

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

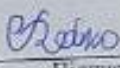
Кіберфізична система керування системою вентиляції в супермаркетах з використанням теплових карт WiFi пристроїв на основі ESP32
Назва теми

КвРКІ 210120.21.01.62 ПЗ
Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»
Назва

Виконав: студент IV курсу, група KI2-21-1 
Підпис Ініціали, прізвище

Керівник 
Підпис, дата Ініціали, прізвище

Нормоконтролер 
Підпис, дата Ініціали, прізвище

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


Підпис Ініціали, прізвище

«12» червня 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Освітній рівень БАКАЛАВР

Галузь знань 12 Інформаційні технології

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Олегу РЕДЬКУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система керування системою вентиляції в супермаркетах з використанням теплових карт WiFi пристроїв на основі ESP32

Керівник проекту (роботи) Дмитро ДЕНИСЮК старший викладач

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, місце зв'язку

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. № 23

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

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

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

Кіберфізична система керування системою вентиляції у супермаркетах та постановка задачі щодо її впровадження

Проектування системи збору, обробки та локалізації даних про присутність людей на основі Wi-Fi сигналів

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи керування вентиляцією з використанням ESP32 та теплових карт

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

Блок-схеми алгоритмів роботи підсистем кіберфізичної системи

Структурно-функціональна схема архітектури кіберфізичної системи керування вентиляцією

Принципова електрична схема підключення компонентів кіберфізичної системи

6. Консультанти розділів дипломного проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Тетяна КИСІЛЬ, доцент кафедри КПС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання

« 24 » 03 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2025	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2025	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2025	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проектування кіберфізичної системи	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи	29.04.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2025	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент

Підпис

Олег РЕДЬКО

Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Дмитро ДЕНИСЮК

Ініціали, прізвище

№ рядка	формат	Позначення	Найменування	Кількість	№ екз	Примітка
1		КвРКІ 210120.21.01.62 ПЗ	Текстові документи Пояснювальна записка	55		
2		КвРКІ 210120.21.01.62 E62	Графічні матеріали Блок-схеми алгоритмів роботи підсистем кіберфізичної системи	1		
3		КвРКІ 210120.21.01.62 E62	Структурно- функціональна схема архітектури кіберфізичної системи керування вентиляцією	1		
4		КвРКІ 210120.21.01.62 E62	Принципова електрична схема підключення компонентів кіберфізичної системи	1		

КвРКІ 210120.21.01.62 ВП

Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата
Розробив		Редько		02.06
Перевір.		Денисюк		12.06.25
Н. контр.		Кисіль		12.06.25
Затв.		Павлова		12.06.25

Відомість проекту

Літера	Аркуш	Аркушів
У	1	1

ХНУ, КІ2-21-1

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система керування системою вентиляції в супермаркетах з використанням теплових карт WiFi пристроїв на основі ESP32».

Автор роботи: Олег РЕДЬКО.

Керівник роботи: Дмитро ДЕНИСЮК.

Пояснювальна записка: 55 с., 15 рис., 3 табл., 3 дод., 52 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

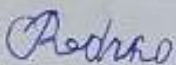
КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦІЇ, Wi-Fi ТРЕКІНГ, ESP32, ТРИЛАТЕРАЦІЯ.

Метою дипломної роботи є проектування та реалізація кіберфізичної системи керування вентиляцією на основі аналізу теплових карт, сформованих за даними WiFi-пристроїв у приміщенні супермаркету.

Об'єктом дослідження є система керування мікрокліматом у торгових приміщеннях.

Предметом дослідження є методи локалізації, агрегації та використання даних присутності для адаптивного керування вентиляційними потоками.

Під час виконання дослідження були використані методи аналізу літературних джерел, моделювання, програмно-апаратного прототипування та тестування вбудованих систем на основі мікроконтролерів ESP32 та ESP8266.



Підпис студента

30.05.2025

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	4
1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань.....	4
1.2 Порівняльний аналіз переваг та недоліків існуючих рішень.....	9
1.3 Підходи до вирішення задачі за темою дослідження.....	14
1.4 Постановка задачі.....	19
2 ПРОЕКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ВЕНТИЛЯЦІЇ	20
2.1 Архітектура.....	20
2.2 Вимоги до пристрою та його архітектури.....	27
2.3 Програмування мікроконтролерів.....	31
2.4 Система збору та обробки інформації з використанням мікроконтролерів.....	34
2.5. Висновки до другого розділу.....	42
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ	45
3.1 Апаратне розгортання та підключення до виконавчих механізмів.....	45
3.2 Програмна реалізація та алгоритмічна обробка даних.....	51
3.3 Висновки до третього розділу.....	55
ВИСНОВКИ	57
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	59
ДОДАТОК А	66
ДОДАТОК Б	67
ДОДАТОК В	68
ДОДАТОК Г	69

КвРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ								
Зм.	Арк.	Недокум.	Підпис	Дата	Кіберфізична система керуванням системою вентиляції в супермаркетах з використанням теплових карт WiFi пристроїв на основі ESP32	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Олег РЕДЬКО	<i>[Підпис]</i>	09.06		у	2	55
Перевір.		Дмитро ДЕНИСЮК	<i>[Підпис]</i>	12.06				
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ	<i>[Підпис]</i>	12.06				
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА	<i>[Підпис]</i>	12.06				
						ХНУ КІ2-21-1		

ВСТУП

Актуальність дослідження. Розвиток кіберфізичних систем суттєво впливає на модернізацію технічних рішень у сфері автоматизації будівель, зокрема в частині регулювання параметрів мікроклімату. В умовах підвищеної уваги до ефективного використання енергоресурсів зростає потреба у впровадженні інтелектуальних механізмів управління вентиляційними системами. Серед актуальних підходів – застосування аналітики Wi-Fi-сигналів для непрямого виявлення скупчення людей. Формування теплових карт на основі розподілу бездротових пристроїв дозволяє оцінювати щільність перебування відвідувачів у різних секторах простору та адаптивно регулювати подачу повітря. Такий підхід є доцільним у супермаркетах, де навантаження на систему вентиляції змінюється залежно від часу доби та просторового розташування клієнтів.

Мета роботи полягає у створенні прототипу кіберфізичної системи, здатної формувати теплову карту присутності за допомогою аналізу Wi-Fi-активності та автоматично змінювати режими вентиляції відповідно до виявленого розподілу відвідувачів.

Об'єкт дослідження – адаптивне управління параметрами мікроклімату в комерційних приміщеннях.

Предмет дослідження – технології виявлення присутності за Wi-Fi сигналами та алгоритми прийняття рішень для керування вентиляційними системами на основі аналізу розподілу людей у просторі.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань

Системи вентиляції в сучасних торгових приміщеннях, зокрема супермаркетах, відіграють вирішальну роль у забезпеченні комфортних умов для покупців та персоналу, а також у підтримці якості товарів. Традиційно системи вентиляції супермаркетів проектуються з урахуванням максимально можливого навантаження, тобто максимальної кількості відвідувачів, які теоретично можуть перебувати в приміщенні, що призводить до надмірного споживання енергії в періоди низької відвідуваності.

Архітектура типових систем вентиляції в супермаркетах базується на централізованому підході, де потужні кондиціонери та вентиляційні установки працюють за заздалегідь встановленим графіком або режимом, який рідко враховує фактичну динаміку відвідуваності в різних зонах торгового простору. Така система складається з центрального блоку підготовки повітря, мережі повітропроводів, повітророзподільних терміналів та системи автоматизації. Залежно від розміру супермаркету, для різних зон може використовуватися кілька незалежних підсистем (наприклад, окремі системи для торгового залу, складських приміщень, зон приготування їжі).

У торгових приміщеннях спостерігається значна варіативність просторового розподілу відвідувачів упродовж дня. У супермаркетах середнього розміру щільність присутності може відрізнитися в 3–5 разів залежно від функціонального сектору. Зони розміщення популярних товарів, касові вузли та акційні стенди, як правило, характеризуються підвищеним скупченням людей порівняно з іншими відділами. Крім того, просторове навантаження змінюється динамічно під впливом часових факторів, таких як добовий та тижневий ритм, а також сезонні коливання. Така динаміка зумовлює локальні коливання температури, вологості

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та концентрації вуглекислого газу, що створює неоднорідне мікрокліматичне навантаження на систему вентиляції.

Таблиця 1.1 – Характеристики тепловиділення та виділення вологи людиною залежно від фізичної активності

Стан людини	Тепловиділення (Вт)	Виділення вологи (г/год)
Спокій	100	50
Легка активність	120–140	60–70
Інтенсивна дія	150–170	75–90

Економічні та енергетичні витрати, пов'язані з неефективним використанням вентиляційних систем, є значними. Дослідження енергоефективності будівель[49] показують, що системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВК) споживають від 40% до 60% загальної енергії в комерційних будівлях, включаючи супермаркети. При цьому неоптимальне використання вентиляційних систем може призводити до перевитрат енергії на 15–30%. У грошовому еквіваленті це складає значні суми для операторів роздрібною торгівлі, особливо враховуючи тенденцію до зростання вартості енергоносіїв.

Окрім прямих витрат на енергоносії, неефективні системи вентиляції спричиняють додаткові витрати на обслуговування обладнання через його інтенсивніше використання, а також непрямі витрати, пов'язані зі скороченням терміну експлуатації товарів, чутливих до температурного режиму та вологості.

Якість повітря у торговельних приміщеннях має безпосередній вплив на сприйняття бренду покупцями та їхню схильність до здійснення покупок. Дослідження у сфері споживчої психології виявили, що висока температура, задушливе повітря та неприємні запахи можуть суттєво скоротити час перебування покупців у магазині та, відповідно, зменшити середній чек. За

даними Дослідження показують[50], що оптимальні умови мікроклімату можуть збільшити час перебування відвідувачів у магазині на 15–20%, що прямо корелює зі збільшенням обсягу продажів.

Для персоналу супермаркетів якість повітря є ще важливішим фактором, оскільки працівники перебувають у приміщенні протягом тривалого часу. Недостатня вентиляція і підвищений рівень CO₂ призводять до зниження продуктивності, збільшення кількості помилок та погіршення загального самопочуття персоналу.

Таблиця 1.2 – Залежність когнітивних здібностей від концентрації CO₂

Концентрація CO ₂ (ppm)	Зміна когнітивних здібностей, %	Опис впливу
≤ 600	0%	Максимальна продуктивність
1000	-15%	Відчутне зниження уваги, підвищення кількості помилок
1400	-50%	Різде зниження когнітивної ефективності, розвиток втоми

Моніторинг переміщення людей у закритих приміщеннях представляє значний науковий та практичний інтерес у контексті оптимізації функціонування комерційних, громадських та промислових об'єктів. Сучасні технології пропонують різноманітні підходи до вирішення цієї задачі, кожен із яких має свої переваги, обмеження та сфери застосування.

Відеоаналітика та системи комп'ютерного зору є одними з найпоширеніших методів моніторингу переміщення людей. Ці системи використовують мережі

камер спостереження, поєднані з алгоритмами комп'ютерного зору для виявлення, відстеження та аналізу руху людей. Сучасні алгоритми, базовані на глибоких нейронних мережах, досягають значної точності у виявленні людей (до 95–98% [51]) навіть у складних умовах освітлення та при частковому перекритті. Архітектура таких систем зазвичай включає камери високої роздільної здатності, обчислювальні модулі для попередньої обробки відео та центральний сервер для аналізу даних. Найновіші рішення використовують розподілені обчислення на граничних пристроях (edge computing), що дозволяє знизити навантаження на мережу та зменшити затримку обробки.

Незважаючи на високу точність, системи відеоаналітики мають суттєві обмеження. По-перше, вони потребують значних витрат на розгортання та обслуговування інфраструктури відеоспостереження. По-друге, використання таких систем пов'язане з аспектами захисту персональних даних, оскільки ідентифікація осіб за зображенням обличчя може підпадати під регулювання у сфері приватності в різних юрисдикціях. По-третє, ефективність роботи систем може знижуватись у ситуаціях високої щільності людей або недостатнього рівня освітлення.

Інфрачервоні (ІЧ) сенсори використовуються як технічний засіб для виявлення присутності людей у приміщеннях на основі аналізу теплового випромінювання. Розрізняють два основні типи таких пристроїв: пасивні інфрачервоні датчики, які фіксують зміни рівня інфрачервоного випромінювання в полі зору, та активні сенсори, що формують інфрачервону променеву завісу та виявляють її переривання у разі переміщення об'єктів. У стандартних умовах експлуатації точність виявлення присутності за допомогою таких сенсорів може досягати 85–90% [52]. Проте ці системи не передбачають можливості просторової ідентифікації окремих осіб, що обмежує їх застосування в задачах локалізації або моніторингу переміщень у групах людей.

Перевагами ІЧ-технологій є невисока вартість, конструктивна простота та відсутність потреби в обробці персоналізованих даних. Це дозволяє масштабувати

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

такі рішення у великих приміщеннях без суттєвого впливу на політику конфіденційності. Разом із тим, ІЧ-сенсори здебільшого застосовуються для визначення факту присутності в окремій зоні, а не для формування повноцінної карти розподілу людей у просторі.

Системи підрахунку відвідувачів представляють спеціалізовану категорію рішень, орієнтованих на визначення кількості людей, що входять та виходять із певних зон приміщення. Такі системи можуть базуватися на різних технологіях: інфрачервоних променях, лазерних сканерах, 3D-стереокамерах або комбінації цих технологій. Сучасні системи підрахунку досягають точності 95–98% [48] навіть у умовах інтенсивного потоку людей. Зазвичай ці системи встановлюються на входах до приміщень або на кордонах між різними зонами, що дозволяє отримувати дані про кількість людей у кожній зоні в реальному часі.

WiFi-трекінг є одним із поширених підходів до моніторингу переміщення людей у приміщеннях. Він базується на аналізі сигналів, які мобільні пристрої періодично надсилають у процесі пошуку доступних мереж. Ці сигнали фіксуються скануючими пристроями, які оцінюють рівень RSSI та інші характеристики для визначення приблизного положення джерела. При використанні кількох сканерів можлива реалізація методів трилатерації.

Точність такого моніторингу визначається кількістю точок спостереження, особливостями просторового середовища та частотою зчитування сигналів. У контрольованих умовах вона може сягати 2–5 метрів, чого достатньо для виявлення зон із підвищеною щільністю присутності в межах торгових площ.

До переваг підходу належать можливість використання наявної мережевої інфраструктури та відсутність потреби у встановленні окремих сенсорів на відвідувачів. Для зниження ризиків порушення конфіденційності передбачено методи анонімізації MAC-ідентифікаторів. Водночас точність зменшується у випадках, коли пристрої використовують тимчасові MAC-адреси або мають вимкнений WiFi-модуль.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У контексті розробки кіберфізичної системи керування вентиляцією, WiFi-трекінг представляє особливий інтерес, оскільки дозволяє отримувати дані про розподіл людей у приміщенні з достатньою точністю для ефективного керування повітряними потоками, при цьому не вимагаючи значних інвестицій у додаткову інфраструктуру та мінімізуючи ризики порушення приватності відвідувачів.

1.2 Порівняльний аналіз переваг та недоліків існуючих рішень

На ринку систем автоматизації мікроклімату використовуються як централізовані, так і розподілені архітектурні рішення. До централізованих належать системи типу Siemens BMS, Honeywell EBI та Johnson Controls Metasys, що орієнтовані на великі комерційні об'єкти. Вони характеризуються широкими функціональними можливостями та високим рівнем інтеграції, проте потребують значних капіталовкладень і працюють переважно з закритими протоколами.

Розподілені IoT-рішення, зокрема EcoStruxure, Carrier i-Vu та Daikin IE, передбачають використання мережі сенсорів і виконавчих пристроїв з можливістю поетапного розгортання. Їх впровадження забезпечує більшу гнучкість, хоча стабільність роботи залишається залежною від якості комунікаційного середовища.

Окрему категорію становлять системи, що враховують розподіл людей у просторі. Рішення на основі технології Demand Controlled Ventilation здебільшого покладаються на датчики CO₂, однак цей підхід має обмеження щодо просторової точності. Більш складні системи, як Enlighted (Рисунок 1.1) чи ThoughtWire, використовують комбінації інфрачервоних сенсорів, камер і Wi-Fi аналізу, що підвищує точність, але вимагає складнішої інфраструктури та породжує питання конфіденційності.

Системи на основі аналізу Wi-Fi активності, зокрема Cisco DNA Spaces, Aruba та Ekahau, дозволяють формувати теплові карти за MAC-адресами пристроїв і можуть бути інтегровані в існуючу мережеву інфраструктуру. Проте

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

їхнє первинне призначення зосереджене на аналітиці поведінки, а не на управлінні інженерними системами.



Рисунок 1.1 – Enlighted Smart Sensors [1]

Для систематизації відмінностей між розглянутими підходами наведено порівняльну таблицю 1.3, в якій враховано вартість впровадження, експлуатаційні витрати та можливості масштабування.

Також можливим є використання рішень на основі мікроконтролерів ESP32 із вбудованою логікою збору MAC-адрес та передачею агрегованої інформації до системи керування вентиляцією. Такі підходи характеризуються низькою вартістю впровадження, не потребують розгалуженої інфраструктури та забезпечують можливість локального регулювання повітрообміну залежно від поточного розподілу присутності в приміщенні.

Кіберфізичні системи керування мікрокліматом передбачають використання алгоритмів обробки даних та прийняття рішень як базового елементу архітектури. Сучасні комерційні системи все частіше використовують методи машинного навчання та штучного інтелекту для оптимізації керування.

Таблиця 1.3 – Порівняння вартості впровадження різних систем керування мікрокліматом із фокусом на Wi-Fi моніторинг відвідувачів.

Система / Платформа	Опис / Основні особливості	Вартість впровадження	Щорічне обслуговування	Гнучкість / Масштабованість
Siemens BMS / Honeywell EBI / Johnson Controls Metasys	Централізовані BMS системи для великих об'єктів	\$50,000 – \$300,000+	\$5,000 – \$20,000+	Висока, але з прив'язкою до виробника
Schneider EcoStruxure / Carrier i-Vu / Daikin IE	IoT-орієнтовані платформи автоматизації з розподіленою архітектурою	\$20,000 – \$100,000	\$2,000 – \$10,000	Гнучкі, можливе поетапне впровадження
Enlighted / ThoughtWire / камери / IR / AI-аналітика	Аналітика присутності з камерами, давачами, AI	\$30,000 – \$150,000+	\$3,000 – \$15,000	Середня до висока, залежить від інфраструктури
Cisco DNA Spaces / Aruba / Ekahau	WiFi-аналітика трафіку, теплові карти	\$10,000 – \$80,000	\$1,000 – \$10,000	Висока для маркетингу, низька для BMS
ESP32 + Custom Software	Власна розробка на ESP32 з аналізом MAC-адрес та інтеграцією у вентиляцію	\$100 – \$1,000	\$0 – \$500	Дуже гнучка, легко масштабована

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Розгляд технічних аспектів створення кіберфізичної системи керування вентиляцією на базі ESP32 з використанням аналізу WiFi-сигналів свідчить про наявність практичної реалізованості такого підходу. Разом із тим виявляється розрив між комерційними системами автоматизації будівель, які здебільшого обмежені у можливостях просторового аналізу присутності, та окремими рішеннями WiFi-моніторингу, що не мають засобів інтеграції з інженерними системами. Ця невідповідність актуалізує потребу в розробці комплексного підходу, здатного об'єднати функціональність відстеження присутності з адаптивним керуванням мікрокліматом у комерційних приміщеннях.

Аналіз існуючих рішень також виявляє необхідність врахування кількох важливих аспектів при розробці системи: забезпечення точності локалізації WiFi-пристроїв в умовах комерційного приміщення з численними перешкодами та джерелами інтерференції; оптимізація обчислювальних алгоритмів для роботи на обмежених ресурсах ESP32; забезпечення надійного зв'язку між компонентами системи; розробка ефективних алгоритмів керування вентиляцією на основі даних про розподіл людей.

Впровадження систем відстеження WiFi пристроїв у публічних приміщеннях, зокрема в супермаркетах, порушує низку важливих законодавчих та етичних питань, які потребують ретельного розгляду. Розвиток технологій збору та аналізу даних відбувається швидше, ніж формування відповідної законодавчої бази, що створює певну правову невизначеність для розробників та операторів таких систем.

В Європейському Союзі основним законодавчим актом, що регулює питання збору та обробки персональних даних, є Загальний регламент захисту даних (GDPR). З точки зору GDPR, MAC-адреси WiFi пристроїв можуть розглядатися як персональні дані, оскільки вони потенційно дозволяють ідентифікувати фізичну особу. Це означає, що збір та обробка таких даних повинні здійснюватися відповідно до принципів GDPR, включаючи наявність

законних підстав для обробки, інформування суб'єктів даних, забезпечення безпеки даних та дотримання інших вимог регламенту.

В Україні діє Закон "Про захист персональних даних", який також встановлює вимоги до збору та обробки персональних даних. Хоча законодавство України не містить прямих вказівок щодо статусу MAC-адрес, загальні принципи захисту персональних даних застосовуються до будь-якої інформації, що дозволяє ідентифікувати фізичну особу.

Щоб забезпечити відповідність законодавству, системи відстеження WiFi пристроїв повинні включати механізми анонімізації даних. Одним із найпоширеніших підходів є хешування MAC-адрес з використанням криптографічних алгоритмів. Такий підхід дозволяє зберегти можливість відстеження переміщення пристрою в межах приміщення без можливості ідентифікації його власника. Важливо забезпечити, щоб процес хешування був необоротним та включав елементи випадковості, наприклад, використання солі при хешуванні.

Законодавство багатьох країн, включаючи GDPR, встановлює принцип мінімізації даних, згідно з яким персональні дані повинні зберігатися не довше, ніж це необхідно для досягнення мети їх обробки. Для систем керування вентиляцією це означає, що дані про розподіл WiFi пристроїв повинні зберігатися лише протягом часу, необхідного для оптимізації роботи системи, і після цього мають бути видалені або повністю анонімізовані.

З етичної точки зору, використання систем відстеження WiFi пристроїв порушує питання приватності та автономії особи. Хоча основною метою таких систем є оптимізація роботи вентиляції, а не збір даних про конкретних осіб, сам факт відстеження електронних пристроїв може викликати негативну реакцію відвідувачів. Важливо забезпечити прозорість щодо мети та способів збору даних, а також надати відвідувачам можливість відмовитися від відстеження (наприклад, шляхом вимкнення WiFi на своїх пристроях).

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На міжнародному рівні існують також рекомендації та стандарти щодо захисту приватності при використанні технологій Інтернету речей. Наприклад, Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) розробила стандарт ISO/IEC 27701, який надає рекомендації щодо захисту приватності в контексті систем управління інформаційною безпекою. Дотримання таких стандартів може допомогти забезпечити відповідність системи відстеження WiFi пристроїв кращим практикам захисту приватності.

1.3 Підходи до вирішення задачі за темою дослідження

Технологія WiFi-трекінгу базується на особливостях роботи безпроводних мереж і способах взаємодії мобільних пристроїв із точками доступу. Для розуміння її функціонування доцільно розглянути принципи роботи WiFi-протоколу, механізми ідентифікації пристроїв, методи оцінки відстані та підходи до обробки зібраних даних.

Принципи роботи WiFi протоколу базуються на стандарті IEEE 802.11, який визначає формат і структуру пакетів даних, що передаються в безпроводній мережі. Згідно з цим стандартом, взаємодія між пристроями відбувається через передачу різних типів пакетів, включаючи кадри керування (management frames), кадри даних (data frames) та кадри керування доступом до середовища (control frames). З точки зору пасивного моніторингу особливий інтерес становлять кадри керування, зокрема, probe request пакети, які мобільні пристрої періодично надсилають для виявлення доступних WiFi мереж у своєму оточенні.

Пристрої з активованим WiFi модулем регулярно сканують радіоефір у пошуках доступних мереж навіть тоді, коли вони не підключені до жодної з них. Цей процес сканування передбачає відправлення probe request пакетів на 14 каналів (у більшості регіонів світу) в діапазоні 2,4 ГГц та на додаткові канали в діапазоні 5 ГГц. Частота відправлення таких запитів залежить від конкретного пристрою та його стану (активний екран, режим енергозбереження тощо), але в

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середньому складає від декількох разів на хвилину до декількох разів на секунду під час активного використання.

Системи моніторингу WiFi-середовища зазвичай базуються на перехопленні probe-запитів, що надсилаються мобільними пристроями у пошуках доступних мереж. У таких запитах фігурує MAC-адреса відправника, яка використовується для тимчасової ідентифікації пристрою. Хоча сучасні мобільні операційні системи впроваджують механізми рандомізації MAC-адрес для підвищення конфіденційності, ці адреси залишаються сталими протягом короткого проміжку часу, що дозволяє використовувати їх для побудови локальної теплової карти присутності.

Методи визначення відстані на основі потужності сигналу (RSSI – Received Signal Strength Indicator) базуються на фізичному принципі затухання радіосигналу при поширенні у просторі. Згідно з цим принципом, потужність сигналу зменшується пропорційно квадрату відстані у вільному просторі, хоча в реальних умовах ця залежність ускладнюється наявністю перешкод, відбиттів та інтерференції.

RSSI виражається в дБм (децибел-міліват) і зазвичай має негативні значення, де менші за модулем значення (наприклад, -30 дБм) вказують на сильніший сигнал, а більші за модулем значення (наприклад, -90 дБм) – на слабший. На практиці, RSSI може варіюватися від -30 дБм (дуже близько до передавача) до -90 дБм (на межі чутливості приймача).

Технологічні основи відстеження WiFi пристроїв складаються з розуміння принципів роботи WiFi протоколу, особливостей ідентифікації пристроїв через MAC-адреси, методів визначення відстані на основі RSSI та алгоритмів обробки даних для визначення місцезнаходження. Ці компоненти в сукупності формують технологічне підґрунтя для створення системи моніторингу переміщення відвідувачів супермаркету з метою оптимізації роботи вентиляційного обладнання.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мікроконтролери ESP32 (Рисунок 1.4) та ESP8266 (Рисунок 1.5) часто застосовуються у проєктах моніторингу WiFi-трафіку завдяки доступності та наявності вбудованого WiFi-модуля. У системах відстеження переміщень відвідувачів у супермаркетах ці пристрої забезпечують прийнятний баланс між вартістю та функціональністю.

ESP32, випущений пізніше, розширив можливості попередника, додавши підтримку Bluetooth, двоядерний процесор та розширену периферію, що робить його особливо привабливим для складних систем моніторингу.

Для задач моніторингу WiFi трафіку ESP32 пропонує значні переваги: потужніший процесор (двоядерний Tensilica Xtensa LX6 з частотою до 240 МГц) забезпечує достатню обчислювальну потужність для аналізу мережевих пакетів у реальному часі, більший обсяг пам'яті дозволяє зберігати значні масиви даних, а WiFi модуль підтримує стандарти 802.11 b/g/n у діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц.



Рисунок 1.4 – Мікроконтролер ESP32 [2]

ESP8266, представлений у 2014 році, став революційним рішенням для IoT завдяки інтегрованому WiFi модулю та доступній ціні.

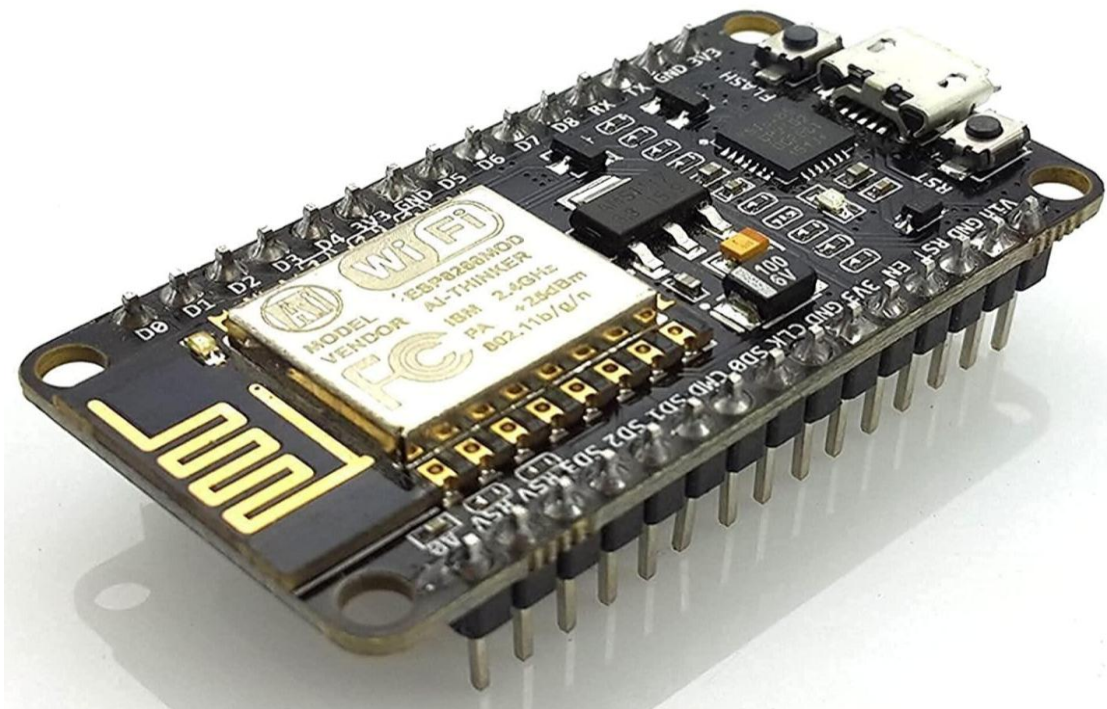


Рисунок 1.5 – Мікроконтролер ESP8266 [3]

ESP8266, хоча й менш потужний (однопотужний процесор з частотою до 160 МГц), залишається привабливим варіантом для розподілених систем завдяки низькій вартості та підтримці WiFi у діапазоні 2,4 ГГц, що цілком достатньо для виявлення більшості мобільних пристроїв відвідувачів.

У системах моніторингу застосовуються спеціальні режими роботи WiFi-модулів цих мікроконтролерів. Неселективний режим (promiscuous mode) забезпечує приймання всіх пакетів даних на вибраному каналі незалежно від адресата. Режим сніфера (sniffer mode) дає змогу автоматично перемикатися між різними WiFi-каналами, що розширює зону покриття та підвищує ймовірність виявлення мобільних пристроїв відвідувачів.

Пасивний моніторинг WiFi-трафіку передбачає фіксацію даних, що передаються у бездротовому середовищі, без встановлення з'єднання з пристроями. ESP32 у режимі прометування (promiscuous mode) реєструє проби-запити від пристроїв, що шукають доступні мережі, а також рівень сигналу від підключених пристроїв і частоту передавання даних. При цьому не вимагається

підключення пристроїв до конкретної мережі, що дозволяє здійснювати моніторинг без активної участі користувача.

Активне сканування середовища передбачає використання спеціальних точок доступу, які взаємодіють з клієнтськими пристроями шляхом надсилання запитів на з'єднання, аналізу часу відповіді пристроїв та використання інформації про підключені пристрої. Цей метод забезпечує більш точні дані, але вимагає певного рівня взаємодії з пристроями клієнтів.

Системи вентиляції у великих комерційних приміщеннях, зокрема супермаркетах, мають високий рівень енергоспоживання, що обумовлює потребу в оптимізації їхньої роботи з урахуванням принципів енергоефективності. Використання теплових карт, побудованих на основі розподілу Wi-Fi пристроїв, дозволяє реалізувати динамічне керування повітрообміном шляхом спрямування вентиляційних потоків у зони з підвищеною щільністю присутності. Такий підхід забезпечує зменшення надлишкової вентиляції в порожніх секторах і адаптацію інтенсивності роботи обладнання до поточного навантаження

Зниження обсягів повітрообміну в періоди низької активності відвідувачів дозволяє зменшити сумарне енергоспоживання, що, у свою чергу, впливає на скорочення викидів парникових газів та навантаження на електромережу. Інтеграція з іншими системами кліматичного контролю (опалення, кондиціонування) забезпечує комплексний підхід до управління мікрокліматом із мінімальними витратами ресурсів.

У контексті застосування кіберфізичної системи на базі ESP32 варто також враховувати енергоефективність самої моніторингової мережі. Мікроконтролери підтримують режими зниженого енергоспоживання, що дає змогу зменшити витрати у фонових інтервалах. Параметри частоти оновлення та фільтрації даних повинні обиратися з урахуванням компромісу між точністю та енергетичною стабільністю системи.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4 Постановка задачі

Розроблювана кіберфізична система має на меті створення інтелектуальної інфраструктури, що динамічно регулює вентиляцію супермаркету на основі просторового розподілу відвідувачів, отриманого з теплових карт Wi-Fi-пристроїв. Для досягнення цієї мети передбачено мережу з трьох модулів ESP8266 у режимі пасивного сканування, які реєструють MAC-адреси та рівні сигналу (RSSI) і з високою частотою передають ці дані парним вузлам ESP32. На рівні кожного ESP32 реалізовано алгоритми згладжування та анонімізації, після чого агрегована інформація надсилається на центральний контролер.

Головний ESP32 виконує трилатераційні обчислення, співставляє координати з попередньо визначеною сіткою секторів торговельної зали й формує теплову карту. На її основі модуль генерує керуючі сигнали для вентиляційного обладнання, коригуючи інтенсивність повітрообміну відповідно до поточної щільності відвідувачів. Такий підхід дає змогу скоротити надлишкову вентиляцію в порожніх секторах і зменшити сумарне енергоспоживання, що, за прогнозами, забезпечує економію електроенергії на 20–40 % порівняно з фіксованими режимами та гарантований період окупності не більш як три роки.

Система розрахована на сезонні та добові коливання потоку відвідувачів, а її апаратна база (ESP32 / ESP8266) забезпечує низьку вартість та енергоефективність самої моніторингової мережі. Реалізація проєкту потребує інтеграції методів бездротового зв'язку, обробки сигналів, алгоритмів локалізації та вбудованого програмування, що визначає практичну цінність і міждисциплінарний характер поставленого завдання.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ПРОЕКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ВЕНТИЛЯЦІЇ

2.1 Архітектура

Побудова системи керування вентиляцією заснована на каскадній взаємодії між кількома мікроконтролерами, кожен з яких відповідає за окрему фазу збору, обробки та передачі даних. В основі лежить спостереження за динамікою присутності користувачів у приміщенні шляхом виявлення активності Wi-Fi пристроїв. У якості базових сенсорних елементів виступають мікроконтролери ESP8266, що здійснюють пасивне сканування ефіру з метою фіксації MAC-адрес пристроїв, які надсилають запити на підключення. Додатково фіксується рівень сигналу (RSSI), що дозволяє оцінити наближені координати джерела сигналу відносно точки зчитування.

Ці дані одразу ж передаються на мікроконтролери ESP32, кожен з яких приймає інформацію з одного або кількох ESP8266. Передача відбувається за допомогою протоколу ESP-NOW, що забезпечує швидкий обмін без проміжного роутера. Таким чином, кожен ESP32 виступає в ролі локального вузла агрегування, який відповідає за збір і часткове попереднє сортування даних перед пересиланням на центральний модуль.

На фінальному рівні функціонує головний контролер ESP32, що приймає агреговану інформацію з усіх периферійних вузлів. Зіставлення рівнів сигналу з різних точок дозволяє визначати просторове розміщення пристроїв, використовуючи відносну силу сигналу та взаємну геометрію точок зчитування. У результаті формується картина теплового розподілу присутності в приміщенні, що виступає основою для адаптивного керування повітряними потоками у вентиляційній системі. Отримані обчислення можуть бути передані на віддалений сервер або інтегровані безпосередньо в систему автоматичного регулювання мікроклімату приміщення.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

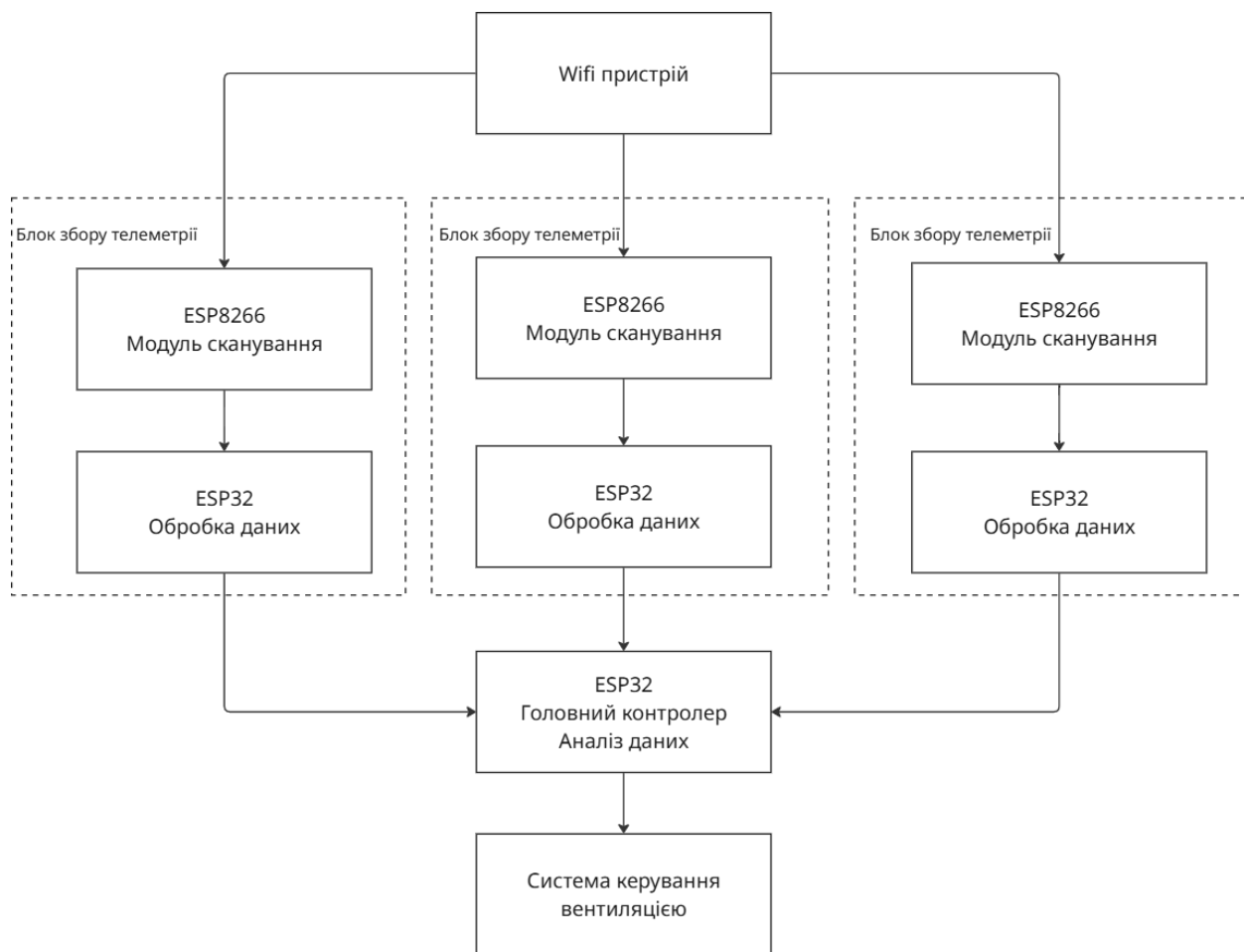


Рисунок 2.1 – Схема керування вентиляцією

З метою забезпечення ефективного розподілу повітряних потоків приміщення поділяється на умовні сектори, кожен з яких репрезентує окрему зону вентиляційного контролю. Кількість та розміри секторів не є фіксованими параметрами й визначаються динамічно на етапі ініціалізації системи залежно від фактичної геометрії простору та топології розміщення сенсорних вузлів. Основною умовою для побудови зонального поділу є наявність як мінімум трьох незалежних точок вимірювання – це дозволяє здійснити базову просторову локалізацію пристроїв за допомогою триангуляції на основі RSSI-показників.

Теоретичною основою функціонування системи є принципи радіочастотної локалізації, що базуються на аналізі параметрів розповсюдження електромагнітних хвиль у закритому просторі. Сучасні дослідження в галузі Indoor Positioning Systems (IPS) демонструють, що точність визначення

місцеположення об'єктів залежить від кількості опорних точок, геометричної конфігурації сенсорної мережі та методів компенсації багатошляхового розповсюдження сигналу. У контексті застосування Wi-Fi технологій для просторової аналітики, критичним фактором є врахування змінної природи радіосередовища, де присутність людських тіл, металевих конструкцій та рухомих об'єктів суттєво впливає на характеристики сигналу.

На початковому етапі система фіксує положення кожного вузла в координатному просторі. У реальному середовищі, де недоступні абсолютні географічні координати, розміщення задається відносно, заздалегідь визначаючи відстані між кожною парою ESP. Ці відстані можуть бути введені вручну під час інсталяції або обчислені автоматично за допомогою калібрувальних сценаріїв, у межах яких передаються сигнали від одного модуля до іншого з фіксацією часу та рівня сигналу. За результатами формується відносна карта розташування точок, яка дозволяє задати логічну сітку поділу простору.

Кількість секторів визначається з урахуванням площі покриття кожної сенсорної пари, щільності очікуваного трафіку користувачів та структурної конфігурації вентиляційної системи. Наприклад, у прямокутному приміщенні можливий поділ на чотири, шість або дев'ять зон, залежно від точності, яку потрібно досягти при виявленні локального навантаження на систему кондиціонування. Основна вимога полягає в тому, щоб кожен сектор мав стабільне перекриття хоча б двома точками зчитування, що гарантує можливість адекватної інтерполяції сигналу й визначення приблизного положення пристроїв усередині сектора.

Це дозволяє не лише сформувати початкову карту простору, але й забезпечує її подальшу адаптацію. У разі змін у конфігурації приміщення, переміщення обладнання або оновлення системи вентиляції, параметри секторизації можуть бути змінені без втручання в апаратну частину системи, оскільки уся логіка реалізована на рівні програмного забезпечення головного мікроконтролера ESP32.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У запропонованій системі використовується гібридна мережева структура, що поєднує окремі точки збору інформації з централізованим обчислювальним вузлом. На першому рівні мікроконтролери ESP8266 функціонують як незалежні сканери, кожен з яких здійснює пасивний моніторинг Wi-Fi-ефіру з фіксацією MAC-адрес та рівнів потужності сигналу (RSSI). Ці дані передаються до відповідного ESP32, з яким він утворює локальну пару. Передача здійснюється через ESP-NOW, що дозволяє уникнути потреби в традиційному Wi-Fi-з'єднанні й забезпечує прямий обмін між модулями з мінімальними затримками.

Цей підхід дозволяє досягти високого рівня структурної гнучкості системи, що є критично важливим при розгортанні в умовах змінної просторової конфігурації. Завдяки використанню бездротових протоколів peer-to-peer взаємодії, кожен вузол може бути переміщений або перепризначений без необхідності втручання в архітектуру всієї мережі. Крім того, відсутність централізованого маршрутизатора зменшує залежність системи від окремих точок відмови, що покращує загальну відмовостійкість. Структура на основі ESP-NOW також дозволяє реалізувати низькоенергетичні сценарії взаємодії між вузлами, що особливо актуально у випадках автономного живлення пристроїв.

Кожен ESP32, що отримує дані від сканерів, виконує базову агрегацію й передає їх далі на головний ESP32, який виступає в ролі центрального вузла обробки. Його канал взаємодії з проміжними вузлами також реалізується через ESP-NOW, що зберігає розділення внутрішньої мережі збору даних та зовнішнього каналу зв'язку з сервером або системою вентиляції. Головний мікроконтролер має доступ до стандартного Wi-Fi-з'єднання, через яке, за потреби, може передавати результати обробки або отримувати команди ззовні.

Комунікаційна схема (Рисунок 2.2) такої структури дозволяє забезпечити стабільну й детерміновану взаємодію між модулями без залежності від інфраструктурного Wi-Fi середовища, а також зменшити обчислювальне навантаження на окремі вузли.

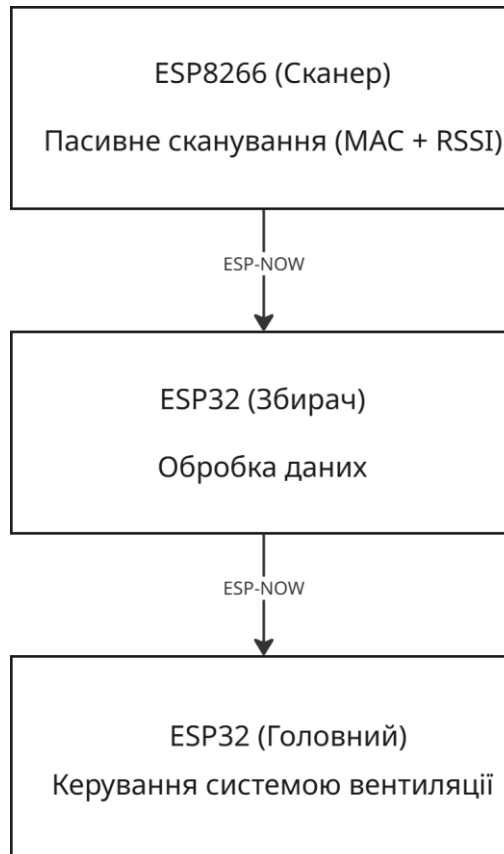


Рисунок 2.2 – Блок-схема архітектури системи

Система складається з трьох типів взаємопов'язаних апаратних компонентів, кожен з яких виконує чітко визначену функцію у загальному процесі збору, обробки та використання даних. На нижньому рівні ієрархії функціонують мікроконтролери ESP8266, що працюють у режимі моніторингу без потреби підключення до Wi-Fi-мережі. Вони перехоплюють ширококомвні пакети, які періодично надсилають Wi-Fi-пристрої в навколишньому середовищі, і фіксують MAC-адреси разом із рівнем потужності сигналу. Через обмежені ресурси ці модулі не здійснюють обробки отриманої інформації, а лише виконують її попередню фільтрацію за базовими критеріями та формують структуровані пакети для передачі.

Дані з ESP8266 передаються на пов'язані з ними ESP32, що виконують роль проміжних вузлів агрегування. Кожен ESP32 обслуговує один або декілька ESP8266, приймаючи від них потік інформації в реальному часі. У рамках цієї фази відбувається попередня обробка: проводиться зведення по MAC-адресах,

усереднення RSSI-значень, фіксація часу виявлення та фільтрація короткотривалих або некоректних з'єднань. Застосування ESP32 на цьому етапі дозволяє зменшити обсяг трафіку до центрального вузла та підвищити загальну ефективність системи.

Центральний ESP32 об'єднує функціональність координації, обчислення просторової присутності та формування сигналів керування. Він отримує структуровані дані від усіх проміжних ESP32, аналізує співвідношення рівнів сигналу, кількість пристроїв у зоні покриття кожного сканера, та на основі цього формує теплову карту простору. Кінцева мета обчислень полягає у визначенні зон з підвищеною концентрацією людей та перетворенні цієї інформації у формат, придатний для взаємодії з виконавчим модулем системи вентиляції. Передача може здійснюватися або через локальний API, або за допомогою HTTP-запитів до серверної частини системи управління мікрокліматом. Результати аналізу використовуються для зміни інтенсивності повітряного потоку в окремих секторах приміщення з урахуванням актуального розподілу теплових навантажень.

Теплова карта в даному контексті виконує роль графічного представлення просторового розподілу Wi-Fi пристроїв у межах супермаркету. Її основна функція (Рисунок 2.3) полягає у візуалізації щільності присутності людей, які мають при собі активні пристрої з увімкненими Wi-Fi модулями. З огляду на те, що абсолютна більшість сучасних користувачів постійно мають при собі смартфони, планшети або смарт-годинники, теплову карту можна інтерпретувати як доволі точний індикатор людської активності в окремих секторах приміщення.

Побудова карти здійснюється шляхом фіксації MAC-адрес пристроїв, визначення сили сигналу (RSSI) відносно кількох радарних точок, а також обчислення координат пристроїв за допомогою просторової інтерполяції або методів триангуляції. Кожна точка на тепловій карті відображає рівень інтенсивності присутності: що більше пристроїв зафіксовано в даній ділянці

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

простору, то вищою є її "температура", яка візуалізується відповідно до обраної кольорової шкали (наприклад, від синього до червоного).

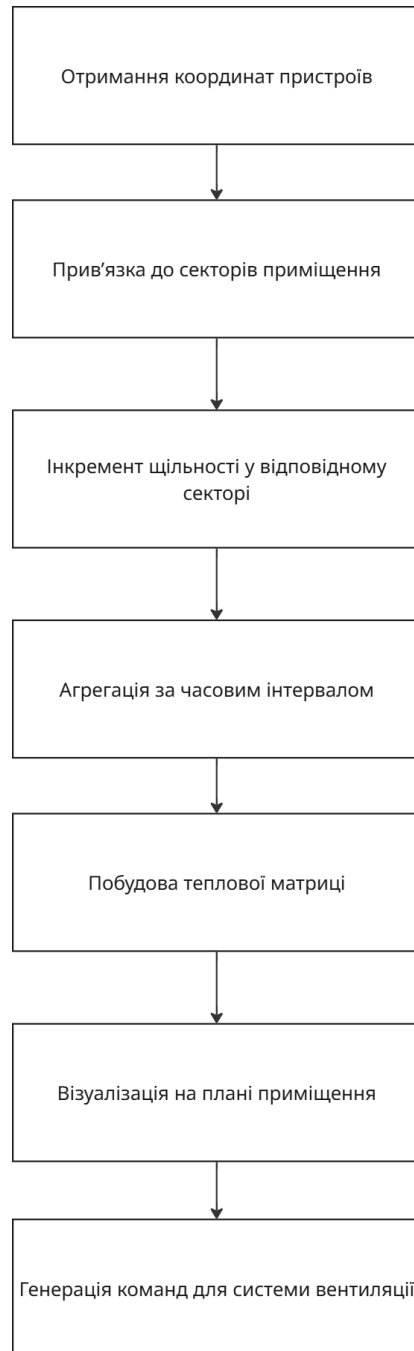


Рисунок 2.3 – Блок-схема архітектури системи

Оновлення карти може здійснюватися в режимі реального часу або з певною періодичністю, залежно від обчислювальних можливостей головного мікроконтролера та частоти надходження даних з радарів. У такому форматі карта

стає інструментом для прийняття оперативних рішень щодо балансування потоків повітря, зокрема автоматичного регулювання інтенсивності вентиляції в зонах з вищим скупченням відвідувачів. Це дозволяє не лише покращити комфорт у межах окремих секторів, але й оптимізувати споживання енергії шляхом адаптивного керування кліматичними системами.

2.2 Вимоги до пристрою та його архітектури

У процесі побудови багаторівневої системи обробки просторових даних було прийнято рішення про поділ функціонального навантаження між різними типами мікроконтролерів. Такий підхід дозволяє оптимізувати використання апаратних ресурсів, зменшити загальне енергоспоживання та забезпечити стійкість і масштабованість системи. Мікроконтролери ESP8266 було обрано для первинного виявлення пристроїв користувачів за допомогою сканування Wi-Fi середовища в обраному частотному діапазоні. Незважаючи на свою відносну апаратну простоту, ESP8266 достатньо ефективно виконує задачу пасивного прослуховування мережевого трафіку у радіусі дії, що дозволяє виявляти MAC-адреси пристроїв, визначати інтенсивність сигналу (RSSI) і формувати первинні пакети даних для подальшої обробки. Завдяки низькому енергоспоживанню, компактності та дешевизні, ESP8266 є доцільним вибором у ролі сенсорного модуля, що виконує лише одну чітко визначену задачу в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Для збору, фільтрації та агрегації даних з декількох ESP8266 використовуються мікроконтролери ESP32, що значно переважають попередню модель за обчислювальною спроможністю. Кожен такий вузол виступає в ролі локального концентратора, який приймає пакети даних по бездротовому протоколу зв'язку (наприклад, ESP-NOW), зберігає їх у тимчасовому буфері, аналізує на предмет повторів, втрат або аномальних значень, після чого передає результати обробки на головний координаційний вузол. Використання двоядерної

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

архітектури ESP32 дозволяє реалізовувати багатозадачну модель, в якій одне ядро відповідає за обробку вхідних повідомлень і локальну логіку, а інше – за підтримку каналу комунікації з вищим рівнем системи.

Головна плата ESP32 виконує роль централізованого модуля, який отримує зведені дані з усіх точок збору, синхронізує їх у часі, оцінює просторове розміщення пристроїв на основі RSSI, генерує теплову карту присутності та формує вихідні сигнали для модуля управління вентиляцією. Інтеграція з серверною інфраструктурою може бути реалізована через Wi-Fi або інші протоколи, залежно від обраної архітектури верхнього рівня. Задіяна обчислювальна модель забезпечує як модульність, так і можливість подальшого розширення системи, зокрема за рахунок збільшення кількості точок збору без суттєвих змін у загальній структурі.

Розподіл ролей між ESP8266 та ESP32 базується на принципі відповідності функціонального навантаження обчислювальним можливостям пристроїв, що дозволяє досягти оптимального співвідношення між вартістю, продуктивністю та гнучкістю розгортання системи в реальних умовах.

Вибір мікроконтролерів у структурі системи розподілено відповідно до функціонального навантаження кожного компонента. Для виконання завдань первинного збору інформації щодо наявності пристроїв у зоні покриття, а саме відслідковування мережевої активності за допомогою Wi-Fi Beacon та Probe пакетів, застосовано ESP8266. Цей мікроконтролер забезпечує базову підтримку 802.11b/g/n та має достатню обчислювальну потужність для пасивного сканування мереж у режимі promiscuous, що дозволяє ефективно виявляти MAC-адреси пристроїв у радіусі дії. Незважаючи на обмежені ресурси в порівнянні з ESP32, ESP8266 демонструє високу стабільність при виконанні монофункціональних задач, споживає менше енергії та характеризується нижчою вартістю, що робить його доцільним вибором для реалізації мережі сенсорних точок.

Зібрані ESP8266 дані передаються на ESP32, який виконує роль вузла агрегації. Завдяки двоядерній архітектурі Tensilica LX6, ESP32 здатен паралельно

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробляти потоки вхідної інформації з декількох сенсорів, проводити фільтрацію дублікатів, часову нормалізацію, попереднє обчислення координат присутності пристроїв, а також управляти передачею структурованих повідомлень на центральний контролер або сервер. Підтримка Wi-Fi у режимі клієнта і точки доступу дозволяє реалізувати як децентралізовану, так і централізовану архітектуру обміну повідомленнями. Наявність розширеного набору інтерфейсів забезпечує можливість гнучкої комунікації з модулями вентиляції, драйверами або реле через UART, I2C або PWM.

У контексті енергоефективності та стабільності системи, така розподілена модель дозволяє ізолювати критично важливі обчислювальні та комунікаційні процеси від базових сенсорних операцій. Завдяки цьому зменшується ймовірність перевантаження пристроїв, а також спрощується налагодження і масштабування системи в залежності від площі об'єкта або кількості зон спостереження.

Фізична інфраструктура системи передбачає живлення всіх мікроконтролерів з використанням стабілізованих джерел постійного струму. Для забезпечення надійної роботи ESP8266 та ESP32 доцільно застосовувати модулі живлення на основі перетворювачів типу AMS1117 або більш енергоефективні DC-DC конвертери з вхідною напругою 5 В та вихідною 3.3 В. У випадках, коли планується автономна робота, можливе використання акумуляторних елементів типу 18650 з підключенням захисних плат з функцією перезаряду. Альтернативно, при наявності стаціонарного монтажу, живлення може бути централізовано організоване через блоки живлення на DIN-рейках з живленням від стандартної мережі 220 В.

Передача даних між ESP8266 та ESP32 реалізується через протокол ESP-NOW, який дозволяє здійснювати обмін повідомленнями у форматі peer-to-peer без потреби у централізованій точці доступу Wi-Fi. Такий підхід мінімізує затримки, підвищує енергоефективність та зменшує навантаження на мережу. ESP-NOW підтримує адресацію MAC-рівня, що дозволяє реалізувати контрольовану маршрутизацію повідомлень від сенсорних вузлів до агрегуючих

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ESP32. За потреби, у випадках втрати пакету або перешкод у радіоканалі, можливе використання повторного надсилання повідомлень з часовою синхронізацією.

Для покращення точності позиціонування та аналізу інтенсивності присутності, до системи можуть бути додатково інтегровані сенсори температури й вологості, наприклад, DHT22 або BME280. Вони дозволяють враховувати мікрокліматичні умови конкретного сектору при формуванні команд для системи вентиляції. Крім того, можливе підключення освітленості або CO₂ сенсорів (наприклад, MH-Z19), що забезпечить адаптивне регулювання на основі додаткових параметрів навколишнього середовища. Всі допоміжні модулі підключаються до ESP32 через стандартні цифрові або аналогові інтерфейси, з подальшою обробкою та включенням результатів до загального профілю сектора.

Для забезпечення коректної роботи мікроконтролери ESP8266 та ESP32 потребують стабілізованого живлення з напругою 3.3 В. Споживання струму варіюється залежно від режиму роботи. У спокійному стані ESP32 зазвичай споживає близько 80 мА, при активній передачі даних по Wi-Fi – до 240–300 мА, а в пікових навантаженнях – до 500 мА. ESP8266 характеризується подібними показниками, хоча середнє споживання у стандартному режимі передачі дещо нижче – в межах 70–250 мА. З огляду на ці параметри, джерела живлення повинні мати запас потужності не менше 1 А на мікроконтролер, з урахуванням додаткових підключених сенсорів або модулів.

Розміщення мікроконтролерів у просторі повинне ґрунтуватися на принципах триангуляції сигналів. Кожен з ESP8266 виконує роль сканера та повинен бути розташований у фіксованій точці простору, яка не змінюється протягом експлуатації. Точки розташування формують умовний трикутник, або за потреби – більшу кількість опорних вузлів, які забезпечують перетин зон покриття Wi-Fi. Такий підхід дозволяє реєструвати один і той самий пристрій з кількох ракурсів та, за допомогою порівняння рівнів сигналу (RSSI), робити висновки про його просторове положення.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ESP32, які збирають інформацію від ESP8266, розміщуються у безпосередній близькості або в межах гарантованого радіусного покриття ESP-NOW – зазвичай до 20–30 метрів у закритому просторі. Основний ESP32, який виконує функції обчислення та агрегації даних, повинен бути встановлений у центральній або технічній зоні з найменшою кількістю радіоперешкод. У разі потреби, додаткові ретранслятори ESP32 можуть застосовуватись для покращення стабільності мережевих з'єднань та мінімізації втрат пакетів у складних топологіях приміщення.

2.3 Програмування мікроконтролерів

У процесі програмування мікроконтролерів ESP8266 та ESP32 можуть використовуватись два основних підходи: використання Arduino Framework або natively – ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework). Хоча обидва підходи базуються на C/C++ і підтримують однакові апаратні ресурси, різниця між ними полягає у гнучкості, рівні абстракції та екосистемі супровідних бібліотек.

Arduino Framework забезпечує вищий рівень абстракції та спрощений інтерфейс для розробки програмного забезпечення. Його популярність обумовлена широким набором відкритих бібліотек, зручними прикладами та активною спільнотою. Це значно скорочує час розробки, особливо в проектах, які вимагають швидкої реалізації функціоналу з мінімальними зусиллями при інтеграції сторонніх компонентів. Arduino також має підтримку великої кількості сенсорів і модулів, що актуально у випадку реалізації систем з великою кількістю периферії або нетипових конфігурацій.

Альтернативою є використання ESP-IDF, що надає більш детальний контроль над апаратними ресурсами та дозволяє оптимізувати продуктивність критичних секцій коду. ESP-IDF забезпечує прямий доступ до регістрів периферійних пристроїв, розширені можливості налагодження та профілювання, а також підтримку багатозадачності на основі FreeRTOS. Однак застосування цього

framework потребує глибших знань архітектури мікроконтролера та значно збільшує час розробки.

З огляду на специфіку даної реалізації, Arduino Framework забезпечує достатній рівень функціональності для розробки стабільної та ефективної системи, не потребуючи надмірної складності, притаманної низькорівневим підходам. У контексті кваліфікаційної роботи, де основна увага зосереджена на загальній архітектурі, передачі даних та інтеграції з системою вентиляції, Arduino є раціональним вибором, що дозволяє реалізувати всі необхідні компоненти проекту на відповідному технічному рівні.

У розподіленій структурі взаємодії між мікроконтролерами ESP кожен пристрій виконує чітко визначену роль, що узгоджується з його апаратними можливостями. ESP8266 функціонує виключно як пасивний сканер Wi-Fi середовища в режимі promiscuous, фіксуючи MAC-адреси, рівні сигналу та часові мітки. Уся зібрана інформація передається ESP32-збирачеві, який виконує роль проміжного вузла агрегації та попередньої обробки. Ці мікроконтролери відповідають за локальну фільтрацію, усунення повторень і обчислення усереднених параметрів, зокрема рівня сигналу одного пристрою, зафіксованого кількаразово в межах короткого періоду часу.

Передача даних між ESP8266 і ESP32-збирачами реалізується або через послідовний UART-інтерфейс, або за допомогою бездротового протоколу ESP-NOW, залежно від фізичної конфігурації вузлів. Такий підхід дозволяє уникнути перевантаження локальної Wi-Fi мережі та забезпечує низьку затримку обміну. Кожен ESP32-збирач після формування структурованих агрегованих пакетів передає їх на головний ESP32, де вже здійснюється комплексна обробка: триангуляція позицій пристроїв на основі значень RSSI, просторове групування, та побудова теплової карти присутності.

Алгоритм збору RSSI будується на періодичному прослуховуванні Wi-Fi ефіру в режимі promiscuous, що дозволяє фіксувати кожен кадр з MAC-адресою передавача та відповідним рівнем сигналу. Частота сканування визначається як

компроміс між навантаженням на мікроконтролер та точністю даних: інтервал у межах 500–1000 мілісекунд забезпечує достатню щільність вибірки без перевантаження системи.

Для передачі даних між ESP-модулями використовується структурований формат повідомлень, орієнтований на компактність і швидкість обробки. Через обмеження пропускну здатності ESP-NOW, який є основним каналом комунікації, застосовується бінарне кодування з фіксованими полями. Структура пакету включає службову інформацію, ідентифікатор джерела, часову мітку та список спостережень. Кожне спостереження містить MAC-адресу пристрою в шістбайтовому вигляді та відповідне значення RSSI, представлене як 1 байт (зі знаком).

Усі значення MAC-адрес нормалізуються до верхнього регістру без роздільників на рівні приймача, що спрощує дедуплікацію. Для уникнення перевантаження каналу застосовується обмеження кількості спостережень у пакеті, а при необхідності – фрагментація з пріоритетом за величиною RSSI.

Визначення координат пристроїв у просторі здійснюється на основі отриманих значень RSSI з кількох ESP-вузлів. При наявності щонайменше трьох джерел даних, відомих за координатами, застосовується трилатерація – метод, що дозволяє оцінити положення об'єкта шляхом перетину сфер радіусами, пропорційними до сили сигналу. Для покращення точності у реальних умовах, де спостерігається значне затухання та відбиття сигналу, замість прямої трилатерації використовується її наближений варіант, такий як метод середніх або варіації градієнтної локалізації.

Для реалізації міжконтролерної комунікації використовується бібліотека `esp_now`, яка забезпечує ефективний бездротовий обмін даними без необхідності встановлення Wi-Fi-підключення. Цей протокол дозволяє мікроконтролерам напряму надсилати й отримувати пакети з мінімальними затримками, що критично для реактивності системи в умовах багатоточкової передачі. Для модулів, які мають потребу в одночасному доступі до локальної мережі,

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовується стандартна бібліотека `WiFi.h`, яка конфігурує станцію в режимі інфраструктури або одночасного функціонування з ESP-NOW за рахунок внутрішньої мультиплексії.

2.4 Система збору та обробки інформації з використанням мікроконтролерів

У реалізації сканерів Wi-Fi мереж на базі ESP8266 (Рисунок 2.4) основною задачею є періодичне виявлення активних пристроїв у радіусі дії та вимірювання рівня сигналу (RSSI) для кожного з них. Сканування виконується пасивним способом, що дозволяє отримати MAC-адреси пристроїв без встановлення з'єднання, а також мінімізує вплив на мережеве середовище. Сканер працює в циклі, використовуючи `WiFi.scanNetworks(true)` з параметром `true` для пасивного режиму, після чого обробляє знайдені мережі та формує масив об'єктів із потрібними параметрами: SSID, BSSID (MAC-адреса), RSSI та канал.



Рисунок 2.4 – Блок-схема роботи ESP8266

Ключовим моментом є фільтрація отриманих даних: відкидаються мережі з аномально високими чи низькими значеннями RSSI, а також ті, що з'являються одинично. Дані після сканування зберігаються у буфер, після чого відправляються по протоколу ESP-NOW до вузла-збирача. Передача реалізується з урахуванням обмеження розміру пакету (макс. 250 байт), тому реалізовано розбиття даних на порції або застосовується бінарне кодування.

На стороні ESP32-збирача (Рисунок 2.5) реалізована функція приймання повідомлень, збирання їх у буфер і передача далі до головного вузла. Кожне повідомлення обробляється асинхронно через callback функцію, яка оновлює локальну таблицю MAC-адрес із часовими мітками та поточними RSSI. Для зменшення навантаження на головний вузол, збирачі виконують часткову агрегацію: наприклад, обчислюють середній RSSI для кожного MAC за останні кілька секунд.



Рисунок 2.5 – Блок-схема роботи ESP32 (Збирач)

Головний вузол ESP32 виконує роль центрального обчислювального блоку (Рисунок 2.6). Він періодично отримує зібрані пакети з ESP32-збирачів, зберігає їх у структурі даних із часовою прив'язкою та запускає обчислення координат на основі алгоритмів RSSI-локалізації. Комунікація між збирачами і головним вузлом може виконуватися або також через ESP-NOW, або через TCP-сокет з використанням AsyncTCP. При використанні TCP передбачено контроль часу життя з'єднання, перепідключення у випадку втрати лінку та серіалізація даних через ArduinoJson для зручності парсингу.

Крім того, головний вузол відповідає за виявлення неактивних пристроїв (timeout по часу останнього пакету), запуск логіки локалізації та відправлення результатів в інтерфейс керування вентиляцією.

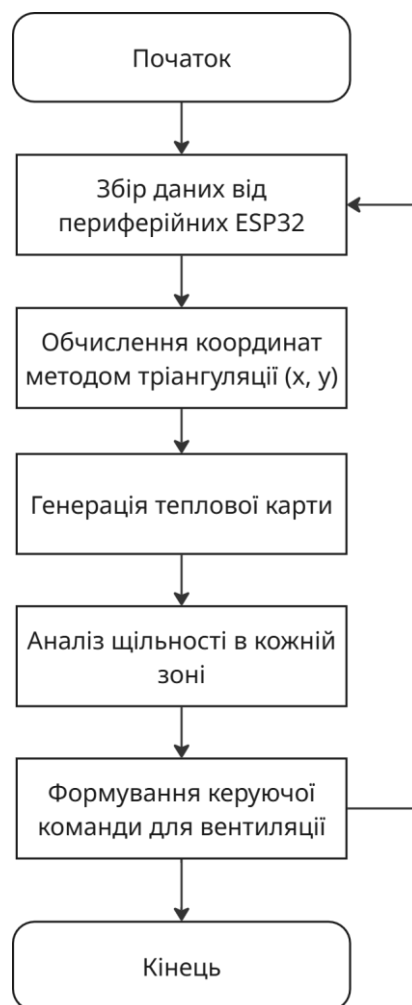


Рисунок 2.6 – Блок-схема роботи ESP32 (Головний)

Після збору сирих даних з кількох ESP, наступним етапом є попередня обробка значень RSSI, яка складається з фільтрації шуму та нормалізації вимірів для забезпечення стабільності вхідних даних у триангуляційному обчисленні.

Рівень прийнятого сигналу (RSSI) є змінним параметром, чутливим до ряду зовнішніх впливів, включаючи багатошляхове розповсюдження, наявність фізичних перешкод, зміну положення пристроїв у просторі, а також фонові перешкоди в бездротовому середовищі. З метою зменшення впливу короткотривалих відхилень на результати подальшої обробки, у системі реалізовано попереднє згладжування вхідних значень.

Кожен вузол-збирач зберігає для кожної унікальної MAC-адреси набір останніх N значень RSSI у структурі типу кільцевого буфера з обмеженим розміром. Нове значення, отримане з чергового пакета, додається до буфера з одночасним видаленням найстарішого запису. Типове значення параметра N становить від 5 до 10 вимірів, що забезпечує баланс між чутливістю до змін і стійкістю до флуктуацій.

Після оновлення буфера виконується обчислення середнього арифметичного значення RSSI, яке використовується як нормалізований показник для подальших обчислень. Такий підхід дозволяє зменшити вплив імпульсних коливань, знизити варіативність вхідних даних і підвищити стабільність обчислень координат пристроїв у системі триангуляції. Згладжені значення передаються до головного модуля для подальшої локалізації та формування карти щільності присутності.

Після первинного збору даних про рівні сигналу з різних приймальних вузлів здійснюється процедура їх нормалізації. Цей етап передбачає приведення значень потужності сигналу до уніфікованої шкали, що враховує індивідуальні особливості чутливості антен окремих модулів та їх розташування в просторі. Для цього до кожного отриманого значення застосовується поправковий коефіцієнт, який враховує відхилення вимірювання для конкретного вузла. Ці коефіцієнти

можуть бути задані вручну або визначені емпіричним шляхом під час попереднього калібрування системи.

На наступному етапі здійснюється оцінка просторового положення джерела сигналу. Для цього використовується підхід, заснований на моделюванні залежності між рівнем сигналу та відстанню до передавача. Ця залежність описується логарифмічною функцією, яка враховує загасання сигналу в умовах внутрішнього середовища. На основі вимірних рівнів сигналу з трьох або більше вузлів з відомими координатами, обчислюється орієнтовна відстань до джерела сигналу від кожного з них.

Після оцінки відстаней реалізується процедура локалізації. Застосовується метод найменших квадратів, який дозволяє визначити такі координати на площині, що мінімізують суму квадратів різниці між фактично вимірними та теоретично очікуваними відстанями до всіх задіяних вузлів. Цей підхід дозволяє здійснити апроксимацію положення пристрою з урахуванням неточностей вимірювання та характеристик середовища. Візуальне представлення логіки цього алгоритму подано на Рисунку 2.7.

Після визначення позицій усіх активних пристроїв, координати агрегуються у сіткову модель, що відповідає плану приміщення. На кожен клітинку накладається кількість пристроїв, що потрапили в її межі, з урахуванням часу останнього виявлення. Так формується теплова карта – матриця щільності присутності, яка оновлюється в реальному часі.

Карта може бути згладжена фільтрами (наприклад, Гаусовим) для візуальної інтерпретації та передана в інтерфейс керування вентиляцією, що дозволяє приймати рішення про активацію або посилення вентиляційних потоків у зонах з підвищеною присутністю.

Після формування теплової карти присутності дані передаються у блок логіки керування мікрокліматом, який відповідає за генерацію команд до системи вентиляції. Цей процес базується на попередньо заданих сценаріях адаптивного

регулювання, які враховують інтенсивність присутності, тривалість перебування людей у певній зоні та локальні перевищення порогових значень.

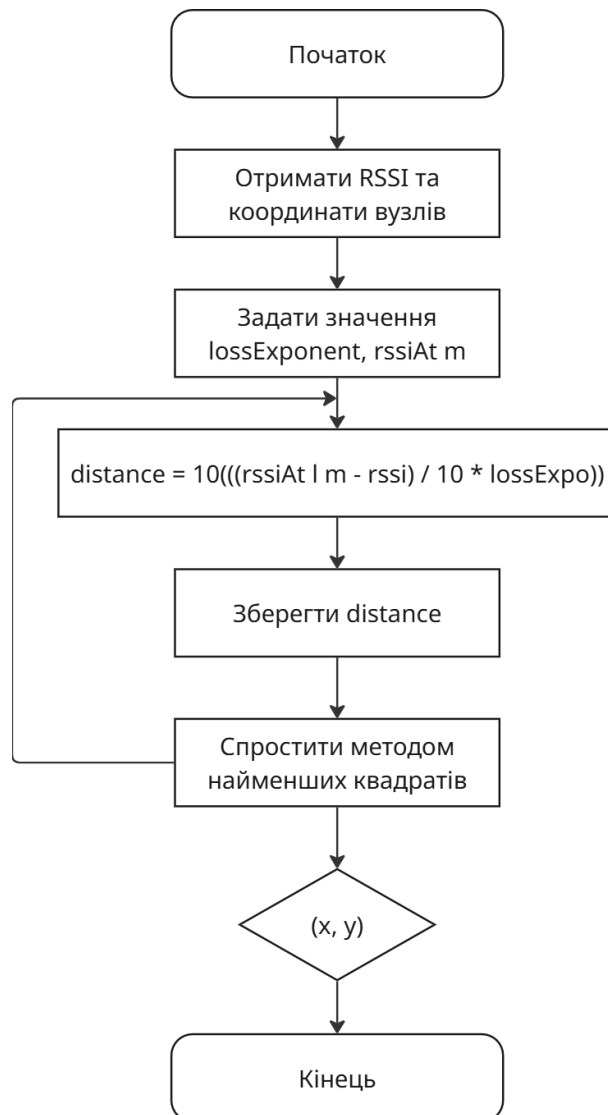


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритму визначення координат пристрою за методом найменших квадратів на головному ESP32

Інтеграція системи збору даних з модулем керування вентиляцією здійснюється через механізм аналізу розподілу присутності, отриманого в результаті триангуляції сигналів Wi-Fi пристроїв. Кожна зона простору, що фіксується на тепловій карті, асоціюється з відповідним логічним сегментом у системі вентиляції. Після нормалізації рівнів RSSI для кожного пристрою обчислюється кількість унікальних MAC-адрес у межах конкретного радіусу, яка

потім агрегується у вигляді щільності на квадратний метр. У разі виявлення щільності, що перевищує базовий пороговий рівень, головний ESP32 ініціює подачу керуючих сигналів на відповідні реле, які безпосередньо керують виконавчими механізмами вентиляційної системи для конкретної зони. Керування передбачає активацію або деактивацію реле для збільшення або зменшення інтенсивності вентиляції.

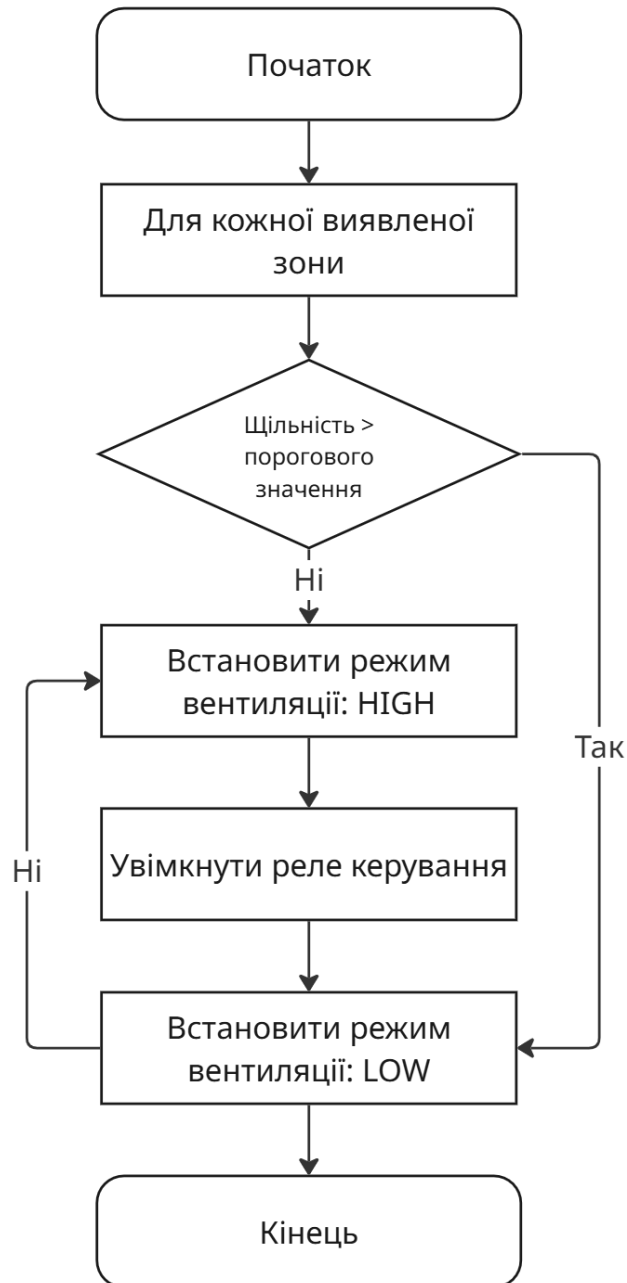


Рисунок 2.8 – Блок-схема керування вентиляцією на основі щільності Wi-Fi пристроїв

Система також формує буфер історичних змін, що дозволяє уникати реакції на короточасні пікові значення. Буфер використовується для усереднення значень протягом останніх N секунд, що дозволяє підвищити інерційність у зміні режимів вентиляції. Дані щодо стану реле (увімкнено/вимкнено) та, за можливості, параметри мікроклімату з додаткових сенсорів (наприклад, температура, якщо інтегровано) можуть фіксуватися для аналізу ефективності керування. У разі відсутності підтвердження зміни стану виконавчого механізму (якщо така перевірка передбачена конструкцією релейного модуля або додатковими давачами), система може повторно надсилати керуючий сигнал. Повна транзакція (команда на реле, час, зона) записується в лог-файл, що доступний через внутрішній веб-інтерфейс з обмеженим доступом. Забезпечується гальванічна розв'язка між логічними колами ESP32 та силовими колами керування вентиляційним обладнанням за допомогою оптоізоляції в релейних модулях.

Адаптація до змін топології приміщення реалізується через періодичне оновлення просторової конфігурації системи на основі аналізу змін у розподілі потужності сигналів. Для цього застосовується механізм динамічного моніторингу, при якому ESP32-збирачі регулярно фіксують зміни середніх та пікових значень RSSI від окремих пристроїв у своїй зоні видимості. Якщо спостерігаються відхилення, які перевищують заздалегідь визначений поріг, система ініціює процес переоцінки топологічної карти.

У рамках цього процесу виконується повторне групування точок вимірювання із застосуванням евклідової або косинусної метрики у просторі сигналів. Зміна кластерів відбувається шляхом ітеративного наближення до нових центрів мас сигналів, що дозволяє реконструювати модель з урахуванням нових характеристик середовища. Для зменшення флуктуацій, спричинених тимчасовими перешкодами або шумами, використовується згладжування у вигляді ковзного середнього або медіанного фільтру на рівні локальних буферів ESP-збирачів.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5. Висновки до другого розділу

У процесі розробки системи збору та аналізу даних на основі Wi-Fi сигналів для адаптивного керування вентиляцією було реалізовано архітектуру, що базується на розподіленій структурі взаємодії мікроконтролерів. Такий підхід забезпечує масштабованість, відмовостійкість та локалізовану обробку даних, що зменшує навантаження на центральний вузол і дозволяє системі функціонувати в умовах часткової втрати з'єднання між окремими компонентами. Розподілений характер дозволяє гнучко адаптуватися до змін у мережевій топології або геометрії простору без необхідності повної реконфігурації всієї системи.

У ролі вузлів сканування було обрано мікроконтролери ESP8266, які відзначаються низьким енергоспоживанням, невеликою вартістю та достатньою функціональністю для пасивного виявлення пристроїв у радіоєфірі. Для задач агрегації та аналізу використано ESP32, що мають більший обсяг пам'яті, двоядерний процесор і вбудовані засоби бездротового зв'язку, зокрема ESP-NOW, які забезпечують низьколатентну взаємодію між вузлами.

Система демонструє високий рівень енергоефективності за рахунок оптимізації режимів живлення та обмеження частоти передачі даних. Точність просторової локалізації забезпечується за рахунок комбінації RSSI-аналізу, фільтрації шумів та алгоритмів триангуляції, що дозволяє реконструювати розподіл присутності пристроїв у приміщенні з прийнятною просторовою роздільною здатністю. За рахунок модульної побудови система здатна адаптуватися до змін у навантаженні – наприклад, при збільшенні кількості клієнтських пристроїв або зон моніторингу – шляхом додавання нових вузлів без порушення цілісності логіки роботи або зменшення продуктивності.

Попри функціональну завершеність реалізованої системи, її ефективність у задачах локалізації обмежується характерними для Wi-Fi-технологій флуктуаціями потужності сигналу та залежністю RSSI-вимірів від фізичних перешкод, відбиттів і присутності людей. Це зумовлює певну похибку при

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначенні просторового положення пристроїв, особливо в складних приміщеннях із великою кількістю відбивних поверхонь або змінною геометрією. Також наразі система оперує лише з MAC-адресами, що обмежує точність і можливість ідентифікації без додаткових зовнішніх джерел даних.

Можливими напрямками подальшого удосконалення запропонованої кіберфізичної системи є інтеграція додаткових сенсорних каналів, зокрема інфрачервоних датчиків присутності, термодатчиків або сенсорів якості повітря. Це дозволить не лише підвищити достовірність детекції присутності у зонах з низькою щільністю Wi-Fi-пристроїв, а й забезпечити багатоканальний підхід до оцінки завантаженості простору. Такий підхід сприятиме контекстно-залежному регулюванню параметрів мікроклімату відповідно до сукупності факторів – присутності, температури, вологості та концентрації CO₂. Додатково, впровадження комбінованих методів локалізації, що об'єднують сигнали Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE) та інерційну навігацію (IMU), дозволить зменшити похибку позиціонування та підвищити стабільність системи в умовах значного радіочастотного шуму або обмеженої кількості точок спостереження.

Крім функціональних розширень у межах системи вентиляції, перспективним є розгляд можливостей інтеграції з іншими підсистемами інтелектуального середовища супермаркету. Наприклад, координація з системами динамічного освітлення може забезпечити адаптацію яскравості в зонах з підвищеною активністю, а взаємодія з системами охоронного моніторингу – виявлення нетипових маршрутів пересування. З точки зору бізнес-аналітики, система може надати дані для оцінки ефективності планування торгових площ, логіки розміщення товарів або часових піків відвідуваності, що відкриває можливість її використання як складової інструментів клієнтської аналітики. Усі ці напрями вказують на потенціал масштабування розробленої системи до рівня багатофункціональної платформи для підтримки прийняття рішень в управлінні комерційною нерухомістю.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Масштабованість системи обмежується пропускнуою здатністю каналу ESP-NOW та обчислювальними ресурсами центрального ESP32. Теоретична максимальна кількість одночасно відстежуваних пристроїв становить близько 200-300 унікальних MAC-адрес при збереженні прийнятної швидкості оновлення теплової карти. При перевищенні цього рівня спостерігається зростання затримок обробки та зниження точності локалізації через переповнення буферів та збільшення інтервалів між циклами обчислень. Для розширення системи на більші приміщення або збільшення щільності сенсорних точок необхідно застосовувати ієрархічну архітектуру з кількома координуючими вузлами та розподіленою обробкою даних.

Запропонована система може забезпечити економічну доцільність впровадження за рахунок зниження енергоспоживання вентиляційного обладнання шляхом його адаптивного використання, орієнтованого на реальне навантаження приміщення. Покращення мікроклімату в зонах підвищеної концентрації відвідувачів сприятиме комфортному перебуванню та потенційному збільшенню тривалості перебування клієнтів у торговому залі. Окрім того, зменшення інтенсивності роботи вентиляційної системи в непікові періоди має позитивний екологічний ефект через зниження викидів CO₂ та зменшення загального споживання енергії.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Апаратне розгортання та підключення до виконавчих механізмів

Фізична архітектура системи передбачає використання трьох пар мікроконтролерів ESP8266 та ESP32, які розміщуються на фіксованих позиціях у межах площини торгового залу (Рисунок 3.1). Кожна пара функціонує як локальний вузол збору даних, де ESP8266 виконує пасивне сканування Wi-Fi середовища, а ESP32 приймає та агрегує зібрану інформацію. Розташування пар вибрано з урахуванням рівномірного покриття простору та можливості тристоронньої локалізації мобільних пристроїв за рівнем сигналу.

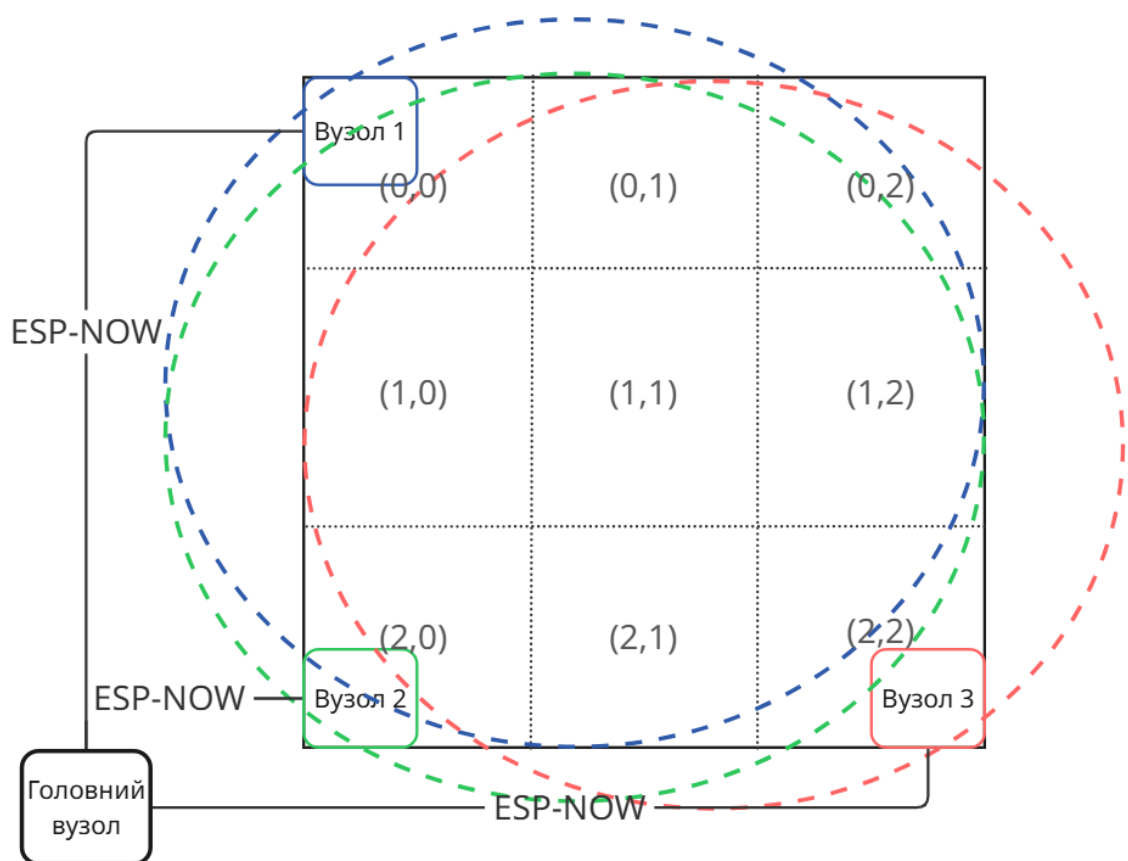


Рисунок 3.1 – Графічна схема фізичного розташування вузлів

Кожен вузол закріплюється на висоті приблизно 2,5 метра над рівнем підлоги з кутом огляду, орієнтованим у центр контрольованої зони. Вузли розміщуються по периметру приміщення у вершинах умовного трикутника або прямокутника, що забезпечує геометричну основу для обчислення координат за допомогою трилатерації. Відстань між вузлами становить від 8 до 15 метрів залежно від площі приміщення, розрахована так, щоб зменшити взаємні завади й забезпечити стабільну фіксацію RSSI у зоні перекриття покриття кожної трійки.

Для кожного вузла визначено унікальний ідентифікатор, який закладається у прошивку ESP32 і використовується у подальшій структурі повідомлень. Таблиця відповідності між ідентифікаторами вузлів та логічними секторами приміщення дозволяє системі вентиляції співвідносити координати пристроїв з конкретними зонами для управління повітряними потоками.

Для реалізації апаратної частини системи використано серійні модулі ESP32 DevKit V1 та ESP8266 NodeMCU. Мікроконтролери обрано з урахуванням доступності, підтримки бездротових протоколів, можливості роботи в енергозалежному середовищі та відповідності вимогам до обсягу оперативної пам'яті та пропускної здатності при передаванні даних. ESP8266 NodeMCU використовується у мінімальній конфігурації без додаткових сенсорів, лише для сканування ефіру у режимі promiscuous, тоді як ESP32 DevKit V1 виконує обробку, агрегацію та зв'язок із головним контролером.

Обидва типи плат живляться від джерела постійного струму з номінальною напругою 5 В. Мікроконтролер ESP8266 NodeMCU має вбудований стабілізатор напруги, що забезпечує внутрішнє пониження до рівня 3,3 В, необхідного для стабільної роботи ядра. Живлення подається через вхід VIN, що дозволяє використовувати централізовану шину живлення без потреби у додаткових зовнішніх стабілізаторах. На стороні ESP32 живлення також здійснюється через VIN або USB-інтерфейс, при цьому вбудований стабілізатор DevKit-модуля забезпечує необхідний рівень напруги для внутрішніх компонентів. У випадках автономного живлення від акумуляторів допускається використання зовнішніх

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стабілізаторів для обох мікроконтролерів, за умови дотримання вхідних параметрів.

Обмін даними між ESP8266 і ESP32 в межах одного вузла реалізовано виключно за допомогою бездротового протоколу ESP-NOW, тому фізичне з'єднання між модулями не передбачене. На етапі початкового налагодження використовується вбудований USB-UART інтерфейс NodeMCU, що забезпечує безпосередню прошивку модуля через Arduino IDE без додаткових перетворювачів. У виробничій конфігурації мікроконтролери розміщуються на макетних або друкованих платах з виведеними лініями живлення, заземлення та, за потреби, додатковими діагностичними інтерфейсами.

До головного ESP32 підключено виконавчий елемент – модуль керування вентиляцією. Залежно від вимог системи, передбачено два варіанти реалізації: у випадку дискретного керування використовується твердотільне або релейне реле з оптоізоляцією (Рисунок 3.2), що підключається до GPIO-контакту ESP32 і спрацьовує при подачі логічного сигналу високого рівня. У випадку аналогового регулювання (наприклад, у приводах заслінок з PWM-входом) використовується вивід з апаратною підтримкою широтно-імпульсної модуляції. Усі лінії з'єднань мають резистори обмеження струму та при необхідності – діоди захисту від зворотної полярності.

Живлення системи (Рисунок 3.3) реалізовано з урахуванням вимог до стабільності напруги, споживання струму кожним вузлом та умов експлуатації в середині торгового приміщення. Для всіх модулів використано централізоване джерело живлення постійного струму на 5 В із номінальним струмом 3 А. Така потужність забезпечує одночасне живлення однієї пари ESP8266 та ESP32, з урахуванням пікових навантажень під час передавання даних через ESP-NOW та під час активації логіки керування.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

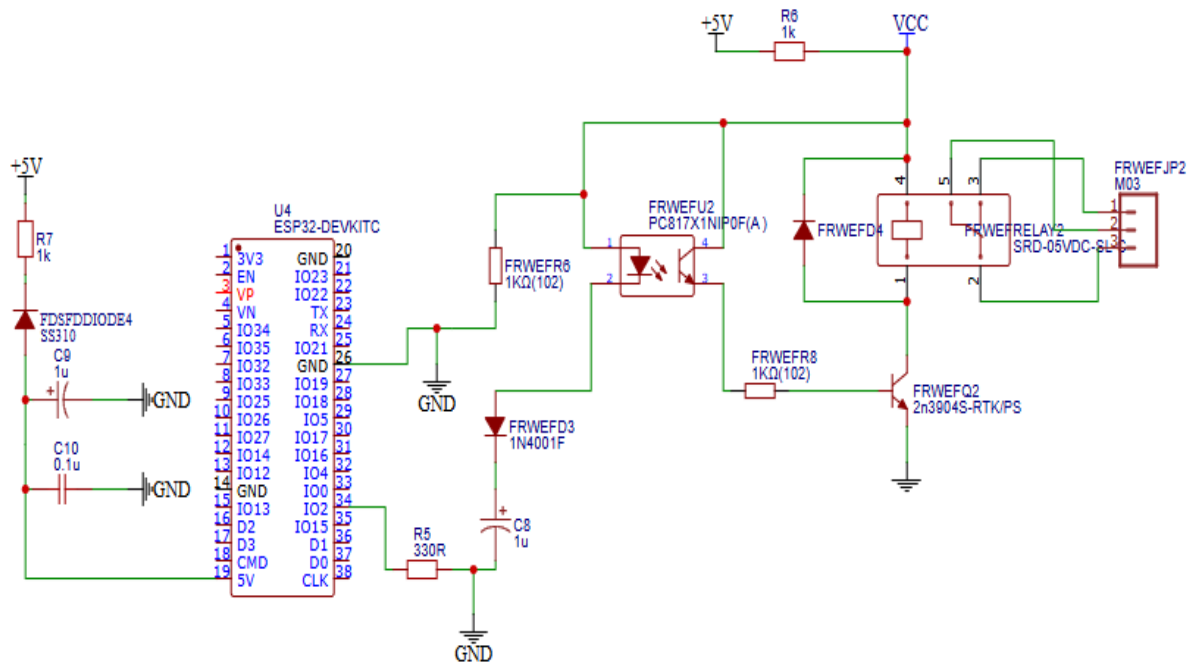


Рисунок 3.2 – Приципова схема підключення реле до головного ESP32

Мікроконтролери ESP8266 NodeMCU живляться безпосередньо через вхід VIN, який дозволяє підключення до загальної лінії 5 В. Вбудований стабілізатор модуля забезпечує необхідну робочу напругу 3,3 В для ядра мікроконтролера. Аналогічно, ESP32 DevKit V1 може житися як через USB-конектор за наявності зовнішнього адаптера, так і через пін VIN за умови стабілізованої подачі 5 В. У кожному випадку передбачено вбудовану стабілізацію напруги на рівні плати, з використанням інтегрованих стабілізаторів (наприклад, CP2102 або AMS1117), що забезпечують коректне функціонування внутрішніх компонентів контролера.

Для кожного модуля передбачено захист від перенапруги та зворотної полярності: діоди типу Schottky встановлюються на вході лінії живлення, а електролітичні та керамічні конденсатори (значення 10 μF та 100 nF відповідно) розміщуються поруч із виводами живлення контролера для компенсації пульсацій та згладжування імпульсних навантажень. Додатково для ESP8266 реалізовано фільтрацію живлення шляхом введення феритового дроселя перед стабілізатором, що дозволяє зменшити електромагнітні завади при роботі в режимі високої мережевої активності.

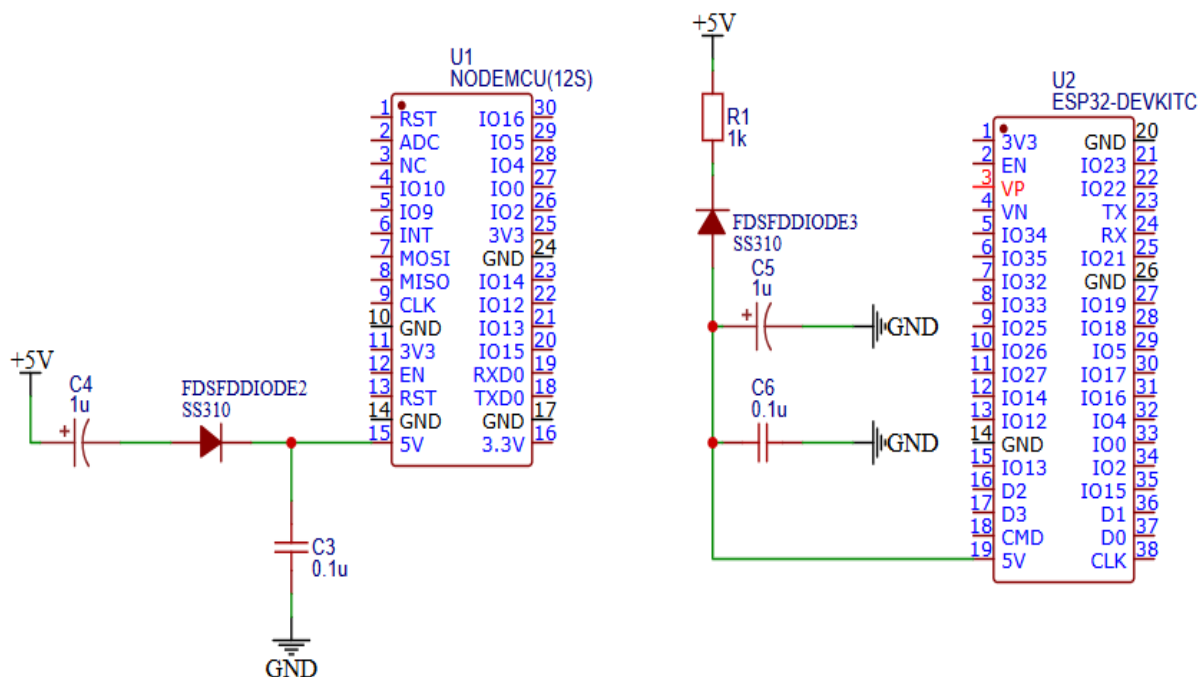


Рисунок 3.3 – Приципова схема живлення ESP8266 NodeMCU та ESP32 DevKit

V1

У випадках живлення системи від акумуляторів застосовуються Li-Ion елементи формату 18650 зі вбудованим захистом, підключені через плату зарядки TP4056 з виходом на стабілізатор. При живленні всіх вузлів від єдиного джерела передбачається окрема лінія для кожної пари мікроконтролерів, з обов'язковим розгалуженням через гвинтову клему або конектор типу XT30. Таке розділення дозволяє зменшити просідання напруги при пускових струмах і уникнути падіння живлення під час одночасної активності вузлів.

Передача керуючих сигналів до вентиляційного обладнання здійснюється з головного мікроконтролера ESP32, який виконує обчислення необхідного рівня інтенсивності повітрообміну та формує відповідну команду. Реалізація підключення до виконавчого пристрою залежить від типу використовуваного обладнання, однак у межах даної реалізації передбачено використання цифрового реле, керованого логічним сигналом рівня 3,3 В.

Для інтерфейсу керування обрано модуль на базі твердотілого або електромеханічного реле з оптоізоляцією, зокрема HL-52S або аналогічний, сумісний з логічними рівнями ESP32. Керування здійснюється через один з доступних виводів GPIO, налаштований у режимі виходу. При подачі високого рівня (логічна одиниця) на вхід IN реле відбувається замикання вихідного кола, яке підключене до вентиляційного блока. У випадку необхідності керування декількома вентиляційними каналами або ступеневим регулюванням, реалізується мультививідна схема з використанням GPIO-матриці або І²С-реле.

Реле живиться від окремої гілки 5 В, ізольованої від логіки ESP32 через оптопару. Це дозволяє виключити взаємний вплив імпульсних перешкод або пускових струмів на мікроконтролер. У розрив лінії керування включено резистор обмеження струму (330–470 Ом), а також додатковий фільтрувальний конденсатор (100 nF) для зменшення імпульсних завад. У випадку застосування широтно-імпульсного керування (PWM), вихідний сигнал формується з фіксованою частотою 1–3 кГц і змінним робочим циклом відповідно до рівня вентиляції, що визначається логікою у головному ESP32.

Реалізована схема передбачає можливість як прямого керування, так і комутації живлення виконавчого пристрою через контакт реле. В обох випадках забезпечено гальванічну розв'язку між логікою обробки і силовою частиною, що підвищує надійність та безпеку системи. Усі лінії керування мають фізичну маркування відповідно до призначення, а схема з'єднань представлена у вигляді структурної діаграми із зазначенням логічних рівнів, типів сигналів та номіналів елементів.

Для забезпечення відмовостійкості передбачено програмну ініціалізацію стану GPIO після перезавантаження ESP32, що запобігає випадковій активації виконавчого пристрою у момент включення живлення.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Програмна реалізація та алгоритмічна обробка даних

Програмна реалізація скануючого пристрою на базі мікроконтролера ESP8266 здійснюється в середовищі розробки Arduino IDE. Для доступу до низькорівневих можливостей Wi-Fi модуля використано бібліотеку ESP8266WiFi.h, яка дозволяє керувати мережевим інтерфейсом у режимі станції, а також підключати модуль до роботи у проміскуїтному режимі. Окрім стандартних бібліотек Arduino, у прошивці використовується espnow.h для ініціалізації ESP-NOW та реалізації бездротового обміну повідомленнями.

Сканування трафіку здійснюється за допомогою прямого доступу до Wi-Fi MAC-рівня через виклики, доступні у фреймворку Arduino для ESP8266. У коді передбачено ініціалізацію Wi-Fi у режимі WIFI_STA без прив'язки до жодної точки доступу. Після налаштування конфігурації активується прослуховування каналів за допомогою `wifi_set_promiscuous_rx_cb(callback)`, де `callback` – це функція обробки вхідних кадрів. У тілі зворотного виклику проводиться фільтрація кадрів типу `probe request`, витяг даних із полів MAC-адреси та значення потужності сигналу (RSSI), після чого відбувається їх серіалізація.

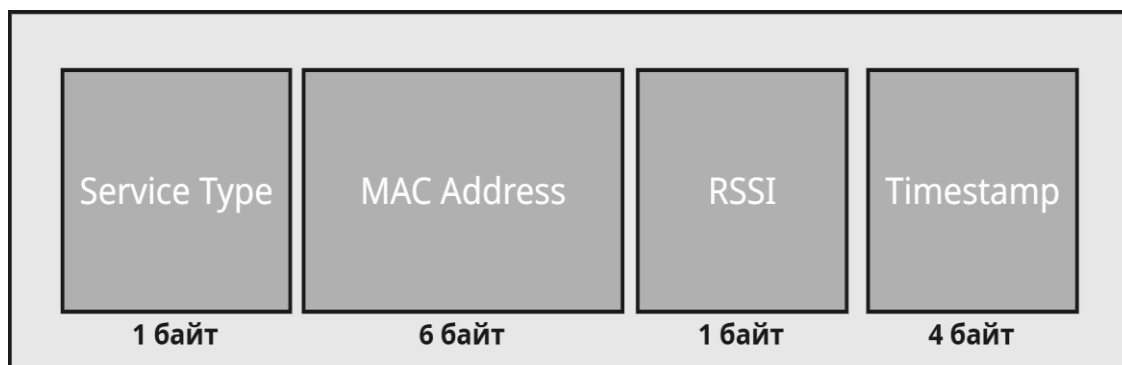
Важливою частиною логіки є попередня фільтрація дублікатів – пристрої, що нещодавно вже фіксувалися, тимчасово ігноруються для зменшення надлишкових передач. Для цього створено кільцевий буфер, що зберігає MAC-адреси за останній інтервал часу (приблизно 5 секунд). У разі виявлення нової адреси створюється повідомлення, що включає службовий заголовок, MAC-ідентифікатор, значення RSSI, а також часову мітку, отриману з функції `millis()`.

Передача повідомлень здійснюється через ESP-NOW, який попередньо ініціалізується функцією `esp_now_init()`. У конфігурації передбачено встановлення адреси приймача, зазвичай парного ESP32, через `esp_now_add_peer(...)`. Передача відбувається асинхронно, а підтвердження доставки контролюється зворотним викликом `OnDataSent`, де реєструються

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

успішні або помилкові спроби. Повторна передача реалізована з використанням таймерного інтервалу без блокування основного циклу.

Увесь пакет (Рисунок 3.4) має довжину 12 байт. Він передається як бінарний блок без додаткової інкапсуляції або кодування. Така структура забезпечує компактність і дозволяє передавати до 10 повідомлень на секунду без перевантаження радіоканалу.



Загальний розмір пакету: 12 байт

Рисунок 3.4 – Схема структури пакету

У основному циклі `loop()` перевіряється лише стан черги повідомлень, наявність нових записів у буфері та тригер на передачу. Також періодично оновлюється Watchdog таймер, а при переповненні буфера старі записи заміщуються новими без порушення цілісності загального потоку.

Програмна частина ESP32-збирача реалізована в середовищі Arduino IDE з використанням бібліотек `esp_now.h` та `WiFi.h`. Основне призначення пристрою – приймання бінарних повідомлень від відповідного ESP8266, їх валідація, попередня обробка та передача агрегованих даних до головного ESP32. У структурі прошивки застосовується модель подій: основна логіка реалізована у зворотному виклику `OnDataRecv`, прив'язаному до подій прийому повідомлень через ESP-NOW.

Після ініціалізації Wi-Fi-інтерфейсу в режимі `WIFI_STA` виконується реєстрація функції обробки вхідних пакетів та конфігурація MAC-адреси вузла-джерела. Кожен ESP32 отримує лише повідомлення з фіксованого вузла ESP8266,

що виключає необхідність у фільтрації за джерелом. Прийняте повідомлення перевіряється на відповідність структурі, зокрема перевіряється довжина пакету та допустимі значення RSSI. Після валідації дані розпаковуються в локальну структуру, яка включає MAC-адресу, RSSI та часову мітку.

У межах одного циклу спостереження всі прийняті MAC-адреси зберігаються у кільцевому буфері з фіксованою ємністю. У випадку багаторазового фіксування однієї MAC-адреси протягом інтервалу агрегації, значення RSSI усереднюється за допомогою алгоритму ковзного середнього. Для кожного запису додатково зберігається лічильник спостережень, що дозволяє коригувати вагу при передаванні. Буфер реалізовано у вигляді масиву структур, кожна з яких має фіксовану довжину та індексується за хешем MAC-адреси.

Після завершення агрегування дані передаються на головний ESP32. Перед передачею формується бінарне повідомлення, у якому кожен запис містить MAC-адресу, усереднене значення RSSI, та час останнього спостереження. Повідомлення доповнюється службовим заголовком із вказанням ідентифікатора вузла-відправника та кількості записів у тілі пакету. Загальний розмір пакета не перевищує 250 байт, що відповідає технічним обмеженням ESP-NOW на ESP32. Передача виконується через `esp_now_send(...)`, де адреса головного контролера задана під час ініціалізації.

Для обробки помилок надсилання реалізовано механізм підтвердження доставки, у якому зворотний виклик `OnDataSent` фіксує статус кожного повідомлення. У разі невдалої передачі ініціюється повторна відправка з затримкою 50 мс. Повторна передача виконується не більше двох разів, після чого запис позначається як втрачене значення.

Основний цикл мікроконтролера виконує лише обслуговування черги передач, оновлення інтервалів таймерів та контроль Watchdog. Усі операції обробки пакунків, агрегації та передавання реалізовано у форматі подій, що дозволяє мінімізувати навантаження на процесор ядра та забезпечує енергетичну ефективність вузла.

Головний мікроконтролер ESP32 виконує функції централізованої обробки даних, отриманих від периферійних збирачів, та формує керуючі сигнали для системи вентиляції. Програмна реалізація побудована у середовищі Arduino IDE із використанням бібліотек `esp_now.h`, `WiFi.h`, `ArduinoJson.h` та `esp_task_wdt.h`. Передача даних від вузлів-збирачів відбувається через ESP-NOW, тому з моменту запуску пристрою виконується ініціалізація протоколу, а також додавання MAC-адрес усіх відомих периферійних ESP32 у таблицю приймання.

Кожне вхідне повідомлення приймається у функції `OnDataRecv`, де проводиться первинна перевірка розміру пакета та службових заголовків. Дані розпаковуюються у структуру, яка включає MAC-адресу відстежуваного пристрою, усереднене значення RSSI та часову мітку. Усі записи заносяться у двовимірну таблицю, де кожен рядок відповідає унікальному ідентифікатору пристрою, а стовпці – окремим вузлам-збирачам. Така структура дає змогу зберігати незалежні значення RSSI з кожного з трьох джерел.

Після накопичення достатньої кількості вимірювань (мінімум три незалежних значення RSSI на MAC-адресу) активується процедура обчислення положення пристрою. Для визначення координат використовується трилатерація із перетворенням значень RSSI у відстані за допомогою логарифмічної моделі загасання сигналу. У модулі реалізовано функцію, яка розв'язує систему рівнянь, побудовану на основі відомих координат вузлів-збирачів та отриманих відстаней, з використанням методу найменших квадратів.

Результатом обчислення є координати у межах площини, які далі прив'язуються до умовної сітки секторів, попередньо визначених на рівні апаратного розгортання. У кожному секторі накопичується лічильник присутності пристроїв, що використовується для формування теплової карти поточної щільності. На основі порівняння отриманих значень з пороговими параметрами запускається алгоритм прийняття рішень щодо активації вентиляції у відповідному секторі. Керуючий сигнал формується у вигляді об'єкта JSON, який містить індекс сектора та відсоткову інтенсивність вентиляції.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для передачі сигналу використовується вбудований інтерфейс GPIO, підключений до керуючого модуля реле або вентиляційного контролера. Якщо система підтримує апаратне PWM-регулювання, значення інтенсивності конвертується у відповідний робочий цикл. У випадку цифрового вводу використовується шкала, поділена на діапазони, кожен з яких відповідає конкретному режиму роботи вентилятора. Команда передається не одразу після обчислення, а після перевірки стабільності ситуації в межах 5–10 секунд, що зменшує кількість перемикань при незначних флуктуаціях.

Впродовж усього часу роботи пристрій веде журнал ключових подій, включаючи кількість прийнятих пакетів, кількість успішних локалізацій, а також час відгуку з моменту фіксації пристрою до подачі керуючої команди. Усі логічні блоки реалізовані з урахуванням обмежень по пам'яті та з використанням статичних структур даних. Для захисту від зависань застосовується вбудований Watchdog Timer, який оновлюється з кожним циклом обробки.

3.3 Висновки до третього розділу

У межах реалізації програмно-апаратної частини системи здійснено повноцінне розгортання децентралізованої архітектури збору та обробки даних, що ґрунтується на використанні мікроконтролерів ESP8266 та ESP32 з бездротовим протоколом обміну ESP-NOW. На рівні кожного вузла реалізовано незалежну логіку, яка забезпечує стабільну роботу при тривалому пасивному скануванні Wi-Fi середовища, передачу даних у бінарному форматі, локальну агрегацію та багатоетапну маршрутизацію повідомлень до центрального модуля.

Програмна логіка для ESP8266 реалізує перехоплення кадрів типу probe request у пасивному режимі, без підключення до Wi-Fi мережі. Це дозволяє зменшити навантаження на бездротовий канал і забезпечити енергоефективну роботу пристрою. На стороні ESP32-збирачів реалізовано буферизацію, згладжування значень RSSI та серіалізацію зібраної інформації з урахуванням

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допустимого розміру повідомлень для передачі через протокол ESP-NOW. Центральний контролер виконує обробку прийнятих даних, формує матрицю рівнів сигналу, здійснює обчислення координат джерел на основі трилатерації та керує виконавчими елементами системи вентиляції відповідно до заданих умов.

Вся логіка реалізована з урахуванням обмежень ресурсів мікроконтролерів, а також технічних особливостей бездротової передачі в умовах багатопроменевого середовища. Структура взаємодії між вузлами відповідає вимогам розподіленої системи та забезпечує можливість масштабування без перегляду загальної логіки роботи. Реалізовані рішення формують програмну основу для функціонування кіберфізичної системи керування вентиляцією в умовах динамічного просторового навантаження.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

ВИСНОВКИ

У межах виконання кваліфікаційної роботи було спроектовано кіберфізичну систему адаптивного керування вентиляцією в супермаркетах, що функціонує на основі аналізу присутності відвідувачів шляхом обробки Wi-Fi сигналів мобільних пристроїв. Архітектура рішення побудована із використанням мікроконтролерів ESP32 та ESP8266, організованих у розподілену мережу датчиків, які виконують функції сканування мережевого трафіку, попередньої обробки сигналу, передачі структурованих даних та централізованого аналізу. Передача інформації між модулями реалізована за допомогою протоколу ESP-NOW, що забезпечує бездротову взаємодію між вузлами системи з низьким енергоспоживанням.

Програмна частина реалізована з урахуванням необхідності згладжування флуктуацій рівня сигналу та уніфікації RSSI за допомогою калібрувальних коефіцієнтів, визначених емпіричним шляхом. В основі обчислень положення пристроїв використано модель втрати потужності в середовищі, що дозволяє здійснити трилатерацію — визначення координат на основі сигналів з трьох або більше точок. На основі цих координат формується теплова карта, яка структурно відображає просторову щільність присутності пристроїв. Ця інформація прив'язується до логічних зон приміщення, що дозволяє виконати зональне керування інтенсивністю повітрообміну.

Керуючі дії реалізовано шляхом подачі сигналів на релейні модулі, які активують або деактивують відповідні виконавчі пристрої вентиляційної системи. Алгоритм враховує як абсолютне значення щільності пристроїв у зоні, так і динаміку її зміни, що забезпечує адаптивне реагування на реальні умови. Буферизація та усереднення історичних даних дозволяють уникати реакції на імпульсні флуктуації та підвищити стабільність функціонування системи в умовах змінного навантаження.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система враховує специфіку приміщень супермаркетів, дозволяючи регулювати повітрообмін з урахуванням зонального навантаження та пікових періодів відвідуваності. Анонімізація MAC-ідентифікаторів реалізована через хешування з використанням криптографічних алгоритмів, що забезпечує відповідність вимогам щодо захисту персональних даних. Гальванічна розв'язка між логічними колами та силовими компонентами підвищує рівень безпеки при взаємодії з виконавчими пристроями.

У ході реалізації системи було проаналізовано її потенційні обмеження та переваги. До основних переваг слід віднести низьку вартість впровадження порівняно з комерційними аналогами, відносну простоту обслуговування та гнучкість масштабування для різних типів приміщень. Водночас одним з обмежень є складність використання в деяких юрисдикціях через особливості законодавства щодо обробки MAC-ідентифікаторів, які можуть трактуватись як персональні дані. Цей фактор потребує додаткового аналізу можливостей легалізації або впровадження технічних заходів щодо повної анонімізації інформації.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Enlighted's Advanced Wireless Lighting Controls. URL: <https://tactiklighting.com/enlighted-sensors/> (дата звернення: 03.06.2025).
2. Контролер ESP32 WiFi+Bluetooth. URL: <https://diyshop.com.ua/ua/kontroller-esp-32-wifiblueetooth-type-c> (дата звернення: 03.06.2025).
3. NodeMCU (ESP8266 WiFi Programming & Development Kit) CH340 URL: <https://store.fut-electronics.com/products/copy-of-nodemcu-esp8266-wifi-programming-development-kit-cp2102> (дата звернення: 03.06.2025).
4. Pasic R., Kuzmanov I., Atanasovski K. ESP-NOW communication protocol with ESP32. *Journal of Universal Excellence*. 2021. № 6.1. P. 53–60.
5. Eridani D., Rochim A. F., Cesara F. N. Comparative performance study of ESP-NOW, Wi-Fi, bluetooth protocols based on range, transmission speed, latency, energy usage and barrier resistance. *2021 international seminar on application for technology of information and communication (iSemantic)*, 2021. IEEE. P. 322–328. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/iSemantic52711.2021.9573246>.
6. Koushik M. S., Srinivasan M., Lavanya R., Alfred S. Design and Development of Wireless Sensor Network based data logger with ESP-NOW protocol. *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. 2021. IEEE. P. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/I2CT51068.2021.9417914>.
7. Cameron N. Esp32 microcontroller. *ESP32 Formats and Communication: Application of Communication Protocols with ESP32 Microcontroller*. Berkeley, CA: Apress, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9376-8_1.
8. Oner V. O. *Developing IoT Projects with ESP32: Automate your home or business with inexpensive Wi-Fi devices*. Packt Publishing Ltd, 2021.
9. Cameron N. *ESP32 Formats and Communication*. Berkeley, CA: Apress, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9376-8>.
10. de Oliveira S. *Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi 2a edição: Atualizado para ESP32*. Novatec Editora, 2021.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. García Martínez D. Comparativa entre xips WiFi de baix cost: ESP32 vs ESP8266: aplicació a una xarxa domòtica. Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2021.

12. Samal L., Bute P. Wireless network for Industrial application using ESP32 as Gateway. *2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2023. IEEE. P. 1–5.

13. Henry S., Christian J. A. Absolute triangulation algorithms for space exploration. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2023. № 46.1. P. 21–46. DOI: <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2205.12197>.

14. Dzwigol H. Research methodology in management science: Triangulation. *Virtual Economics*. 2022. № 5.1. P. 78–93. DOI: [https://doi.org/10.34021/ve.2022.05.01\(5\)](https://doi.org/10.34021/ve.2022.05.01(5)).

15. Wong W. K., Lease B. A., Lim C. I., Jo H. S., Juwono F. H. RSSI-Based Distance Triangulation Using A Low-Cost Transceiver: Towards Robust Localization in Agrorobotics. *2024 10th International Conference on Smart Computing and Communication (ICSCC)*, 2024. IEEE. P. 28–32. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSCC62041.2024.10690328>.

16. Kharmeh S. A., Natsheh E., Nasrallah R., Masri M. Triangulation-Enhanced WiFi-Based Autonomous Localization and Navigation System: A Low-Cost Approach. *2024 22nd International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, 2024. IEEE. P. 69–74. DOI: <https://doi.org/10.1109/REM63063.2024.10735691>.

17. Rio D. M. P. Object tracking in industrial environments. Master's thesis, Universidade do Minho (Portugal), 2023.

18. Şeker Ö., Şahin B., Akdoğan T., Dalkılıç G. A Physical Tracking of ESP32 IoT Devices with RSSI Based Indoor Position Calculation. *Journal of Millimeterwave Communication, Optimization and Modelling*. 2024. № 4.1. P. 13–16.

19. Çetin A., Işikli E., Türk A. S. RF Communication and RSSI Based Location Detection with Trilateration Method. *2024 32nd Signal Processing and*

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Communications Applications Conference (SIU), 2024. IEEE. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIU61531.2024.10601015>.

20. Biju R. N., Akhil K. M., Sinha S. Rssi based device monitoring with ieee 802.15 in wireless sensor network. *2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 2022. IEEE. P. 503–508. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIRCA54612.2022.9985558>.

21. Irsyad M. A., Chadirin Y. Designing A Room Comfort Measurement Tool Based on ESP32 Microcontroller for Thermal, Auditory and Visual Comfort. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. T. 1359, № 1. IOP Publishing. C. 012024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1359/1/012024>.

22. Izadyar N., Miller W. Ventilation strategies and design impacts on indoor airborne transmission: A review. *Building and environment*. 2022. № 218. P. 109158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109158>.

23. Garcia-Ruiz M. A., Mancilla P. C. S. *DIY Microcontroller Projects for Hobbyists: The ultimate project-based guide to building real-world embedded applications in C and C++ programming*. Packt Publishing Ltd, 2021.

24. Rak F., Wiora J. Comparison of ESP programming platforms. *Computer science and information technologies*. 2021. № 2.2. P. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.11591/csit.v2i2.p77-86>.

25. Plauska I., Liutkevičius A., Janavičiūtė A. Performance evaluation of c/c++, micropython, rust and tinygo programming languages on esp32 microcontroller. *Electronics*. 2022. № 12.1. P. 143. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12010143>.

26. Chandra Y. I., Sjafrina F., Irawati D. R., Riastuti M., Purba W. S. B. Design of air pollution measurement detection using microcontroller nodemcu esp 8266 based on iot. *IJISTECH (International Journal of Information System and Technology)*. 2022. № 6.1. P. 41–53.

27. Samsudin S., Abdullah A., Muni A., Niansyah N. Design of an IoT-Based 4-Channel 5V Relay Controller Using WiFi and Smartphone Integration. *Sistemasi: Jurnal Sistem Informasi*. 2025. № 14.3. P. 1233–1245.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. Hercog D., Lerher T., Truntič M., Težak O. Design and implementation of ESP32-based IoT devices. *Sensors*. 2023. № 23.15. P. 6739. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156739>.

29. Abdul M. S., Sam S. M., Mohamed N., Hassan N. H., Azizan A., Yusof Y. M. Peer to peer communication for the internet of things using ESP32 microcontroller for indoor environments. *2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2022. IEEE. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTC55196.2022.9952832>.

30. Kusuma H. A., Suhendra T. Field Testing and QoS Analysis of ESP-NOW Communication on ESP32. *2024 FORTEI-International Conference on Electrical Engineering (FORTEI-ICEE)*, 2024. IEEE. P. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.1109/FORTEI-ICEE64706.2024.10824617>.

31. Strohmayer J., Kappel M. Wifi csi-based long-range through-wall human activity recognition with the esp32. *International Conference on Computer Vision Systems*, 2023. Cham: Springer Nature Switzerland. P. 41–50. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44137-0_4.

32. Juhász M. F. Modern C++ in embedded systems-Utilization of modern C++ language features for creating zero-overhead firmware architectures for resource-constrained embedded systems. Doctoral dissertation, Technische Universität Wien, 2023. DOI: <https://doi.org/10.34726/hss.2023.112580>.

33. Litayem N., Al-Sa'di A. Exploring the programming model, security vulnerabilities, and usability of esp8266 and esp32 platforms for iot development. *2023 IEEE 3rd International Conference on Computer Systems (ICCS)*, 2023. IEEE. P. 150–157. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCS59700.2023.10335558>.

34. Hercog D., Lerher T., Truntič M., Težak O. Design and implementation of ESP32-based IoT devices. *Sensors*. 2023. № 23.15. P. 6739. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156739>.

35. Zinkevich A. V. ESP8266 microcontroller application in wireless synchronization tasks. *2021 international conference on industrial engineering*,

					КВПКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

applications and manufacturing (ICIEAM), 2021. IEEE. P. 670–674. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM51226.2021.9446411>.

36. Sarcar V. Functional Programming Overview. *Introducing Functional Programming Using C# Leveraging a New Perspective for OOP Developers*. Berkeley, CA: Apress, 2023. P. 3–32. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9697-4_1.

37. Plauska I., Liutkevičius A., Janavičiūtė A. Performance evaluation of c/c++, micropython, rust and tinygo programming languages on esp32 microcontroller. *Electronics*. 2022. № 12.1. P. 143. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12010143>.

38. Sinambela M., Nugraha M. R., Widodo A., Kadir J. S. P., Yasir A. M., Aji T. W. IoT-Based Air Quality Monitoring System Design and Development Using ESP32. *2024 Ninth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, 2024. IEEE. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIC64337.2024.10956737>.

39. Wijayanti M. Prototype Smart Home Dengan Nodemcu Esp8266 Berbasis Iot. *Jurnal Ilmiah Teknik*. 2022. № 1.2. P. 101–107. DOI: <https://doi.org/10.56127/juit.v1i2.169>.

40. Mitu N. S., Vassilev V., Tabany M. R. Low cost, easy-to-use, IoT and cloud-based real-time environment monitoring system using ESP8266 microcontroller. *International Journal of Internet of Things and Web Services*. 2021. № 6. P. 30–44. DOI: <https://doi.org/10.1109/GCAT55367.2022.9972203>.

41. Fahmi N., Prayitno E., Musri T., Supria S., Ananda F. An Implementation Environmental Monitoring Real-time IoT Technology. *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, 2022. IEEE. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECET55527.2022.9872654>.

42. Irsyada R., Haq M. A., Rohmah N. A., Saputra P. A. H., Jannah R. Implementasi NodeMCU ESP8266 dan Sensor Cahaya Pada Lampu Berbasis Internet Of Things. *Jurnal Ilmiah Sistem Informasi Dan Ilmu Komputer*. 2022. № 2.1. P. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.55606/juisik.v2i1.514>.

43. Hakkı S. O. Y. ESP8266 and ESP32 series of SoC microcontrollers. *Programmable Smart Microcontroller Cards*, 2021. P. 110.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

44. Albana I., Asgalani A., Rachmadani M. D. Esensial Internet Of Things Dalam Konsep Bangunan Cerdas (Studi Kasus: ESP8266 dan Prediksi Energi). *Prosiding Seminar Teknologi Perencanaan, Perancangan, Lingkungan Dan Infrastruktur*, 2021. P. 457–461.

45. Rajeshkumar G., Rajesh Kanna P., Sriram S., Sadesh S., Karunamoorthi R., Mahudapathi P. Home automation system using Nodemcu (ESP8266). *International Conference on Advanced Communications and Machine Intelligence*, 2022. Singapore: Springer Nature Singapore. P. 293–302. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2768-5_28.

46. Xu M. Enhancing the performance of active and passive systems in visible light communication, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4233/uuid:de365b76-bea8-489a-a75a-023a04ff1bc8>.

47. Klügel M., Mamduhi M., Ayan O., Vilgelm M., Johansson K. H., Hirche S., Kellerer W. Joint cross-layer optimization in real-time networked control systems. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*. 2020. № 7.4. P. 1903–1915. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCNS.2020.3011847>.

48. Neis P., Warch D., Hoppe M. Testing and Evaluation of Low-Cost Sensors for Developing Open Smart Campus Systems Based on IoT. *Sensors*. 2023. № 23.20. P. 8652. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23208652>.

49. Hossain J., Kadir A. F., Hanafi A. N., Shareef H., Khatib T., Baharin K. A., Sulaima M. F. A review on optimal energy management in commercial buildings. *Energies*. 2023. № 16.4. P. 1609. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16041609>.

50. Yoo J., Eom J., Zhou Y. Thermal comfort t and retail sales: A big data analysis of extreme temperature's impact on brick-and-mortar stores. *Journal of Retailing and Consumer Services*. 2024. № 77. P. 1039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2023.103699>.

51. Ansari M. A., Singh D. K. Human detection techniques for real time surveillance: a comprehensive survey. *Multimedia tools and applications*. 2021. № 80.6. P. 8759–8808. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10103-4>.

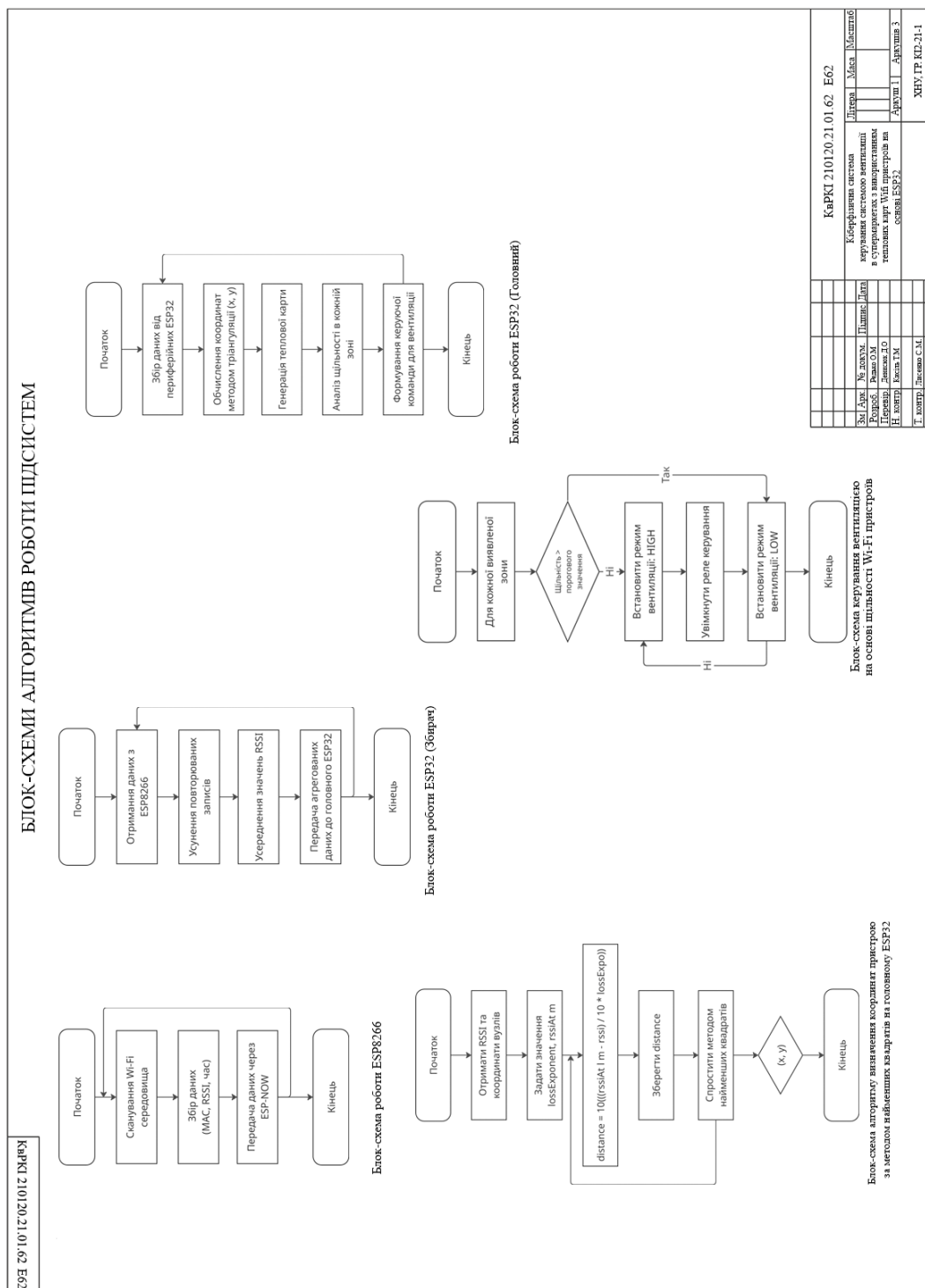
					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

52. Altaf M. A., Ahn J., Khan D., Kim M. Y. Usage of IR sensors in the HVAC systems, vehicle and manufacturing industries: A review. *IEEE Sensors Journal*. 2022. № 22.10. P. 9164–9176. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3166190>.

					КВРКІ. 210120.21.01.62 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Додаток А (обов'язковий)

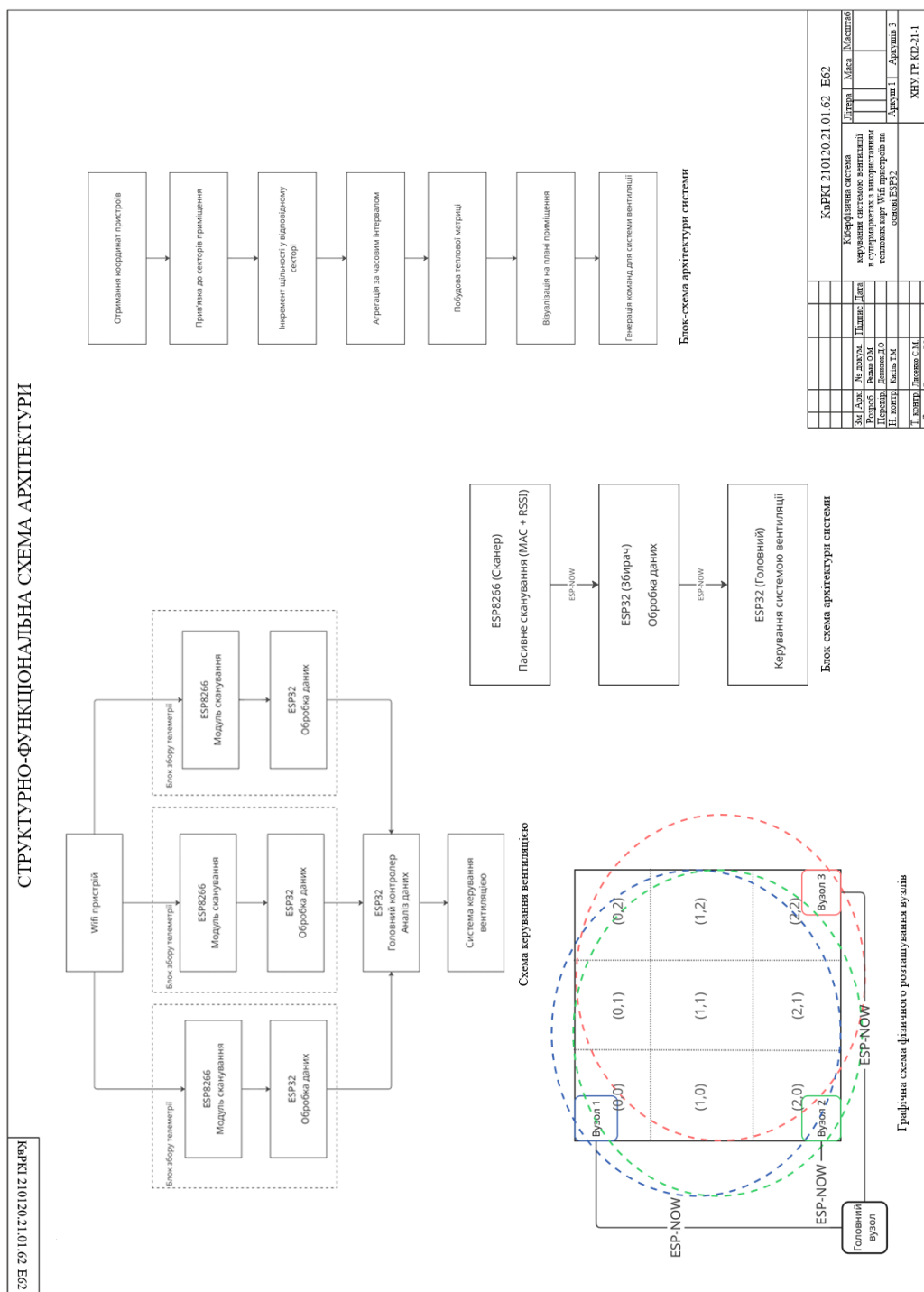
КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «БЛОК-СХЕМИ АЛГОРИТМІВ РОБОТИ ПІДСИСТЕМ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ»



Кварт 210120.21.01.62 Б62	
Літера	Масштаб
Кіберфізична система керування системою вентиляції в сучасних будівлях з використанням теплових карт Wi-Fi пристроїв на основі ESP32.	
Зм. Арк.	№ докум.
Розроб.	Дата введ.
Н. Контр.	Дата вх.
Т. Монтр.	Дата вих.
Затв.	Інструмент 12
	Архив 1
	Архив 2
	Архив 3
	Архив 4
	Архив 5
	Архив 6
	Архив 7
	Архив 8
	Архив 9
	Архив 10
	Архив 11
	Архив 12
	Архив 13
	Архив 14
	Архив 15
	Архив 16
	Архив 17
	Архив 18
	Архив 19
	Архив 20
	Архив 21
	Архив 22
	Архив 23
	Архив 24
	Архив 25
	Архив 26
	Архив 27
	Архив 28
	Архив 29
	Архив 30
	Архив 31
	Архив 32
	Архив 33
	Архив 34
	Архив 35
	Архив 36
	Архив 37
	Архив 38
	Архив 39
	Архив 40
	Архив 41
	Архив 42
	Архив 43
	Архив 44
	Архив 45
	Архив 46
	Архив 47
	Архив 48
	Архив 49
	Архив 50
	Архив 51
	Архив 52
	Архив 53
	Архив 54
	Архив 55
	Архив 56
	Архив 57
	Архив 58
	Архив 59
	Архив 60
	Архив 61
	Архив 62
	Архив 63
	Архив 64
	Архив 65
	Архив 66
	Архив 67
	Архив 68
	Архив 69
	Архив 70
	Архив 71
	Архив 72
	Архив 73
	Архив 74
	Архив 75
	Архив 76
	Архив 77
	Архив 78
	Архив 79
	Архив 80
	Архив 81
	Архив 82
	Архив 83
	Архив 84
	Архив 85
	Архив 86
	Архив 87
	Архив 88
	Архив 89
	Архив 90
	Архив 91
	Архив 92
	Архив 93
	Архив 94
	Архив 95
	Архив 96
	Архив 97
	Архив 98
	Архив 99
	Архив 100

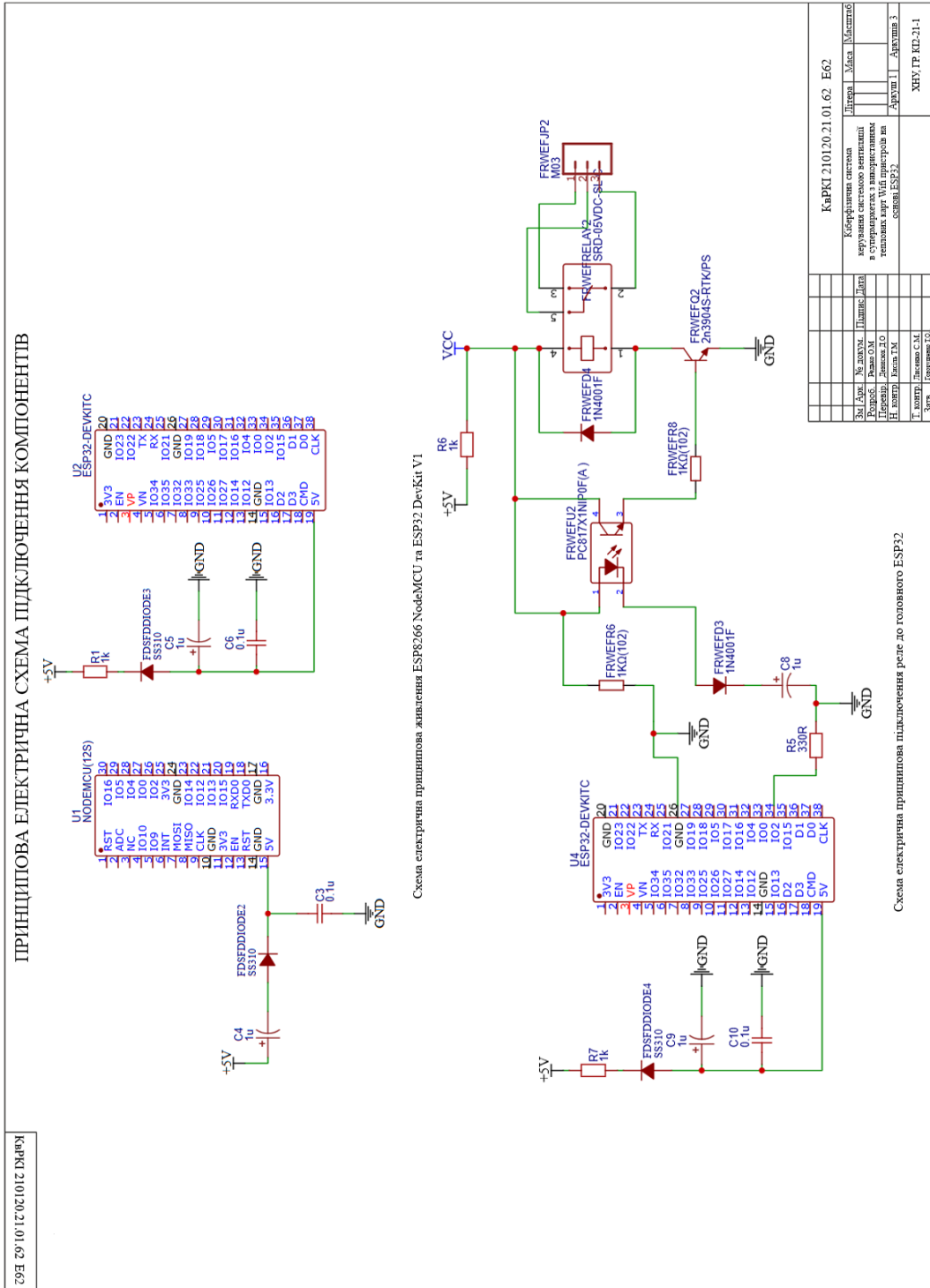
Додаток Б (обов'язковий)

КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АРХІТЕКТУРИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ»



Додаток В (обов'язковий)

КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ «ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ПІДКЛЮЧЕННЯ КОМПОНЕНТІВ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ»



Додаток Г
(довідковий)

**ВИХІДНИЙ КОД ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВУЗЛІВ СИСТЕМИ
НА БАЗІ ESP8266 ТА ESP32**

Кодування ESP8266

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <espnw.h>

typedef struct __attribute__((packed)) {
    uint8_t mac[6];
    int8_t rssi;
    uint32_t timestamp;
} DataPacket;

uint8_t peerMac[] = {0x24, 0x6F, 0x28, 0xAA, 0xBB, 0xCC}; //
MAC-адреса ESP32

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.disconnect();
    if (esp_now_init() != 0) {
        Serial.println("ESP-NOW init failed");
        return;
    }
    esp_now_set_self_role(ESP_NOW_ROLE_CONTROLLER);
    esp_now_add_peer(peerMac, ESP_NOW_ROLE_SLAVE, 1, NULL, 0);
}

void loop() {
    DataPacket packet;
    memcpy(packet.mac, WiFi.macAddress().c_str(), 6);
```

```

packet.rssi = random(-90, -30);
packet.timestamp = millis();

esp_now_send(peerMac, (uint8_t *) &packet, sizeof(packet));
delay(1000);
}

```

Кодування ESP32 Збирач

```

#include <WiFi.h>
#include <esp_now.h>

typedef struct __attribute__((packed)) {
    uint8_t mac[6];
    int8_t rssi;
    uint32_t timestamp;
} DataPacket;

void OnDataRecv(const uint8_t *mac_addr, const uint8_t
*incomingData, int len) {
    if (len != sizeof(DataPacket)) return;

    DataPacket packet;
    memcpy(&packet, incomingData, sizeof(DataPacket));

    Serial.print("MAC: ");
    for (int i = 0; i < 6; i++) {
        Serial.printf("%02X", packet.mac[i]);
        if (i < 5) Serial.print(":");
    }

    Serial.print(" | RSSI: ");
    Serial.print(packet.rssi);
    Serial.print(" | Timestamp: ");
    Serial.println(packet.timestamp);
}

```

```

    forwardToMainESP32(packet);
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.disconnect(true);

    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
        return;
    }

    esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);
}

void loop() {
}

```

Кодування ESP32 Головний

```

#include <WiFi.h>
#include <esp_now.h>
#include <map>
#include <vector>
#include <math.h>

#define NUM_NODES 3
#define MAX_BUFFER 10

struct Position {
    float x;
    float y;
};

```

```

struct NodeInfo {
    uint8_t id;
    Position pos;
    float calibrationOffset;
};

NodeInfo nodeMap[NUM_NODES] = {
    {0, {0, 0}, -3.0},
    {1, {5, 0}, 0.0},
    {2, {2.5, 4.3}, +1.5}
};

typedef struct __attribute__((packed)) {
    uint8_t mac[6];
    int8_t rssi;
    uint8_t nodeId;
    uint32_t timestamp;
} CollectorPacket;

struct RSSIRecord {
    float rssi;
    Position nodePos;
};

std::map<String, std::vector<RSSIRecord>> rssiMap;

void onDataRecv(const uint8_t *mac_addr, const uint8_t *data,
int len) {
    if (len != sizeof(CollectorPacket)) return;

    CollectorPacket pkt;
    memcpy(&pkt, data, sizeof(pkt));

    String macStr = "";

```

```

for (int i = 0; i < 6; i++) {
    macStr += String(pkt.mac[i], HEX);
    if (i < 5) macStr += ":";
}

float calibratedRSSI = pkt.rssi +
nodeMap[pkt.nodeId].calibrationOffset;

RSSIRecord rec = { calibratedRSSI, nodeMap[pkt.nodeId].pos };

auto &records = rssiMap[macStr];
if (records.size() >= MAX_BUFFER)
records.erase(records.begin());
records.push_back(rec);
}

Position estimatePosition(const std::vector<RSSIRecord>
&records) {
    if (records.size() < 3) return {-1, -1};

    std::vector<float> distances;
    float rssi0 = -45.0;
    float n = 2.2;

    for (const auto &r : records) {
        float d = pow(10.0, (rssi0 - r.rssi) / (10 * n));
        distances.push_back(d);
    }

    // Спрощена трилатерація для 3 точок
    float x1 = records[0].nodePos.x;
    float y1 = records[0].nodePos.y;
    float x2 = records[1].nodePos.x;
    float y2 = records[1].nodePos.y;
    float x3 = records[2].nodePos.x;

```

```

float y3 = records[2].nodePos.y;
float r1 = distances[0];
float r2 = distances[1];
float r3 = distances[2];

float A = 2 * (x2 - x1);
float B = 2 * (y2 - y1);
float C = r1 * r1 - r2 * r2 - x1 * x1 + x2 * x2 - y1 * y1 +
y2 * y2;
float D = 2 * (x3 - x2);
float E = 2 * (y3 - y2);
float F = r2 * r2 - r3 * r3 - x2 * x2 + x3 * x3 - y2 * y2 +
y3 * y3;

float x = (C * E - F * B) / (A * E - D * B);
float y = (A * F - D * C) / (A * E - D * B);

return {x, y};
}

void controlVentilation(const Position &pos) {
    // Секторизація + логіка керування
    if (pos.x >= 0 && pos.x < 2.5) {
        digitalWrite(25, HIGH); // Вентиляція зони А
    } else if (pos.x >= 2.5 && pos.x <= 5) {
        digitalWrite(26, HIGH); // Вентиляція зони В
    }
    // Можна реалізувати також вимикання або PWM
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.disconnect();
}

```

```

pinMode(25, OUTPUT);
pinMode(26, OUTPUT);

if (esp_now_init() != ESP_OK) {
    Serial.println("ESP-NOW Init Failed");
    return;
}

esp_now_register_recv_cb(onDataRecv);
}

void loop() {
    for (auto &[mac, records] : rssiMap) {
        if (records.size() >= 3) {
            Position est = estimatePosition(records);
            Serial.printf("MAC %s → x: %.2f, y: %.2f\n", mac.c_str(),
est.x, est.y);
            controlVentilation(est);
        }
    }

    delay(3000); // Інтервал оновлення теплової карти
}

```

Завідувачу кафедри КПС
д-р. філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ

Олега РЕДЬКА

ПШ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-21-1

ЗАЯВА

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

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

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

03.06 2025 року



РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Редько Олег Миколайович

Тема: Кіберфізична система керування системою вентиляції в супермаркетах з використанням теплових карт WiFi пристроїв на основі ESP32

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 55

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є проектування та реалізація кіберфізичної системи керування вентиляцією на основі аналізу теплових карт, сформованих за даними WiFi-пристроїв у приміщенні супермаркету

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. 3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи:

У першому розділі кваліфікаційної роботи здійснено аналіз предметної області, пов'язаної з використанням кіберфізичних систем для керування мікрокліматом у комерційних приміщеннях. Проведено огляд сучасних технологій трекінгу присутності людей, таких як Wi-Fi-моніторинг, відеоаналітика, інфрачервоні сенсори та їх комбінації. Узагальнено переваги та недоліки існуючих комерційних і дослідницьких рішень у цій сфері. Обґрунтовано доцільність розробки власної системи на базі мікроконтролерів ESP32 та сформульовано постановку задачі.

У другому розділі виконано проектування кіберфізичної системи адаптивного керування вентиляцією на основі Wi-Fi сигналів мобільних пристроїв. Розроблено архітектуру апаратної частини системи, визначено конфігурацію вузлів: ESP8266 як сенсорні модулі та ESP32 як вузли збору і головний контролер. Визначено методи обміну даними за допомогою ESP-NOW, запропоновано структуру пакета передачі, методи нормалізації RSSI, триангуляції координат та формування теплових карт

присутності. Розроблено логічну структуру взаємодії між вузлами та алгоритми прийняття рішень для керування вентиляційним обладнанням.

У третьому розділі виконано програмно-апаратну реалізацію системи. Реалізовано програмне забезпечення для всіх типів мікроконтролерів у середовищі Arduino IDE із використанням бібліотек ESP-NOW та WiFi. Виконано обробку сигналів, згладжування флуктуацій RSSI, трилатераційний розрахунок координат та алгоритми генерації теплових карт. Налагоджено механізм керування виконавчим модулем системи вентиляції через релейні канали з гальванічною розв'язкою. Здійснено тестування функціональних компонентів системи в умовах наближених до експлуатаційних.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: обмежене тестування системи в умовах реального торговельного середовища.

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 належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: добре

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

доцент кафедри ТІЗ Яшарова О.М.

“12” 06 2025 р.

(підпис)

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

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Кіберфізична система керування системою вентиляції в супермаркетах з використанням теплових карт WiFi пристроїв на основі ESP32

Автор: Олег РЕДЬКО

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Дмитро ДЕНИСЮК, старший викладач

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи.	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Виявлені в роботі запозичення є правомірними і не становлять плагіату, оскільки:

- 1) вони розміщені в розділах, присвячених аналізу існуючих аналогів і прототипів, що не стосуються безпосередньо авторського дослідження та отриманих результатів;
- 2) усі запозичення є фрагментарними або супроводжуються належним чином оформленими посиланнями;
- 3) окремі збіги є загальноживаними фразами чи виразами;
- 4) як запозичення в окремих випадках система визначила послідовності чотирьохрозрядних двійкових кодів, які є типовими вхідними даними для великої кількості задач і не можуть вважатися об'єктами авторського права, а отже – й порушенням таких прав;
- 5) усі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту стосуються лише поєднання латинських символів з українськомовними скороченнями індексів у формулах, що не є зміною тексту в контексті авторства.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 5.81%; та системою Anti-Plagiarism складає 1%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС

Дмитро ДЕНИСЮК

Андрій Нічепорук

Ольга Павлова

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 1.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 12%

ID: 244461 Title: БКР Кіберфізична система керування системою вентиляції в супермаркетах з використанням теплових карт WiFi пристроїв на основі ESP32 Added in a DB: 2025-06-10 Authors: Олег РЕДЬКО Heads: Дмитро ДЕНИСЮК Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	95083	658	1740 (2%)	21 (3%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Олег РЕДЬКО

Співавтор:

Назва: Редько_Кіберфізична система керування системою вентиляції в супермаркетах з використанням теплових карт WiFi пристроїв на основі ESP32

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1:5.8%

Коефіцієнт подібності 2:3%

Мікропробіли: 20

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-10 11:16:44.0

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:

2025-06-10

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт