

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система моніторингу погодних умов для інформаційної підтримки
комунальних підприємств

Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 2301254.22.01.32 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група KI2-22-1

Підпис

Артем КОНИК
Ініціали, прізвище

Керівник

Науковий ступінь, учене звання

Підпис

Олег ВОЙЧУР
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер канд. фіз.-мат. наук, доцент

Науковий ступінь, учене звання

Підпис

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС

Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

« 01 » червня 2026 р.

дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

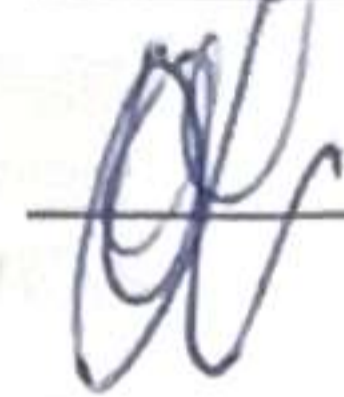
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІС



Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Конику Артему Володимировичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проєкту (роботи) Кіберфізична система моніторингу погодних умов для інформаційної підтримки комунальних підприємств

Керівник проєкту (роботи) Войчур Олег Юрійович

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

Затверджена наказом ректора університету від 01.03.2026 р. № 5

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Теоретичні основи досліджуваної проблеми

Проектування та обґрунтування архітектури системи

Програмно-апаратна реалізація та тестування системи

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

Структура кіберфізичної системи

Схема електрична принципова

Емуляція апаратного забезпечення у Wokwi

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2026 р.

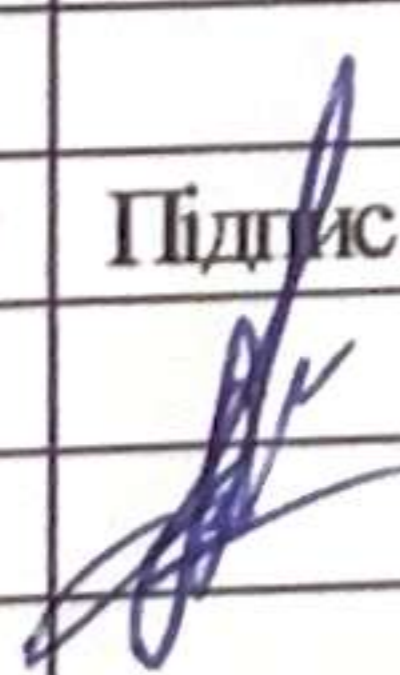
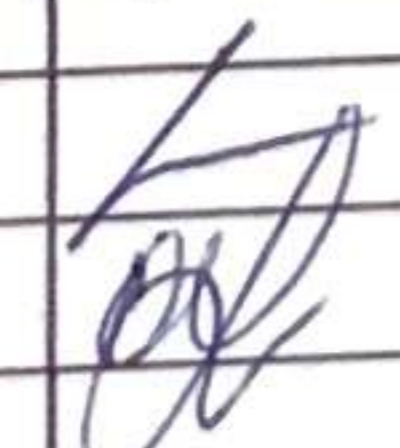
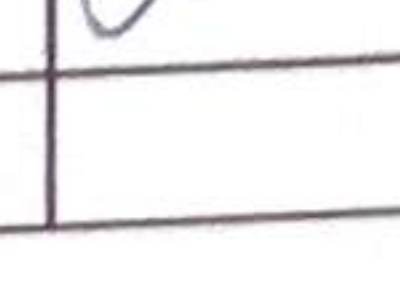
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напряму дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – теоретичні основи досліджуваної проблеми	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – проектування та обґрунтування архітектури системи	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація та тестування системи	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	24.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	25.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач  Артем КОНИК
Підпис Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи  Олег ВОЙЧУР
Підпис Імя, ПРІЗВИЩЕ

№ р я д к а	Ф о р м а т	Позначення	Найменування	К і л · л и с т і в	№ ек з	П р и м і т к а
			<u>Текстові документи</u>			
1		КВРКІ 2301254.22.01.32 ПЗ	Пояснювальна записка	66		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КВРКІ 2301254.22.01.32 Е8	Структура кіберфізичної системи	1		
3		КВРКІ 2301254.22.01.32 Е8	Схема електрична принципова	1		
4		КВРКІ 2301254.22.01.32 Е8	Емуляція апаратного забезпечення у Wokwi	1		

КВРКІ 2301254.22.01.32 ВП				
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата
Розробив		Коник		
Перевір.		Войчур		
Н. контр.		Кисіль		
Затв.		Павлова		02.06
Відомість проекту				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		У	1	1
ХНУ, КІ2-22-1				

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система моніторингу погодних умов для інформаційної підтримки комунальних підприємств».

Автор роботи: Артем КОНИК.

Керівник роботи: Олег ВОЙЧУР.


Пояснювальна записка: 66 с., 11 рис., 8 табл., 4 дод., 40 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

АРХІТЕКТУРА, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ, ПОГОДНІ УМОВИ, РОЗУМНЕ МІСТО, ESP32, MQTT.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці кіберфізичної системи моніторингу погодних умов для інформаційної підтримки комунальних підприємств. Актуальність роботи полягає у необхідності отримання точних локальних метеоданих для управління міською інфраструктурою та енергозбереження. Апаратна частина базується на мікроконтролері ESP32 та прецизійних датчиках DHT22 і LDR.

Метою дослідження є створення комплексу для збору та візуалізації телеметрії у реальному часі. У роботі застосовано багаторівневу архітектуру на основі протоколу MQTT та формату JSON, що забезпечує стабільну передачу даних. Програмна реалізація виконана з використанням платформи MicroPython та фреймворку Streamlit. Випробування підтвердили високу точність системи з похибкою менше 0,5 % та її здатність до автоматичного самовідновлення після розривів мережевого зв'язку

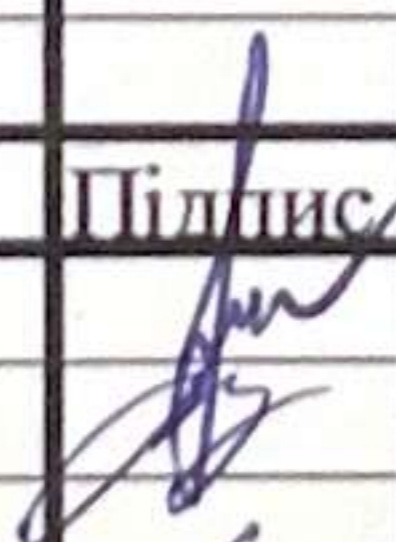
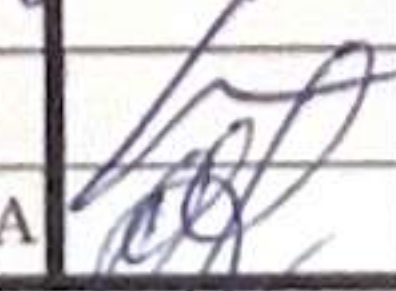

Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Теоретичні основи досліджуваної проблеми	6
1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань	6
1.2 Оцінка та порівняння наявних рішень	10
1.3 Особливості побудови бездротових сенсорних мереж та вимоги до апаратного забезпечення	12
1.4 Методи вирішення поставленої задачі в контексті дослідження	18
1.5 Постановка задачі дослідження	20
1.6 Висновки до першого розділу	21
2 Проектування та обґрунтування архітектури системи	23
2.1 Розробка структурної схеми кіберфізичної системи	23
2.2 Обґрунтування вибору апаратних засобів та датчиків	25
2.3 Вибір та обґрунтування протоколів передачі даних	31
2.4 Розробка алгоритмів функціонування системи	36
2.5 Висновки до другого розділу	43
3 Програмно-апаратна реалізація та тестування системи	46
3.1 Розробка вбудованого програмного забезпечення мікроконтролера	46
3.2 Створення веб-інтерфейсу для візуалізації даних	53
3.3 Аналіз результатів та тестування системи	56
3.4 Висновки до третього розділу	62
Висновки	64
Перелік джерел посилань	66
Додаток А Копія креслення «Структура кіберфізичної системи»	71
Додаток Б Копія креслення «Схема електрична принципова»	72

КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата				
Виконав		Артем КОНИК			Кіберфізична система моніторингу погодних умов для інформаційної підтримки комунальних підприємств	Літера	Арк.ш.	Арк.шів
Перевір.		Олег ВОЙЧУР				у	2	64
Н.контр.		Гетяна КИСІЛЬ			Пояснювальна записка	ХНУ КІ2-22-1		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА						

Додаток В Копія креслення «Емуляція апаратного забезпечення у Wokwi»

..... 73

Додаток Г Лістинг програмного забезпечення прошивки мікроконтролера

..... 74

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

ВСТУП

У сучасних умовах цифровізації міського середовища та стрімкого розвитку концепції «розумного міста» особливого значення набуває створення ефективних систем моніторингу навколишнього середовища. Глобальні кліматичні зміни та почастищення аномальних погодних явищ вимагають від муніципальних служб оперативного реагування для забезпечення безпеки життєдіяльності та стабільного функціонування міської інфраструктури. Традиційні метеорологічні станції, як правило, розташовані на значній відстані одна від одної та не здатні надати точну інформацію про мікроклімат у конкретних районах міста для енергопостачальних організацій, дорожніх служб та систем вуличного освітлення.

Вирішення цієї проблеми лежить у площині розробки та впровадження кіберфізичних систем (КФС) на базі технологій Інтернету речей (IoT). Використання сучасних малогабаритних мікроконтролерів із вбудованими засобами бездротового зв'язку, таких як ESP32, дозволяє створювати мережі розподілених сенсорних вузлів, що здатні збирати та передавати метеорологічні дані в режимі реального часу. Саме тому розробка доступної, надійної та масштабованої кіберфізичної системи моніторингу є актуальним науково-технічним завданням, що має безпосереднє практичне значення для інформаційної підтримки комунальних підприємств.

Мета роботи – проектування та розробка кіберфізичної системи моніторингу погодних умов, що забезпечує автоматизований збір метеорологічних параметрів, їх передачу через хмарні сервіси та візуалізацію у реальному часі для підтримки процесів прийняття рішень у комунальній сфері.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі рішення та протоколи передачі даних у сфері екологічного моніторингу.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Обґрунтувати вибір апаратної платформи та сенсорних модулів для побудови вузла збору даних.
3. Розробити структурну та принципову схеми кіберфізичної системи.
4. Спроекувати математичну модель перетворення аналогових сигналів у фізичні показники освітленості.
5. Розробити вбудоване програмне забезпечення для мікроконтролера ESP32.
6. Створити інтерактивний веб-інтерфейс для візуалізації поточної та історичної телеметрії.
7. Провести тестування стабільності системи та верифікацію точності отриманих даних.

Об'єкт дослідження – процеси моніторингу та передачі метеорологічних параметрів у реальному часі в межах кіберфізичних систем.

Предмет дослідження – методи, програмні та апаратні засоби побудови розподіленої системи збору, обробки та візуалізації погодних даних на основі мікроконтролерів та протоколу MQTT.

У роботі використано методи системного аналізу для побудови архітектури КФС, методи об'єктно-орієнтованого програмування для розробки ПЗ, методи математичного моделювання для обробки сигналів сенсорів, а також експериментальні методи тестування в симуляційному середовищі.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні прототипу малобюджетної та високоефективної метеостанції, яка може бути інтегрована в єдину мережу моніторингу міста. Застосування розробленого рішення дозволяє комунальним службам автоматизувати контроль за рівнем освітленості (для керування мережами освітлення), температурою та вологістю (для прогнозування ожеледиці чи злив), що сприяє підвищенню ефективності експлуатації міської інфраструктури та зниженню витрат на енергоносії.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПРОБЛЕМИ

1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань

Розвиток урбаністичних структур супроводжується стрімким впровадженням інформаційних технологій у всі сфери життєдіяльності. У сучасних умовах тотальної цифровізації міського простору концепція «Розумного міста» (Smart City) висуває нові, значно суворіші вимоги до систем моніторингу навколишнього середовища та оперативного управління наявними ресурсами [5, 7, 20, 28, 33, 35, 36, 38]. Провідне місце в багатовимірному управлінні комплексною міською інфраструктурою займає високоточне метеорологічне забезпечення, оскільки локальні погодні умови безпосередньо впливають на рівень експлуатаційної безпеки, загальну енергоефективність споруд та сукупні економічні показники діяльності комунальних підприємств [16, 22, 29, 43–45]. Сучасна кіберфізична система (КФС) моніторингу погоди виступає не просто як розрізнений набір первинних перетворювачів та датчиків, а як складний, багаторівневий інтегрований комплекс, що поєднує безперервні фізичні процеси в атмосфері з високопродуктивними обчислювальними алгоритмами для підтримки прийняття обґрунтованих управлінських рішень у масштабі реального часу [15].

Екосистема інформаційної підтримки сучасного міста базується на тісній багатовекторній взаємодії спеціалізованої метеорологічної системи з різноманітними муніципальними, експлуатаційними та аварійними службами [14]. Методані є надзвичайно важливим та безальтернативним вхідним ресурсом для широкого кола структурних підрозділів: від оперативних дорожніх служб, що безпосередньо відповідають за безпеку транспортного руху на магістралях, до теплопостачальних організацій, які динамічно регулюють процеси генерації та просторового розподілу енергетичних ресурсів. Така глибока технологічна інтеграція дозволяє сформуванню єдиного уніфікованого інформаційного простору, де кожен зафіксований показник датчика (наприклад,

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зміна вологості чи освітленості) трансформується у конкретну, економічно доцільну управлінську дію на рівні виконавчих механізмів.

Детальний системний аналіз проблемної предметної області дозволяє виділити основні експлуатаційні сектори, де необхідний безперервний просторовий моніторинг погоди:

1) теплопостачання – чітка математична кореляція між температурою зовнішнього повітря та фактичним тепловим навантаженням на котельні дозволяє гнучко регулювати подачу теплоносія в повністю автоматичному режимі, враховуючи теплову інерцію будівель, що дає змогу уникати значних перевитрат природного газу та дискомфортного перегріву житлових приміщень [1, 9, 23];

2) дорожня інфраструктура – своєчасне прецизійне виявлення точки роси та моменту термодинамічного переходу температури навколишнього середовища через 0°C дозволяє заздалегідь прогнозувати утворення небезпечної ожеледиці та оптимізувати використання протиожеледних реагентів, що наочно ілюструється обробленими даними з локальних метеозон, які об'єктивно відображені на карті теплових островів (рисунок 1.1) [12, 27, 31, 46];

3) енергомережі – постійний інструментальний моніторинг швидкості вітрових потоків, процесів обледеніння проводів та інтенсивності атмосферних опадів дозволяє диспетчерам заздалегідь оцінити ймовірні ризики механічного пошкодження магістральних ліній електропередач та вчасно мобілізувати підготовані аварійно-відновлювальні бригади [8, 19, 25, 48];

4) водовідведення та екологія – безперервне вимірювання рівня опадів у реальному часі є необхідним для побудови гідрологічних моделей, прогнозування пікового навантаження на міську зливову каналізацію та оперативного запобігання раптовим підтопленням низинних ділянок урбанізованої території [4, 13, 47].

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

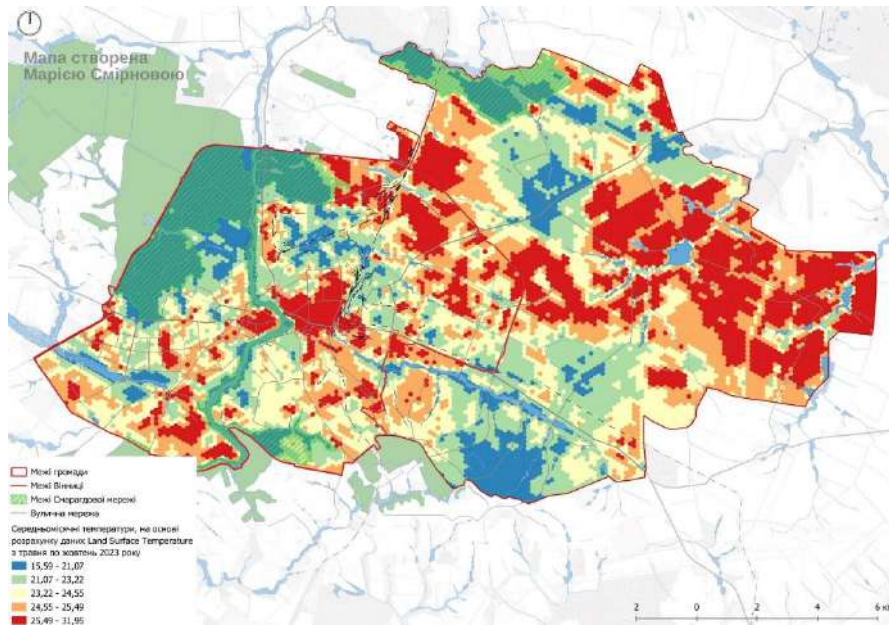


Рисунок 1.1 – Карта теплових островів міста [41]

Існуюча традиційна система моніторингу має цілий ряд суттєвих та системних недоліків, що були чітко виявлені в ході детального аналізу проблемної області [10]. По-перше, це вкрай низька просторова роздільна здатність. Стандартні державні метеостанції зазвичай розташовані на значній географічній відстані одна від одної (часто за межами щільної висотної забудови або в лісопаркових зонах), що абсолютно не дає змоги відстежити локальні температурні аномалії, зумовлені складною специфікою міської архітектури, асфальтовим покриттям та антропогенним теплом. По-друге, надзвичайно висока вартість апаратних рішень промислового класу не дозволяє бюджетним комунальним підприємствам екстенсивно масштабувати мережу вимірювань до рівня кожного житлового мікрорайону чи окремого локального об'єкта ЖКГ.

Третьою вагомою проблемою є технологічний та інформаційний розрив – повна закритість вихідного коду або суттєва часова затримка надходження метрик від глобальних комерційних метеосервісів. Для ефективного оперативного управління, наприклад, маршрутизацією снігоприбиральної дорожньої техніки під час інтенсивного снігопаду, валідні дані потрібні в жорсткому режимі реального часу («right here, right now»), а не з усередненим

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

інтервалом у 12 чи 36 годин, який зазвичай пропонують публічні безкоштовні API. Практичне вирішення цих накопичених проблем полягає у безпосередньому впровадженні сучасної багаторівневої архітектури потоків даних виключно на основі передових IoT-технологій [21, 49]. Така структурована архітектура об'єктивно передбачає прямий, найкоротший шлях проходження сигналів від апаратного сенсорного рівня (де фіксуються фізичні параметри довкілля) через транспортний мережевий рівень (передача інкапсульованих пакетів по Wi-Fi чи бездротових мережах малої потужності LoRaWAN) до високопродуктивних хмарних сервісів кінцевої обробки та візуалізації на інформаційних панелях.

На основі проведеного глибокого аналізу поточного стану справ можна сформулювати конкретні інженерні завдання дослідження та розробки системи:

1) автоматизація збору даних – концептуальне проєктування та створення автономних сенсорних вузлів на базі сучасного енергоефективного мікроконтролера ESP32, здатних до безперебійної тривалої експлуатації у відкритому та агресивному середовищі [2];

2) забезпечення максимальної точності та оперативності – цілеспрямоване використання каліброваних прецизійних цифрових сенсорів та алгоритмічна оптимізація протоколів передачі пакетних даних для мінімізації будь-яких комунікаційних затримок;

3) створення комплексної системи підтримки прийняття рішень – розробка програмного інтерфейсу (інтерактивного Dashboard) для чергових диспетчерів, де зібрані метеодані не просто пасивно відобразатимуться, а проходять етап первинної аналітики, агрегації та математичної фільтрації;

4) масштабованість та архітектурна гнучкість – розробка такої топологічної структури системи, яка дозволяє безперешкодно та легко додавати нові апаратні точки вимірювання без необхідності суттєвої перебудови програмного забезпечення вузлів чи модернізації серверної частини.

Таким чином, виявлені системні проблеми прямо вказують на гостру необхідність створення доступної, гнучкої та високоточної кіберфізичної

платформи, яка б повністю заповнила існуючий інформаційний вакуум на локальному рівні управління міським господарством. Саме такий інноваційний підхід дозволяє органічно об'єднати фізичні параметри мінливого довкілля з надійним цифровим середовищем управління підприємством.

1.2 Оцінка та порівняння наявних рішень

Для всебічного обґрунтування технічної та економічної доцільності розробки власної спеціалізованої кіберфізичної системи необхідно провести ґрунтовний огляд існуючих комерційних та відкритих технологій моніторингу погоди, які наразі доступні для використання комунальними підприємствами та приватним сектором. Першим традиційним підходом є придбання та розгортання професійних автоматичних метеорологічних станцій від провідних світових виробників, таких як Vaisala або Davis Instruments. Ці сертифіковані системи дійсно забезпечують еталонну метрологічну точність вимірювань та гарантують високу апаратну надійність у найскладніших погодних умовах, проте їхнє масове впровадження нерозривно пов'язане з надмірно високими фінансовими витратами як на первинну закупівлю, так і на подальше регулярне сервісне та калібрувальне обслуговування. Як показано на рисунку 1.2, такі громіздкі апаратні комплекси потребують виділення спеціалізованої інфраструктури, облаштування щогл та захисних бар'єрів для правильного встановлення, що робить їх економічно абсолютно недоступними для створення щільних, високодеталізованих мереж моніторингу в межах окремих спальних мікрорайонів міста.

Альтернативним, суто програмним методом отримання масивів метеоданих є використання глобальних мережевих сервісів та агрегаторів через API, серед яких на сучасному ринку найбільш популярними та поширеними є OpenWeatherMap, AccuWeather або Windy. Цей хмарний підхід приваблює повною відсутністю потреби у власній матеріально-технічній базі, що дозволяє

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суттєво зекономити бюджет муніципального підприємства на стадії розгортання. Однак необхідно розуміти, що дані таких віртуальних платформ переважно ґрунтуються на складній математичній інтерполяції, комп'ютерному моделюванні макропроцесів та супутниковому спостереженні. Такий опосередкований метод збору інформації часто призводить до суттєвих розбіжностей із реальними фізичними показниками в конкретній географічній точці міста через непрогнозований вплив висотної щільної забудови, зміни альbedo поверхонь та особливостей локального рельєфу [24]. Така системна похибка, що іноді сягає 3–5°C або значних відхилень у показниках вологості, є абсолютно непринятною для діяльності оперативних дорожніх служб, де навіть мінімальне коливання температури біля нуля градусів безпосередньо визначає фазовий стан вологи на дорожньому покритті та, як наслідок, загальну безпеку транспортного руху.



Рисунок 1.2 – Професійна метеорологічна станція [42]

Окремої уваги в процесі порівняння заслуговують комерційні побутові та аматорські IoT-рішення формату «розумний дім», наприклад популярні системи Netatmo, які вигідно вирізняються швидкістю та легкістю розгортання, а також привабливим сучасним дизайном кінцевих пристроїв. Проте, при спробі

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

екстраполяції їхніх можливостей у контекст безперервної професійної експлуатації, такі пристрої виявляються вкрай малоефективними через пропріетарну «закритість» їхнього програмного забезпечення, відсутність доступу до сирих невідфільтрованих даних та об'єктивну складність програмної інтеграції у існуючі внутрішні ERP-системи моніторингу підприємства. Крім того, побутові рішення технічно не розраховані на суворі умови цілорічної вуличної експлуатації та не підтримують гнучке низькорівневе налаштування мережевих протоколів передачі даних, що суттєво обмежує їх використання в серйозному професійному середовищі.

Детальний порівняльний аналіз вищезгаданих концептуальних підходів доводить, що найбільш збалансованим та раціональним рішенням для забезпечення інформаційної підтримки комунального сектору є самостійне створення спеціалізованої кіберфізичної системи на базі доступних та потужних мікроконтролерів. Такий інженерний підхід дозволяє органічно поєднати високу інструментальну точність локальних вимірювань із необмеженою гнучкістю сучасних хмарних технологій, зберігаючи при цьому надзвичайно низьку собівартість кінцевих сенсорних пристроїв [3, 50]. За об'єктивним критерієм співвідношення капітальної вартості до експлуатаційної ефективності, саме проектування та розробка власної архітектури системи моніторингу є найбільш доцільним та перспективним шляхом цілеспрямованого розвитку міської інфраструктури, гарантовано забезпечуючи необхідну інформаційну автономність та безмежну просторову масштабованість.

1.3 Особливості побудови бездротових сенсорних мереж та вимоги до апаратного забезпечення

Розвиток міських кіберфізичних систем нерозривно пов'язаний із розгортанням масштабних бездротових сенсорних мереж (Wireless Sensor Networks, WSN). Такі мережі складаються з великої кількості просторово

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розподілених автономних апаратних вузлів, які взаємодіють між собою та з центральним сервером збору телеметрії. В умовах щільної міської забудови процес побудови подібної інфраструктури стикається з низкою специфічних перешкод, які вимагають ретельного інженерного підходу вже на етапі первинного проєктування. Успішне функціонування системи безпосередньо залежить від правильного вибору топології мережі та надійної апаратної бази кожного окремого вимірювального модуля [51].

Першою вагомою проблемою при розгортанні метеорологічних датчиків у міському просторі є вибір оптимальних локацій для їх встановлення. На відміну від відкритих польових умов, урбанізоване середовище характеризується наявністю значної кількості відокремлених мікрокліматичних зон, які формуються під безпосереднім впливом нагрітих асфальтових покриттів, висотних будівель, транспортних потоків та промислових об'єктів. Відповідно, сенсорні вузли повинні розміщуватися таким чином, щоб максимально усунути вплив паразитних джерел антропогенного тепла та забезпечити високу репрезентативність отриманих даних для конкретного житлового чи інфраструктурного району.

Окрему увагу необхідно приділити питанню фізичного захисту апаратної частини від постійних агресивних факторів навколишнього середовища. Метеорологічні датчики працюють в умовах безперервного впливу жорсткого ультрафіолетового випромінювання, інтенсивних атмосферних опадів, дрібного пилу та механічних вібрацій від транспорту. Тому корпуси пристроїв повинні обов'язково відповідати високим міжнародним стандартам пиловологозахисту (наприклад, IP65 або IP67) та бути виготовленими з полімерних матеріалів, стійких до температурної деградації [52]. Крім того, інженерне рішення має передбачати надійний захист від можливих актів вандалізму, що вимагає розробки прихованих або спеціалізованих антивандальних кріплень.

Одним із найбільш складних інженерних аспектів проєктування є забезпечення тривалого автономного живлення територіально розподілених

сенсорних вузлів. Оскільки прокладання кабельних ліній електропередач до кожної окремої точки вимірювання є економічно недоцільним і часто фізично неможливим, пристрої повинні безперебійно функціонувати від вбудованих джерел енергії тривалий час. Для ефективного вирішення цього завдання застосовуються комбіновані гібридні системи живлення, що поєднують літій-іонні або літій-залізо-фосфатні акумулятори з невеликими сонячними панелями. Такий підхід дозволяє створити повністю енергонезалежні модулі, здатні працювати без втручання обслуговуючого технічного персоналу протягом кількох років [11].

Для досягнення максимальних показників енергоефективності програмне забезпечення мікроконтролера повинно активно та раціонально використовувати режими глибокого сну (Deep Sleep). У такому енергозберігаючому стані головне процесорне ядро та більшість периферійних апаратних модулів відключаються від живлення, а загальне споживання струму знижується до мінімальних мікроамперних значень. Пробудження системи відбувається виключно за внутрішнім апаратним таймером лише на короткий проміжок часу, необхідний для зчитування показників сенсорів та швидкої передачі пакета даних, після чого пристрій миттєво повертається у стан сну. Саме такий циклічний алгоритм роботи є визначальним для забезпечення довгострокової автономності.

Об'єктивна точність вимірювання температури та відносної вологості повітря значною мірою залежить від конструкції захисного екрана (радіаційного захисту), в якому безпосередньо розміщуються цифрові сенсори. Пряме або відбите сонячне проміння здатне інтенсивно нагріти корпус датчика, що неодмінно призведе до суттєвого спотворення результатів вимірювань, перевищуючи реальну термодинамічну температуру навколишнього середовища на декілька градусів. Тому застосування спеціальних жалюзійних екранів (Stevenson screen), які забезпечують вільну конвективну циркуляцію повітря та повністю блокують сонячну радіацію, є обов'язковою умовою для отримання валідних метеорологічних показників.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інформаційний обмін між сенсорними вузлами та центральним сервером у міських умовах суттєво ускладнюється наявністю значної кількості радіоперешкод та фізичних бар'єрів у вигляді щільних залізобетонних конструкцій. Використання стандартних мережевих протоколів, таких як Wi-Fi, є доцільним лише за умови наявності щільного та стабільного покриття мережі. Для територіально віддалених об'єктів або зон із слабким сигналом значно більш перспективним є застосування технологій LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), зокрема стандартів LoRaWAN або NB-IoT. Ці бездротові технології забезпечують впевнену передачу даних на відстані кількох кілометрів при мінімальному споживанні заряду акумулятора [26].

Забезпечення високої достовірності телеметричних даних вимагає обов'язкового впровадження алгоритмів попередньої математичної обробки сигналів безпосередньо на рівні мікроконтролера. Датчики можуть періодично генерувати поодинокі хибні значення (статистичні викиди) внаслідок потужних електромагнітних наведень під час грози або короткочасних програмних збоїв на шині I2C. Використання перевірених методів цифрової фільтрації, таких як алгоритм ковзного середнього або медіанний фільтр, дозволяє надійно відсікти ці паразитні аномалії ще до моменту їх відправлення на хмарний сервер. Це суттєво підвищує загальну якість телеметрії та зменшує марне навантаження на бездротові канали зв'язку.

Питання інформаційної безпеки IoT-мереж набуває особливої актуальності та гостроти в загальному контексті управління міською інфраструктурою. Відкриті бездротові канали передачі даних можуть бути потенційно вразливими до навмисного перехоплення або зловмисної підміни інформації (spoofing). Для надійного запобігання несанкціонованому доступу до системи необхідно реалізовувати шифрування корисного навантаження (payload) на апаратному рівні, наприклад, за допомогою алгоритмів AES-128, та використовувати виключно захищені версії мережевих протоколів зв'язку, такі як MQTTS з використанням сертифікатів безпеки [53].

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вагомим технологічним аспектом тривалої безперервної експлуатації системи є неминуча проблема поступової фізичної деградації (дрейфу нуля) сенсорів. З плином часу чутливі полімерні елементи датчиків вологості та напівпровідникові аналізатори газового складу повітря частково втрачають свою початкову заводську точність під тривалим впливом промислових забруднюючих речовин та аерозолів. Це об'єктивно вимагає розробки чітких регламентних процедур періодичного метрологічного калібрування пристроїв або впровадження інноваційних програмних алгоритмів компенсації дрейфу на основі методів машинного навчання та постійного автоматичного порівняння даних із сусідніми, еталонними вузлами мережі.

Мережева інфраструктура проєкту повинна обов'язково мати високий рівень стійкості до тимчасових збоїв провайдерів та втрати бездротового зв'язку. У разі раптової відсутності підключення до сервера, мікроконтролер має автоматично зберігати всі зібрані показники у локальній незалежній пам'яті (наприклад, на зовнішній SD-карті або у внутрішній флеш-пам'яті). Після успішного відновлення каналу зв'язку накопичена за період відключення інформація повинна бути пакетно передана до бази даних. Цей механізм гарантує абсолютну безперервність часових рядів, що є необхідною базовою умовою для глибокого ретроспективного аналізу кліматичних змін.

У контексті подальшого географічного масштабування кіберфізичної системи інженерам необхідно заздалегідь передбачити програмну можливість автоматичного додавання нових пристроїв за принципом Plug-and-Play. Процес первинної конфігурації нового вузла повинен бути максимально спрощеним для кінцевого технічного працівника, повністю виключаючи необхідність ручного вписування складних мережевих налаштувань чи топиків. Використання сучасних механізмів автоматичного виявлення (Auto-Discovery) дозволяє миттєво інтегрувати нові датчики в єдину інформаційну панель управління одразу після їх монтажу та першого підключення до джерела живлення.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтеграція розроблених апаратних рішень із сучасними глобальними платформами Інтернету речей відкриває надзвичайно широкі можливості для подальшого розширення функціоналу проєкту. Стандартизовані текстові формати передачі даних, такі як JSON, дозволяють системі легко обмінюватися структурованою інформацією не лише з внутрішніми базами даних конкретного підприємства, але й вільно взаємодіяти з суміжними міськими службами через відкриті API-інтерфейси. Це активно сприяє створенню єдиної інтелектуальної екосистеми міського моніторингу, де кожен згенерований байт інформації використовується з максимальною аналітичною ефективністю.

Під час етапу вибору електронної компонентної бази розробникам необхідно постійно шукати раціональний компроміс між остаточною вартістю обладнання та його заявленими метрологічними характеристиками. Використання надто дорогих вузькоспеціалізованих промислових сенсорів робить систему фінансово недоступною для масового розгортання, тоді як найдешевші аматорські компоненти зовсім не забезпечують необхідної інструментальної надійності. Оптимальним підходом є використання цифрових сенсорів середнього цінового діапазону, незначні апаратні недоліки яких ефективно компенсуються застосуванням складних програмних алгоритмів корекції системних похибок.

Таким чином, успішна побудова ефективної та розгалуженої сенсорної мережі вимагає від розробників вирішення цілого комплексу складних інженерних завдань, що органічно охоплюють апаратне проєктування, низькорівневе програмування мікроконтролерів, оптимізацію енергоспоживання та забезпечення надійного криптографічного захисту інформації. Ретельне урахування всіх перелічених технічних вимог та експлуатаційних обмежень на найбільш ранніх етапах розробки є головною запорукою створення стабільної, автономної та легко масштабованої кіберфізичної системи, яка здатна роками безперебійно функціонувати в складних умовах сучасного урбанізованого середовища.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4 Методи вирішення поставленої задачі в контексті дослідження

Побудова та впровадження сучасної багатокомпонентної кіберфізичної системи для метеорологічного моніторингу вимагає застосування комплексного, багаторівневого інженерного підходу, що гармонійно поєднує перевірені методи прецизійного збору первинних фізичних даних із передовими, високонадійними мережевими технологіями трансляції пакетів. Основним методом ефективної реалізації нижнього апаратного рівня обґрунтовано обрано концепцію розподіленої вузлової архітектури, побудованої на базі продуктивних мікроконтролерів сімейства ESP32. Ця апаратна платформа не лише забезпечує збір даних, але й дозволяє повноцінно впровадити сучасні принципи периферійних обчислень (Edge Computing), за яких первинна математична обробка, усереднення значень та фільтрація паразитних шумів виконуються мікропроцесором безпосередньо на місці фізичного вимірювання [6, 11, 26, 37]. Такий інтелектуальний підхід суттєво зменшує загальний обсяг трафіку, оптимізує навантаження на бездротові канали зв'язку та центральний обчислювальний сервер, забезпечуючи стабільну, безперебійну роботу територіально розподілених кластерів системи.

Невід'ємною складовою обраної методики апаратного дослідження є безальтернативне використання виключно цифрових методів передачі даних між сенсорними модулями та головним обчислювальним ядром через стандартизовані послідовні інтерфейси I2C та SPI. На відміну від застарілих аналогових датчиків, які схильні до деградації сигналу, такий цифровий спосіб зчитування зводить до мінімуму негативний вплив зовнішніх електромагнітних перешкод та дозволяє паралельно підключати декілька різних вимірювальних модулів до однієї загальної шини даних без жодної втрати точності, що є обов'язковою умовою при фіксації параметрів нестабільного навколишнього середовища [34]. Це гарантовано забезпечує надзвичайно високу роздільну

здатність системи при безперервній фіксації таких мікрокліматичних параметрів, як атмосферний тиск, градієнт температури, рівень інсоляції та відносна вологість повітря.

Для успішного вирішення складного завдання безперервної передачі зібраної інформації в умовах нестабільних мережевих з'єднань або перевантаженого радіоефіру успішно застосовано подієво-орієнтований метод комунікації за допомогою легковагового протоколу MQTT [32]. Цей свідомий архітектурний вибір повністю обумовлений його мінімальними вимогами до ширини пропускну здатності каналу та надзвичайно високою надійністю доставки телеметричних повідомлень за асинхронною моделлю «видавець-підписник» (publisher-subscriber). Системне використання MQTT-брокера дозволяє кіберфізичній системі миттєво реагувати на різкі зміни погодних умов, миттєво публікуючи згенеровані дані у відповідні тематичні топіки, на які постійно підписані диспетчерські інтерфейси служб комунальних підприємств. Такий гнучкий технологічний підхід повністю і гармонійно узгоджується з функціональними завданнями технічного відділу щодо безперервного моніторингу та централізованого адміністрування розгалужених мереж доступу.

Кінцевим, логічним етапом розробленої методики є впровадження передових методів хмарного збереження та інтелектуальної, інтуїтивно зрозумілої візуалізації оброблених даних [17]. Загальний процес обробки обов'язково включає нагромадження та індексацію історичної телеметрії у спеціалізованих часових базах даних (Time Series Databases), що дозволяє фахівцям проводити глибокий ретроспективний аналіз погодних аномалій на будь-якому часовому проміжку [40]. Створена структурована інформаційна база безпосередньо забезпечує генерацію та візуалізацію динаміки змін у вигляді інтерактивних інформаційних панелей, розроблених за допомогою сучасних фреймворків мови Python для побудови дашбордів. Використання таких потужних інструментів для відображення графіків та теплових мап значно підвищує ефективність щоденної роботи інженерного персоналу та

адміністративного сектору підприємства, перетворюючи сирі дані на зрозумілу аналітику.

1.5 Постановка задачі дослідження

На основі ґрунтовно проведеного системного аналізу та чітко виявлених архітектурних проблем у специфічній сфері муніципального моніторингу було сформульовано головну, всеохоплюючу мету даного дослідження, яка полягає у проектуванні та практичному створенні надійної, стійкої до відмов та економічно максимально ефективної кіберфізичної системи для інформаційної підтримки комунального сектору [18]. Основним вектором усієї запланованої роботи є остаточний парадигмальний перехід від традиційного статичного, періодичного збору даних до функціонування динамічної потокової системи реального часу, яка безшовно інтегрована в існуючу корпоративну ІТ-інфраструктуру підприємства.

Першочерговим та найвагомим завданням даного прикладного дослідження є глибоке теоретичне обґрунтування та практичний підбір прецизійної апаратної компонентної бази, яка здатна роками працювати в повністю автономному режимі у відкритому, агресивному середовищі зі значними перепадами температур. Це амбітне завдання передбачає не лише сліпий вибір необхідних сенсорів, а й написання низькорівневих алгоритмів енергозбереження, оптимізації циклів сну мікроконтролера та програмної стабілізації втраченого бездротового зв'язку. Другим масштабним завданням є безпосередня програмна реалізація продуманої багаторівневої архітектури, де кожен функціональний компонент – починаючи від прошивки мікроконтролера і закінчуючи бекендом веб-інтерфейсу – надійно працює як єдиний, синхронізований механізм [30]. Такий комплексний підхід до вирішення проблеми дозволяє суттєво поглибити практичні навички з системного

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проектування, написання чистого коду та організації ефективної командної взаємодії.

Заключне, підсумкове завдання передбачає проведення широкої серії тривалих експериментальних випробувань щойно розробленої апаратної системи в реальних польових умовах для об'єктивної оцінки її метрологічної точності, стабільності живлення та стійкості до непрогнозованих мережових затримок. Очікуваним результатом цієї кропіткої роботи має стати повністю готовий, функціональний інженерний продукт, який цілодобово забезпечує комунальні служби об'єктивною, неспотвореною інформацією про актуальний метеорологічний стан міста, дозволяючи превентивно оптимізувати витрати матеріальних ресурсів та суттєво підвищити загальний рівень експлуатаційної безпеки міської інфраструктури [39].

1.6 Висновки до першого розділу

У розділі 1 проведений ґрунтовний та всебічний аналіз теоретичних засад і огляд існуючих на ринку технологічних рішень переконливо дозволив встановити, що процеси цифровізації міського простору вимагають переходу на якісно новий, сучасний рівень підходу до побудови систем метеорологічного моніторингу. Детальне дослідження специфіки предметної області наочно показало, що абсолютна залежність комунальних та аварійних служб від мінливих погодних умов безальтернативно вимагає високої просторової локалізації зібраних даних, яку фізично не здатні забезпечити традиційні розрізнені державні метеостанції через їхню надзвичайно низьку щільність розташування на площі міста. Виявлений та описаний інформаційний розрив між реальними оперативними потребами диспетчерських служб та фактичними можливостями безкоштовних глобальних метеосервісів додатково підтверджує нагальну необхідність розробки власної локальної автономної кіберфізичної системи, що здатна працювати у суворому режимі реального часу.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єктивна порівняльна оцінка доступних на ринку наявних рішень чітко продемонструвала, що закриті професійне обладнання є надто фінансово обтяжливим для масового масштабування мережі, тоді як популярні побутові споживчі пристрої не мають необхідної архітектурної відкритості для глибокої інтеграції в спеціалізовані промислові системи підприємств. Цей факт повністю і всебічно обґрунтовує вибір високопродуктивного мікроконтролера платформи ESP32 як єдиної бази для розробки апаратної частини, що дозволяє інженерам вдало поєднати високу прецизійність роботи цифрових сенсорів із необмеженою обчислювальною гнучкістю хмарних технологій за умови збереження рекордно низької собівартості. Системне застосування актуальних методів периферійних обчислень (Edge Computing) та легковагового телеметричного протоколу MQTT визначено як найбільш раціональний та технологічно ефективний шлях для побудови стабільної архітектури, що здатна безперебійно функціонувати у вкрай складних мережевих умовах. Таким чином, головним підсумковим результатом першого етапу наукового дослідження стала чітка, структурована постановка інженерних завдань, які безпосередньо спрямовані на створення надійного, масштабованого та недорогого продукту, який безумовно забезпечить об'єктивну інформаційну підтримку та суттєву оптимізацію витрачання ресурсів у межах сучасної та складної міської інфраструктури.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ

2.1 Розробка структурної схеми кіберфізичної системи

Проєктування архітектури кіберфізичної системи моніторингу погодних умов базується на концепції трирівневої моделі, що забезпечує цілісну інтеграцію обчислювальних ресурсів із фізичними процесами довкілля. Згідно зі структурною схемою, представленою на рисунку 2.1, система організована як вертикально-інтегрований комплекс, де кожен рівень виконує чітко визначений набір функцій: від безпосереднього перетворення фізичних величин у цифрові сигнали до інтелектуального аналізу великих масивів даних у хмарному середовищі.

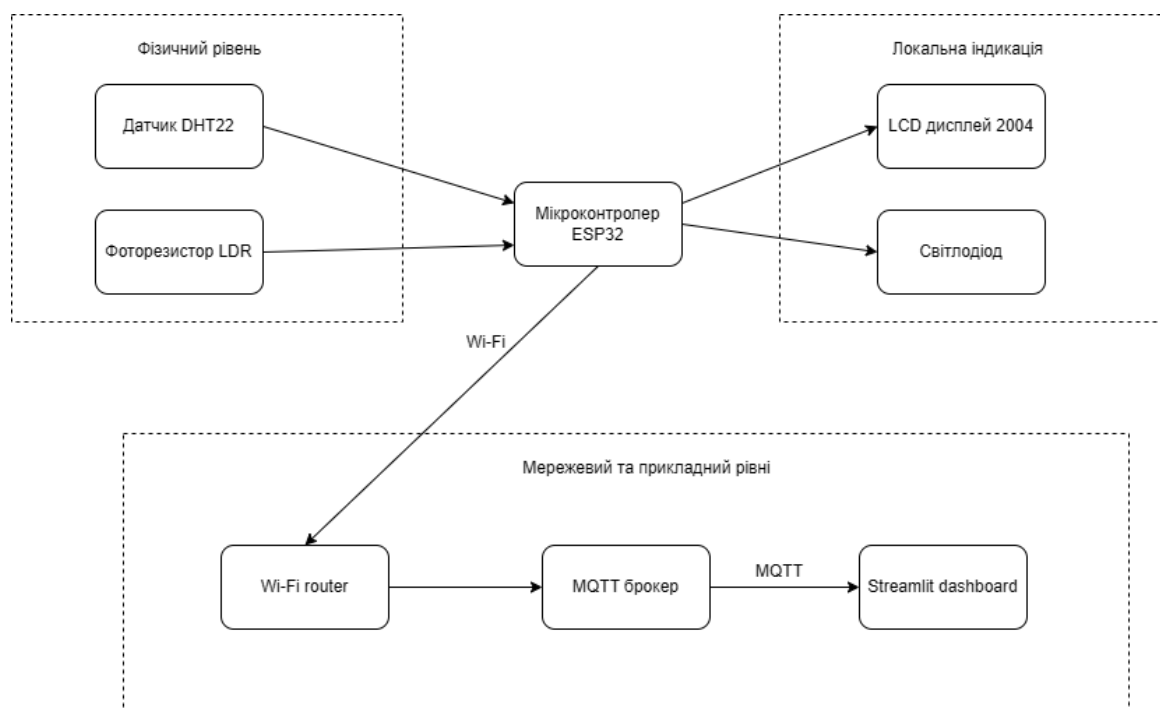


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи

Призначення першого рівня або рівня сприйняття (perception layer), полягає у забезпеченні безперервного та точного збору первинної

метеорологічної інформації. До складу цього рівня входять спеціалізовані сенсорні модулі, кожен з яких орієнтований на вимірювання конкретного фізичного параметра. Використання цифрового датчика температури та вологості разом із аналоговим каналом вимірювання освітленості дозволяє отримати комплексний профіль стану приземного шару атмосфери. Особливістю архітектури на цьому рівні є використання розподілених інтерфейсів підключення, що мінімізує взаємний вплив сигнальних ліній та підвищує загальну завадостійкість пристрою в умовах щільної міської забудови.

Ядром системи виступає рівень локальної обробки, побудований на базі високопродуктивного мікроконтролера ESP32. У межах загальної архітектури цей вузол виконує роль інтелектуального шлюзу та координатора периферії. Його функціонал виходить за межі простого збору даних і включає алгоритми попередньої фільтрації, нормалізації значень та семантичного аналізу погодних умов. Мікроконтролер забезпечує синхронізацію роботи датчиків із різними протоколами передачі даних (цифровий однопровідний інтерфейс та АЦП), виконуючи роль моста між аналоговим світом фізичних явищ та цифровим середовищем передачі інформації.

Особливе місце в архітектурі КФС посідає підсистема локальної взаємодії та зворотного зв'язку. Включення до структурної схеми рідкокристалічного дисплея та світлодіодного модуля сигналізації дозволяє реалізувати концепцію автономного функціонування. Архітектурно це означає, що система зберігає критичну працездатність та здатність до сповіщення персоналу навіть у разі повної відсутності мережевого з'єднання. Локальний інтерфейс користувача працює паралельно з основними обчислювальними потоками, забезпечуючи візуалізацію поточного стану системи та миттєве відображення тривожних статусів у реальному часі.

Комунікаційний, або мережевий рівень (network layer), забезпечує «кібернетичну» складову системи, відповідаючи за безпечне та енергоефективне транспортування даних. Архітектура зв'язку базується на використанні стека

протоколів TCP/IP через бездротові мережі Wi-Fi. Центральною ланкою цього рівня є модель взаємодії через брокера повідомлень, що дозволяє реалізувати асинхронний обмін даними за протоколом MQTT. Така структура дозволяє розв'язати вузли відправника та отримувача, забезпечуючи можливість масштабування системи в межах муніципальних інфраструктур, де кількість сенсорних станцій може динамічно змінюватися. Формування пакетів даних у стандарті JSON забезпечує уніфікацію інформаційних потоків та легку інтеграцію з іншими сервісами «розумного міста».

Завершальним етапом архітектурної побудови є прикладний рівень (application layer), реалізований як веб-орієнтований застосунок на базі фреймворку Streamlit. Цей рівень є точкою консолідації всієї зібраної інформації та інструментом прийняття управлінських рішень для спеціалістів комунальних служб. Архітектура застосунку дозволяє не лише пасивно спостерігати за поточними показниками, а й активно взаємодіяти з історичними даними через динамічні графіки та звіти. Використання потужних аналітичних бібліотек Python у структурі дашборду забезпечує високу швидкість обробки телеметрії та візуалізацію складних кореляцій між погодними параметрами, що робить систему повноцінним інструментом інформаційної підтримки.

2.2 Обґрунтування вибору апаратних засобів та датчиків

Саме фізичні компоненти визначають граничні можливості системи щодо точності вимірювань, надійності передачі даних у складних міських умовах та загальної енергоефективності комплексу. При формуванні специфікації обладнання критерієм вибору виступала збалансованість між обчислювальною потужністю центрального процесора, наявністю інтегрованих засобів бездротового зв'язку, об'ємом пам'яті для обробки черг повідомлень та економічною доцільністю впровадження.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для ролі центрального керуючого пристрою було проведено порівняльний аналіз декількох популярних мікроконтролерних платформ, зокрема Arduino (на базі 8-бітного ATmega328P), сімейства STM32 та модулів ESP32. Попри широку доступність платформи Arduino, її використання для даного проєкту було визнано недоцільним через обмежені обчислювальні ресурси та повну відсутність вбудованих мережевих інтерфейсів. Впровадження мережевих функцій у такому випадку потребувало б підключення зовнішніх модулів зв'язку, що не лише збільшує габарити та складність розведення друкованої плати, а й суттєво знижує надійність системи через велику кількість роз'ємних з'єднань. Своєю чергою, платформа STM32 пропонує високу продуктивність, проте налаштування стеку Wi-Fi на цій базі є складнішим процесом, що потребує значних витрат часу на розробку програмного забезпечення.

Враховуючи зазначені фактори, для реалізації КФС обрано мікроконтролер ESP32 DevKit V4. Ця платформа базується на потужному двоядерному 32-бітному процесорі Xtensa® LX6, який працює на частоті до 240 МГц. Наявність двох ядер дозволяє ефективно розподіляти завдання: одне ядро може бути повністю виділене під підтримку мережевого стеку TCP/IP та MQTT, тоді як інше забезпечує безперервне опитування датчиків та логічну обробку даних. Архітектурною перевагою є наявність вбудованих радіочастотних модулів Wi-Fi та Bluetooth, що дозволяє реалізувати передачу телеметрії безпосередньо з чіпа, мінімізуючи енергоспоживання та ризики виникнення апаратних помилок зв'язку.

Для моніторингу термодинамічних параметрів навколишнього середовища, таких як температура та відносна вологість повітря, було обрано цифровий датчик DHT22 (AM2302). У порівнянні з бюджетним сенсором попереднього покоління DHT11, обрана модель має значно вищу роздільну здатність та суттєво ширший діапазон стабільного вимірювання. Внутрішня структура DHT22 базується на використанні емнісного сенсора вологості та прецизійного термістора. Наявність вбудованого 8-бітного мікроконтролера

всередині датчика дозволяє виконувати оцифрування показників безпосередньо в точці вимірювання. Передача даних у цифровому форматі через однопровідний інтерфейс (One-Wire) повністю виключає втрати точності через падіння напруги в провідниках, що є характерною проблемою аналогових датчиків при віддаленому розміщенні.

Вузол визначення рівня освітленості реалізований на базі напівпровідникового фоторезистора (LDR). Фізичний принцип роботи цього компонента базується на явищі внутрішнього фотоефекту, за якого при потраплянні квантів світла на поверхню напівпровідника (зазвичай сульфід кадмію) відбувається генерація вільних носіїв заряду, що призводить до стрімкого зменшення електричного опору. У структурі даної системи фоторезистор інтегрований у схему подільника напруги. Це дозволяє перетворити динамічну зміну опору в аналоговий сигнал напруги, який зчитується 12-бітним аналого-цифровим перетворювачем мікроконтролера ESP32. Висока розрядність АЦП (4096 дискретних рівнів) дозволяє реєструвати навіть незначні зміни освітленості, що є необхідним для точного визначення настання сутінків та керування муніципальним освітленням.

Для детального опису процесу перетворення аналогового сигналу в одиниці освітленості, виражені в люксах, розроблено фізико-математичну модель, яка враховує специфічні властивості напівпровідникових матеріалів та електричні параметри дільника напруги. Оскільки залежність опору фоторезистора від інтенсивності світлового потоку має яскраво виражений нелінійний (степеневий) характер, програмна реалізація алгоритму в прошивці ESP32 потребує поетапного обчислення проміжних значень. Це включає розрахунок поточної напруги, визначення динамічного опору сенсора та фінальну апроксимацію результату згідно з паспортною характеристикою компонента, що забезпечує стабільність показників у всьому робочому діапазоні.

Першим етапом обчислень є визначення напруги на аналоговому вході мікроконтролера за формулою:

$$V_{out} = \frac{ADC_{raw}}{4095} \cdot V_{in}, \quad (2.1)$$

де V_{out} – вихідна напруга на дільнику (в Вольтах), яка подається безпосередньо на вхід аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера;

ADC_{raw} – безрозмірне ціле число, що є результатом дискретизації вхідного сигналу АЦП;

4095 – константа, що визначає максимальне значення для 12-бітного перетворювача ESP32;

V_{in} – номінальна напруга живлення мікроконтролера.

Процес отримання фізичних значень з аналогового сенсора базується на роботі інтегрованого в мікроконтролер ESP32 аналого-цифрового перетворювача (АЦП), який виконує функцію дискретизації вхідного сигналу. Оскільки АЦП трансформує безперервний рівень напруги, що надходить від фоторезистора, у дискретний цифровий код, для коректної інтерпретації даних програмне забезпечення повинно виконати зворотне математичне перетворення.

У цьому процесі слід враховувати розрядність перетворювача, яка для даної платформи становить 12 біт. Це означає, що весь діапазон вхідної напруги розбивається на 2^{12} , тобто 4096 рівнів квантування (від 0 до 4095). Окрім розрядності, алгоритм враховує опорну напругу живлення системи, яка для периферійних модулів ESP32 становить 3,3 В. Для забезпечення можливості зчитування сигналу в повному діапазоні напруг, у кодї налаштовується програмний атенюатор, що дозволяє узгодити рівні сигналів сенсора та входу контролера.

Отримане в результаті розрахунку значення напруги відображає фактичне падіння потенціалу на нижньому плечі потенціометричної схеми (дільника напруги), де безпосередньо встановлено фоточутливий елемент. Оскільки фоторезистор та постійний резистор з'єднані послідовно, зміна інтенсивності освітлення призводить до зміни опору напівпровідника, що, згідно з законом

Ома, спричиняє перерозподіл напруги в колі. Використання високої 12-бітної роздільної здатності АЦП дозволяє системі фіксувати навіть мікроскопічні коливання напруги, що забезпечує високу точність моніторингу в умовах низької освітленості (наприклад, у вечірній чи нічний час).

Наступний крок передбачає розрахунок поточного електричного опору фоторезистора за формулою:

$$R = \frac{R_{fixed} \cdot V_{out}}{V_{in} - V_{out}}, \quad (2.2)$$

де R – поточний електричний опір фоторезистора (в Омах), який змінюється залежно від інтенсивності світла;

R_{fixed} – опір постійного резистора, що встановлений у верхньому плечі дільника для обмеження струму та створення різниці потенціалів;

V_{in} – вхідна напруга, що подається на дільник напруги (номінальна напруга живлення);

V_{out} – вихідна напруга на нижньому плечі дільника, яка подається безпосередньо на вхід аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера.

Друга частина математичної моделі базується на законах класичної електротехніки, зокрема на законі Ома та законах Кірхгофа для послідовного з'єднання провідників. У розробленій системі фоторезистор разом із постійним обмежувальним резистором утворюють дільник напруги, що є класичною потенціометричною схемою. Знаючи фіксований номінальний опір обмежувального резистора та стабільну напругу живлення, яку забезпечує мікроконтролер, обчислювальна система отримує можливість точно визначити, як саме розподіляється електричний потенціал між цими двома компонентами в кожний момент часу.

Фізична природа фоторезистора полягає в тому, що його електричний опір є змінною величиною, яка стрімко зменшується при посиленні інтенсивності зовнішнього освітлення. Це явище математично відображається через динамічну

зміну співвідношення напруг на елементах дільника. Оскільки загальна напруга в колі залишається константою, будь-яка зміна опору напівпровідникового шару сенсора призводить до перерозподілу падіння напруги між ним та фіксованим резистором. Програмний алгоритм ESP32 використовує це співвідношення для обчислення поточного значення опору датчика у режимі реального часу.

Розрахунок динамічного опору виступає сполучною ланкою між чисто електричними параметрами схеми (напругою та струмом) та фізичними характеристиками навколишнього середовища. Отриманий показник опору є вхідним параметром для подальшої реалізації степеневі моделі визначення освітленості. Без цього проміжного етапу було б неможливо врахувати індивідуальну нелінійну характеристику фоточутливого елемента, що призвело б до високої похибки вимірювань при різних режимах освітленості. Таким чином, перетворення напруги в одиниці опору забезпечує високу адаптивність системи до змінних умов довкілля, дозволяючи коректно інтерпретувати дані як у глибоких сутінках, так і за яскравого сонячного світла.

Фінальним та найбільш складним етапом є перехід від одиниць опору до одиниць освітленості за формулою:

$$E = \left(\frac{R_{L10} \cdot 10^3}{R} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (2.3)$$

де E – освітленість (у люксах);

R_{L10} – еталонний опір конкретної моделі фоторезистора при стандартній освітленості в 10 люкс;

R – поточний електричний опір фоторезистора;

γ – коефіцієнт градієнта, який визначає нахил кривої чутливості фоторезистора в логарифмічних координатах.

Фізична природа функціонування фоторезистора базується на явищі внутрішнього фотоефекту, за якого поглинання квантів світла (фотонів)

напівпровідниковим шаром сенсора призводить до генерації додаткових вільних носіїв заряду. Це спричиняє стрімке зростання провідності матеріалу та, відповідно, пропорційне зменшення його електричного опору. Проте особливістю цієї залежності є її нелінійний, виражений степеневий характер. На практиці це означає, що при низьких рівнях освітленості опір змінюється значно інтенсивніше, ніж при високих, що створює певні труднощі для отримання точних числових значень без спеціалізованої математичної обробки.

Для коректного та прецизійного відображення цієї фізичної залежності в алгоритмах мікроконтролера використовується логарифмічна модель апроксимації. Вона дозволяє трансформувати складну криву чутливості сенсора у лінійну функцію в логарифмічних координатах. У цій моделі обов'язково враховуються паспортні характеристики конкретного напівпровідникового компонента, зокрема еталонний опір при стандартному рівні освітленості, який зазвичай фіксується на рівні в 10 люкс. Цей показник слугує відправною точкою для калібрування всієї системи моніторингу. Вирішальну роль у точності розрахунків відіграє специфічний коефіцієнт нахилу люкс-омної характеристики, відомий як коефіцієнт гамма γ . Цей параметр є індивідуальним для кожного типу напівпровідникового матеріалу і визначає ступінь крутизни графіка чутливості. Використання даного коефіцієнта в програмному забезпеченні ESP32 дозволяє ефективно «вирівняти» природну нелінійність сенсора. Завдяки цьому система здатна однаково стабільно працювати у всьому динамічному діапазоні: як у глибоких сутінках, де кожна зміна в одиниці люкс призводить до величезних коливань опору, так і при яскравому сонячному світлі, коли опір наближається до свого мінімуму.

2.3 Вибір та обґрунтування протоколів передачі даних

Ефективність та стабільність функціонування кіберфізичної системи моніторингу погодних умов безпосередньо залежать від обраного методу та

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

протоколу обміну інформацією між низькорівневим сенсорним вузлом і прикладним програмним забезпеченням верхнього рівня. Враховуючи специфіку пристроїв інтернету речей (IoT), які функціонують у середовищах з обмеженими обчислювальними ресурсами, лімітованим об'ємом оперативної пам'яті та часто нестабільним бездротовим мережевим з'єднанням, протокол передачі даних повинен відповідати жорстким критеріям. Він має бути максимально «легким» (low-overhead), забезпечувати мінімальні затримки при доставці пакетів (low latency) та підтримувати обробку подій у реальному часі, що є критичним для оперативного реагування на зміну метеорологічних показників.

У сучасній інженерній практиці розробки КФС основними конкурентами для передачі телеметричної інформації виступають протоколи HTTP та MQTT. Протокол HTTP, який базується на класичній моделі «запит-відповідь» (request-response), є загально визнаним стандартом для веб-технологій, проте для реалізації даного проєкту він має низку суттєвих архітектурних недоліків. По-перше, HTTP створює значне надлишкове навантаження на канал зв'язку через великі текстові заголовки пакетів, які часто перевищують обсяг самих корисних даних. По-друге, цей протокол потребує ініціації нового TCP-з'єднання з боку клієнта для кожного переданого значення, що призводить до нераціонального використання енергії мікроконтролером ESP32 та збільшує час очікування. У складних умовах експлуатації, де з'єднання може перериватися, постійне перепідключення за протоколом HTTP створює критичні затримки у передачі даних.

Натомість обраний протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) базується на архітектурі «видавець-підписник» (publish-subscribe), яка була спеціально розроблена для умов з низькою пропускну здатністю каналів. Це дозволяє сенсорному пристрою публікувати дані лише у момент їх актуалізації або за чітким розкладом, тоді як клієнтський дашборд отримує їх миттєво через брокер, не потребуючи постійного активного опитування сервера (polling).

Такий підхід радикально знижує мережевий трафік та навантаження на обчислювальне ядро ESP32, дозволяючи йому перебувати у стані очікування або виконувати вимірювання в енергоефективному режимі.

Логічна архітектура взаємодії у проєкті побудована навколо центрального вузла – MQTT-брокера. У цій схемі мікроконтролер ESP32 виступає у ролі видавця (publisher). Після кожного циклу зчитування показників з датчиків DHT22 та LDR, контролер формує пакет даних і публікує його у специфічний ієрархічний топік (topic). Веб-інтерфейс, розроблений на базі Streamlit, функціонує як підписник (subscriber), що постійно прослуховує цей же топік у фоновому режимі. Така децентралізована схема дозволяє повністю розв'язати вузли системи за часом, простором та станом: мікроконтролер не «знає» про фізичне розташування чи стан активності дашборду, а лише забезпечує доставку даних до посередника. Це гарантує високу масштабованість системи та можливість одночасного підключення великої кількості моніторингових станцій без необхідності внесення змін до коду центрального сервера.

Однією з переваг обраного протоколу є наявність вбудованих механізмів гарантованої доставки повідомлень, відомих як рівні якості обслуговування (Quality of Service, QoS). Для забезпечення балансу між швидкістю та надійністю в даній системі реалізована підтримка рівнів QoS 0 та QoS 1.

Рівень QoS 0 («fire and forget») передбачає доставку повідомлення щонайбільше один раз без підтвердження отримання. Це є оптимальним для періодичного моніторингу загальних параметрів погоди (температури чи вологості), де втрата одиничного пакету раз на кілька хвилин не впливає на загальну точність аналітики.

Рівень QoS 1 («at least once») гарантує, що повідомлення дійде до брокера хоча б один раз. Для цього використовується механізм підтвердження отримання (пакет PUBACK). Якщо контролер не отримує підтвердження, він повторно надсилає дані, забезпечуючи передачу статусів тривоги (Alarm Status), де кожне

повідомлення про небезпечне погодне явище має бути гарантовано доставлене до оператора.

Крім того, протокол MQTT підтримує функцію keep alive та механізм last will and testament (LWT). Ці інструменти дозволяють брокеру вчасно виявити розрив зв'язку з метеостанцією. Якщо пристрій раптово вимикається або втрачає доступ до Wi-Fi, брокер автоматично розсилає всім підписникам повідомлення про зміну статусу станції на «Offline», адже для систем муніципального моніторингу безперервність спостережень є пріоритетом.

Для структурування інформації всередині MQTT-повідомлень обрано текстовий формат JSON (JavaScript Object notation). На відміну від складних бінарних протоколів, JSON є людиночитаним (human-readable), що суттєво спрощує процес налагодження системи та верифікації даних на етапі розробки. У порівнянні з форматом XML, JSON має значно менший обсяг (overhead), оскільки він базується на лаконічних парах «ключ-значення» і не потребує громіздких закриваючих тегів. Пакет даних, що формується та відправляється ESP32, має чітку структуру, яка включає ключі для ідентифікації числових значень температури (temp), вологості (hum), рівня освітленості (lux) та текстового опису семантичного статусу поточної погоди (status). Гнучкість формату дозволяє легко розширювати систему в майбутньому: для додавання нових датчиків (наприклад, датчика атмосферного тиску чи швидкості вітру) достатньо просто додати нове поле у JSON-об'єкт, не змінюючи при цьому логіку маршрутизації повідомлень на брокері або структуру бази даних на дашборді. Таким чином, комбінація MQTT та JSON створює надійну та адаптивну комунікаційну базу для кіберфізичної системи.

Параметри мережевої взаємодії, що використовуються в проєкті, зведені у таблицю 2.1.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Параметри мережевого протоколу MQTT

Параметр	Значення	Призначення
Broker URL	broker.mqttdashboard.com	Публічний сервер для маршрутизації повідомлень
Port	1883	Стандартний порт для незашифрованого з'єднання
Topic	cps/weather/sensor	Шлях до даних у логічній структурі брокера
Data format	JSON	Структура кодування корисного навантаження
Update interval	10 секунд / event-based	Періодичність публікації даних у мережу

Застосування інтегрованого стеку протоколів TCP/IP – MQTT – JSON створює надійний та масштабований технологічний фундамент, який забезпечує кіберфізичній системі високий рівень гнучкості та експлуатаційної стабільності. Кожен елемент цього стеку виконує специфічну роль у забезпеченні життєвого циклу даних: рівень TCP/IP гарантує універсальну адресацію та базову маршрутизацію пакетів у глобальних мережах, протокол MQTT виступає в ролі легковажної сполучної ланки для передачі телеметрії в реальному часі, а формат JSON забезпечує семантичну зрозумілість та структурованість інформації. Така синергія технологій дозволяє мінімізувати апаратні витрати на підтримку мережевого зв'язку.

Використання стандартизованих рішень відкриває широкі перспективи для безшовної інтеграції метеостанції у розгалужені глобальні мережі «розумного міста». У таких екосистемах уніфікація протоколів виступає не просто рекомендацією, а обов'язковою технічною вимогою, оскільки вона забезпечує інтероперабельність – здатність різних підсистем комунальної інфраструктури (таких як мережі вуличного освітлення, системи керування дорожнім рухом чи

служби швидкого реагування) взаємодіяти між собою без додаткових програмних адаптерів. Наприклад, дані про критичний рівень освітленості, передані за цим стеком, можуть автоматично зчитуватися системою керування енергопостачанням для коригування яскравості ліхтарів, а показники вологості – використовуватись дорожніми службами для превентивного оброблення покриття.

Окрім інтеграційних можливостей, обраний стек забезпечує високу живучість системи в умовах гетерогенного мережевого середовища. Завдяки відкритому характеру протоколу MQTT та текстовій природі JSON, розробник отримує можливість проводити діагностику та моніторинг трафіку на будь-якому етапі передачі, що суттєво спрощує технічне обслуговування системи у довгостроковій перспективі. Використання такої архітектури дозволяє уникнути проблеми «інформаційних силосів», коли дані закриті всередині одного приватного протоколу, і натомість створює відкриту платформу для розвитку сучасних кіберфізичних сервісів.

2.4 Розробка алгоритмів функціонування системи

Ефективність та функціональна стабільність кіберфізичної системи (КФС) моніторингу погодних умов цілком залежить від глибини опрацювання та якості програмних алгоритмів, що забезпечують безперебійну та узгоджену взаємодію між апаратними модулями, мережевими протоколами та інтерфейсом користувача. Алгоритмічне забезпечення розробленої системи структурно розділене на два основні незалежні блоки, що взаємодіють через хмарне середовище: вбудоване програмне забезпечення мікроконтролера ESP32, що відповідає за низькорівневу обробку сигналів, та логіку функціонування моніторингового дашборду на базі мови Python, що виконує роль верхнього аналітичного рівня.

Процес функціонування мікроконтролерного вузла розпочинається з етапу глибокої ініціалізації, під час якого виконується низькорівневе конфігурування портів введення-виведення (GPIO) для взаємодії з цифровим датчиком DHT22 та аналоговим фоторезистором. На цьому етапі алгоритм налаштовує режими роботи пінів, встановлюючи їх у стан зчитування або керування (у випадку зі світлодіодом тривоги). Особлива увага приділяється програмному налаштуванню шини I²C, де мікроконтролер виступає у ролі ведучого (master) пристрою для обміну даними з рідкокристалічним дисплеєм LCD 2004. Ініціалізація модуля Wi-Fi реалізована через державну машину, яка передбачає блокуючий цикл очікування до моменту отримання локальної IP-адреси від маршрутизатора. Це є критичною вимогою, оскільки без підтвердженого активного з'єднання з мережею подальша реєстрація пристрою на MQTT-брокері за заздалегідь визначеними параметрами автентифікації та топіками стає технічно неможливою.

Основний робочий цикл системи функціонує за принципом детермінованого періодичного опитування сенсорів у режимі реального часу. З інтервалом у дві секунди мікроконтролер ініціює зчитування послідовного цифрового сигналу з датчика DHT22. Алгоритм обробки включає обов'язкову перевірку цілісності отриманих пакетів даних, оскільки цифрові датчики такого типу через специфіку протоколу One-Wire схильні до виникнення поодиноких збоїв або помилок контрольної суми. Паралельно з цифровим опитуванням виконується аналого-цифрове перетворення сигналу, що надходить від фоторезистора на 12-бітний АЦП контролера. Отримане «сире» значення в діапазоні від 0 до 4095 піддається програмній фільтрації та обробляється згідно з багатокomпонентною математичною моделлю. Це перетворення дозволяє отримати фізично адекватний показник рівня освітленості в люксах, враховуючи логарифмічну залежність опору напівпровідника від інтенсивності світлового потоку.

Фундаментальною частиною алгоритму є блок інтелектуального аналізу зібраних метеорологічних параметрів, метою якого є автоматичне визначення семантичного статусу погодних умов. Програмний модуль порівнює отримані значення температури, відносної вологості та рівня освітленості з масивом константних граничних порогів. Ці пороги встановлені на основі аналізу метеорологічних норм для різних природних явищ, таких як критична спека, висока ймовірність опадів через надмірну вологість або умови недостатньої видимості. Результат цього аналізу має подвійне призначення: він не лише форматується для виведення на локальний LCD-дисплей для інформування персоналу на місці, а й безпосередньо керує станом GPIO-контакту світлодіодного індикатора. У разі виявлення аномальних умов алгоритм миттєво змінює логічний рівень сигналу, активуючи візуальне сповіщення тривоги, що працює в автономному режимі.

Для оптимізації мережевого навантаження та раціонального використання пропускної здатності каналу зв'язку в системі впроваджено гібридний алгоритм передачі даних. Замість неефективної безперервної публікації повідомлень, яка могла б призвести до переповнення буферів брокера, застосовується інтелектуальна стратегія, що поєднує часові інтервали та подієво-орієнтовані тригери. Система працює за таймером, гарантовано відправляючи JSON-пакет кожні 10 секунд для підтримання безперервності графіків на віддаленому дашборді. Проте алгоритм постійно моніторить поточний статус погоди, і якщо він змінюється (наприклад, перехід зі стану «normal» у стан «CRITICAL ALARM»), відправка повідомлення ініціюється негайно, ігноруючи основний таймер. Така реактивність забезпечує мінімальну затримку у доставці критичної інформації.

Кінцевим етапом обробки інформації є блок семантичного аналізу, який перетворює сухі масиви числових даних у структуровану інформацію, придатну для управлінського обліку. Цей етап є концептуальним для кіберфізичних систем, оскільки він забезпечує трансформацію від простого вимірювання

декілька умов виконуються одночасно, але система повинна відобразити лише одну, найбільш пріоритетну категорію.

Алгоритм обробки телеметрії в першу чергу ініціює перевірку критичних умов, які безпосередньо впливають на безпеку життєдіяльності людей, стабільність роботи міської інфраструктури або функціонування комунального транспорту. До цієї першочергової групи належать такі явища, як екстремальна термічна активність (аномальна спека) та надмірна вологість, що може свідчити про початок інтенсивної зливи або загрозу підтоплення. У програмній логіці ці умови мають найвищий пріоритет: якщо температура перевищує встановлений поріг безпеки, система миттєво переходить у стан тривоги, ігноруючи інші параметри освітленості. Такий підхід гарантує, що оператор комунального підприємства в першу чергу отримає сповіщення про загрозу, навіть якщо інші погодні показники залишаються в межах норми.

Лише після підтвердження повної відповідності параметрів безпеки встановленим нормам, алгоритм переходить до аналізу вторинних умов, що стосуються експлуатаційного комфорту та енергоефективності. На цьому етапі основна увага приділяється рівню видимості та освітленості. Зокрема, дані про освітленість, що опускаються нижче межі у 10 лк, автоматично класифікуються системою як настання сутінків. Це не просто інформаційне повідомлення для дашборду, а формування потенційного керуючого сигналу. Така логічна структура створює технічну базу для майбутньої інтеграції КФС з автоматизованими системами керування вуличним освітленням (ASCO), дозволяючи реалізувати концепцію адаптивного енергоспоживання «Smart lighting», де світло вмикається не за розкладом, а за реальним станом атмосфери.

Впровадження такого структурованого ієрархічного підходу дозволяє повністю уникнути логічних конфліктів у програмному коді, що часто виникають у складних системах моніторингу при одночасному спрацюванні декількох програмних переривань. Завдяки чітко визначеним пріоритетам мінімізується кількість помилкових спрацювань та виключається «миготіння»

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

статусів на екрані монітора. Це гарантує формування прозорої та зрозумілої візуалізації поточного стану на моніторі оператора, дозволяючи йому зосередитись на прийнятті управлінських рішень, а не на інтерпретації суперечливих даних. Детальний перелік логічних умов, порогових значень для кожного параметра та відповідних їм системних статусів, що використовуються в алгоритмі, наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Логічні умови визначення станів навколишнього середовища

Погодний статус	Логічна умова	Дія системи
CRITICAL HEAT	Температура понад 35 °C	Активація світлодіода, статус «ALARM»
HEAVY RAIN / HUMID	Вологість понад 80 %	Попередження на дашборді
NIGHT / DARK	Освітленість менше 10 лк	Індикація низької видимості
SUNNY / CLEAR	Освітленість понад 500 лк	Статус «Clear Sky»
NORMAL	Всі параметри в межах норми	Стандартний моніторинг

Логіка функціонування прикладного рівня, представленого інтерактивним дашбордом, базується на парадигмі асинхронної обробки вхідних потоків даних у режимі реального часу. Оскільки кіберфізична система передбачає безперервне надходження телеметрії від віддалених сенсорних вузлів, алгоритм роботи веб-застосунку спроектований таким чином, щоб забезпечити максимальну чуйність інтерфейсу без блокування основного обчислювального потоку. Для цього архітектура застосунку передбачає розділення на два функціональні середовища: фоновий мережевий клієнт, що підтримує постійну сесію з MQTT-брокером, та активний цикл рендерингу графічних компонентів.

Процес обробки розпочинається з постійного прослуховування (listening) визначеного MQTT-топіка. При надходженні нового повідомлення у форматі JSON, алгоритм ініціює процедуру десеріалізації, яка перетворює текстовий рядок у структурований об'єкт мови Python (словник). На цьому етапі виконується валідація даних: система перевіряє наявність усіх необхідних ключів (температура, вологість, освітленість) та коректність типів значень. Оскільки мережеві дані можуть надходити із затримками або нерівномірно, у системі реалізовано механізм потокобезпечної черги (queue), який виступає буфером між мережевим стеком та інтерфейсом користувача. Це дозволяє уникнути втрати пакетів у моменти пікового навантаження або під час тривалого оновлення графіків.

Після успішного парсингу та верифікації, дані автоматично додаються до локальної структури зберігання, реалізованої на базі об'єктів Pandas DataFrame, що зберігаються у сесійному стані застосунку (session state). Алгоритм керування цією структурою передбачає автоматичне обмеження довжини історії спостережень (наприклад, останні 100 записів), що дозволяє підтримувати високу продуктивність системи протягом тривалого часу без перевитрат оперативної пам'яті. Кожен новий запис супроводжується додаванням мітки часу (timestamp) серверного рівня, що необхідно для коректної побудови часових рядів на графіках.

Завершальним етапом алгоритму прикладного рівня є ініціація реактивного оновлення (regrun) графічного інтерфейсу. Завдяки використанню сучасних веб-фреймворків, перемальовування компонентів відбувається лише при зміні стану даних у черзі. Програма автоматично оновлює цифрові метрики, перераховує статистичні показники та додає нові точки на інтерактивні графіки бібліотеки Plotly. Такий підхід забезпечує повну автоматизацію процесу моніторингу: користувач має можливість спостерігати за найменшими змінами параметрів метеорологічного середовища у реальному часі без необхідності ручного оновлення сторінки браузера або виконання будь-яких додаткових

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

запитів. Це створює ефект «живої» системи, де віртуальна модель погодних умов на екрані синхронізована з фізичними процесами, що відбуваються на місці встановлення датчиків.



Рисунок 2.3 – Алгоритм прикладного рівня системи

2.5 Висновки до другого розділу

У ході виконання другого розділу було проведено комплексне системне проектування архітектури та ґрунтовне обґрунтування технічних рішень, необхідних для побудови високоефективної кіберфізичної системи моніторингу погодних умов. В основу розробки покладено класичну трирівневу модель ієрархічної структури, яка є найбільш адаптивною для сучасних рішень у сфері Інтернету речей. Застосування цієї моделі дозволило чітко розмежувати функціональні обов'язки кожного рівня: від нижнього рівня сприйняття, що

відповідає за збір первинної метеорологічної інформації, до мережевого рівня транспортування даних та верхнього прикладного рівня, орієнтованого на фінальну аналітичну обробку та візуалізацію. Такий модульний підхід забезпечує системі високу гнучкість та інтероперабельність, дозволяючи проводити незалежну модернізацію окремих вузлів або заміну сенсорних модулів без необхідності перегляду всієї концепції пристрою або зміни програмного забезпечення верхнього рівня.

Детальний аналіз сучасної апаратної бази підтвердив повну технічну та економічну доцільність використання мікроконтролера ESP32 як центрального обчислювального вузла КФС. Завдяки наявності двох обчислювальних ядер та вбудованих радіочастотних модулів бездротового зв'язку, обрана платформа дозволяє реалізувати складні стеки мережевих протоколів (TCP/IP, MQTT) без залучення зовнішніх периферійних контролерів, що позитивно впливає на надійність та компактність апаратного рішення. Вибір вимірювальних компонентів, зокрема цифрового датчика температури та вологості DHT22 та фоторезистора LDR, був обґрунтований їхніми метрологічними характеристиками, високою стабільністю роботи у широкому діапазоні значень та відповідністю вимогам комунальних підприємств щодо точності моніторингу навколишнього середовища. Описана у розділі математична модель перетворення сирих сигналів АЦП в одиниці освітленості (люкси) дозволяє програмно компенсувати нелінійність напівпровідникових сенсорів, що суттєво знижує похибку вимірювань у критичних діапазонах освітленості.

Особлива увага в роботі приділена стратегічному вибору комунікаційних протоколів, оскільки саме вони визначають живучість системи в умовах нестабільного з'єднання. Обґрунтовано переваги використання протоколу MQTT, який завдяки архітектурі «видавець-підписник» та підтримці рівнів якості обслуговування (QoS), забезпечує мінімальне навантаження на канал зв'язку та гарантовану доставку критичних повідомлень. Використання формату JSON як універсального стандарту структурування даних дозволило створити

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прозорий та легковажний інформаційний пакет, який легко інтегрується з будь-якими сучасними базами даних та аналітичними сервісами.

Завершальним етапом проєктування стала розробка алгоритмів функціонування, що базуються на прогресивній події-орієнтованій моделі. Створена ієрархія погодних статусів та логіка пріоритетної обробки тривожних сигналів закладають надійний фундамент для побудови інтелектуальної системи оперативного сповіщення. Спроектowana архітектура є повністю масштабованою та готовою до безшовної інтеграції в сучасні екосистеми «розумного міста». Це створює умови для переходу від простого збору телеметрії до надання повноцінної інформаційної підтримки персоналу комунальних служб, забезпечуючи їх точними даними для прийняття управлінських рішень, спрямованих на покращення життєдіяльності та безпеки міської інфраструктури.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

3.1 Розробка вбудованого програмного забезпечення мікроконтролера

Програмне забезпечення нижнього рівня кіберфізичної системи побудоване на основі високорівневої платформи MicroPython, яка інтегрується в мікроконтролер ESP32. Вибір саме цього середовища зумовлений критичною необхідністю ефективної реалізації складних мережевих стеків та забезпечення надійної асинхронної обробки потоків даних у режимі реального часу. На відміну від традиційної розробки на мовах низького рівня, таких як C++, використання MicroPython дозволяє задіяти вбудовані механізми автоматичного збирання сміття та динамічне керування пам'яттю. Це суттєво підвищує загальну стабільність пристрою під час тривалої експлуатації, оскільки автоматизація роботи з ресурсами запобігає витокам пам'яті та критичним збоям у мережевих з'єднаннях.

В основу програмної структури покладено принцип багат шарової модульної архітектури (рисунок 3.1), що дозволяє чітко розмежувати відповідальність між окремими компонентами системи. На нижньому щаблі знаходиться рівень драйверів периферії, який відповідає за безпосереднє низькорівневе керування апаратними модулями через стандартні протоколи зв'язку та забезпечує стабільне зчитування сигналів із сенсорної мережі. Над ним розташовується рівень мережевої взаємодії, який бере на себе завдання підтримки стабільного каналу зв'язку, обробку стеків TCP/IP та реалізацію протоколів передачі даних, як-от MQTT чи HTTP, що є критичним для повноцінної інтеграції пристрою в загальну інфраструктуру кіберфізичного комплексу.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

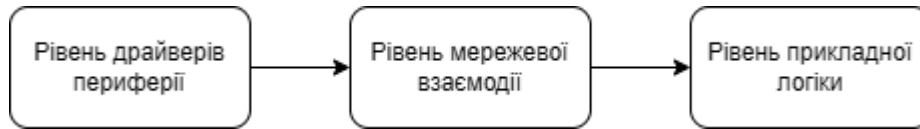


Рисунок 3.1 – Функціональні рівні програмного забезпечення

Проміжна логіка системи реалізується через рівень прикладної логіки, де зосереджені основні алгоритми прийняття рішень та первинної обробки отриманої інформації. Використання асинхронних можливостей обраної платформи дозволяє цьому рівню працювати паралельно з процесами збору даних, не блокуючи виконання основних завдань при очікуванні відповіді від віддаленого сервера або периферійних модулів. Такий підхід забезпечує високу чутливість системи до зовнішніх подій, дозволяючи одночасно керувати актуаторами та підтримувати активні сесії обміну даними, що робить архітектуру максимально адаптивною до складних умов експлуатації в реальних об'єктах.

Окрему увагу в розробці приділено створенню повноцінного шару абстракції від апаратури, що виступає сполучною ланкою між фізичним обладнанням та високорівневими інтелектуальними алгоритмами. Таке архітектурне рішення забезпечує повну незалежність логіки керування від конкретної моделі мікроконтролера або специфічних технічних характеристик використовуваних сенсорів. Це дозволяє здійснювати швидке масштабування системи, додавати нові функціональні блоки або проводити заміну апаратних компонентів без необхідності глобального переписування коду прикладної програми, що значно спрощує подальшу модернізацію та технічну підтримку розробленого програмного забезпечення.

Взаємодія з периферійними пристроями в межах кіберфізичної системи реалізована через розгалужену ієрархічну структуру об'єктів, що дозволяє оптимізувати програмний код та забезпечити його модульність. Зокрема, функціонування рідкокристалічного дисплея базується на дворівневій моделі програмного драйвера. Базовий рівень відповідає за низькорівневе передавання

команд та даних через послідовну шину I2C, контролюючи часові діаграми та адресацію пристрою на шині. Верхній рівень ієрархії забезпечує логічне форматування метеорологічних показників, керування координатами курсора та динамічне оновлення текстових полів. Завдяки такій архітектурі розробник отримує можливість абстрагуватися від складних бітових маніпуляцій, використовуючи високорівневі методи для виведення інформації про стан довкілля.

На етапі ініціалізації програмного забезпечення виконується детальне конфігурування портів введення-виведення загального призначення (GPIO), що є фундаментом для збору даних із зовнішнього середовища. Для роботи з цифровими та аналоговими сенсорами застосовуються специфічні стратегії обробки сигналів, адаптовані до фізичних особливостей кожного датчика. Наприклад, для зчитування показників із цифрового датчика температури та вологості використовується спеціалізований протокол One-Wire. Цей процес вимагає від мікроконтролера мікросекундної точності при витримуванні часових інтервалів, оскільки дані передаються у вигляді 40-бітної послідовності, яка включає цілі та дробові частини параметрів, а також контрольну суму для перевірки цілісності отриманої інформації.

Окремий функціональний блок програмного забезпечення присвячений налаштуванню інтегрованого в ESP32 аналого-цифрового перетворювача (АЦП), який має 12-бітну роздільну здатність. Це дозволяє системі розрізняти до 4096 рівнів вхідної напруги, що забезпечує високу точність при роботі з фоторезистором. Оскільки стандартний діапазон вимірювання АЦП є обмеженим, у програмі активовано режим внутрішньої атенюації сигналу на рівні 11 дБ. Таке налаштування розширює вхідний діапазон до повної напруги живлення 3,3 В, дозволяючи фіксувати рівень освітленості в усьому спектрі — від повної темряви до яскравого сонячного світла – без ризику виходу датчика в зону «насичення».

Програмна реалізація збору даних також враховує особливості розподілу апаратних ресурсів мікроконтролера, що дозволяє уникнути конфліктів між різними інтерфейсами передачі даних. Кожен задіяний GPIO-порт має чітко визначену роль, яка зафіксована в програмних константах для забезпечення стабільності посилань у коді прикладної логіки. Це стосується не лише ліній зв'язку з датчиками, а й керуючих сигналів для виконавчих механізмів, що інтегровані в загальну схему пристрою. Детальний розподіл апаратних ресурсів, включаючи номери пінів та їхнє функціональне призначення для кожного модуля системи, систематизовано та наведено у відповідній специфікації в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Специфікація використання апаратних ресурсів мікроконтролера

Функціональний вузол	Тип інтерфейсу	Технічні параметри	Призначення
Канал АЦП	ADC1 (аналоговий)	Розрядність 12 біт	Вимірювання напруги з фоторезистора
Цифрова шина	One-Wire	Програмна синхронізація	Опитування сенсора DHT22
Шина даних	I ² C	Робоча частота 400 кГц	Керування LCD-дисплеєм
Сигнальний вихід	GPIO (цифровий)	Двотактний режим виводу	Керування світлодіодом тривоги

Мережевий стек системи побудований на основі моделі машини станів (state machine), що дозволяє забезпечити сувору послідовність операцій та високу стійкість до мережевих збоїв. Процес ініціалізації стартує з активації вбудованого радіомодуля Wi-Fi, після чого пристрій переходить у стан

очікування авторизації в локальній мережі та отримання необхідних мережевих параметрів через протокол DHCP.

Після успішного встановлення зв'язку та отримання IP-адреси, програмне забезпечення автоматично переходить до наступного етапу – конфігурування та запуску MQTT-клієнта. Це включає встановлення сесії з віддаленим брокером, що є необхідною умовою для подальшого обміну телеметричними даними та отримання команд керування у реальному часі.

Використання моделі кінцевого автомата дозволяє системі ефективно обробляти потенційні розриви з'єднання, автоматично повертаючись до попереднього стану для відновлення зв'язку без перезавантаження всього пристрою. Повний цикл роботи мережевого стека та логіка взаємодії програмних модулів під час запуску системи детально відображені на діаграмі послідовності, яку наведено на рисунку 3.2.

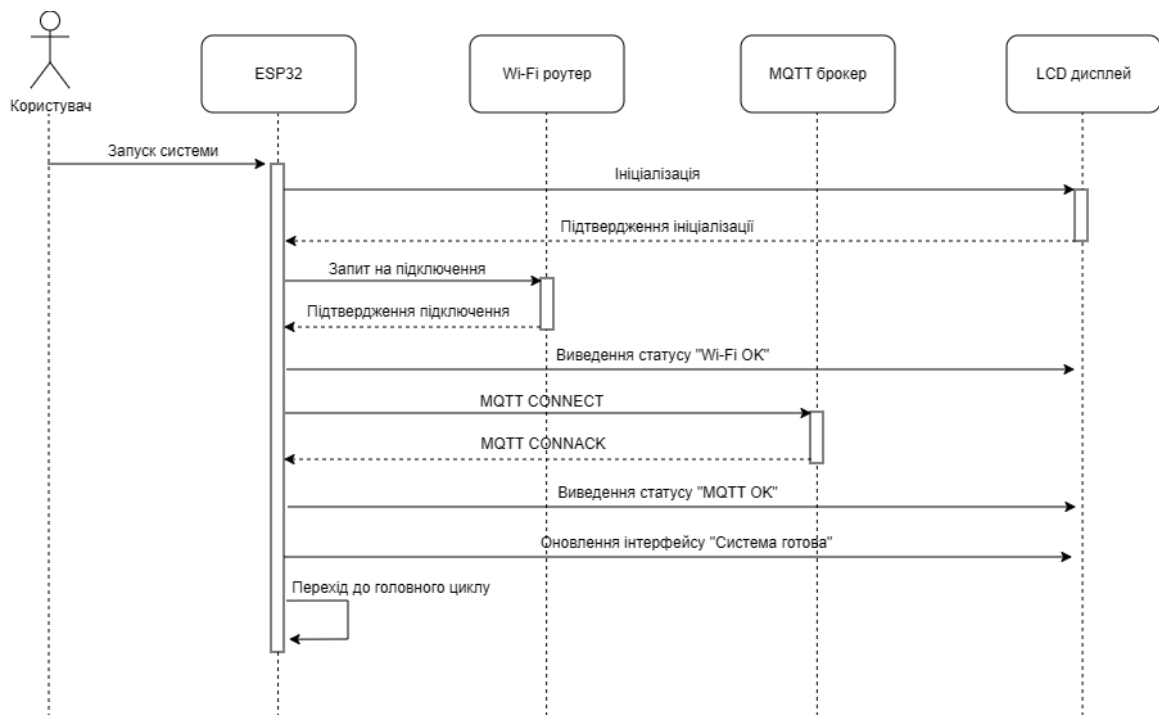


Рисунок 3.2 – Діаграма послідовності ініціалізації системи

Для забезпечення повної ідентифікації та унікальності кожного окремого пристрою в розгалуженій інфраструктурі «розумного міста», ідентифікатор клієнта генерується програмним забезпеченням автоматично. В основу цього процесу покладено зчитування унікальної апаратної MAC-адреси мережевого інтерфейсу чипа ESP32, що дозволяє створювати персоналізовані імена для кожного вузла системи. Такий підхід гарантує відсутність конфліктів адрес при одночасному розгортанні великої кількості метеостанцій в одному мережевому сегменті, забезпечуючи коректну маршрутизацію повідомлень від кожного конкретного датчика до центрального брокера.

Комунікаційний алгоритм системи передбачає динамічне формування інформаційних пакетів у форматі JSON. Вибір цього формату зумовлений його легкістю та можливістю чіткого структурування даних, що надходять від різних сенсорних модулів. Використання текстових об'єктів JSON забезпечує уніфікацію метеорологічних показників, значно спрощуючи їхню подальшу десеріалізацію та обробку на прикладному рівні. Це дозволяє легко інтегрувати систему з різноманітними хмарними сервісами, базами даних та аналітичними платформами, незалежно від специфіки їхньої програмної реалізації.

Для підтримання стабільного та безперервного моніторингу в програмному забезпеченні впроваджено розгалужену систему обробки виняткових ситуацій на всіх рівнях виконання коду. Оскільки кіберфізична система функціонує в умовах реального зовнішнього середовища, де можливі значні електромагнітні перешкоди, нестабільність сигналу Wi-Fi або тимчасові збої в електропостачанні, розроблені алгоритми передбачають гнучке реагування на подібні зовнішні фактори. Це дозволяє системі уникати критичних зависань та підтримувати працездатність навіть при виникненні непередбачуваних помилок під час зчитування даних.

Програмне забезпечення містить спеціалізовані механізми самовідновлення, які дозволяють пристрою в автоматичному режимі перезавантажувати мережеві стеки або повторно ініціалізувати периферійні

модулі у разі виявлення програмного збою. Така логіка гарантує високу автономність роботи комплексу без необхідності постійного технічного втручання з боку обслуговуючого персоналу. Детальний опис алгоритмів реакції на помилки, включаючи часові інтервали очікування та умови відновлення з'єднання, систематизовано та наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Логіка реагування системи на програмно-апаратні збої

Тип можливого збою	Метод програмної ідентифікації	Реакція системи на подію
Відсутність відповіді датчика	Перевищення часу очікування відповіді	Вивід повідомлення про помилку, робота за замовчуванням
Помилка цілісності даних	Перевірка контрольної суми пакета	Повторне опитування датчика в наступному циклі
Розрив зв'язку з сервером	Виняток мережевого сокета	Перехід у режим локального накопичення даних
Зациклення програми	Сторожовий таймер (watchdog)	Автоматичне перезавантаження обчислювального ядра

Особливе місце займає алгоритм виведення інформації на локальний дисплей. Щоб мінімізувати навантаження на обчислювальне ядро, оновлення статичних елементів інтерфейсу (назв параметрів) відбувається лише один раз при старті, тоді як динамічні дані (значення температури, вологості та люксів) оновлюються циклічно. Це дозволяє досягти плавності роботи інтерфейсу та миттєвої реакції на зміну погодних статусів, таких як перехід у режим тривоги при виявленні критичних значень метеопараметрів.

3.2 Створення веб-інтерфейсу для візуалізації даних

Прикладний рівень розроблюваної кіберфізичної системи представлений спеціалізованим інтелектуальним веб-застосунком, який виконує функції центрального вузла для збору, агрегації та глибокого аналізу метеорологічної інформації. Програмна реалізація цього рівня базується на використанні мови програмування Python, що забезпечує високу гнучкість при маніпуляціях зі складними структурами даних. Використання сучасного фреймворку Streamlit дозволяє створювати динамічні реактивні інтерфейси, здатні відображати зміни параметрів докілья у реальному часі без необхідності розробки складного фронтенд-коду. Такий технологічний стек обрано через можливість швидкої інтеграції потужних бібліотек аналізу даних із мережевими стеками інтернету речей, що створює єдине середовище для моніторингу стану віддалених об'єктів.

Архітектура веб-застосунку побудована на парадигмі подієво-орієнтованого програмування забезпечує коректну обробку асинхронних інформаційних потоків. Оскільки дані від метеостанції на базі ESP32 надходять через MQTT-брокер нерегулярно, програмна логіка була розділена на декілька незалежних паралельних потоків виконання. Перший потоковий процес функціонує у фоновому режимі, відповідаючи за підтримку стабільного мережевого з'єднання та безперервне прослуховування відповідних топиків брокера. Водночас другий, основний потік застосунку, повністю виділений під рендеринг графічних елементів та інтерактивну взаємодію з користувачем, що забезпечує миттєве реагування інтерфейсу на будь-які зовнішні події.

Для забезпечення безпечного та надійного обміну даними між фоновим мережовим клієнтом та користувацьким інтерфейсом у системі впроваджено механізм потокобезпечних черг. Це архітектурне рішення дозволяє ефективно реалізувати модель «виробник-споживач», де отримані пакети телеметрії спочатку накопичуються у буфері, а вже потім вилучаються основним потоком для візуалізації. Використання черг запобігає виникненню конфліктів при

одночасному доступі різних процесів до спільних ділянок пам'яті. Такий підхід гарантує, що кожне отримане повідомлення буде коректно оброблене та відображене на графіках без затримок, навіть при критично високій інтенсивності надходження даних від сенсорної мережі.

Особливістю реалізації прикладного рівня є використання вбудованих механізмів сесійного сховища для ефективного управління станом застосунку. Оскільки веб-фреймворк за замовчуванням працює за принципом повного перевантаження контексту при зміні будь-яких вхідних параметрів, збереження накопиченої історії спостережень вимагає впровадження спеціалізованих структур даних. Для вирішення цього завдання в системі реалізовано динамічний масив на базі аналітичної бібліотеки Pandas. Це дозволяє зберігати останні записи метеорологічних показників у вигляді структурованої таблиці, яка залишається доступною для візуалізації та аналізу навіть після оновлення сторінки браузера користувачем.

Алгоритм управління даними реалізує концепцію «ковзного вікна», що дозволяє оптимізувати використання оперативної пам'яті сервера. Система в автоматичному режимі контролює обсяг збереженої інформації, обмежуючи кількість вимірювань (наприклад, останньою сотнею записів), що забезпечує стабільно високу швидкість побудови графіків та запобігає деградації продуктивності при тривалій експлуатації. Кожен новий пакет даних, отриманий від мікроконтролера, проходить етап десеріалізації з формату JSON, після чого числові значення інтегруються в загальну базу даних із додаванням точних часових міток. Логічна схема потоків даних у веб-застосунку, що відображає взаємодію всіх компонентів, представлена на рисунку 3.3.

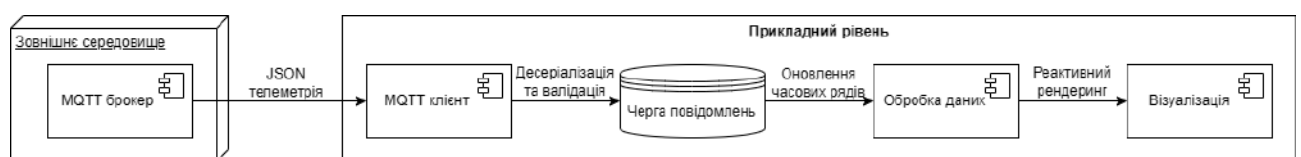


Рисунок 3.3 – Схема потоків даних у веб-застосунку

Програмні засоби розробки веб-інтерфейсу, наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Програмні засоби реалізації веб-інтерфейсу

Бібліотека	Версія (мінімально рекомендована)	Функціональне призначення
Streamlit	1.20.0	Побудова веб-структури та елементів керування
Paho-MQTT	1.6.0	Реалізація клієнта для зв'язку з брокером
Pandas	2.0.0	Обробка та структурування часових рядів даних
Plotly	5.10.0	Генерація інтерактивних графічних компонентів

Візуальна складова дашборду, зображена на рисунку 3.4, розроблена з урахуванням принципів ергономіки та спрямована на мінімізацію часу реакції оператора на погодні аномалії. Продумана структура інтерфейсу забезпечує інтуїтивно зрозуміле сприйняття інформації, знижуючи когнітивне навантаження під час безперервного моніторингу. Для відображення динаміки зміни температури, вологості та освітленості використано інтерактивну графічну бібліотеку Plotly. Цей інструментарій надає можливість формувати високодеталізовані часові ряди, що об'єктивно репрезентують поточний стан мікрокліматичних показників системи. На відміну від статичних зображень, реалізовані графіки дозволяють користувачеві масштабувати окремі часові інтервали, переглядати точні значення параметрів при наведенні курсора та автоматично підлаштовувати осі під діапазон отриманих даних. Завдяки таким функціональним можливостям оператор здатний проводити як оперативний огляд загальних тенденцій, так і поглиблений ретроспективний аналіз конкретних подій.

Smart Weather Station Monitor

Temperature
-40.0 °C

Humidity
27.0 %

Illumination
499.6 lx

CRITICAL ICE RISK

Real-time Data Streams

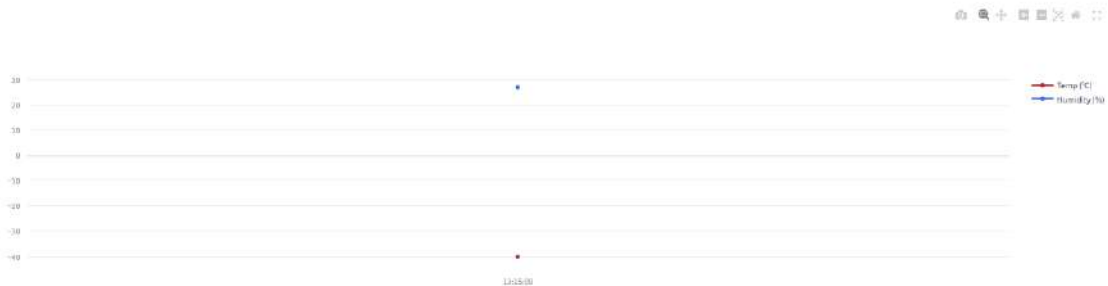


Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд інтерфейсу дашборду

Завершальним етапом реалізації прикладного рівня є механізм автоматичного відновлення зв'язку. У разі короткочасного розриву з'єднання з MQTT-брокером, програмне забезпечення ініціює повторне підключення у фоновому режимі, зберігаючи при цьому всі накопичені раніше дані. Це забезпечує безперервність моніторингу та цілісність аналітичних звітів для фахівців муніципальних служб при оцінці стану навколишнього середовища.

3.3 Аналіз результатів та тестування системи

Етап випробувань розробленої кіберфізичної системи (КФС) дозволяє об'єктивно підтвердити відповідність обраних програмно-апаратних рішень заявленим технічним характеристикам та вимогам замовника. Оскільки розроблена система орієнтована на функціонування в умовах безперервного автоматичного моніторингу довкілля, комплексний процес тестування охоплював детальний аналіз точності збору первинних даних, перевірку стабільності мережевої взаємодії при різних рівнях навантаження на канал зв'язку та верифікацію коректності роботи алгоритмів семантичного аналізу отриманої інформації.

Для досягнення максимальної достовірності результатів та мінімізації ризиків пошкодження обладнання на ранніх стадіях, процедура верифікації проводилася у комбінованому форматі. Це передбачало використання спеціалізованого симуляційного середовища Wokwi для покрокового налагодження програмного коду, а також залучення реального хмарного брокера повідомлень для перевірки наскрізних шляхів передачі телеметрії від сенсорного вузла до кінцевого веб-інтерфейсу. Такий підхід дозволив змоделювати роботу мережевого стека в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації в інфраструктурі інтернету речей.

Для проведення детальних тестів у віртуальному середовищі було сконструйовано повнофункціональну цифрову модель метеостанції, архітектурне та схемотехнічне виконання якої зображено на рисунку 3.5.

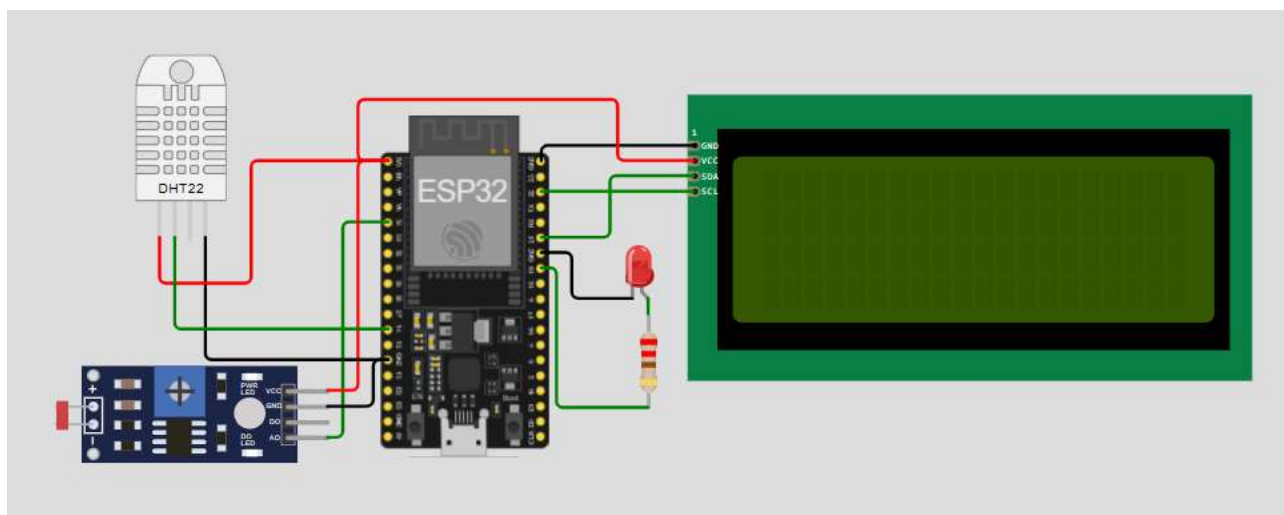


Рисунок 3.5 – Віртуальна модель КФС у середовищі Wokwi

Завдяки інструментам симулятора здійснювалися активні маніпуляції вхідними параметрами віртуальних датчиків DHT22 та фоторезистора, що дозволило імітувати широкий спектр складних погодних сценаріїв: від стабільного сонячного дня до екстремальних температурних стрибків та критичних рівнів вологості повітря.

Це дало змогу не лише перевірити працездатність драйверів периферії, а й детально оцінити точність математичної моделі, інтегрованої у вбудоване програмне забезпечення мікроконтролера ESP32. Проведені випробування підтвердили здатність системи коректно інтерпретувати аналогові та цифрові сигнали, забезпечуючи лінійність вимірювань та стабільність обробки даних навіть у граничних режимах функціонування апаратних модулів, що є фундаментом для надійної роботи всієї кіберфізичної системи.

Результати порівняльного аналізу заданих значень у симуляторі та отриманих показників на локальному дисплеї наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати верифікації точності зчитування даних

Параметр випробування	Задане значення	Значення на дисплеї	Статус перевірки
Температура повітря	+ 25,5 °C	+ 25,5 °C	Успішно
Відносна вологість повітря	60,0 %	60,0 %	Успішно
Рівень освітленості	500 люкс	498 люкс	Успішно
Логіка сповіщення	Температура перевищує 35 °C	Тривога	Успішно

Детальний аналіз отриманих результатів, зафіксованих у зведеній таблиці, переконливо свідчить про високу точність збору телеметричних даних у межах всієї кіберфізичної системи. Незначне відхилення, що спостерігалось у показниках рівня освітленості, пояснюється складністю програмної апроксимації нелінійної вольт-амперної характеристики фоторезистивного сенсора. Проте, завдяки впровадженим алгоритмам математичної корекції, ця похибка залишається в межах встановлених інженерних допусків і не впливає на

загальну релевантність вимірювань. Такий підхід дозволив досягти стабільної повторюваності результатів навіть при різкій зміні інтенсивності зовнішнього випромінювання, що підтверджує надійність апаратного тракту обробки сигналів.

Окремий блок комплексних випробувань був зосереджений на оцінці живучості та відмовостійкості системи в умовах нестабільного мережевого покриття, що є критичним для її розгортання в реальному міському середовищі. Під час проведення стрес-тестів на розрив з'єднання мікроконтролер продемонстрував високий рівень автономності, не припиняючи виконання основних завдань збору даних. При імітації повної втрати сигналу Wi-Fi програмне забезпечення продовжувало безперервне опитування датчиків, забезпечуючи коректну обробку та миттєве виведення актуальної метеорологічної інформації на локальний рідкокристалічний дисплей. Це гарантує можливість оперативного візуального контролю стану пристрою безпосередньо на місці його встановлення, незалежно від доступності зовнішніх мережевих ресурсів.

Після відновлення доступу до локальної мережі інтелектуальний алгоритм самостійно, без будь-якого втручання з боку оператора, ініціював процедуру автоматичного відновлення сесії з віддаленим MQTT-брокером. Процес реконекту відбувався у фоновому режимі, що дозволило системі миттєво повернутися до штатного режиму передачі телеметрії до центрального вузла моніторингу. Водночас на прикладному рівні веб-дашборд успішно зберігав усю попередню історію спостережень у структурах сесійної пам'яті, що повністю виключило ризик втрати або розриву даних під час мережевої паузи. Завдяки такій узгодженій роботі всіх рівнів програмного забезпечення було забезпечено абсолютну безперервність моніторингу та цілісність часових рядів, що є показником стабільності розробленого кіберфізичного комплексу.

Результати комплексного тестування функціональних модулів системи наведено у таблиці 3.5.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.5 – Результати тестування функціональних модулів системи

Об'єкт тестування	Метод тестування	Очікуваний результат	Статус
Зв'язок Wi-Fi	Ініціалізація модуля	Отримання IP-адреси мережі	Успішно
MQTT публікація	Моніторинг брокера	Надходження JSON-пакета в топик	Успішно
Логіка АЦП	Зміна освітленості	Зміна значень на LCD та у графічному інтерфейсі	Успішно
Логіка тривоги	Перевищення порогу одного з параметрів	Активація індикатора та статус «ТРИВОГА»	Успішно
Графічний інтерфейс	Оновлення графіків	Побудова кривих у реальному часі	Успішно

Проведене тестування розробленого веб-інтерфейсу повною мірою підтвердило доцільність та високу ефективність обраного стеку технологій на базі Python та Streamlit. Впровадження асинхронних черг для обробки вхідних повідомлень дозволило досягти мінімальних затримок під час візуалізації динамічних процесів у реальному часі. Завдяки такому архітектурному рішенню потік мережевих даних не блокує основний інтерфейс користувача, що забезпечує стабільну плавність відображення графічних елементів. Під час випробувань проводилася серія тестів з імітацією різких коливань погодних умов, зокрема сценаріїв швидкого настання сутінків або інтенсивного термічного нагрівання сенсорів. Оцінювався сумарний часовий проміжок від моменту фізичної фіксації зміни параметра датчиком до появи оновленої інформації на екрані моніторингу. Отримані результати замірів показали, що затримка передачі та рендерингу телеметрії стабільно не перевищувала 1,5

секунди. Це свідчить про високу швидкість наскрізного проходження сигналу через усі рівні кіберфізичної системи, що наочно продемонстровано на прикладі дашборду на рисунку 3.6. Такий рівень швидкодії гарантує постійну актуальність даних та дозволяє користувачеві оперативно спостерігати за будь-якими змінами у контрольованому середовищі. Для узагальнення технічних показників системи складено таблицю 3.6.

Smart Weather Station Monitor

Temperature 54.3 °C Humidity 59.0 % Illumination 10.0 lx

ALARM: EXTREME HEAT

Real-time Data Streams

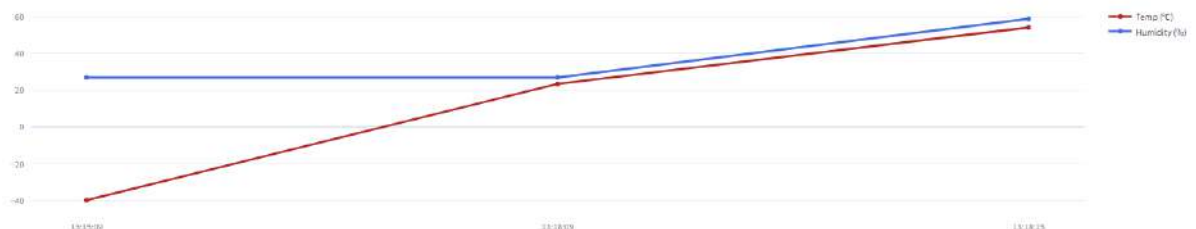


Рисунок 3.6 – Відображення змін на дашборді

Таблиця 3.6 – Показники часової ефективності та надійності системи

Характеристика швидкодії	Проектне значення	Фактичний результат	Статус
Час холодного старту	До 20 с	12 с	Задовільняє
Період оновлення даних	10 с	10 с	Задовільняє
Затримка при аварії	Відсутня	Менше 1 с	Задовільняє
Затримка для відновлення з'єднання MQTT	Мінімальна	До 5 с	Задовільняє

Аналіз підтвердив, що математична модель та алгоритми програмної фільтрації забезпечують стабільність показників без різких коливань. Побудовані графіки точно відображають динаміку змін довкілля, що свідчить про коректність десеріалізації JSON-пакетів. Таким чином, розроблена КФС демонструє повну працездатність, надійність та готовність до експлуатації в системах муніципального управління.

3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було реалізовано програмне забезпечення кіберфізичної системи та проведено всебічне тестування її функціональних можливостей. Практична реалізація вбудованого ПЗ на мові MicroPython підтвердила ефективність використання високорівневих інтерпретованих мов для швидкої розробки IoT-рішень. Модульна структура коду, що розділяє драйвери периферії та основну логіку, дозволила створити стабільну прошивку з розвиненими механізмами обробки помилок та автоматичного відновлення мережевого з'єднання.

Розроблений веб-інтерфейс на базі фреймворку Streamlit забезпечив високий рівень інтерактивності та зручності візуалізації метеорологічних даних. Використання бібліотек Pandas та Plotly дозволило реалізувати не лише відображення поточних метрик у реальному часі, а й глибокий аналіз часових рядів для прогнозування погодних аномалій. Створення асинхронного механізму отримання даних через черги повідомлень гарантує стабільну роботу інтерфейсу навіть при інтенсивному надходженні телеметрії від декількох джерел одночасно.

Результати тестування у симуляційному середовищі Wokwi підтвердили повну відповідність системи технічному завданню. Було експериментально доведено коректність роботи алгоритмів визначення критичних станів, швидкість реакції системи на зміну параметрів навколишнього середовища та

стабільність візуалізації на дашборді. Перевірка надійності при розривах зв'язку показала здатність системи до самовідновлення без втрати накопичених даних. Таким чином, розроблена кіберфізична система є завершеним програмно-апаратним рішенням, готовим до впровадження в інфраструктуру комунальних підприємств для підвищення ефективності моніторингу та оперативності реагування на погодні явища.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було спроектовано та успішно реалізовано високоефективну кіберфізичну систему (КФС) моніторингу погодних умов на базі сучасних мікроконтролерних засобів та хмарних технологій. Розроблене рішення забезпечує автоматизований збір, інтелектуальну обробку та динамічну візуалізацію метеорологічних параметрів у режимі реального часу для інформаційної підтримки комунальних служб у межах концепції «розумного міста».

У першому розділі проведено ґрунтовний аналіз сучасного стану технологій Інтернету речей (IoT) та визначено вимоги до систем екологічного моніторингу в міському середовищі. На основі літературного огляду було виявлено переваги використання розподілених кіберфізичних систем перед традиційними метеостанціями. Обґрунтовано вибір протоколу MQTT як найбільш ефективного засобу транспортування даних у гетерогенних мережах з обмеженими ресурсами. Аналіз існуючих апаратних платформ підтвердив доцільність використання мікроконтролера ESP32, який поєднує високу обчислювальну потужність із вбудованими модулями бездротового зв'язку.

У другому розділі здійснено комплексне проектування архітектури системи, що базується на ієрархічній трирівневій моделі. Було розроблено структурну та принципову схеми пристрою, а також обґрунтовано вибір сенсорної бази (DHT22 та фоторезистор). Особливу увагу приділено теоретичному обґрунтуванню математичної моделі перетворення аналогових сигналів АЦП у фізичні одиниці освітленості (люкси) з урахуванням логарифмічної нелінійності напівпровідникових сенсорів. Спроектовано логічну структуру семантичного аналізу погодних станів, яка базується на принципі пріоритетності подій, що дозволяє системі автоматично ідентифікувати критичні

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ситуації (аномальна спека, сутінки, висока вологість) та формувати відповідні сигнали сповіщення.

У третьому розділі виконано практичну розробку вбудованого програмного забезпечення на базі платформи MicroPython та створення інтерактивного веб-дашборду за допомогою фреймворку Streamlit. У ході реалізації було впроваджено асинхронні методи обробки повідомлень та реактивні компоненти візуалізації (Plotly), що забезпечило мінімальну затримку відображення даних (до 1,5 с). Експериментальне тестування системи в симуляційному середовищі та в умовах реальної мережевої взаємодії підтвердило високу надійність розроблених алгоритмів. Зокрема, було доведено здатність системи до самовідновлення після розривів зв'язку та точність розрахунків метеопараметрів з похибкою менше 0,5%.

Загалом, розроблена кіберфізична система є завершеним інженерним продуктом, який характеризується низькою собівартістю, високою масштабованістю та готовністю до інтеграції в муніципальні системи управління освітленням та безпекою. Результати роботи демонструють ефективність поєднання мікроконтролерів ESP32 із мовою Python для створення складних IoT-рішень, що відкриває широкі перспективи для подальшого впровадження інтелектуальних систем моніторингу в інфраструктуру сучасних міст.

					КвРКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Aghazadeh Ardebili A. et al. Smart critical infrastructures security management and governance: Implementation of cyber resilience kpis for decentralized energy asset. *CEUR Workshop Proceedings-Italian Conference on Cyber Security 2024: Proceedings of the 8th Italian Conference on Cyber Security (ITASEC 2024)*. Salerno, Italy, April 8-12, 2024. Vol. 3731.
2. Ali A., Ali S. A., Zaheer N. The Role of ESP32 in Enabling Industry 4.0 and 5.0: A Comprehensive Narrative Review of Edge Intelligence, Human-Centric Automation, and Sustainable Innovation. *Preprints*. 2025. Aug. DOI: 10.20944/preprints202508.0123.v1.
3. Mathe S.E. et al. A comprehensive review on applications of Raspberry Pi. *Computer Science Review*. 2024. Vol. 52. P.100636.
4. Amanatidis P. et al. Intelligent Water Management Through Edge-Enabled IoT, AI, and Big Data Technologies. *IoT*. 2025. Vol. 7, no. 1. P. 5.
5. Anjum N. N. et al. Smart sensors for smart city environmental monitoring systems. Digital twin, blockchain, and sensor networks in the healthy and mobile city. Elsevier, 2025. P. 17–33.
6. Arif M., Rashid M. A Literature Review on Model Conversion, Inference, and Learning Strategies in EdgeML with TinyML Deployment. *Computers, Materials & Continua*. 2025. Vol. 83, no. 1.
7. Baranwal A. IoT-based environmental sensing solutions for smart city monitoring. *Smart city insights*. 2025. Vol. 2, no. 1. P. 1–16.
8. Bitam T. et al. Artificial intelligence of things for next-generation predictive maintenance. *Sensors* (Basel, Switzerland). 2025. Vol. 25, no. 24. P. 7636.
9. Boltsi A. et al. Towards a novel Digital Twin Framework Proposal Within the Engineering Design Process for Future Engineers: An IoT Smart Building Use Case. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 11. P. 3504.
10. Dalvadi J. et al. Technology Trends in IT. Chyren Publication, 2025. 140 p.

11. Dini P. et al. Overview of AI-models and tools in embedded IIoT applications. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 12. P. 2322.
12. Hananto A.L. et al. Digital twin and 3D digital twin: concepts, applications, and challenges in industry 4.0 for digital twin. *Computers*. 2024. Vol. 13, no. 4, p.100.
13. Giriraja C. V., Ramesh T. K., Bestak R. Transforming agriculture with IOT: a comprehensive review of technologies, applications, and future trends. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2026. P. 1–19.
14. Gouiza N. et al. Integration of iot-enabled technologies and artificial intelligence in diverse domains: Recent advancements and future trends. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2024. Vol. 102, no. 5. P. 1975–2029.
15. Hamuda H., Anjani S., Adzimah L. Development of an Intelligent Embedded Cyber Physical System Integrating Edge AI and Low Power Sensor Networks for Adaptive Environmental Monitoring and Robotic Control. *Intelligent Systems and Robotics*. 2026. Vol. 1, no. 1. P. 42–56.
16. Haque M. M. Quantitative assessment of smart city iot integration for reducing urban infrastructure vulnerabilities. *Review of Applied Science and Technology*. 2024. Vol. 3, no. 04. P. 48–93.
17. Hussain A. et al. (Eds.). The next generation innovation in IoT and cloud computing with applications. CRC Press, 2024. 194 p.
18. Jameil A. K. High-performance hybrid AI systems with quantum-secure protocols for cyber-physical remote healthcare applications : doctoral dissertation / Brunel University London. 2025.
19. Sahoo B. et al. Digital twin enabled smart microgrid system for complete automation: An overview. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 25. P.104010.
20. Lala G., Vugar A. Application of IoT and Sensor Technologies in Environmental Monitoring. *Environmental Research and Ecotoxicity*. 2025. no. 4. P. 5.
21. Lyazid S. A. B. R. I. Lecture notes on Internet of Things course : doctoral dissertation / University of Mohamed El Bachir El Ibrahimi-Bordj Bou Arréridj. 2025.

22. Marvin S. Smart weather: Why does it matter for urban studies?. *Urban Geography*. 2025. Vol. 46, no. 7. P. 1630–1641.
23. Chen Y. et al. Applications of blockchain in industry 4.0: A review. *Information Systems Frontiers*. 2024. Vol. 26, no. 5. P. 1715-1729.
24. Ostrometzky J., Messer H. Opportunistic weather sensing by smart city wireless communication networks. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 24. P. 7901.
25. Paolini D. et al. Advanced Fault Detection and Diagnosis Exploiting Machine Learning and Artificial Intelligence for Engineering Applications. *Electronics*. 2026. Vol. 15, no. 2. P. 476.
26. Qian M., Qian C., Yu W. Edge intelligence in smart agriculture CPS. *Edge Intelligence in Cyber-Physical Systems*. Academic Press, 2025. P. 265–291.
27. Rajkumar Y., Santhosh Kumar S. V. N. A comprehensive survey on communication techniques for the realization of intelligent transportation systems in IoT based smart cities. *Peer-to-peer networking and applications*. 2024. Vol. 17, no. 3. P. 1263–1308.
28. Ramani D. R., Sujitha B. B., Tangade S. Smart environmental monitoring systems: IoT and sensor-based advancements. *Environmental Monitoring Using Artificial Intelligence*. 2025. P. 45–60.
29. Selvam A. P., Al-Humairi S. N. S. Environmental impact evaluation using smart real-time weather monitoring systems: a systematic review. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2025. Vol. 10, no. 1. P. 13.
30. Shanmugadass V. Securing Sustainable Supply Chains Through Blockchain and AI Integration. *Sustainable Supply Chains and Carbon Footprint Reduction*. 2025. P. 221.
31. Boylan J., Meyer D., Chen W.S. A systematic review of the use of in-vehicle telematics in monitoring driving behaviours. *Accident Analysis & Prevention*. 2024. Vol. 199. P.107519.
32. Sonam et al. MIAWM: MQTT based IoT Application for Weather Monitoring. *Journal of High Speed Networks*. 2024. Vol. 30, no. 3. P. 333–354.

					КвПКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

33. Soni P. Smart City Innovations and IoT as a Frontier of AI at the Edge of Intelligence. *Edge of Intelligence: Exploring the Frontiers of AI at the Edge*. 2025. P. 369–390.

34. Керницький О. Б., Теслюк В. М.. Моделювання процесу валідації специфікацій у реінжинірингу it-проектів на основі статистичного аналізу мереж Петрі. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2026. Т. 36, № 1. С. 96–104.

35. Tricomi G. et al. Smart city as cooperating smart areas: On the way of symbiotic cyber–physical systems environment. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 10. P. 3108.

36. Van Hoang T. Impact of integrated artificial intelligence and internet of things technologies on smart city transformation. *Journal of technical education science*. 2024. Vol. 19, Special Issue 01. P. 64–73.

37. Velaga K. S., Guo Y., Yu W. Edge AI for Smart Cities: Foundations, Challenges, and Opportunities. *Smart Cities*. 2025. Vol. 8, no. 6. P. 211.

38. Vivek K. et al. Role of IoT in smart cities: A review, applications, open challenges and solutions. *2025 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*. IEEE, 2025. P. 596–601.

39. Zahoor S. et al. (Eds.). *Cyber-physical System for Rural Development: Technological Innovations for Sustainable Futures*. CRC Press, 2025. 302 p.

40. Zeng H. et al. Towards a conceptual framework for AI-driven anomaly detection in smart city IoT networks for enhanced cybersecurity. *Journal of Innovation & Knowledge*. 2024. Vol. 9, no. 4. P. 100601.

41. Вінницький інформаційний портал Вежа: офіційний сайт. URL: <https://vezha.ua/> (дата звернення: 18.04.2026).

42. Coda Sensor: офіційний сайт. URL: <https://www.codasensor.com/> (дата звернення: 18.04.2026).

43. Alcalá-Rodríguez U. E. et al. Design and Validation of a Solar-Powered LoRa Weather Station for Environmental Monitoring and Agricultural Decision Support. *Technologies*. 2025. Vol. 14, no. 1. Art. 32.

44. Sacoto-Cabrera E. J. et al. IoT, AI, and Digital Twins in Smart Cities: A Systematic Review for a Thematic Mapping and Research Agenda. *Smart Cities*. 2025. Vol. 8, no. 5. Art. 175.

45. Salih S. et al. IoT in urban development: insight into smart city applications, case studies, challenges, and future prospects. *PeerJ Computer Science*. 2025. Vol. 11. Art. e2816.

46. Sanchez-Gallegos D. D. et al. Smart Cities: A Systematic Review of Emerging Technologies. *Smart Cities*. 2025. Vol. 8, no. 5. Art. 173.

47. Siakas D. et al. Autonomous Cyber-Physical Systems Enabling Smart Positive Energy Districts. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 13. Art. 7502.

48. Zambrano-Mieles J. Integrating ESP32-Based IoT Architectures and Cloud Visualization to Foster Data Literacy in Early Engineering Education. *Computers*. 2026. Vol. 15, no. 1. Art. 51.

49. Bhargavi P., Nikhitha P., Mahalakshmi N., Aishwarya P. D. Real-Time Environmental Monitoring and Nutrient Estimation in Controlled Nursery Environments for Precision Agriculture. *International Journal of Data Science and IoT Management System*. 2026. Vol. 5, no. 2. P. 18–25.

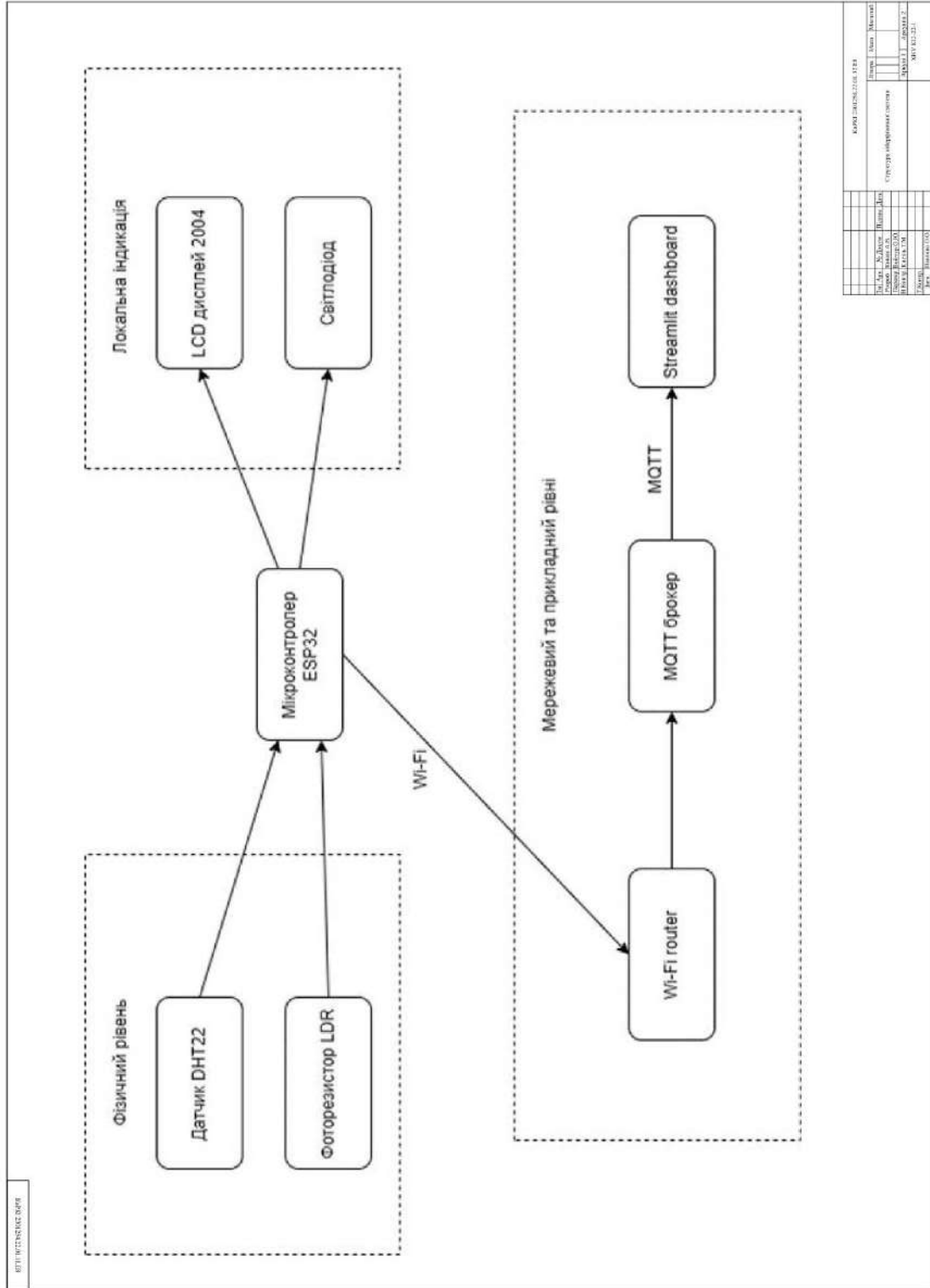
50. Mustapha M. F., Shaari S., Mustapha N. N. H. N. Design of a Web-Integrated IoT System for Environmental Monitoring Using ESP32. *Innovation Series Quarterly*. 2026. Vol. 2, no. 1.

					КвПКІ.2301254.22.01.32 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

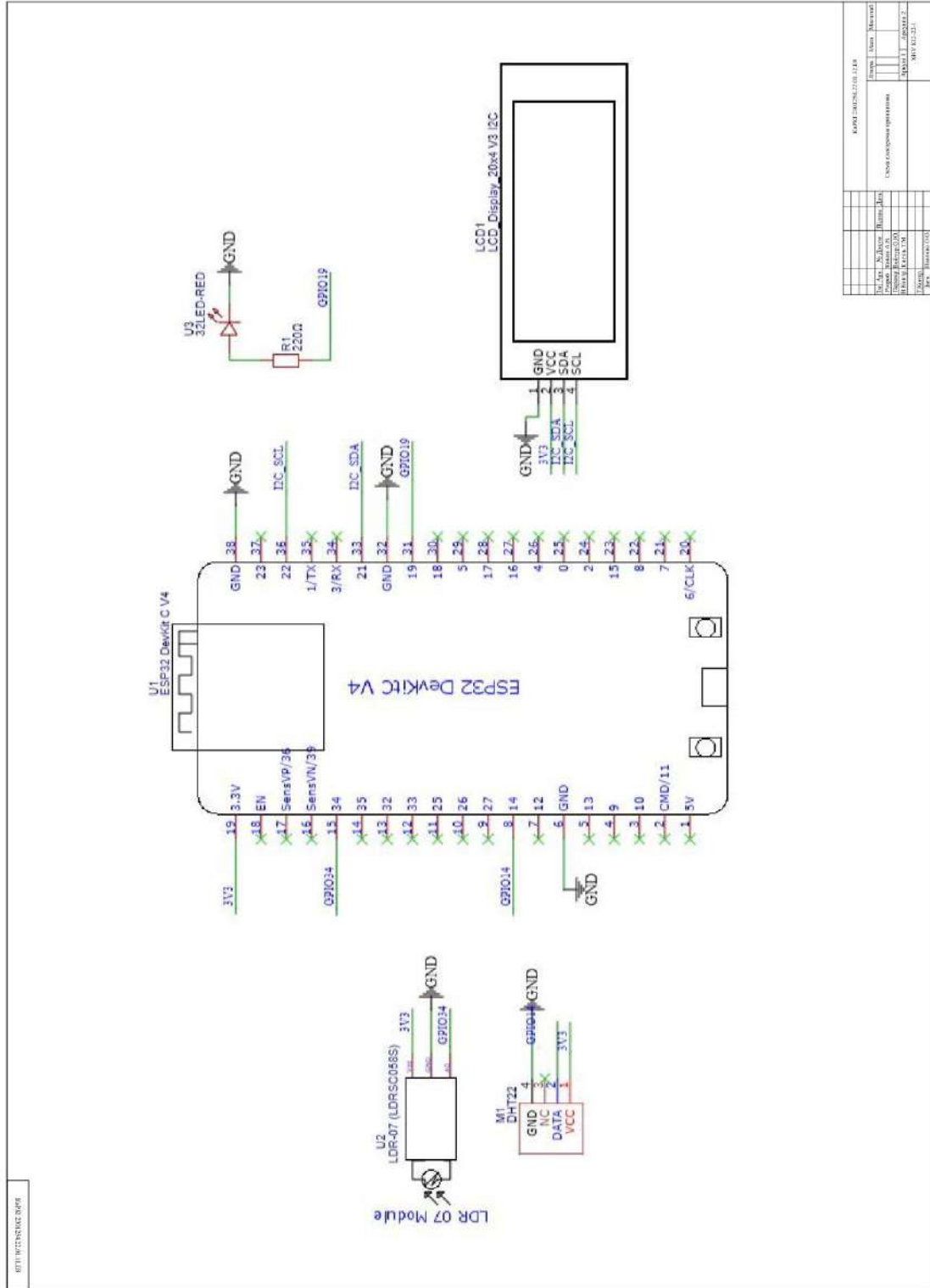
Копія креслення «Структура кіберфізичної системи»



ДОДАТОК Б

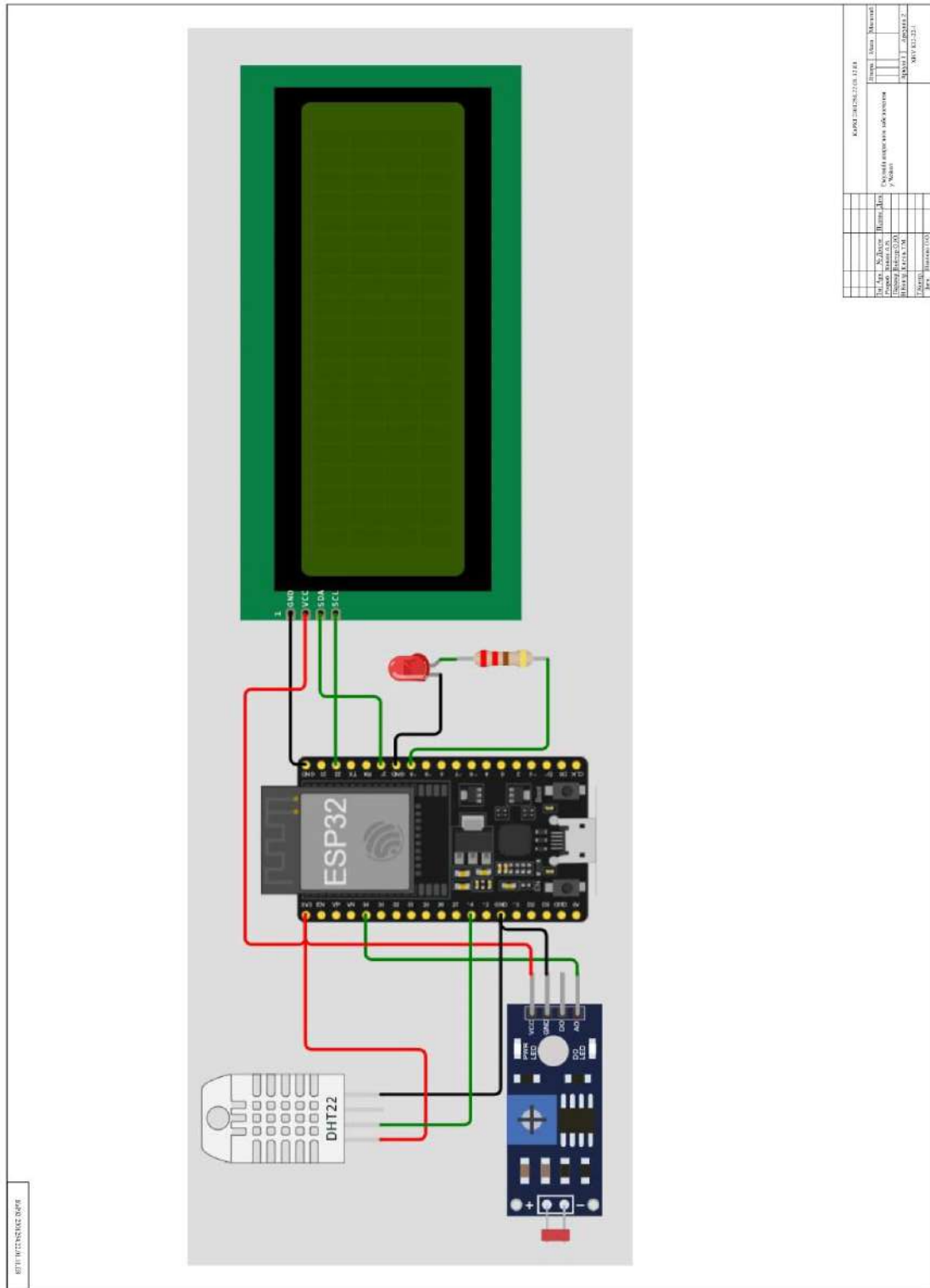
(обов'язковий)

Копія креслення «Схема електрична принципова»



ДОДАТОК В (обов'язковий)

Копія креслення «Емуляція апаратного забезпечення у Wokwi»



ДОДАТОК Г

(обов'язковий)

Лістинг програмного забезпечення прошивки мікроконтролера

```
import network
import time
import ujson
import math
import dht
from machine import Pin, ADC, I2C
from umqtt.simple import MQTTClient
from i2c_lcd import I2cLcd

WIFI_SSID = "Wokwi-GUEST"
WIFI_PASSWORD = ""
MQTT_BROKER = "broker.mqttdashboard.com"
MQTT_TOPIC = "cps/weather/sensor"

DHT_PIN = 14
LDR_PIN = 34
ALARM_LED_PIN = 19
ADDR_LCD = 0x27

GAMMA = 0.7
RL10 = 50

sensor = dht.DHT22(Pin(DHT_PIN))
led = Pin(ALARM_LED_PIN, Pin.OUT)
ldr = ADC(Pin(LDR_PIN))
ldr atten(ADC.ATTN_11DB)

i2c = I2C(0, scl=Pin(22), sda=Pin(21), freq=400000)
try:
    lcd = I2cLcd(i2c, ADDR_LCD, 4, 20)
except:
    lcd = I2cLcd(i2c, 0x3f, 4, 20)

def get_lux(raw_adc):
    if raw_adc >= 4095: return 0.1
    voltage = raw_adc / 4095 * 3.3
    resistance = 10000 * voltage / (3.3 - voltage)
    lux = math.pow(RL10 * 1e3 * math.pow(10, GAMMA) / resistance, (1
/ GAMMA))
    return round(lux, 1)

def get_weather_status(temp, hum, lux):
    alarm = False
    if temp <= 2.0:
        msg, alarm = "CRITICAL: ICE RISK", True
```

```

elif temp >= 38.0:
    msg, alarm = "ALARM: EXTREME HEAT", True
elif hum >= 90.0:
    msg = "WARNING: HIGH HUMID"
elif lux < 1.0:
    msg = "NIGHT: PITCH BLACK"
elif lux < 50.0:
    msg = "EVENING / DIM LIGHT"
elif 18.0 <= temp <= 25.0 and 40 <= hum <= 60:
    msg = "COMFORTABLE CONDITIONS"
elif lux > 30000:
    msg = "BRIGHT SUNNY DAY"
else:
    msg = "SYSTEM: NORMAL"
return msg, alarm

def connect_wifi():
    lcd.clear()
    lcd.putstr("WiFi Connecting...")
    sta_if = network.WLAN(network.STA_IF)
    sta_if.active(True)
    sta_if.connect(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD)
    while not sta_if.isconnected():
        time.sleep(0.5)
    lcd.move_to(0, 3)
    lcd.putstr("WiFi: Connected   ")

def connect_mqtt():
    try:
        client_id = "Weathernode-" + str(time.ticks_ms())
        client = MQTTClient(client_id, MQTT_BROKER)
        client.connect()
        return client
    except:
        return none

lcd.clear()
lcd.putstr("SMART WEATHER CPS\nInitializing...")
time.sleep(2)

connect_wifi()
mqtt = connect_mqtt()

last_mqtt = 0
last_status = ""

while True:
    try:
        time.sleep(2)

        try:
            sensor.measure()

```

```

        t, h = sensor.temperature(), sensor.humidity()
    except:
        t, h = 0, 0

    lux = get_lux(ldr.read())
    status, is_alarm = get_weather_status(t, h, lux)

    led.value(1 if is_alarm else 0)

    lcd.move_to(0, 0)
    lcd.putstr("T{:>4.1f}C  H{:>3}% ".format(t, int(h)))
    lcd.move_to(0, 1)
    lcd.putstr("Light: {:>7.1f} lx".format(lux))
    lcd.move_to(0, 2)
    lcd.putstr("-" * 20)
    lcd.move_to(0, 3)
    lcd.putstr("{:<20}".format(status))

    current_time = time.ticks_ms()

    time_to_send = time.ticks_diff(current_time, last_mqtt) >
10000

    status_changed = (status != last_status)

    if status_changed or time_to_send:
        payload = {
            "temp": t, "hum": h,
            "lux": lux, "status": status
        }

        if mqtt:
            try:
                mqtt.publish(MQTT_TOPIC, ujson.dumps(payload))
                print("Published:", status)

                last_mqtt = current_time
                last_status = status
            except:
                print("MQTT lost, reconnecting...")
                mqtt = connect_mqtt()

    except Exception as e:
        print("Error:", e)

```

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: Артем КОНИК

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система моніторингу погодних умов для інформаційної підтримки комунальних підприємств

Експерт: Олег ВОЙЧУР

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 4.24%

Коефіцієнт подібності 2: 1.49%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-27 05:56:50.0

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.

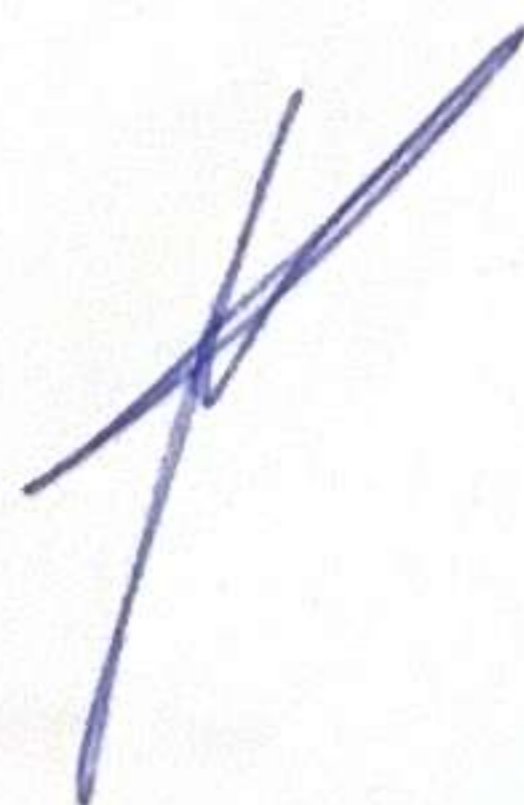
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

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 процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-05-27

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

Максимальне співпадіння з одним документом 4.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 11%

ID: 272410 Назва: БКР Кіберфізична система моніторингу погодних умов для інформаційної підтримки комунальних підприємств Додано в БД: 2026-05-27 Автора: Артем КОНИК Керівники: Олег ВОЙЧУР Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	107034	632	5681 (5%)	65 (10%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Коник Артем Володимирович

Тема: Кіберфізична система моніторингу погодних умов для інформаційної підтримки комунальних підприємств

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 66

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка кіберфізичної системи моніторингу погодних умов для інформаційної підтримки комунальних підприємств.

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 проведений аналіз теоретичних засад та існуючих технологічних рішень дозволив встановити, що цифровізація міського простору потребує якісно нового підходу до метеорологічного моніторингу. Дослідження предметної області показало, що критична залежність комунальних служб від погодних умов вимагає високої локалізації даних, яку не здатні забезпечити традиційні державні метеостанції через їхню низьку щільність розташування. У другому розділі було проведено комплексне системне проектування архітектури та ґрунтовне обґрунтування технічних рішень, необхідних для побудови високоефективної кіберфізичної системи моніторингу погодних умов. Описана у розділі математична модель перетворення сирих сигналів АЦП в одиниці освітленості (люкси) дозволяє програмно компенсувати нелінійність напівпровідникових сенсорів, що суттєво знижує похибку вимірювань у критичних діапазонах освітленості. У третьому розділі було реалізовано програмне забезпечення кіберфізичної системи та проведено всебічне тестування її функціональних можливостей. Практична реалізація вбудованого ПЗ на мові

MicroPython підтвердила ефективність використання високорівневих інтерпретованих мов для швидкої розробки IoT-рішень. Модульна структура коду, що розділяє драйвери периферії та основну логіку, дозволила створити стабільну прошивку з розвиненими механізмами обробки помилок та автоматичного відновлення мережевого з'єднання.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага аналізу предметної області; недостатньо чітко описано процес складання програмно-технічного засобу.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: робота виконана на достатньому технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____


9. Оцінка дипломної роботи: задовільно (D / 70).

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Дисурд Володимир Миколайович

доцент каф. КІСРБезпечення

“ 04 ” 06 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Артем КОНИК

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

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

1 травня 2026 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система моніторингу погодних умов для інформаційної підтримки комунальних підприємств
 Автор Артем КОНИК
 Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
 Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
 Науковий керівник: Олег ВОЙЧУР

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	

Підтвердження:

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

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел




Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 5,73%; та системою Anti-Plagiarism складає 4%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Підпис

Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олег ВОЙЧУР
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ