	520 КБ SRAM	192-256 КБ SRAM	512 МБ SDRAM	32 КБ SRAM
Флеш-пам'ять	4-16 МБ (зовнішня)	512 КБ - 2 МБ (внутрішня)	microSD до 32 ГБ	256 КБ (внутрішня)
Вбудовані комунікації	Wi-Fi 802.11b/g/n, BT 4.2	-	Wi-Fi 802.11n, BT 4.1	Wi-Fi 802.11b/g/n, BT 4.2
АЦП	12-біт, 18 каналів	12-біт, 16 каналів	-	12-біт, 8 каналів
Цифрові інтерфейси	I2C, SPI, UART, I2S, CAN	I2C, SPI, UART, CAN, USB	I2C, SPI, UART, USB	I2C, SPI, UART
Енергоспоживання (активне)	150-260 мА при 3.3В	80-150 мА при 3.3В	100-200 мА при 5В	20-50 мА при 3.3В
Енергоспоживання (сон)	10-150 мкА	2-100 мкА	>20 мА	5-50 мкА
Ціна (приблизна)	\$3-8	\$5-10	\$10-15	\$18-25
Переваги	Відмінне співвідношення ціна/функціональність, вбудований Wi-Fi/BT	Висока продуктивність, низьке енергоспоживання, надійність	Висока продуктивність, повноцінна ОС Linux	Компактність, простота використання
Недоліки	Вище енергоспоживання порівняно з STM32	Відсутність вбудованих бездротових інтерфейсів	Високе енергоспоживання, більші габарити	Обмежені обчислювальні ресурси, вища вартість
Обґрунтування вибору	Обрано завдяки оптимальному поєднанню обчислювальної потужності, вбудованих комунікаційних можливостей та доступності	Гарна альтернатива для застосувань з критичними вимогами до енергоефективності	Надмірна потужність для більшості задач моніторингу, складність забезпечення автономного живлення	Недостатні обчислювальні ресурси для обробки даних від множини датчиків

Кінець таблиці 2.10 – Порівняння альтернативних програмних платформ для розробки вбудованого

Доступ до апаратних ресурсів	Повний	Обмежений	Хороший	Обмежений	Повний
Багатозадачність	FreeRTOS	Примітивна	Так	Обмежена	Повна
Управління живленням	Повне	Обмежене	Хороше	Обмежене	Повне
Підтримка мережевих протоколів	Широка	Базова	Дуже широка	Обмежена	Широка
Розмір коду/пам'яті	Оптимізовані	Невеликий	Великий	Великий	Оптимізований
Швидкість розробки	Середня	Висока	Висока	Дуже висока	Низька
Підтримка OTA-оновлень	Так	Обмежена	Так	Обмежена	Так
Крива навчання	Середня	Низька	Середня	Низька	Висока
Зрілість/стабільність	Висока	Дуже висока	Середня	Середня	Висока
Спільнота/документація	Велика	Дуже велика	Середня	Велика	Середня
Переваги	Ефективне використання ресурсів, висока гнучкість	Простота використання, велика кількість бібліотек	Вбудовані хмарні функції, високорівнева розробка	Швидке прототипування, простота коду	Висока продуктивність, стандартизація
Недоліки	Вища складність розробки	Обмежений доступ до низькорівневих функцій	Високі вимоги до ресурсів	Низька продуктивність, вищі вимоги до пам'яті	Складна розробка, менше готових компонентів
Обґрунтування вибору	Обрано завдяки оптимальному балансу між ефективністю використання ресурсів та швидкістю розробки	Недостатні можливості для реалізації всіх функцій системи	Надмірні вимоги до ресурсів для автономного пристрою	Недостатня обчислювальна ефективність для роботи з множинними датчиками	Надмірна складність впровадження для даного проєкту

Програмна архітектура мікроконтролера побудована за модульним принципом з використанням багатозадачної операційної системи реального часу

FreeRTOS. Такий підхід забезпечує ефективний розподіл обчислювальних ресурсів між різними функціональними блоками, ізоляцію компонентів для підвищення надійності та спрощення розробки та тестування. Окремі задачі відповідають за збір даних з датчиків, попередню обробку та фільтрацію сигналів, керування енергоспоживанням, комунікацію з хмарною платформою. Пріоритезація задач дозволяє гарантувати своєчасне виконання критичних операцій, таких як збереження даних при виявленні низького заряду акумулятора або обробка повідомлень про критичні рівні забруднення.

Захист даних при передачі та зберіганні в системі реалізований з використанням сучасних криптографічних алгоритмів та протоколів. Шифрування даних при передачі здійснюється з використанням протоколу TLS 1.3, який забезпечує конфіденційність та цілісність інформації, а також автентифікацію сторін з'єднання. Для зберігання критичних даних, таких як ключі та сертифікати, використовується захищена область пам'яті мікроконтролера з апаратним захистом від несанкціонованого доступу. Хмарна платформа реалізує багаторівневу систему автентифікації та авторизації, що забезпечує доступ до даних та функцій відповідно до ролей користувачів та визначених політик безпеки.

Вибір хмарної платформи для збереження та обробки даних здійснювався на основі аналізу функціональних можливостей, масштабованості, вартості та екосистеми доступних сервісів. Після порівняння провідних хмарних провайдерів (AWS, Azure, Google Cloud) та спеціалізованих платформ для інтернету речей (ThingsBoard, Ubidots, Thinger.io) було обрано гібридне рішення на базі AWS з використанням сервісів IoT Core для прийому даних від пристроїв, DynamoDB для зберігання часових рядів, Lambda для обробки даних та API Gateway для надання доступу до інформації через веб-інтерфейс та мобільний додаток. Таке рішення забезпечує оптимальне співвідношення між функціональністю, гнучкістю та вартістю при збереженні високої надійності та масштабованості.

						КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			58

Таблиця 2.11 - Порівняння альтернативних хмарних платформ для системи моніторингу якості повітря

Критерій	AWS IoT Core + супутні сервіси	Azure IoT Hub + супутні сервіси	ThingsBoard	Ubidots	Самостійно розгорнута система
Модель ціноутворення	Pay-as-you-go, залежить від використання	Pay-as-you-go, залежить від використання	Відкритий код + платні функції	Фіксована плата за пристрій	Капітальні + операційні витрати
Масштабованість	Відмінна, до мільйонів пристроїв	Відмінна, до мільйонів пристроїв	Добра, до тисяч пристроїв	Добра, до тисяч пристроїв	Обмежена інфраструктурою
Надійність/Доступність	99.9%+	99.9%+	Залежить від розгортання	99.5%+	Залежить від реалізації
Підтримка протоколів	MQTT, HTTP, WebSockets	MQTT, AMQP, HTTP	MQTT, CoAP, HTTP	MQTT, HTTP	Довільна
Аналітичні можливості	Широкі (AWS Analytics, ML)	Широкі (Azure Analytics, ML)	Базові	Середні	Залежить від реалізації
Готові візуалізації	Обмежені, потребують налаштування	Обмежені, потребують налаштування	Хороші	Відмінні	Залежить від реалізації
Інтеграції	Дуже широкі	Дуже широкі	Обмежені	Обмежені	Залежить від реалізації
Керування пристроями	Повне	Повне	Хороше	Обмежене	Залежить від реалізації
Безпека	Висока	Висока	Середня	Середня	Залежить від реалізації
Час впровадження	Середній	Середній	Низький	Дуже низький	Високий
Кастомізація	Висока	Висока	Середня	Низька	Повна

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ

Арк.

59

Кінець таблиці 2.11 - Порівняння альтернативних хмарних платформ для системи моніторингу якості повітря

Технічна підтримка	Корпоративного рівня	Корпоративного рівня	Спільнота + платні опції	Базова	Самостійна
Переваги	Гнучкість, масштабованість, зрілість екосистеми	Інтеграція з іншими сервісами Microsoft, зрілість	Легкість налаштування, готові панелі візуалізації	Простота використання, швидке впровадження	Повний контроль, потенційно нижча вартість
Недоліки	Складність, потенційно висока вартість	Складність, потенційно висока вартість	Обмежена масштабованість, менше функцій	Обмежена гнучкість, залежність від постачальника	Висока складність розробки, обслуговування
Обґрунтування вибору	Обрано завдяки оптимальному балансу між функціональністю	Хороша альтернатива при наявності інтеграції	Розглядалося для пілотного проекту через швидке впровадження	Недостатня гнучкість для специфічних вимог проекту	Надмірні витрати на розробку та обслуговування

Архітектура хмарної платформи побудована за мікросервісним принципом, що забезпечує гнучкість розгортання, масштабування та оновлення окремих компонентів системи. Розділення функціональності на невеликі, незалежні сервіси спрощує розробку та тестування, дозволяє ефективно використовувати обчислювальні ресурси та забезпечує стійкість системи до відмов окремих компонентів. Безсерверні обчислення (AWS Lambda) використовуються для обробки даних, генерації сповіщень, автоматичного калібрування датчиків та інших задач, що дозволяє оптимізувати вартість обчислювальних ресурсів завдяки оплаті лише за фактичне використання. Для зберігання даних використовується комбінація реляційних (Aurora PostgreSQL) та NoSQL (DynamoDB) баз даних, що

забезпечує оптимальне співвідношення продуктивності, вартості та функціональності для різних типів даних.

Інтерфейс взаємодії з користувачами реалізований у вигляді веб-додатку та мобільного додатку, що забезпечують доступ до інформації про якість повітря з різних пристроїв. Веб-додаток розроблений з використанням архітектури Single Page Application (SPA) на базі фреймворку React, що забезпечує швидкий відгук інтерфейсу та зменшує навантаження на сервер. Мобільний додаток розроблений з використанням кросплатформеного фреймворку React Native, що дозволяє підтримувати версії для iOS та Android з мінімальним дублюванням коду. Інтерфейс користувача спроектований з урахуванням принципів UX/UI дизайну для забезпечення інтуїтивної зрозумілості та доступності для користувачів з різним рівнем технічної підготовки.

Алгоритми обробки та аналізу даних про якість повітря включають методи фільтрації для усунення шумів та артефактів вимірювань, статистичні методи для виявлення аномалій та трендів, моделі машинного навчання для прогнозування змін параметрів повітря з урахуванням історичних даних та зовнішніх факторів. Для фільтрації високочастотних шумів використовуються цифрові фільтри Калмана та ковзного середнього, що забезпечують згладжування даних без втрати важливих трендів. Алгоритми виявлення аномалій базуються на статистичному аналізі відхилень від середніх значень з урахуванням сезонних та добових коливань параметрів повітря. Прогностичні моделі використовують комбінацію методів часових рядів (ARIMA) та нейронних мереж для точного передбачення змін якості повітря на період до 24 годин.

Інтеграція системи з зовнішніми джерелами даних та інформаційними системами забезпечує збагачення аналізу додатковою інформацією та розширення функціональності. Підключення до метеорологічних сервісів дозволяє враховувати прогнози погоди при моделюванні розповсюдження забруднень. Відкритий API системи дозволяє стороннім розробникам створювати додаткові сервіси та додатки

						Арк.
					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на основі даних про якість повітря, сприяючи розширенню екосистеми та популяризації екологічного моніторингу.

Комплексний аналіз обраних програмних, апаратних та хмарних рішень підтверджує їх відповідність встановленим вимогам до системи моніторингу якості повітря. Вибрані технології забезпечують оптимальний баланс між функціональністю, надійністю, енергоефективністю та вартістю, створюючи технологічну основу для ефективного відстеження показників якості повітря з можливістю масштабування та адаптації до різних сценаріїв використання. Модульна архітектура та використання відкритих стандартів забезпечують можливість подальшого розвитку системи з урахуванням нових технологічних можливостей та змінних вимог користувачів.

2.6. Висновки до другого розділу

Розроблено архітектуру програмно-апаратного засобу відстеження показників якості повітря, що включає сенсорний модуль з набором датчиків для вимірювання різних параметрів, мікроконтролер для керування роботою пристрою та обробки даних, модулі зв'язку для передачі інформації та хмарну платформу для зберігання, аналізу й візуалізації результатів моніторингу.

Спроектовано електричну принципову схему пристрою на базі мікроконтролера ESP32, що забезпечує роботу з комплексом сенсорів якості повітря, включаючи датчик частинок SDS011, електрохімічні датчики газів та сенсори температури, вологості й атмосферного тиску.

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО ЗАСОБУ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

3.1. Розгортання та налаштування хмарної платформи

Розгортання хмарної платформи для відстеження показників якості повітря представляє собою багатоетапний процес конфігурування взаємопов'язаних сервісів, які забезпечують прийом, зберігання, аналіз та візуалізацію даних від мережі сенсорних пристроїв. Впровадження хмарної інфраструктури виконувалось з використанням платформи Amazon Web Services як провідного провайдера хмарних послуг, що забезпечує необхідний рівень надійності, масштабованості та функціональності для побудови повноцінної системи екологічного моніторингу.

Початковим етапом розгортання хмарної платформи стало створення віртуальної приватної мережі (VPC) для ізоляції ресурсів системи від загальнодоступного інтернету та забезпечення контрольованого доступу до даних. Структура VPC включає публічні підмережі для компонентів, що потребують прямого доступу з інтернету (API Gateway, балансувальники навантаження), та приватні підмережі для внутрішніх сервісів (бази даних, обчислювальні ресурси).

AWS IoT Core став центральним компонентом для взаємодії з мережею пристроїв моніторингу якості повітря, забезпечуючи безпечну реєстрацію пристроїв, двосторонній обмін повідомленнями та керування станом обладнання. Конфігурація сервісу включала створення політик безпеки, визначення типів пристроїв з відповідними атрибутами, налаштування правил маршрутизації повідомлень до інших сервісів AWS для подальшої обробки.

Обробка даних від пристроїв реалізована через механізм правил IoT Rules, які виконують первинну фільтрацію та маршрутизацію повідомлень на основі їхнього вмісту та метаданих. Кожне правило включає SQL-подібний запит для вибору повідомлень за певними критеріями та дії для їх обробки, такі як збереження в базу даних, виклик Lambda-функцій, публікація в теми SNS для сповіщень.

									Арк.
									63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Зберігання даних про якість повітря організовано з використанням комбінації різних типів баз даних для оптимального поєднання продуктивності, вартості та функціональності. Первинне зберігання необроблених даних здійснюється в Amazon S3 через AWS IoT Firehose. Структуровані часові ряди показників якості повітря зберігаються в Amazon Timestream, спеціалізованій базі даних для часових рядів, яка забезпечує високу продуктивність при роботі з історичними даними та агрегації показників за різні часові проміжки.

Таблиця 3.1 – Конфігурація AWS IoT Core для різних типів повідомлень від пристроїв

Тип повідомлення	Формат топика MQTT	Частота повідомлень	Дії обробки	Призначення
Регулярні вимірювання	devices/{device_id}/data	5-15 хвилин	Збереження в Timestream, агрегація в DynamoDB, перевірка порогових значень	Основні дані про показники якості повітря для аналізу та візуалізації
Статус пристрою	devices/{device_id}/status	30-60 хвилин	Оновлення метаданих в DynamoDB, генерація сповіщень при критичному заряді	Моніторинг стану пристроїв, включаючи рівень заряду, якість зв'язку, версію ПЗ
Діагностика	devices/{device_id}/logs	За потребою	Збереження в CloudWatch Logs, аналіз аномалій	Детальна інформація для діагностики проблем та оптимізації роботи пристроїв
Попередження	devices/{device_id}/alerts	При перевищенні порогів	Публікація в SNS, запис в DynamoDB	Негайні сповіщення про критичні рівні забруднення або аномалії в показниках

Система аналітики та обробки даних реалізована з використанням AWS Lambda та Amazon Kinesis для обробки даних в реальному часі та Amazon EMR для складних аналітичних задач над великими обсягами історичних даних. Механізми масштабування налаштовані для автоматичної адаптації обчислювальних ресурсів до зміни навантаження на систему.

Таблиця 3.2 – Конфігурація компонентів хмарної платформи для моніторингу якості повітря

Компонент	Сервіс AWS	Параметри конфігурації	Функціональність
Прийом даних від пристроїв	AWS IoT Core	Протокол MQTT, QoS 1, X.509 сертифікати	Безпечне підключення пристроїв, двостороння комунікація, валідація повідомлень
Обробка потоків даних	Kinesis Data Streams, Lambda	2 шарди, обсяг буфера 24 години	Буферизація та послідовна обробка потоків вимірювань
Первинне зберігання даних	S3, Firehose	S3 Standard, Lifecycle Policy 90 днів → S3 IA → Glacier	Надійне зберігання всіх необроблених даних для аудиту та резервного копіювання
База даних часових рядів	Amazon Timestream	Retention: 24h in memory, 2y in magnetic storage	Високопродуктивне зберігання та запити часових рядів вимірювань
Зберігання метаданих	DynamoDB	On-demand capacity, 5 GSI	Зберігання інформації про пристрої, користувачів, конфігурації

Розгортання інтерфейсів доступу до даних включало налаштування Amazon API Gateway для створення RESTful API, що забезпечує взаємодію веб-додатків та мобільних клієнтів з хмарною платформою. Система автентифікації та авторизації базується на Amazon Cognito, що забезпечує реєстрацію користувачів, керування сесіями, підтримку різних провайдерів ідентифікації та детальний контроль доступу на основі ролей та атрибутів.

3.2 Програмна реалізація клієнтської частини програмно-апаратного засобу

Програмна реалізація клієнтської частини програмно-апаратного засобу представляє собою комплекс взаємопов'язаних програмних модулів, що функціонують на мікроконтролері ESP32 та забезпечують повний цикл роботи пристрою – від збору даних з датчиків до передачі інформації у хмарну платформу. Розробка програмного забезпечення виконувалась з використанням фреймворку ESP-IDF, що надає доступ до всіх апаратних можливостей мікроконтролера при збереженні переваг високорівневої розробки.

Кінець таблиці 3.3 – Характеристики програмних модулів клієнтської

частини системи

Модуль обробки даних	Фільтрація, агрегація, обчислення показників	Цифрові фільтри, алгоритми усереднення, обчислення індексів AQI	DSP Library, IQR Filter, власні алгоритми
Комунікаційний модуль	Підключення до мережі, передача даних	Wi-Fi WPA2-Enterprise, MQTT over TLS 1.2, буферизація	ESP-MQTT, Wi-Fi Driver, LTE-M Driver, ESP-TLS
Модуль зберігання даних	Локальне зберігання вимірювань	Кільцевий буфер до 10000 записів	SPIFFS, NVS, SDCard API
Модуль керування енергоспоживанням	Оптимізація енергоспоживання	Режими сну: Light Sleep (0.8 мА), Deep Sleep (10 мкА)	ESP Power Management API, RTC Driver

Механізми буферизації та локального зберігання даних забезпечують надійне функціонування системи в умовах нестабільного зв'язку з хмарною платформою. При відсутності з'єднання виміряні показники зберігаються в енергонезалежній пам'яті (NVS) або на зовнішній карті SD з організацією у вигляді кільцевого буфера, що запобігає втраті даних при заповненні доступного простору.

Модуль безпечного оновлення програмного забезпечення реалізує механізм Over-The-Air (OTA) для оновлення прошивки пристрою без необхідності фізичного доступу до обладнання. Процес оновлення включає перевірку доступності нових версій, завантаження оновлення з верифікацією цифрового підпису, перевірку цілісності завантаженого образу, і контрольований перезапуск пристрою з новою версією прошивки.

Алгоритми обробки даних включають різні методи фільтрації та аналізу для підвищення якості вимірювань та виявлення значущих змін у параметрах якості повітря. Реалізовано цифрові фільтри для усунення шумів, алгоритми виявлення аномалій та обчислення індексів якості повітря (AQI) відповідно до міжнародних стандартів.

Програмна реалізація клієнтської частини програмно-апаратного засобу демонструє комплексний підхід до розробки вбудованих систем для моніторингу

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

якості повітря. Модульна архітектура, оптимізація енергоспоживання, надійні механізми обміну даними та гнучке управління забезпечують ефективне функціонування пристрою в різних умовах експлуатації.

3.3. Висновки до третього розділу

Розроблено та реалізовано програмне забезпечення для мікроконтролера, що забезпечує збір даних з сенсорів, їх попередню обробку, включаючи фільтрацію шумів та корекцію показників з урахуванням температури і вологості, збереження інформації в локальній пам'яті при відсутності зв'язку та передачу даних на хмарну платформу при наявності підключення.

Розгорнуто хмарну інфраструктуру на основі AWS IoT Core для прийому, зберігання та обробки даних з мережі сенсорних пристроїв. Реалізовано аналітичні інструменти для виявлення аномалій у показниках якості повітря, прогнозування змін концентрації забруднювачів та візуалізації результатів моніторингу через веб-інтерфейс та мобільний додаток.

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

ВИСНОВОК

Проведено аналіз існуючих програмно-технічних рішень для моніторингу якості повітря, що дозволив визначити ключові показники забруднення атмосфери, включаючи концентрацію твердих частинок PM2.5 та PM10, шкідливих газів (CO, NO₂, SO₂, O₃), а також метеорологічні параметри, які впливають на поширення забруднювачів. Встановлено, що комплексний моніторинг цих показників забезпечує найбільш повну картину стану повітряного середовища та дозволяє оцінювати потенційні ризики для здоров'я населення.

Визначено, що системи моніторингу на основі низьковартісних датчиків у поєднанні з технологіями інтернету речей та хмарних обчислень забезпечують оптимальний баланс між точністю вимірювань, географічним покриттям та вартістю розгортання, що дозволяє створювати масштабні мережі моніторингу з високою просторовою роздільною здатністю.

Розроблено архітектуру програмно-апаратного засобу відстеження показників якості повітря, що включає сенсорний модуль з набором датчиків для вимірювання різних параметрів, мікроконтролер для керування роботою пристрою та обробки даних, модулі зв'язку для передачі інформації та хмарну платформу для зберігання, аналізу й візуалізації результатів моніторингу.

Спроектовано електричну принципову схему пристрою на базі мікроконтролера ESP32, що забезпечує роботу з комплексом сенсорів якості повітря, включаючи датчик частинок SDS011, електрохімічні датчики газів та сенсори температури, вологості й атмосферного тиску. Розроблена схема відрізняється низьким енергоспоживанням, що забезпечує тривалу автономну роботу пристрою від акумуляторного живлення.

Розгорнуто хмарну інфраструктуру на основі AWS IoT Core для прийому, зберігання та обробки даних з мережі сенсорних пристроїв. Реалізовано аналітичні інструменти для виявлення аномалій у показниках якості повітря, прогнозування змін концентрації забруднювачів та візуалізації результатів моніторингу через веб-інтерфейс та мобільний додаток.

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

practice for low-cost PM2.5 sensor network. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 779. P. 146381.

31. Qin X., Hou L., Gao J. et al. The evaluation and optimization of calibration methods for low-cost particulate matter sensors: Inter-comparison between fixed and mobile methods. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 715.

32. Rezapour A., Tzeng W. G. RL-PMAGg: Robust aggregation for PM2.5 using deep RL-based trust management system. *Internet of Things*. 2021. Vol. 13. P. 100347.

33. Rivera-Munoz L. M., Gallego-Villada J. D., Giraldo-Forero A. F. et al. Missing data estimation in a low-cost sensor network for measuring air quality: A case study in Aburra Valley. *Water Air and Soil Pollution*. 2021. Vol. 232, No. 10.

34. Rollo F., Po L. SenseBoard: Sensor monitoring for air quality experts. *CEUR workshop proceedings*. 2021.

35. Saini J., Dutta M., Marques G. Indoor air quality monitoring systems based on internet of things: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, No. 14. P. 4942.

36. Saini R. K., Saini H., Singh S. Air Pollution Quality Monitoring System Using Internet of Things for Smart Cities. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*. 2020. Vol. 11, No. 2.

37. Samee I., Jilani M. T., Wahab H. *An Application of IoT and Machine Learning to Air Pollution Monitoring in Smart Cities*. IEEE, 2019. P. 6.

38. Schilt U. et al. Low-Cost sensor node for air quality monitoring: Field tests and validation of particulate matter measurements. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 2. P. 794.

39. Simo A., Dzitac S., Frigura-Iliasa F. M., Musuroi S., Andea P., Meianu D. Technical solution for a real-time air quality monitoring system. *International Journal of Computer Communication and Control*. 2020. Vol. 15, No. 4.

40. Toma C., Alexandru A., Popa M., Zamfiroiu A. IoT Solution for Smart Cities' Pollution Monitoring and the Security Challenges. *Sensors*. 2019. Vol. 19, No. 15. P. 3401.

41. Van Zoest V., Liu X., Ngai E. Data quality evaluation, outlier detection and

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

missing data imputation methods for IoT in smart cities. *Smart Cities and Smart Spaces: Concepts, Technologies, and Applications*. 2021. P. 1–28.

42. Wang W. C., Lung S. C., Liu C. et al. Laboratory evaluations of correction equations with multiple choices for seed low-cost particle sensing devices in sensor networks. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 13. P. 1–25.

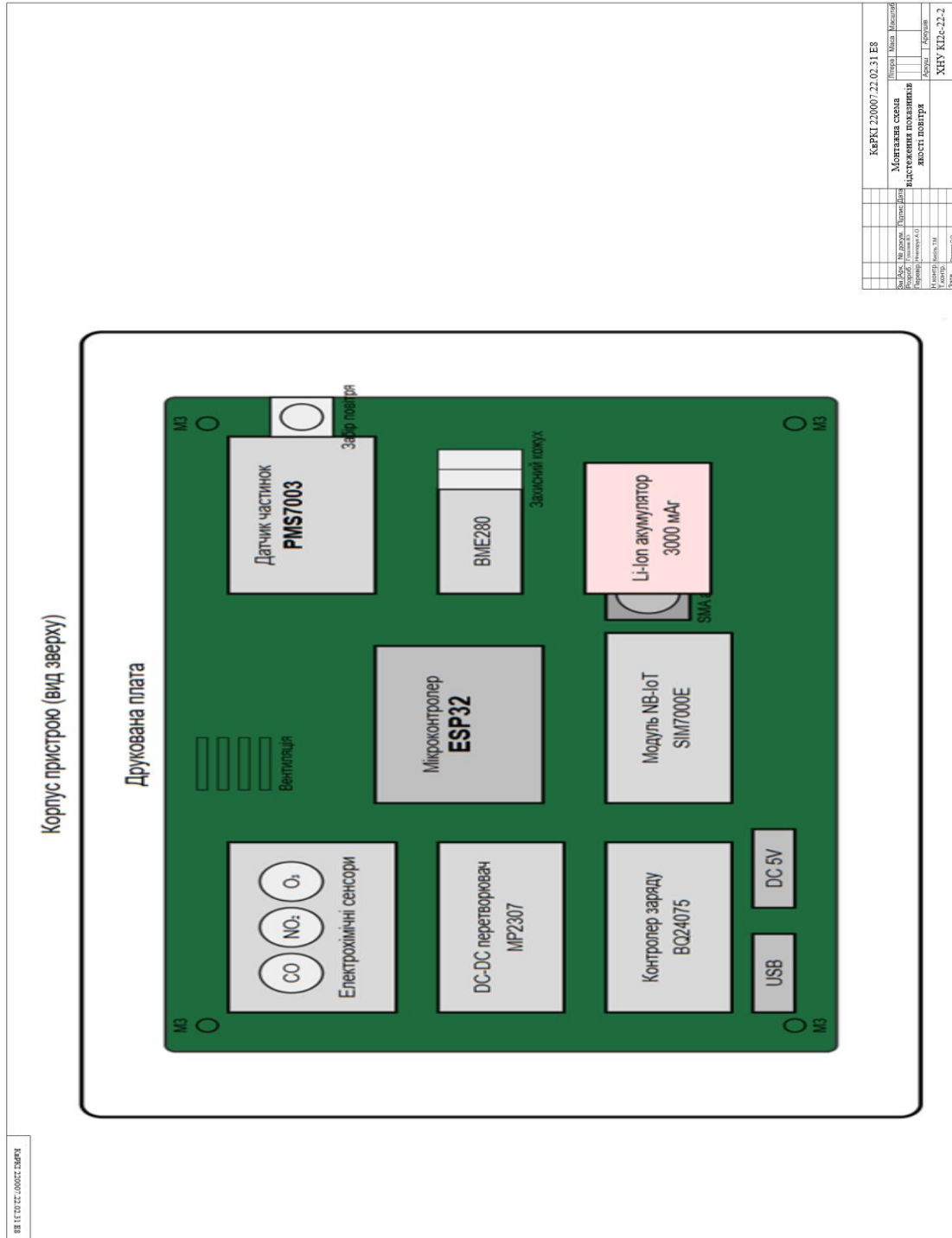
43. Zhao L., Zhou Y., Qian Y., Yang P., Zhou L. A novel assessment framework for improving air quality monitoring network layout. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2022. Vol. 72, No. 4. P. 346–360.

44. Zou E. Y. Unwatched pollution: The effect of intermittent monitoring on air quality. *American Economic Review*. 2021. Vol. 111, No. 7. P. 2101–2126.

					КВРКІ 220007.22.02.31ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

ДОДАТОК Б (обов'язковий)

КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «СТРУКТУРНА СХЕМА ЗАСОБУ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ТЕМПЕРАТУРИ та ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ»



ДОДАТОК Г (обов'язковий)

МОДУЛЬ «КЕРУВАННЯ ДАТЧИКАМИ»

```
// Приклад функції для парсингу даних з датчика твердих частинок
PMS7003

bool pms7003_parse_data(uint8_t *buffer, size_t length,
pms7003_data_t *data) {
    // Перевірка мінімальної довжини пакету
    if (length < 32) {
        ESP_LOGW(TAG, "PMS7003 data packet too short: %d bytes",
length);
        return false;
    }

    // Перевірка стартових байтів
    if (buffer[0] != 0x42 || buffer[1] != 0x4D) {
        ESP_LOGW(TAG, "PMS7003 invalid start bytes: 0x%02X
0x%02X", buffer[0], buffer[1]);
        return false;
    }

    // Розрахунок контрольної суми
    uint16_t checksum = 0;
    for (int i = 0; i < 30; i++) {
        checksum += buffer[i];
    }

    uint16_t received_checksum = (buffer[30] << 8) | buffer[31];
    if (checksum != received_checksum) {
        ESP_LOGW(TAG, "PMS7003 checksum mismatch: calculated
0x%04X, received 0x%04X",
checksum, received_checksum);
    }
}
```

```
        return false;
    }

    // Парсинг значень концентрацій
    data->pm1_0_standard = (buffer[4] << 8) | buffer[5];
    data->pm2_5_standard = (buffer[6] << 8) | buffer[7];
    data->pm10_standard = (buffer[8] << 8) | buffer[9];

    // Інші поля...

    return true;
}
```

Завідувачу кафедри КПС
д-р. філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ
Юрій ГУЦАЛЮК
ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи КІ2с-22-2

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Strike-Plagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

05.06. 2025 року



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Гуцалюк Юрій Богданович

Тема: Програмно-апаратний засіб відстеження показників температури та вологості повітря з використанням хмарних технологій

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 74

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є створення програмно-апаратного засібу відстеження показників температури та вологості повітря з використанням хмарних технологій.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено ґрунтовний аналіз сучасних рішень у сфері моніторингу якості повітря, зокрема тих, що здійснюють відстеження параметрів температури, вологості та рівнів забруднення з подальшою передачею даних у хмарні середовища. Особливу увагу приділено порівнянню комерційних та відкритих систем, їх функціональним можливостям, точності, енергоефективності та масштабованості. На основі аналізу сформульовано вимоги до розроблюваної системи, які поєднують доцільність використання сучасних сенсорів, мікроконтролерів та хмарних платформ для забезпечення доступності, точності та зручності у використанні.
У другому розділі здійснено проектування апаратної частини пристрою, що включає вибір мікроконтролера (ESP32), сенсорів температури та вологості, а також розробку електричної принципової та монтажної схем. Вибір компонентів базується на сучасних технічних характеристиках, низькому енергоспоживанні та сумісності з хмарними сервісами. Також описано архітектуру системи та логіку її функціонування. У роботі застосовано передові методи схемотехнічного проектування, а також враховано вимоги до енергоефективності та стабільності роботи в польових умовах.

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 1.0%

Dictionary check: en_US, ru_RU, ua_UA. **Errors in the documents: 9%**

ID: 243753 Title: БКРПрограмно-апаратний засіб відстеження показників температури та вологості повітря з використанням хмарних технологій Added in a DB: 2025-06-05 Authors: Юрій ГУЦАЛЮК Heads: Андрій Нічепорук Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	123108	797	1206 (1%)	17 (2%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор:

Співавтор:

Назва: Гудалюк_Програмно-апаратний засіб відстеження показників температури та вологості повітря з використанням хмарних технологій

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1:9.4%

Коефіцієнт подібності 2:5.1%

Мікропробіли: 4

Заміна букв: 17

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-06 03:38:05.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-06-06

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА
ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Програмно-апаратний засіб відстеження показників температури та вологості повітря з використанням хмарних технологій

Автор Юрій ГУЦАЛЮК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність 123- Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: к.т.н., доцент Андрій НІЧЕПОРУК

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	Відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	Не виявлено

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) значна частина списку використаних джерел була визначена як плагіат.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 9.38% і адресується до 21 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 1%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи _____

Андрій НІЧЕПОРУК

Гарант ОП _____

Андрій НІЧЕПОРУК

Завідувач кафедри КІС _____

Ольга ПАВЛОВА