

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр  
Освітній рівень

Кіберфізична система моніторингу рекуперації повітря на основі ESP8266

Назва теми

КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ  
Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»  
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
Шифр, назва

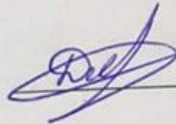
Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»  
Назва

Виконав: студент IV курсу, група KI2-21-1

  
Підпис

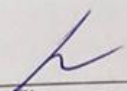
Владислав РУДИК  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

Дмитро ДЕНИСЮК  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

Тетяна КИСІЛЬ  
Ініціали, прізвище

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

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ініціали, прізвище

«19» 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

Владислав РУДИК

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система моніторингу рекуперації повітря на основі ESP8266

Керівник проекту (роботи). Дмитро ДЕНИСЮК

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

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. № 23

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

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

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Кіберфізична система моніторингу рекуперації повітря на основі ESP8266

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

Архітектура системи

Схема підключення ESP8266

Електрично принципова схема

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

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

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	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 – проектування система моніторингу рекуперації повітря на основі ESP8266	01.04.2025	виконано
5	Робота над розділом 3 – реалізація кіберфізичної системи енергомоніторингу на основі ESP8266	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

Владислав РУДИК  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Дмитро ДЕНИСЮК  
Ініціали, прізвище



## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система моніторингу рекуперації повітря на основі ESP8266».

Автор роботи: Владислав РУДИК

Керівник роботи: Денисюк Дмитро Миколайович.

Пояснювальна записка: 60 с., 33 рис., 1 табл., 3 дод., 50 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кіберфізична система; рекуперація повітря; датчик.

У роботі розроблено кіберфізичну систему моніторингу процесу рекуперації повітря з використанням мікроконтролера ESP8266.

Система дозволяє в режимі реального часу контролювати параметри повітря до та після рекуператора, зокрема температуру та вологість, що дає змогу оцінювати ефективність теплообміну. Реалізовано передачу даних на веб-інтерфейс для зручного відображення та аналізу. Робота включає теоретичні основи рекуперації, огляд аналогічних рішень, проектування апаратної частини, програмну реалізацію та результати тестування.

Під час проведення даного дослідження був використаний метод літератури для вивчення і аналізу предметної області даного дослідження з текстових джерел інформації.



---

Підпис студента

---

30.05.2025

Дата

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ РЕКУПЕРАЦІЇ ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ ESP8266</b> .....	5
1.1 Кіберфізичні системи: визначення та класифікація .....	5
1.2 Системи рекуперації повітря: принципи роботи та типи. ....	6
1.3 Системи рекуперації повітря: принципи роботи та типи .....	9
1.4 Існуючі проблеми і завдання у системах вентиляції.....	12
1.5 Постановка завдання дослідження систем моніторингу .....	15
1.6 Висновок до розділу.....	17
<b>2 КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ АДАПТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ МОНІТОРИНГОВИХ РЕКУПЕРАЦІЇ ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ ESP8266</b> ....	18
2.1 Вибір концепції та постановка технічного завдання для системи моніторингу рекуперації повітря.....	18
2.2 Вибір апаратної та програмної бази для реалізації системи моніторингу на основі ESP8266 .....	23
2.3 Порівняння ESP8266 з іншими мікроконтролерами для систем рекуперації повітря .....	37
2.4 Висновок до розділу.....	40
<b>3 РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ РЕКУПЕРАЦІЇ ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ ESP8266</b> .....	43
3.1 Загальна схема з'єднання системи .....	43
3.2 Фізичне збирання пристрою та монтаж.....	45
3.3 Програмна реалізація.....	47
3.4 Тестування системи в реальних умовах .....	51
3.5 Виведення даних, віддалений моніторинг, тестування.....	53
3.6 Висновок по третьому розділу.....	59

<u>КвРКІ 210122.21.01.61 ПЗ</u>								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Підсистема керування освітленням кіберфізичної системи «Розумний будинок». Пояснювальна записка	Літера	Аркуші	Аркуші в
Виконав		Рудик Владислав		19.02		у		
Перевір.		Дмитро Денсюк		19.06			2	72
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		19.06.19				
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		19.06.19	<b>ХНУ КІ2-22-1</b>			

<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>61</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>62</b>
<b>ДОДАТОК А.....</b>	<b>67</b>
<b>ДОДАТОК Б .....</b>	<b>68</b>
<b>ДОДАТОК В .....</b>	<b>69</b>
<b>ДОДАТОК Г .....</b>	<b>70</b>

					<u>КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ</u>	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



# 1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ РЕКУПЕРАЦІЇ ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ ESP8266

## 1.1 Кіберфізичні системи: визначення та класифікація

Кіберфізичні системи (КФС) описують інтеграцію обчислювальних, мережевих та фізичних процесів, коли програмні та апаратні складові взаємодіють між собою для спостереження та управління фізичними процесами у реальному часі. Ключові властивості КФС включають, інтеграцію обчислень та фізики: тісна взаємодія програмної частини із фізичними елементами. Мережувикористання мереж для обміну даними між складовими системи. Реактивність стосується здатності системи швидко реагувати на зміни навколишнього середовища. Автономність розуміють як здатність приймати рішення без зовнішнього впливу.

Класифікація кіберфізичних систем CFS можна типізувати на основі різних атрибутів. Рівень автономності системи, здатні самостійно приймати рішення та реагувати на результати без втручання людини (наприклад, автомобілі без водія). Напівавтономні системи, потребують періодичного втручання або нагляду з боку людини (наприклад, системи підтримки водія). Промислова CPS в автоматизованих виробничих операціях, контролі якості, енергоменеджменті. Медична CPS: для моніторингу пацієнтів і керування медичними пристроями. Транспорт CPS, для додатків керування дорожнім рухом і безпілотних транспортних засобів. Побутова CPS, використовується в розумних будинках для керування освітленням, опаленням і безпекою. Централізовані системи мають єдиний центральний контролер для керування всіма компонентами, децентралізовані системи: складаються з кількох автономних модулів, які взаємодіють спільно.

Розумна електромережа інтеграція обчислювальних систем з інфрачервоним випромінюванням для оптимізації виробництва та споживання електричної енергії. Автономні автомобілі, транспортні засоби, які використовують сенсори, алгоритми та засоби комунікації для самостійного пересування.

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Системи моніторингу стану пацієнтів: пристрої, що відстежують фізіологічні показники пацієнтів і негайно передають інформацію медичному персоналу для негайного реагування. Роботизовані виробничі лінії виробництва, координоване роботами на основі комп'ютерних інструкцій. Системи автоматизації будівель (BMS), комплекси, що керують освітленням, опаленням, вентиляцією та системами безпеки в будівлях.

Кіберфізичні системи – фундамент сучасних технологій, які об'єднують обчислювальні процеси з фізичними об'єктами.

Їхнє застосування поширюється на численні сфери, від промисловості до повсякденного життя, сприяючи підвищенню ефективності та безпеки.[20].

## 1.2 Системи рекуперації повітря: принципи роботи та типи.

У сьогоденному світі, де енергоефективність та комфорт відіграють ключову роль, системи рекуперації повітря стали надзвичайно поширеними. Вони дають змогу гарантувати постійний доступ свіжого повітря в приміщення без відчутних тепловтрат, що особливо важливо в герметичних будівлях із покращеною теплоізоляцією. Рекуперація повітря — це процес повернення тепла з відпрацьованого повітря до свіжого, що допомагає знизити витрати на опалення та кондиціонування.

Принцип функціонування систем рекуперації повітря, головний елемент це теплообмінник, який забезпечує передавання тепла від відпрацьованого повітря до свіжого, не змішуючи їх. Це дозволяє зберегти тепло в приміщенні, водночас забезпечуючи надходження свіжого повітря. Відпрацьоване повітря, температура якого близька до кімнатної, проходить через теплообмінник, віддаючи тепло. Свіже повітря з вулиці проходить через той же теплообмінник, вбираючи тепло від відпрацьованого повітря. [26]

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відтак, свіже повітря потрапляє в приміщення вже підігрітим, що зменшує навантаження на систему опалення. Цей процес може знизити тепловтрати до 90%, залежно від типу та ефективності рекуператора.

Системи рекуперації повітря можна класифікувати за різними ознаками типом теплообмінника, пластинчасті рекуператори складаються з набору пластин, через які проходять повітряні потоки. Вони можуть бути виготовлені з металу або пластику. Пластинчасті рекуператори прості в конструкції та мають високий ККД, але можуть утворювати конденсат при низьких температурах.

Роторні рекуператори: мають обертовий барабан, який по черзі контактує з витяжним та припливним повітрям, передаючи тепло. Вони ефективніші за пластинчасті, особливо при низьких температурах, та можуть передавати не лише тепло, а й вологу.[17]

Камерні рекуператори: складаються з двох камер, які по черзі заповнюються витяжним та припливним повітрям. Тепло передається через стінки камер. Цей тип менш поширений через складність конструкції.

Теплообмінники з проміжним теплоносієм: використовують рідину (наприклад, гліколь) для передачі тепла між витяжним та припливним повітрям. Вони дозволяють розміщувати припливні та витяжні установки на відстані одна від одної.

За способом організації вентиляції централізовані системи: забезпечують функціонування усього простору або споруди. Вони оснащені одним чи кількома потужними рекуператорами, з'єднаними з розгалуженою системою повітропроводів. Ці системи ефективні для великих об'єктів, однак вимагають складного процесу встановлення.[3]

Децентралізовані системи: монтуються індивідуально в кожному приміщенні. Це компактні прилади, що легко встановлюються та обслуговуються. Вони ідеально підходять для квартир або малогабаритних будинків.

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





Кінець таблиці 1.1

6	З проміжним теплоносієм
7	Камерні
8	Фреонові

Окрім своєї низької вартості, яка робить його доступним практично для будь-яких проєктів, ESP8266 має малу фізичну габаритність, що дозволяє легко вбудовувати його у пристрої, які обмежені за розмірами, наприклад, у компактні датчики, настінні модулі, сенсорні блоки або портативні прилади.

ESP8266 побудований на базі 32-бітного процесорного ядра Tensilica L106, що забезпечує хорошу обчислювальну потужність при відносно низькому енергоспоживанні. Залежно від потреб розробника, частота процесора може бути сконфігурована до 160 МГц. Це дозволяє мікроконтролеру не лише обробляти дані з датчиків у реальному часі, але й виконувати додаткову логіку, керувати інтерфейсами, формувати мережеві пакети та підтримувати підключення до Wi-Fi-мереж.[14]

Архітектурні та функціональні переваги ESP8266 як платформи для розробки пристроїв IoT зумовлений кількома ключовими архітектурними перевагами. Найперше, чіп має вбудований повнофункціональний стек TCP/IP, що відкриває легкий шлях для передачі даних на сервери, брокери MQTT, хмарні сервіси чи мобільні застосунки, не потребуючи додаткових обчислювальних потужностей. Це дозволяє пристрою на основі ESP8266 працювати цілковито незалежно, без потреби в окремому шлюзі чи хост-комп'ютері.

Далі, ESP8266 демонструє широку гнучкість в програмуванні: його можна програмувати як в знайомому середовищі Arduino IDE, так і у більш просунутих інструментах, на зразок PlatformIO або Espressif SDK. До того ж, підтримка високорівневих мов, таких як MicroPython та Lua, значно спрощує роботу з пристроєм для новачків та дозволяє швидко розробляти прототипи.

Завдяки підтримці периферійних інтерфейсів, серед яких UART, I<sup>2</sup>C, SPI, PWM, GPIO, ESP8266 може взаємодіяти з широким спектром сенсорів та

виконавчих пристроїв: температурні сенсори, газоаналізатори, реле, драйвери двигунів, дисплеї, кнопки тощо. Усе це відкриває великі можливості для створення адаптивних кіберфізичних систем, здатних реагувати на зміни навколишнього середовища та виконувати запрограмовані дії.

#### Вбудовані механізми збереження енергії

Одним з ключових аспектів ESP8266, що зумовлює його придатність для незалежних систем, є підтримка енергоощадних режимів. Зокрема, він може функціонувати у таких варіантах: Modem-sleep — коли Wi-Fi модуль переходить у стан сну, якщо немає обміну даними; Light-sleep — у цьому режимі процесор частково призупиняє свою роботу, але залишається можливість швидкого пробудження; Deep-sleep — найефективніший режим, де живлення надходить лише на годинник реального часу, а решта компонентів чіпа перебувають у вимкненому стані до певного тригера.

ESP8266 у складі систем моніторингу повітря для систем рекуперації повітря, особливо в межах розумного будинку або офісного простору, важливо мати доступ до поточних параметрів мікроклімату. Завдяки компактності та багатофункціональності, ESP8266 може взаємодіяти з такими сенсорами, як: DHT22 або BME280 — для вимірювання температури та вологості повітря; MQ135 — для оцінки концентрації CO<sub>2</sub>, летких органічних речовин і загальної якості повітря; SHT31, CCS811, CO<sub>2</sub>-датчики — для глибокої аналітики складу повітря.

Після збору даних ESP8266 здатен, локально виводити інформацію на OLED-дисплей або веб-інтерфейс надсилати дані у хмару формувати повідомлення для користувача (через Telegram, e-mail, push).

Таким чином, ESP8266 забезпечує повний цикл роботи кіберфізичної системи, яка в режимі реального часу вимірює, аналізує та повідомляє про стан повітряного середовища, дозволяючи користувачеві вживати заходів — увімкнути вентиляцію, змінити режим рекуператора, відкрити вікна тощо [5].



допомогою рекуперації. З іншого боку, надмірна герметичність сучасних будівель із низьким рівнем інфільтрації без відповідного контролю вентиляції погіршує якість повітря.[6]

Таблиця 1.1 – Типи вентиляції

Тип вентиляції	Основна проблема	Наявність автоматизації	Енергетичні втрати	Коментар
Пасивна (гравітаційна)	Слабка тяга, залежність від погоди	Відсутня	Високі	Застаріла конструкція
Механічна без рекуперації	Значні втрати тепла	Обмежена або відсутня	Дуже високі	Часто неефективна
Механічна з таймером	Працює без зворотного зв'язку	Часткова	Середні	Не адаптується до умов
Система CO <sub>2</sub> -датчиком	Висока вартість інтеграції	Є	Низькі	Недоступна для більшості

Автоматизовані системи, хоча й надають ширші можливості керування, часто мають високий поріг входу в плані налаштування та вартості. Промислові рішення з можливістю зчитування даних по Modbus, BACnet або LonWorks вимагають використання дорогого обладнання, а також залучення фахівців для проектування і обслуговування. Цей фактор унеможливорює їх широке впровадження у приватному секторі або в об'єктах з обмеженим бюджетом. Крім того, такі системи часто є закритими, обмежуючи користувача в розширенні функціоналу або зміні логіки роботи.

Ще однією проблемою є відсутність зворотного зв'язку між датчиками та керуючими елементами. У багатьох випадках навіть при наявності сенсорів вони

не мають інтеграції з виконавчими механізмами, що знижує потенціал системи до саморегулювання. Таким чином, збір даних відбувається формально, без практичного впливу на функціонування вентиляції. Це створює ситуацію, коли інформація накопичується, але не використовується для оптимізації роботи пристрою.

Окремо варто згадати про складність адаптації вентиляційних установок до змінного навантаження. У приміщеннях зі змінною кількістю людей або різними режимами експлуатації система повинна мати можливість коригувати свою роботу на основі актуальних показників, а не працювати за фіксованими часовими сценаріями. У випадках, коли вентиляція не адаптивна, це або призводить до перевитрат, або до погіршення якості повітря. Таким чином, ключовими проблемами сучасних вентиляційних систем є незгодженість між фізичними параметрами середовища та режимом роботи установки, відсутність гнучкості при зміні умов, обмежена інтеграція з цифровими технологіями й висока вартість впровадження повноцінних систем моніторингу й керування. Усі ці аспекти актуалізують необхідність створення доступних, відкритих і масштабованих рішень, які могли б забезпечити якісний повітрообмін без втрати енергоефективності [19].

Однією з критичних проблем у побутових вентиляційних системах залишається втрата теплової енергії під час зимового періоду. У більшості класичних механічних систем витяжне повітря виводиться назовні без повернення частини його теплової енергії, що призводить до зростання навантаження на опалювальні прилади. Водночас припливне повітря потребує додаткового підігріву для забезпечення комфортного мікроклімату. Рекуператори, які вбудовуються в сучасні вентиляційні установки, дозволяють повернути частину тепла за рахунок теплообміну між потоками. На малюнку показано принцип дії пластинчастого рекуператора, що забезпечує ефективний теплообмін без змішування повітряних потоків. (Рисунок 1.2)



Рисунок 1.2 – Ілюстрація рекуператора в розрізі [31]

### 1.5 Постановка завдання дослідження систем моніторинку

Створення технічного завдання на розробку кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря вимагає чіткого окреслення меж дослідження, функціональних обов'язків кожного компоненту системи та передбачуваних результатів її впровадження. Враховуючи специфіку рекупераційних установок та особливості побутових і напівпромислових вентиляційних рішень, ключова увага приділяється збору й інтерпретації даних, що характеризують теплову ефективність та стабільність повітрообміну. Метою дослідження є розробка системи, здатної в режимі реального часу відстежувати ключові параметри, передавати інформацію на віддалений інтерфейс та забезпечувати базову аналітику без втручання користувача.[25]

Для побудови апаратної частини було обрано платформу ESP8266 (Рисунок 1.1), яка дозволяє поєднати компактність з достатньою обчислювальною потужністю для реалізації поставлених функцій. Система містить сенсори температури, вологості та CO<sub>2</sub>, які забезпечують базовий рівень контролю

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

мікроклімату, а також дозволяють розрахувати ефективність рекуперації шляхом оцінки різниці температур у повітряних потоках.



Рисунок 1.1 – Модуль ESP8266 [24]

На програмному рівні завдання полягає у створенні стабільної прошивки з підтримкою бездротового зв'язку, модулів попередньої обробки й буферизації даних, а також реалізації логіки виявлення порушень у роботі системи. Крім того, розглядається можливість розширення функціоналу шляхом підключення системи до зовнішніх платформ збору та візуалізації даних, зокрема, через API або стандартні протоколи MQTT.

В рамках дослідження також передбачається розробка алгоритмів, які на основі зібраних даних дозволять оцінювати ефективність роботи вентиляційного обладнання та за потреби сигналізувати про аномальні режими. Кінцевою метою є розробка функціонального прототипу системи, який можна інтегрувати в реальне середовище та перевірити на відповідність технічним критеріям [16].

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## 1.6 Висновок до розділу

Аналіз досліджуваної предметної галузі виявив значущі проблеми, обумовлені недостатньою ефективністю вентиляційних систем, що використовуються в житлових та комерційних спорудах. Не зважаючи на широкий спектр конструктивних варіацій, суттєва частина наявних систем або взагалі не передбачає рекуперації тепла, або реалізує її на низькому рівні. Це безпосередньо впливає на показники енергоспоживання, а також створює труднощі з забезпеченням стабільного мікроклімату в приміщеннях.

Окремої уваги потребує автоматизація контролю параметрів повітря, що сьогодні впроваджується здебільшого за допомогою складних та дорогих платформ. В більшості випадків спостерігається залежність якості вентиляції від суб'єктивних налаштувань користувача або фіксованих розкладів функціонування системи. Такий підхід не бере до уваги змінні фактори навколишнього середовища, присутність людей чи рівень вуглекислого газу, що знижує ефективність вентиляції в цілому. Порівняння доступних рішень підтвердило наявність компромісу між точністю систем контролю і витратами на їх впровадження. Окремі розробки демонструють високу точність зчитування даних та адаптивну логіку роботи, проте потребують складної інтеграції та дорогого обслуговування. Водночас інші, простіші модулі, навпаки, обмежені у функціональності, хоча й привабливі вартістю та доступністю. На цьому тлі обґрунтованим виглядає підхід до створення компактної кіберфізичної системи, що поєднує базові інструменти збору даних з простим каналом передачі та мінімальними обчислювальними ресурсами. Використання модулів, наприклад ESP8266, дозволяє розробляти гнучкі рішення з низьким порогом входу, які легко масштабуються та адаптуються до конкретних особливостей об'єкта. Такі системи не є універсальними, але здатні забезпечити баланс між точністю, швидкістю реагування та вартістю реалізації. Сформульоване завдання дослідження полягає у створенні такої системи моніторингу, що врахує недоліки типових вентиляційних рішень та компенсує їх.

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ АДАПТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ МОНІТОРИНГОВИХ РЕКУПЕРАЦІЇ ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ ESP8266

2.1 Вибір концепції та постановка технічного завдання для системи моніторингу рекуперації повітря

Рекуперація повітря в системах вентиляції є одним із ключових процесів, що забезпечує енергоефективність житлових, офісних та промислових приміщень. У той час як класичні вентиляційні системи лише замінюють відпрацьоване повітря на свіже, рекуператори дозволяють зберігати значну частину теплової енергії шляхом передачі її від витяжного повітря до припливного. Однак, ефективність такої системи безпосередньо залежить від умов експлуатації та якості повітря, яке надходить і виводиться. Саме тому виникає необхідність в системі моніторингу, яка дозволяє контролювати ключові параметри мікроклімату, що впливають на якість рекуперації. Враховуючи розвиток технологій Інтернету речей (IoT), доцільним є створення кіберфізичної системи, яка не лише фіксує показники, а й здатна передавати їх на віддалені пристрої, аналізувати, візуалізувати й зберігати для подальшого прийняття рішень. Найкращим рішенням для реалізації подібної системи є використання мікроконтролера ESP8266, який поєднує в собі високу продуктивність, вбудований Wi-Fi-модуль і низьке енергоспоживання.

Метою даного проєкту є розробка та реалізація кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря з використанням ESP8266. Система повинна: Здійснювати безперервний збір показників температури, вологості, рівня CO<sub>2</sub> (або загальної якості повітря) [4].

Відображати інформацію локально (на OLED-дисплеї або LCD) та/або через веб-інтерфейс. Забезпечити збереження даних в хмарі або локальній базі даних.

Повідомляти користувача про критичні значення параметрів. Мати можливість інтеграції з системою рекуперації або вентиляції для автоматичного регулювання.

Умови експлуатації: система призначена для використання в побутових умовах або в невеликих комерційних приміщеннях, таких як офіси, майстерні, навчальні кабінети.

Обмеження: для забезпечення низької вартості виготовлення система повинна базуватись на недорогих компонентах, які є у вільному продажу. Перевага надається модулям із відкритою архітектурою, які мають гарну документацію. Для зведення системи було обрано модульний метод. Це дає змогу адаптивно втілювати окремі частини та без проблем видозмінювати чи поліпшувати їх, уникаючи потреби у повній переробці усієї системи.

Модулі, з яких складається загальна структура (Рисунок 2.1) Збирання інформації взаємодія з датчиками та перетворення аналогових/цифрових даних у формат, придатний для аналізу. Обробка та збереження: проміжна обробка даних, запис інформації в пам'ять. Вивід: передача даних на веб-інтерфейс, дисплей чи зовнішній сервер. Користувацький інтерфейс: візуальне відображення інформації, інтерпретація даних.



Рисунок 2.1 – Загальна будова рекуператора[15]

Варто пам'ятати, що експлуатація системи передбачає різноманітні умови: підвищену або знижену вологість, значні коливання температури, середовище з пилом, а також можливі проблеми зі стабільністю електроживлення. Тому, обрані компоненти мають витримувати ці фактори, або ж система повинна мати відповідні засоби захисту (наприклад, корпус стандарту IP44, додаткові фільтри для датчиків, стабілізатор напруги, не варто викидати вплив зовнішніх електромагнітних перешкод, особливо на виробництві. Щоб мінімізувати негативний вплив, необхідно врахувати екранування, правильне розташування проводів на платі, та використання фільтрів для електроживлення.

Для візуалізації концепції подано структурну схему кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря (Рисунок 2.2)

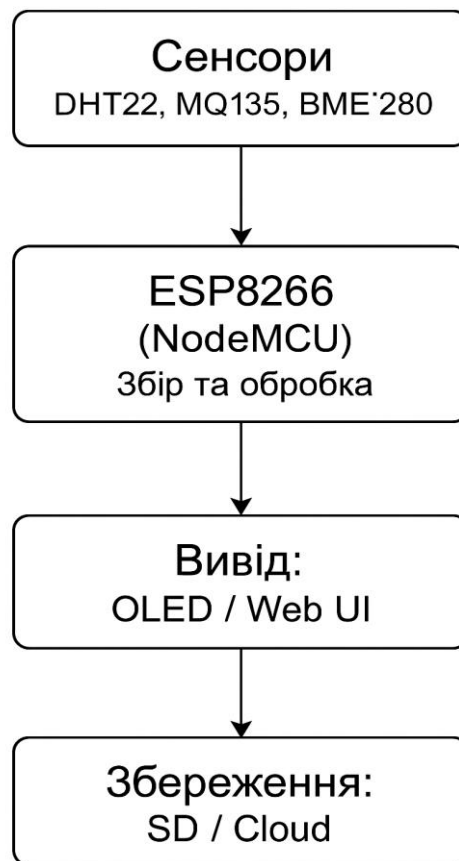


Рисунок 2.2 – Блок схема

Розроблена кіберфізична система моніторингу рекуперації повітря є модульною, гнучкою та відкритою до подальшої модернізації. З огляду на

технологічний прогрес у сфері мікроелектроніки, сенсорики, телекомунікацій і програмного забезпечення, існує низка перспективних напрямів удосконалення системи, що дозволяють підвищити її ефективність, автономність, функціональність та інтеграційні можливості. Інтеграція Bluetooth Low Energy (BLE) або інших бездротових інтерфейсів. Хоча ESP8266 не підтримує Bluetooth, існує можливість додавання зовнішніх BLE-модулів, таких як HM-10 або HC-05. Це дозволить забезпечити пряме з'єднання системи з мобільним пристроєм без потреби в локальній Wi-Fi-мережі. Таке рішення буде особливо корисним у ситуаціях, де користувачеві необхідно швидко отримати дані або змінити налаштування системи без підключення до Інтернету. Також розгляд альтернативи у вигляді переходу на ESP32, який має вбудований Bluetooth, є доцільним у майбутніх ревізіях.

Використання алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту. Інтеграція елементів інтелектуального аналізу даних дозволить передбачати зміни якості повітря, виявляти аномалії та формувати рекомендації щодо режимів роботи вентиляції або рекуперації. Наприклад, за допомогою простих нейронних мереж або моделей прогнозування на основі часових рядів (ARIMA, LSTM) система зможе визначати тренди зміни вологості, CO<sub>2</sub> чи температури та автоматично оптимізувати роботу рекуператора. [13]

Підключення до системи розумного дому. Система моніторингу може бути інтегрована у більші платформи автоматизації, як-от Home Assistant, OpenHAB, Domoticz, Blynk або Node-RED. Для цього доцільно реалізувати підтримку протоколів обміну даними — MQTT, HTTP REST API, WebSocket тощо. Це дозволить не лише централізовано керувати всіма пристроями, а й забезпечить взаємодію з іншими системами: наприклад, увімкнення очищувача повітря при перевищенні порогового значення концентрації пилу. [14]

Застосування альтернативних джерел живлення для підвищення мобільності та незалежності системи можливо реалізувати автономне живлення від акумулятора з додатковим блоком живлення на основі сонячної панелі. Особливо

це буде актуальним у віддалених приміщеннях, теплицях, дачних будинках або сільських школах, де є проблеми з надійністю електромережі. У цьому випадку можна реалізувати режим глибокого сну ESP8266 для економії енергії, активуючи систему лише в момент зняття показників.

Розширення сенсорної підсистеми. Базова версія системи передбачає лише декілька сенсорів для вимірювання температури, вологості та якості повітря (наприклад, DHT22, MQ135). Удосконалення можливе шляхом підключення більш точних і спеціалізованих сенсорів: SCD30 або MH-Z19B — для точного вимірювання рівня CO<sub>2</sub>, VME680 — для одночасного вимірювання температури, вологості, тиску і летких органічних сполук (TVOC), PM2.5/PM10 датчики (PMS7003, SDS011) — для моніторингу частинок пилу; датчики тиску — для адаптації до зовнішніх умов; датчики шуму, освітленості — для комплексного контролю середовища. Це дозволить побудувати не лише систему моніторингу рекуперації повітря, а й повноцінну екологічну станцію.

Оптимізація веб-інтерфейсу та візуалізації. Існує перспектива покращення візуалізації даних шляхом розробки динамічного веб-інтерфейсу із застосуванням JavaScript-бібліотек, таких як Chart.js, Plotly, Highcharts, що забезпечують інтерактивні графіки. Крім того, можна додати функціонал для експорту даних у форматах CSV, JSON, XLSX або інтеграцію з Google Sheets для зберігання та аналізу показників у хмарі.

Додавання локального керування рекуператором. Наступним логічним щаблем еволюції системи є не просто спостереження, а й активне регулювання. Скажімо, виходячи з даних аналізу, що надходять від ESP8266, система здатна корегувати швидкість вентилятора, позицію заслінок або режим теплообміну. Для цього необхідно інтегрувати модулі управління (реле, драйвери моторів, електронні клапани) та розробити алгоритми логіки контролю (як-от PID-регулятор або умовні сценарії).

Узагальнюючи викладене, варто відзначити, що розроблена система - це не тільки ефективний інструмент для вирішення конкретної задачі, але й база для

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

майбутніх досліджень, апробації інноваційних алгоритмів та вдосконалення в сфері автоматизації кліматичних систем. Її відкритість та гнучкість дає змогу адаптувати функціонал до різноманітних сценаріїв застосування – від простого моніторингу до інтелектуального автономного контролю за повітряними потоками в приміщенні.[10]

## 2.2 Вибір апаратної та програмної бази для реалізації системи моніторингу на основі ESP8266

У межах реалізації кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря особливе значення має не лише мікроконтролерна платформа, що виступає ядром управління, а й комплекс допоміжних апаратних засобів та програмних рішень, які забезпечують повноцінну роботу системи. Під час конструювання, тестування та впровадження подібного проєкту виникає необхідність у глибокому аналізі периферійних компонентів, середовища розробки та механізмів взаємодії мікроконтролера з іншими елементами фізичного середовища. Цей розділ присвячений детальному огляду сенсорів, модулів відображення інформації, джерел живлення, а також платформ і бібліотек, які використовуються для створення і налаштування програмного забезпечення системи. [12]

Архітектура сенсорної підсистеми є одним з ключових етапів у побудові функціональної кіберфізичної системи є проєктування сенсорної підсистеми. Саме вона відповідає за фіксацію ключових параметрів повітряного середовища у вентиляційному контурі. У контексті системи рекуперації повітря необхідно постійно відстежувати декілька основних показників: температуру, вологість, рівень забрудненості або концентрацію певних газів (передусім CO<sub>2</sub>), а також зміну атмосферного тиску, який може впливати на ефективність роботи рекуператора.

Сенсори температури та вологості у переважній більшості систем моніторингу мікроклімату найважливішими параметрами виступають температура і відносна вологість повітря. Це пояснюється тим, що саме ці характеристики

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпосередньо впливають як на комфорт перебування людини у приміщенні, так і на ефективність роботи вентиляційного обладнання, зокрема — теплообмінного блоку рекуператора. [13]

Для зчитування температури та вологості в даному проєкті використовуються сенсори цифрового типу (зокрема DHT22 або BME280), які забезпечують відносно високу точність, просту інтеграцію з ESP8266 та стабільність роботи в широкому діапазоні температур.

Ці сенсори дозволяють організувати моніторинг як на вході, так і на виході рекуператора, завдяки чому стає можливим розрахунок коефіцієнта рекуперації тепла, тобто кількісного показника ефективності пристрою. Це дозволяє оцінити реальну користь роботи рекуператора в режимі реального часу.

Сенсори газів та якості повітря більш складних системах моніторингу необхідно враховувати не лише базові параметри повітря, але й якість повітря з точки зору забрудненості або надмірної концентрації окремих сполук. Для цього доцільно використовувати газові сенсори серії MQ, які засновані на принципі зміни опору чутливого елемента залежно від концентрації певних речовин у повітрі.

У проєкті застосовується сенсор MQ135, який чутливий до ряду забруднювачів (амоніаку, вуглекислого газу, бензолу, диму тощо) і дозволяє отримати усереднений показник якості повітря. Незважаючи на те, що MQ135 не є лабораторним сенсором, він ідеально підходить для побутового використання в межах системи розумного будинку або вентиляції з контролем повітряного середовища.

Сигнал із сенсора має аналогову природу, тому для його коректного зчитування використовується вбудований АЦП мікроконтролера ESP8266 (один канал), що накладає певні обмеження на кількість аналогових джерел сигналу. Це слід враховувати при побудові схеми.

Додаткові сенсори у разі розширення функціональності, до системи можуть бути додані такі модулі, BME280 – надає інформацію про тиск, яка може бути використана для компенсації вимірів та побудови більш точних моделей

вентиляції. MH-Z19B – інфрачервоний сенсор CO<sub>2</sub> із цифровим інтерфейсом UART, високою точністю та стабільністю. Але потребує більше ресурсів і дорожчий. Модулі індикації та відображення даних у системі моніторингу важливо забезпечити не лише фіксацію параметрів, але й їх зручне представлення користувачеві. Це реалізується за допомогою вбудованих або віддалених засобів виводу інформації.

Локальна індикація найпоширенішим варіантом локального відображення даних є OLED-дисплей 0.96”, побудований на контролері SSD1306. Він має такі переваги: висока контрастність і роздільна здатність, можливість роботи через I2C, що дозволяє зекономити порти ESP8266, наявність готових бібліотек (Adafruit\_SSD1306), які підтримують відображення тексту, іконок, графіків. Можливе представлення поточних значень температури, вологості, якості повітря у вигляді цифрових значень або міні-графіків.

Веб-інтерфейс ESP8266 має достатньо ресурсів, щоб виступати в ролі вбудованого веб-сервера. Створюється HTML-сторінка, яка оновлюється кожні кілька секунд через JavaScript (AJAX або WebSocket), відображає усі вимірювані параметри у зручному вигляді, забезпечує мобільний доступ до системи без потреби у зовнішніх серверах. Для графіків часто використовується бібліотека Chart.js, яка інтегрується у HTML-інтерфейс. [18]

Вивід на хмарні платформи у разі інтеграції з IoT-інфраструктурою, можливе підключення до таких сервісів, ThingSpeak (через HTTP-запити), Blynk (зручний мобільний застосунок); , InfluxDB + Grafana — для професійного збереження й аналітики.

Це дозволяє реалізувати довготривалий моніторинг, історію змін та аналіз трендів. Вибір програмної платформи для програмування мікроконтролера ESP8266 використовується Arduino-платформа, яка поєднує простоту використання з великою гнучкістю.

Arduino IDE це головне середовище розробки, яке дозволяє: компілювати та заливати код у ESP8266 через USB, використовувати бібліотеки для OLED-дисплеїв, сенсорів, Wi-Fi, підтримує OTA-оновлення (оновлення по повітрю).

У проєкті використовуються бібліотеки ESP8266WiFi.h — для Wi-Fi з'єднання, DHT.h — для роботи з DHT22, Adafruit\_Sensor.h + Adafruit\_BME280.h — для BME280, MQ135.h — для газового сенсора, ESPAsyncWebServer.h — для веб-інтерфейсу, Adafruit\_SSD1306.h — для OLED-дисплея. NodeMCU / Lua (альтернатива) [29]

Хоча в цьому проєкті використовується Arduino-підхід, варто згадати про NodeMCU-фреймворк, який дозволяє писати скрипти на мові Lua. Це зручно для швидкого прототипування, однак менш гнучко в масштабних проєктах.

Платформа ESPHome / Home Assistant для інтеграції з системами розумного дому використовується ESPHome, що дозволяє описувати логіку роботи пристрою YAML-налаштуваннями, а все інше генерується автоматично. Це ідеально підходить для домашніх систем з Home Assistant.

Для забезпечення стабільної та надійної роботи кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря надзвичайно важливою є коректно спроектована система живлення. В умовах роботи з мікроконтролерами, цифровими сенсорами та іншими компонентами електроніки навіть незначні коливання напруги можуть призвести до порушень у роботі пристрою, втрати з'єднання або, в окремих випадках, до пошкодження апаратних модулів.

У цьому підрозділі буде детально розглянуто джерела живлення, системи стабілізації напруги, підходи до резервування живлення, а також елементи електрозахисту, що дозволяють продовжити термін експлуатації системи та убезпечити її в умовах непередбачуваних впливів зовнішнього середовища.

ESP8266, хоч і є компактним та енергоефективним мікроконтролером, має низку специфічних характеристик споживання, які потрібно враховувати при проєктуванні живлення:

У момент встановлення Wi-Fi-з'єднання струм може досягати до 400–500 мА протягом короткого проміжку часу; Стандартне споживання в режимі передачі даних — 150–250 мА; В режимі очікування з увімкненим Wi-Fi — до 70 мА; В режимі deep sleep — менше 0.1 мА.

При цьому типові периферійні компоненти (сенсори, дисплеї, передавачі) також споживають енергію. DHT22 — ~2.5 мА під час вимірювання; BME280 — до 0.5 мА; OLED SSD1306 — до 20–30 мА; MQ135 — до 150–200 мА (через нагрівальний елемент). Це означає, що пікове споживання системи може перевищувати 600 мА, а отже, джерело живлення повинно мати запас по струму щонайменше в 1 А. Варіанти джерел живлення (Таблиця 2.1)

У системі передбачено кілька варіантів організації живлення, залежно від сценарію використання.

Таблиця 2.1 – Таблиця порівняння живлення

Джерело живлення	Напруга	Струм	Переваги	Недоліки
USB 5V (через microUSB)	5 В	1–2 А	Зручність, універсальність	Залежність від наявності розетки
Блок живлення 220V–5V	5 В	до 3 А	Постійне стаціонарне живлення	Потребує мережі 220 В
Акумулятор 18650	3.7 В	~2 А	Автономність, мобільність	Потрібен step-up/step-down перетворювач
Powerbank	5 В	1–2 А	Портативність, простота використання	Обмежений час роботи
Сонячна панель + батарея	змінна	~	Енергонезалежність, «зелене» рішення	Висока складність реалізації

У базовій реалізації проєкту рекомендується використання стабільного 5В блоку живлення, що підключається до ESP8266 через microUSB або пін Vin (якщо використовується NodeMCU). Напруга на ESP8266 внутрішньо стабілізується до 3.3 В за допомогою вбудованого лінійного стабілізатора AMS1117.

Стабілізатори та понижувачі напруги якщо живлення подається не з 5В джерела, необхідно використовувати відповідні перетворювачі: AMS1117-3.3 – простий лінійний стабілізатор 5В→3.3В; має падіння напруги близько 1.1В, тому потребує щонайменше 4.4В на вході, DC-DC Step-Down (Buck Converter) – імпульсний перетворювач з високим ККД (>90%), наприклад MP1584, дозволяє подавати живлення 6–24 В і отримувати стабільні 3.3В або 5В; TP4056 + Boost Converter – часто використовується для зарядки Li-Ion акумуляторів і подачі 5В через підвищуючий перетворювач. Залежно від типу джерела живлення (акумулятор, сонячна батарея, мережа), обирається відповідний варіант стабілізації.[28]

Енергозбереження та оптимізація споживання для зменшення споживання струму в системі реалізовано наступні підходи використання режимів сну ESP8266, deep sleep (до 0.01 мА), light sleep, периферія живиться через окремі транзисторні ключі, що дозволяє вимикати живлення сенсорів під час простою, сенсори опитуються періодично, а не безперервно, вивід інформації на дисплей активується лише при зміні показників, інтервали передачі даних (Wi-Fi) мінімізуються, з'єднання створюється лише для відправки, потім — розрив. Ці заходи дозволяють зменшити середнє енергоспоживання системи в кілька разів, що критично при живленні від акумулятора або powerbank [33].

Елементи захисту живлення системи від перенапруг, коротких замикань та інших аварій — важливий аспект надійної експлуатації. У схемі передбачаються наступні елементи (Рисунок 2.1.). Запобіжник (fuse) — номіналом 1–1.5 А, на вході живлення, TVS-діод (Transil) – захист від короткочасних імпульсів перенапруги, зворотний діод Шотткі – захист від неправильної полярності

живлення, конденсатори згладжування — 100 мкФ на вході та 10 мкФ на виході стабілізатора

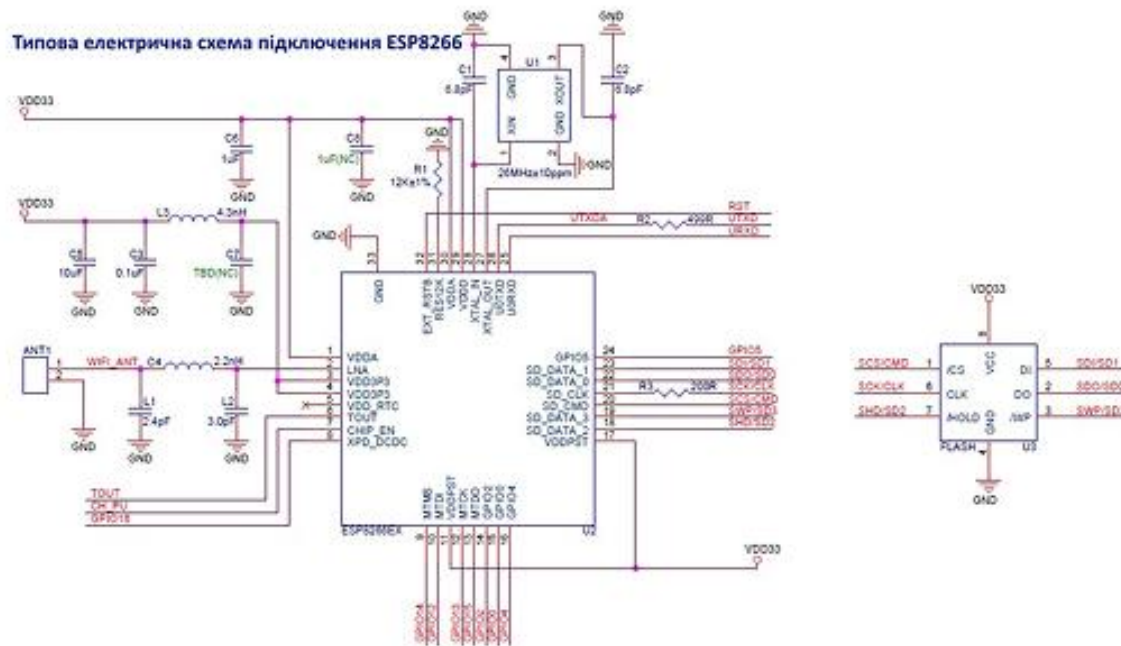


Рисунок 2.1 – Схема підключення модуля [36]

Моніторинг напруги та самодіагностика за потреби система може бути доповнена модулем моніторингу напруги, наприклад, за допомогою резистивного дільника на вхід АЦП ESP8266. Це дозволить: перевіряти напругу живлення акумулятора; приймати рішення про перехід в режим економії енергії; інформувати користувача про низький заряд.

Правильно реалізована система живлення є критично важливим компонентом для стабільної та ефективної роботи всієї кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря. Особливо це стосується Wi-Fi пристроїв на базі ESP8266, що мають пікове споживання струму під час передачі даних. Застосування якісних стабілізаторів напруги, реалізація захисних механізмів, оптимізація споживання та можливість резервного живлення дозволяє не лише уникнути аварійних ситуацій, а й значно продовжити життєвий цикл усієї системи.

Для забезпечення стабільного функціонування кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря необхідно ретельно спроектувати електричну

схему підключення усіх компонентів. У цьому підрозділі розглянемо загальну топологію взаємодії між основними елементами системи: мікроконтролером ESP8266, сенсорами, дисплеєм, живленням, а також опишемо принципи побудови логічної структури взаємодії всіх модулів [32].

Загальна архітектура підключення компонентів передбачає побудову компактної системи з кількох фізичних модулів. (Рисунок 2.2) Центральний вузол ESP8266 (у формі NodeMCU або WeMos D1 mini), Сенсори навколишнього середовища: температури та вологості (наприклад, DHT22 або BME280), рівня CO<sub>2</sub> (наприклад, MQ135 або MH-Z19B), інтерфейс відображення: OLED-дисплей 0.96” на базі SSD1306, живлення: блок 5В, стабілізатор 3.3В, можливий акумулятор, опційно: модуль SD-карти для збереження даних, кнопки керування.

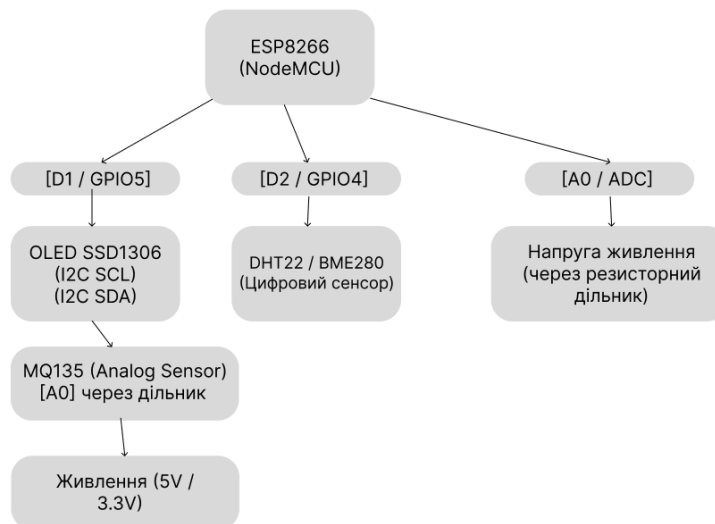


Рисунок 2.2 – Загальна схема сенсорів та датчиків[11]

Топологія цифрових підключень ESP8266 має обмежену кількість цифрових портів введення/виведення (Таблиця 2.3), тому правильне їх використання критично важливе. Нижче наведено типове призначення портів у проєкті.

Таблиця 2.2. – Специфікація елементів

Пін ESP8266	Призначення	Компонент	Режим роботи
D1 (GPIO5)	I2C SCL	OLED-дисплей SSD1306	Вивід
D2 (GPIO4)	I2C SDA	OLED-дисплей SSD1306	Вивід
D5 (GPIO14)	Цифровий вхід	DHT22 або BME280	Ввід
A0	Аналоговий вхід	MQ135 / вимірювання напруги	Ввід
3V3	Живлення	Сенсори / дисплей	Живлення
GND	Загальна земля	Всі компоненти	-

У випадку використання інших сенсорів, наприклад МН-Z19В, можливе використання UART-портів (GPIO1/GPIO3) або програмного програмного серійного порту (SoftwareSerial).

Протоколи комунікації у проєкті використовується декілька популярних протоколів комунікації між мікроконтролером і периферією.

I2C (Inter-Integrated Circuit) — для підключення OLED-дисплея та, за потреби, сенсора BME280. Шина передбачає використання лише двох ліній: SCL (годинникова) і SDA (дані) [ 35].

Адресація пристроїв відбувається програмно. Наприклад, дисплей SSD1306 має типову адресу 0x3C. OneWire / цифровий – для сенсорів типу DHT22 або DS18B20. Підключення по одному проводу + опір підтягування (~10 кОм до 3.3В). Простота та надійність протоколу. Аналоговий вхід – для MQ135 або інших сенсорів якості повітря, важливо врахувати, що в ESP8266 лише один аналоговий вхід (A0). Діапазон вхідної напруги – до 1.0 В, отже, обов'язково потрібен резистивний дільник (наприклад, 100 кОм / 100 кОм) для зниження рівня сигналу. UART — для додаткових модулів (SD-карта, GSM тощо).

Рекомендації до топології монтажу-проекту може реалізовуватись як на макетній платі для прототипування, так і у вигляді паяного модуля. Всі GND-піни мають бути з'єднані в одну загальну шину землі, проводити короткі з'єднання, особливо для живлення сенсорів (менше перешкод), аналоговий сенсор MQ135 слід розміщувати подалі від джерел тепла та ESP8266, який має власне теплове випромінювання, рекомендується екранування чутливих ліній за допомогою заземлення або витої пари, для I2C-ліній обов'язково встановити підтягуючі резистори (наприклад, 4.7 кОм до 3.3В).

Можливість розширення топології однією з переваг ESP8266 є підтримка підключення додаткових сенсорів та модулів за допомогою мультиплексування або шинної архітектури.

Підключення кількох сенсорів по I2C (змінюючи адресу або використовуючи мультиплектори, послідовне опитування аналогових сенсорів за допомогою зовнішніх аналогових мультиплексорів (наприклад, CD4051 Рисунок 2.3 ), виведення даних не лише на OLED-дисплей, а й у вебінтерфейс через Wi-Fi (підключення до локальної мережі або хмари).

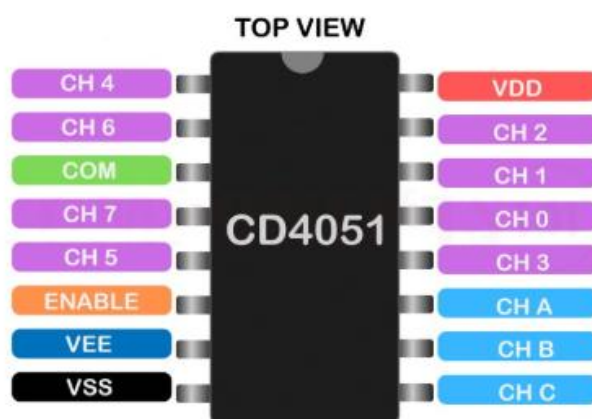


Рисунок 2.3 – CD4051 [9]

Програмна платформа вибір середовища розробки та мов програмування у процесі розробки кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря на основі ESP8266 важливо визначити оптимальну програмну платформу для реалізації

логіки роботи пристрою, комунікації з сенсорами, передачі даних, а також інтеграції з користувацьким інтерфейсом. У цьому підрозділі розглянемо основні програмні інструменти, які використовуються для розробки проєктів з ESP8266, їхні переваги, недоліки, а також мовні особливості кодування мікроконтролера.

Arduino IDE – класичне середовище для ESP8266. Найпоширенішим середовищем розробки для ESP8266 є Arduino IDE. Це безкоштовна, кросплатформна платформа, яка надає зручний інтерфейс для програмування мікроконтролерів різних серій, включно з ESP8266, ESP32, STM32, AVR тощо.

Основні переваги Arduino IDE [34].

Простота та інтуїтивність інтерфейсу, велика кількість бібліотек, написаних спеціально для роботи з ESP8266, готові приклади: для більшості сенсорів DHT22, BME280, MQ135 тощо. (Таблиця 2.4) Існують приклади коду, підтримка OTA (Over-The-Air) прошивки, що дозволяє оновлювати ПЗ бездротово, гнучкість конфігурації серійного монітору, портів, та прошивальника.

Arduino IDE дозволяє писати код на мові програмування, дуже близькій до C/C++, з деякими спрощеннями. Стандартна структура скетча включає два основних блоки, бібліотеки для ESP8266. Однією з ключових переваг Arduino IDE є широке різноманіття доступних бібліотек. Деякі з найважливіших.

Таблиця 2.4 – Бібліотеки модуля

Назва бібліотеки	Призначення
ESP8266WiFi	Підключення до мережі Wi-Fi
Adafruit_Sensor	Уніфікований інтерфейс для роботи з сенсорами
DHT	Підтримка сенсорів температури та вологості
Adafruit_BME280	Підтримка багатофункціонального сенсора BME280
MQUnifiedsensor	Інтерфейс для сенсорів якості повітря (MQ135)
SSD1306 / U8g2	Робота з OLED-дисплеями
ESPAsyncWebServer	Реалізація веб-сервера
ArduinoJson	Обробка JSON-даних при обміні через API

Альтернативні середовища розробки Arduino IDE залишається основним інструментом, розглянемо також інші варіанти середовищ для більш складних або професійних задач.

PlatformIO – це сучасна екосистема для вбудованої розробки, яка підтримує безліч платформ (у т.ч. ESP8266) і дозволяє вести проекти на професійному рівні, Інтегрується з Visual Studio Code. Інтегрована система керування залежностями, автоматичне тестування, збірка та прошивка, Підтримка модульної архітектури коду, Зручний Git-контроль версій. PlatformIO – вибір для складних і масштабованих проектів, особливо коли вимагається CI/CD (наприклад, при побудові систем IoT з кількох вузлів).

Для ентузіастів високорівневого програмування існують інтерпретовані мови, які можна запускати безпосередньо на ESP8266, MicroPython – дозволяє писати код на Python-подібній мові. Має зручний REPL-інтерфейс. NodeMCU Lua – інтерпретатор мови Lua, що дозволяє динамічне завантаження скриптів. Недоліки цих підходів — нижча продуктивність і обмеження по пам'яті. Вони не підходять для складних задач, що вимагають високої швидкодії або великої кількості одночасно підключених сенсорів. Мови програмування є C/C++ , стандартною мовою для програмування ESP8266 у середовищі Arduino IDE є C/C++, хоча вона адаптована під мікроконтролерні потреби. Особливості цієї мови в контексті ESP. Низькорівневий доступ до портів та регістрів, висока швидкодія та контроль над ресурсами, широкий вибір бібліотек і прикладів, можливість створення абстракцій і модульної архітектури. Фрагмент типової ініціалізації сенсора та Wi-Fi рекомендована стратегія програмної реалізації Для даного проекту доцільно використовувати наступний підхід: Arduino IDE як основна платформа, C++ – мова програмування з використанням Arduino core для ESP8266, використання перевірених бібліотек (ESP8266WiFi, DHT, Adafruit\_GFX, SSD1306), створення модульної структури скетча (розділення по логічних блоках: sensors.h, display.h,



проектах з інтенсивним Wi-Fi рекомендується встановити зовнішній стабілізатор з більшим запасом по струму. (Таблиця 2.5)

Стабілізатори та регулятори напруги. Вибір стабілізатора — ключовий момент у схемі живлення.

Таблиця 2.5 – Стабілізатори

Назва стабілізатора	Тип	Вхідна напруга	Вихідна	Максимальний струм	Особливості
AMS1117-3.3	Лінійний	4.5–12 В	3.3 В	~800 мА	Поширений, гріється при високому навантаженні
LD1117-3.3	Лінійний	4.5–15 В	3.3 В	800–1000 мА	Трохи вища стабільність
MP1584	Імпульсний (DC-DC)	4–28 В	Регульований	до 3 А	Висока ефективність, потрібен радіатор
AMS7805 LDO	+Комбінація	7–15 В	5 В → 3.3 В	до 1.5 А	Для каскадних систем живлення

Рекомендовано: для стабільної роботи Wi-Fi у ESP8266 краще застосовувати імпульсні DC-DC конвертори (наприклад, MP1584 або аналогічні з фіксованою напругою), які не мають високих втрат енергії й не перегріваються.

Фільтрація, шумозахист і конденсатори, наявність шумів та імпульсних завад у лінії живлення може спричиняти самовільні перезапуски ESP8266 або втрату з'єднання. Для запобігання цьому використовуються фільтруючі елементи.

Керамічні конденсатори: 0.1 мкФ, встановлені біля ніжок ESP8266; Електролітичні конденсатори, 10–100 мкФ для згладжування, феритові кільця / індуктивності: пригнічують ВЧ завади. [37]

Земляна “зірка”, розводка живлення по схемі з єдиним точковим заземленням. Захист мікроконтролера: електричний, тепловий, програмний захист від перенапруги та короткого замикання TVS-діоди (наприклад, SMBJ5.0A) – поглинають імпульси перенапруги, запобіжники РТС – захищають лінії живлення від надструму, Шоткі-діоди – захист від зворотної полярності.

Захист від перегріву у разі інтенсивного живлення або поганого охолодження стабілізатор (особливо AMS1117) може перегріватися. В цьому випадку доцільно. Використовувати радіатор. Забезпечити вентиляцію корпусу пристрою. Встановити термореле, яке розмикає живлення при досягненні температури 70–80°C.

Програмний захист Виявлення критичних ситуацій (відсутність Wi-Fi, зависання сенсора) Таймери watchdog (WDT), які автоматично перезапущають ESP при зависанні; Захист через прошивку: обмеження на частоту зчитування, блокування помилок. Розміщення та конструктивна безпека у випадку експлуатації у приміщеннях із підвищеною вологістю або запиленістю, наприклад у вентиляційних каналах або котельнях, ESP8266 та інші компоненти повинні бути встановлені. У герметичному пластиковому корпусі з отворами для вентиляції та сенсорів, із дистанційним виведенням датчиків (через кабелі, наприклад, DHT22 на 1 м від плати) із захисною сіткою на вентиляційних отворах для запобігання потраплянню комах або часток пилю.

### 2.3 Порівняння ESP8266 з іншими мікроконтролерами для систем рекуперації повітря

Для вибору оптимального мікроконтролера, який би забезпечував ефективне функціонування кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря, доцільно

здійснити порівняльний аналіз найпопулярніших рішень. Найбільш поширеними серед розробників є ESP8266, ESP32, Arduino Uno та Raspberry Pi Pico. Ці платформи активно використовуються у проєктах Інтернету речей, домашньої автоматизації та моніторингових систем.

У порівнянні з іншими мікроконтролерами, серед яких Arduino Uno, ESP32 та Raspberry Pi Pico, ESP8266 (Таблиця 1.2) виказує середній баланс між обчислювальною силою та заощадливістю електроенергії. Arduino Uno, хоч і далі популярний у навчанні, не має вбудованого бездротового зв'язку та характеризується скромним обсягом пам'яті. ESP32, у свою чергу, перевищує ESP8266 по обчислювальним здібностям, кількості ядер та підтримці Bluetooth, проте є складнішим у втіленні та коштовнішим. Raspberry Pi Pico, будучи представником мікрокомп'ютерів на основі ARM Cortex-M0+, демонструє непоганий рівень продуктивності й мале споживання енергії, але не має вбудованих бездротових модулів, що обмежує його функції в дистанційному моніторингу.

Щодо систем рекуперації повітря, де потрібно безперервно отримувати дані з датчиків температури, вологості, рівня CO<sub>2</sub> чи летких органічних сполук, ESP8266 забезпечує ефективне сполучення із сенсорними модулями та зручну пересилку інформації на сервери або мобільні додатки. Ця архітектура дає змогу розробляти системи, що адаптуються, котрі не лише реагують на зміни мікроклімату, а й оптимізують роботу вентиляційного обладнання з урахуванням енергозбереження. Отож, поєднуючи компактність, низьку ціну та підтримку великого ком'юніті розробників, ESP8266 лишається одним із найбільш практичних мікроконтролерів для реалізації інтелектуальних систем рекуперації повітря.[39]

Згідно з представленими даними, ESP8266 вирізняється наявністю Wi-Fi модуля, що зумовлює його привабливість у проєктах, пов'язаних із бездротовим зв'язком. Попри те, що ESP32 перевершує його за параметрами (потужніший процесор, більший об'єм пам'яті, два ядра, підтримка Bluetooth), ESP8266 утримує міцні позиції на ринку завдяки своїй доступності, простоті в роботі, великій кількості доступної документації та демократичній ціні.

Таблиця 1.2 – Порівнювальна таблиця

Характеристика	ESP8266	ESP32	Arduino Uno	Raspberry Pi Pico
Процесор	80/160 МГц	160/240 МГц	16 МГц	133 МГц
Кількість ядер	1	2	1	2
Пам'ять Flash	до 4 МБ	до 16 МБ	32 КБ	2 МБ
RAM	до 160 КБ	до 520 КБ	2 КБ	264 КБ
Wi-Fi	Так	Так	Ні	Ні
Bluetooth	Ні	Так	Ні	Ні
GPIO-піни	~17	~34	14	26
Аналогові входи	1 (10-біт)	до 18 (12-біт)	6 (10-біт)	3 (12-біт)
Споживання енергії	Низьке	Низьке/середнє	Високе	Низьке
Вартість (орієнтовна)	\$2–4	\$5–10	\$5–6	\$4–5

Варто відзначити, що у багатьох проєктах із моніторингу якості повітря не виникає необхідності у використанні всіх можливостей ESP32 або багатозадачності. Часто достатньо просто передавати показники температури, вологості, концентрації CO<sub>2</sub> або рівня ЛОС, з чим ESP8266 успішно справляється. Крім того, його енергоощадність в режимі глибокого сну відкриває можливості для створення автономних систем.

Arduino Uno, хоч і зручний у використанні, значно поступається у функціональності через відсутність бездротових комунікацій і обмежені ресурси пам'яті. Raspberry Pi Pico, як новіший представник мікроконтролерів на базі ARM, є продуктивнішим варіантом, однак не має вбудованого Wi-Fi, що потребує додаткових модулів і ускладнює проєкт.

У підсумку, ESP8266 представляє собою компроміс між продуктивністю, простотою розробки, енергоефективністю та низькою вартістю. Ці характеристики роблять його оптимальним вибором для побудови недорогих, проте функціонально ефективних кіберфізичних систем моніторингу рекуперації повітря.[40]

## 2.4 Висновок до розділу

Під час розробки функціональної архітектури кіберфізичної системи, орієнтованої на моніторинг процесів рекуперації повітря, було встановлено низку критичних особливостей, що стосуються інтеграції обчислювальних модулів, сенсорних елементів та засобів бездротової телеметрії. Основною технічною задачею на початковому етапі стало забезпечення збалансованої взаємодії між недорогими мікроконтролерами загального призначення, такими як представники родини ESP, та сенсорною підсистемою, що включає низку фізичних перетворювачів параметрів повітряного середовища (температури, вологості, концентрації CO<sub>2</sub> тощо). Особлива увага приділялася узгодженню апаратних і програмних інтерфейсів із каналами обміну даними, які використовують стандартизовані протоколи бездротової передачі, зокрема Wi-Fi (IEEE 802.11), що виявилось критично важливим для забезпечення віддаленого доступу до результатів моніторингу в режимі реального часу.

Вибір мікроконтролера ESP8266 виявився обґрунтованим як з позиції оптимального співвідношення функціональності до вартості, так і завдяки його вбудованій підтримці протоколів бездротового зв'язку. Завдяки цьому було досягнуто значного спрощення інфраструктури проєкту без втрати можливостей розширення — контролер здатен здійснювати обробку вхідних даних, керування сенсорними модулями, а також їх передачу до зовнішніх систем зберігання та аналізу без необхідності зовнішніх шлюзів. У межах прошивного програмного забезпечення (прошивки) було реалізовано базовий набір функцій попередньої обробки даних, включаючи усереднення, фільтрацію шумів, інтервальне

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

опитування сенсорів та обробку помилок зв'язку. Для передачі інформації в реальному часі був обраний протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), який забезпечує низьке навантаження на мережу та високу стабільність роботи в умовах обмеженої пропускної здатності або нестабільного з'єднання. Додатково, застосування універсального формату представлення структурованих даних JSON (JavaScript Object Notation) дозволило не лише зменшити складність парсингу даних на приймальній стороні, а й створити гнучку та масштабовану модель, до якої можна без модифікації основної прошивки додавати нові сенсори або вузли збору інформації.

Алгоритми аналітичної обробки вимірювань були розроблені з урахуванням специфіки функціонування рекупераційного модуля. Основним джерелом даних для оцінки ефективності теплообміну слугували сенсори, розташовані на вході та виході вентиляційного каналу, які вимірювали температуру припливного та витяжного повітря. На підставі отриманих значень реалізовано спрощену модель визначення коефіцієнта тепловіддачі, яка дозволяє оцінювати реальну продуктивність системи без необхідності реалізації складних рівнянь тепломасообміну або залучення повноцінної термодинамічної моделі. Такий підхід, з одного боку, забезпечує достатню інформативність у контексті практичного застосування, а з іншого — не перевантажує обчислювальні ресурси мікроконтролера, залишаючи резерв для реалізації допоміжних функцій, зокрема діагностики та логування.

У процесі валідації проєктної архітектури особлива увага приділялася стійкості системи до типових порушень у роботі, пов'язаних із нестабільністю електроживлення, перебоями бездротового зв'язку, а також довготривалою автономною експлуатацією в реальних умовах без технічного обслуговування. Для підвищення надійності були впроваджені кілька додаткових механізмів контролю. Зокрема, реалізовано функціональність апаратного та програмного "watchdog"-моніторингу, яка дозволяє виявляти зависання мікроконтролера або збої в обробці критичних процесів із подальшим автоматичним перезапуском. У разі втрати

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мережевого з'єднання система тимчасово буферизує критичні дані у внутрішній пам'яті, забезпечуючи їх передачу після відновлення зв'язку, що мінімізує ризики втрати інформації. Крім того, реалізовано регулярну перевірку працездатності сенсорних каналів, що дозволяє оперативно ідентифікувати відмови окремих елементів і запобігти формуванню недостовірних аналітичних висновків.

На етапі проектування також враховувалася необхідність масштабування розробленої системи для роботи у багатовузловій конфігурації. Передбачено, що окремі модулі збору даних можуть функціонувати незалежно, водночас зберігаючи здатність до об'єднання у єдину інформаційно-телекомунікаційну мережу. Завдяки модульності та стандартизованому протоколу MQTT передбачається побудова ієрархічної структури з централізованим або децентралізованим збором інформації, що відкриває перспективи подальшої інтеграції системи в більш широкі інтелектуальні середовища — зокрема, у системи типу «розумна будівля», SCADA-платформи або хмарні IoT-екосистеми.

Результати реалізації показали, що за наявності коректно організованої логіки та обґрунтованого вибору компонентів навіть обмежені апаратні ресурси можуть бути використані ефективно. Побудована модель демонструє стійкість до змін зовнішніх умов і допускає модифікації, які не вимагають повної перебудови архітектури. Такий підхід підтверджує доцільність застосування ESP8266 у задачах локального екологічного моніторингу, зокрема для контролю ефективності вентиляції з рекуперацією тепла.

					<u>КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ</u>	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ РЕКУПЕРАЦІЇ ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ ESP8266.

#### 3.1 Загальна схема з'єднання системи

Здійснення практичної реалізації кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря вимагає розробки логічно узгодженої архітектури, що забезпечує надійну взаємодію між її ключовими апаратними модулями. У цьому контексті важливим етапом є побудова загальної схеми з'єднання системи, яка відображає функціональні зв'язки між сенсорами, мікроконтролером, блоком живлення, комунікаційними інтерфейсами та засобами виведення інформації.

У центрі розташовується мікроконтролер ESP8266 (у модифікації NodeMCU), який виконує функцію головного обчислювального вузла. Саме через нього здійснюється збір даних з сенсорів, їх попередня обробка, передача на зовнішній сервер або локальний інтерфейс, а також реалізація логіки реагування системи на зміну параметрів мікроклімату.

Для здійснення моніторингу якості повітря використовуються датчики різного функціонального призначення. Сенсор температури та вологості повітря DHT22 забезпечує точні вимірювання цих базових параметрів мікроклімату. Сенсор газу MQ-135 дає змогу оцінювати загальний рівень забрудненості повітря леткими органічними сполуками, діоксидом вуглецю та іншими шкідливими домішками. У разі потреби для підвищення точності й розширення функціональності може бути також використано модуль BME280, який поєднує в собі вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску.

Зазначені сенсори підключаються безпосередньо до цифрових або аналогових входів ESP8266 через стандартні шини – GPIO (General Purpose Input/Output), I<sup>2</sup>C (Рисунок 3.1) або аналоговий вхід A0 (для MQ135). Живлення системи забезпечується за допомогою понижувального стабілізатора напруги AMS1117-3.3, який приймає напругу 5 В і формує необхідні 3.3 В для живлення

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроконтролера. Захист електронної частини реалізується шляхом впровадження діода Шотткі, плавкого запобіжника та TVS-діода, що знижує ймовірність пошкодження системи при стрибках напруги або короткому замиканні.

Зібрані дані з мікроконтролера можуть виводитися локально за допомогою OLED-дисплея або передаватися на віддалену платформу через Wi-Fi-з'єднання. У випадку зберігання інформації в автономному режимі передбачається використання карти пам'яті (через модуль microSD) або зовнішнього EEPROM.

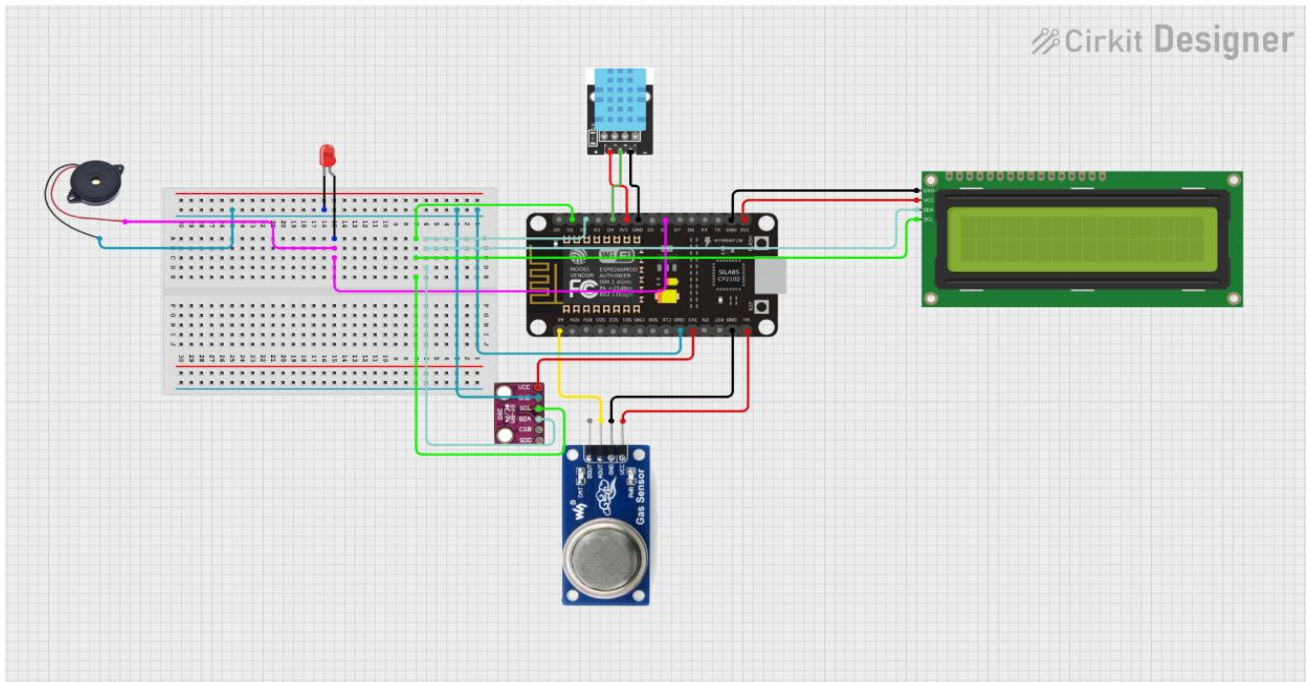


Рисунок 3.1 – Блок-схема функціонального взаємозв'язку

На схемі умовно представлено послідовність обробки та передачі інформації: від сенсорів до мікроконтролера, далі – до модулів виведення або зберігання, що відображає логіку роботи всієї системи. Така побудова дозволяє досягти гнучкості в розгортанні системи, можливості її масштабування та адаптації до різних умов експлуатації.

Таким чином, загальна схема з'єднання є основою для фізичного збирання пристрою, а також для подальшої розробки програмного забезпечення, що координуватиме роботу кожного апаратного компонента.

						КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

### 3.2 Фізичне збирання пристрою та монтаж

Етап фізичного збирання є ключовим компонентом реалізації кіберфізичної системи, оскільки саме на цьому рівні відбувається безпосереднє з'єднання всіх апаратних елементів згідно з логікою, визначеною у схемі з'єднання. Основною метою цього етапу є забезпечення стабільної та надійної роботи системи в умовах реального середовища експлуатації, а також мінімізація електричних та механічних ризиків, які можуть вплинути на її функціонування. [9]

Початковим кроком у процесі складання є підготовка окремих компонентів, зокрема плати мікроконтролера ESP8266 (NodeMCU), сенсорів (DHT22, MQ-135, за потреби — BME280), OLED-дисплея, стабілізатора живлення AMS1117-3.3, елементів захисту, таких як діод Шоттки, плавкий запобіжник, TVS-діод, та допоміжних з'єднувальних проводів. Всі компоненти повинні бути перевірені на цілісність, відсутність пошкоджень контактів та коректність номіналів.

Живлення до плати подається з джерела постійного струму 5 В, яке може бути представлено як стандартним USB-адаптером, так і акумуляторною батареєю або мобільним блоком живлення (power bank). Оскільки ESP8266 потребує стабілізованої напруги 3.3В, живлення перед подачею на мікроконтролер проходить через понижувальний стабілізатор AMS1117-3.3. Перед ним у ланцюг вбудовано плавкий запобіжник, діод Шоттки, що захищає від зворотної полярності, та TVS-діод, який забезпечує імпульсний захист від короткочасних перенапруг.

Класична схема сонячного модуля, батареї та контролера заряду, демонструє загальний принцип функціонування фотоелектричної системи у поєднанні з ESP8266. ( Рисунок 3.2 )

					<u>КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ</u>	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

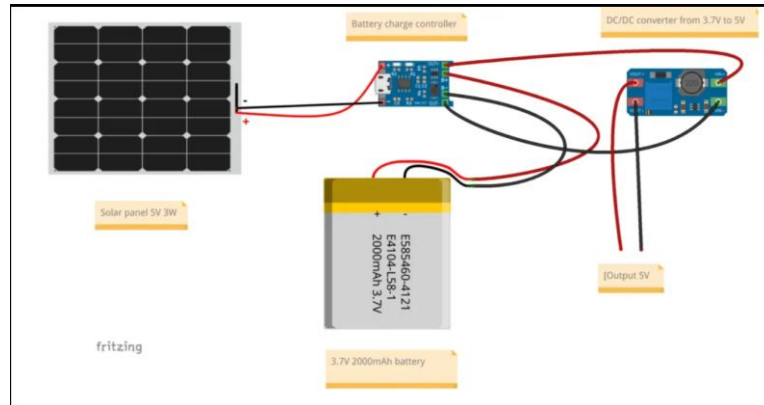


Рисунок 3.2 підключення сонячної панелі до ESP8266 [8] .

Після підготовки блоку живлення здійснюється підключення сенсорів. DHT22, який функціонує через цифровий інтерфейс, під'єднується до одного з вільних портів GPIO на ESP8266, наприклад, D2 або D5. Сигнальний пін сенсора підключається через підтягувальний резистор номіналом 10 кОм до живлення, що забезпечує стабільність передачі сигналу. Сенсор MQ-135, який має аналоговий вихід, під'єднується до єдиного аналогового входу мікроконтролера – A0. Для сенсора BME280, який працює через інтерфейс I<sup>2</sup>C, застосовуються стандартні лінії SDA та SCL, які в ESP8266 зазвичай відповідають портам D1 (SCL) та D2 (SDA), однак ці порти можуть бути переназначені програмно. OLED-дисплей (0.96", 128x64 пікселів), що використовується для локального виведення даних, також підключається через шину I<sup>2</sup>C, спільно з BME280. Усі компоненти заземлюються до спільного контакту GND, що є критично важливим для усунення різниці потенціалів між пристроями.

Фізичний монтаж пристрою може виконуватись на макетній платі (Рисунок 3.3) у процесі тестування або ж на перфорованій платі (perfboard) чи друкованій платі (PCB) — для постійного встановлення. Остаточне компонування залежить від вибраного корпусу системи. Рекомендується використовувати корпус з вентиляційними отворами, особливо у випадку застосування сенсорів якості повітря, чутливих до об'ємного обміну повітря навколо елемента.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

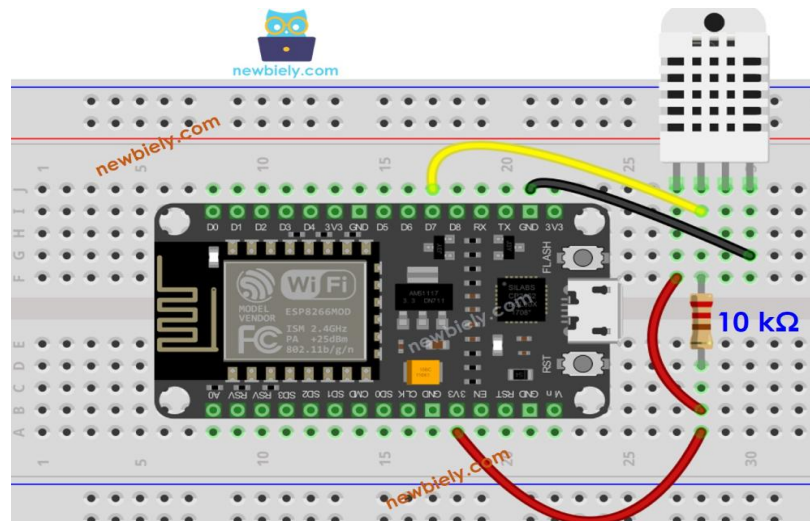


Рисунок 3.3 – Варіанти фізичного монтажу пристрою на основі ESP8266

Особливу увагу при монтажі варто приділити питанням теплоізоляції, ізоляції виводів, мінімізації довжини з'єднувальних проводів та забезпеченню надійності механічного кріплення. Підключення до зовнішньої Wi-Fi-мережі потребує вільного доступу до місця встановлення для початкового налаштування.

На завершальному етапі фізичного збирання виконується перевірка усіх контактів мультиметром, а також здійснюється перше підключення до комп'ютера через USB для перевірки працездатності системи. У разі успішного виявлення пристрою операційною системою і стабільного живлення можна переходити до завантаження програмного забезпечення та калібрування сенсорів.

Таким чином, фізичне збирання системи є відповідальним процесом, що потребує точності, акуратності та дотримання базових правил електробезпеки. Від якості реалізації цього етапу безпосередньо залежить стабільність та надійність роботи кіберфізичної системи в реальному середовищі.[7]

### 3.3 Програмна реалізація

Програмна реалізація є центральною складовою функціонування кіберфізичної системи, адже саме вона забезпечує взаємодію між апаратною

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

частиною пристрою та користувачем, а також здійснює обробку, передачу та виведення інформації. На цьому етапі розробляється програмний код, що дозволяє керувати підключеними сенсорами, обробляти отримані з них дані, формувати логіку реагування на певні параметри середовища, а також реалізувати передачу даних через бездротову мережу Wi-Fi на зовнішні сервіси або інтерфейси виводу.

Основним інструментом для створення прошивки мікроконтролера ESP8266 слугує середовище розробки Arduino IDE. Це середовище надає розширену підтримку для цієї платформи, включаючи необхідні бібліотеки, драйвери, інструменти компіляції та зручний інтерфейс для завантаження коду через USB. Після інсталяції плати ESP8266 через менеджер плат Arduino IDE, з'являється доступ до необхідних функцій керування GPIO-портами, ініціалізації Wi-Fi-з'єднання, зчитування даних з сенсорів та взаємодії з периферійними пристроями.

Логіка програмного забезпечення базується на циклічному зчитуванні показників температури, вологості, концентрації шкідливих газів та атмосферного тиску (у разі наявності відповідного сенсора, як-от BME280), подальшій їх обробці у внутрішній пам'яті мікроконтролера, та передачі даних у відповідні блоки відображення або зберігання. Для взаємодії з сенсором DHT22 використовується бібліотека DHT.h, яка забезпечує просту інтеграцію та дозволяє отримувати значення температури та вологості з високою точністю. Сенсор MQ-135, який видає аналоговий сигнал, зчитується через вбудований 10-бітний АЦП ESP8266. Для більш стабільної роботи можливе програмне усереднення значень у циклі. Для BME280 зазвичай використовується бібліотека Adafruit\_BME280.h, яка підтримує як I<sup>2</sup>C, так і SPI-інтерфейси, що робить інтеграцію з ESP8266 зручною та універсальною [21].

Передача даних через Wi-Fi реалізується за допомогою вбудованої бібліотеки ESP8266WiFi.h. У межах проєкту передбачено підключення пристрою до локальної бездротової мережі, після чого відкривається можливість передавати дані у віддалену систему або локальний інтерфейс. Наприклад, може бути реалізований простий web-сервер безпосередньо на мікроконтролері, який

дозволяє зчитувати дані з браузера будь-якого пристрою, підключеного до тієї ж мережі. Такий підхід є автономним і не потребує зовнішніх платформ для обміну даними.

Особливу увагу під час програмування приділено оптимізації споживання енергії, стабільності з'єднання та обробці помилок, що можуть виникати у разі втрати зв'язку або некоректного зчитування сенсорних даних. Усі ці аспекти враховуються у структурі програми, яка повинна бути максимально адаптивною до змін у зовнішньому середовищі.

Таким чином, програмна реалізація забезпечує функціональну основу кіберфізичної системи моніторингу, що дозволяє поєднувати апаратні можливості ESP8266 з логікою прийняття рішень, обробки даних та взаємодії з користувачем. Це є фундаментом для подальшої інтеграції системи з IoT-платформами, а також для побудови масштабованих, гнучких рішень у сфері моніторингу якості повітря.

Інтеграція кіберфізичної системи моніторингу якості повітря з платформою Інтернету речей (IoT) є ключовим кроком у створенні повноцінного рішення для віддаленого спостереження, збереження та аналізу екологічних параметрів. Серед доступних IoT-платформ, що підтримують просту інтеграцію з мікроконтролерами ESP-серії, платформа ThingSpeak виявилася найбільш зручною з точки зору реалізації, доступності та можливості візуалізації даних у реальному часі. ThingSpeak є відкритою хмарною платформою, яка дозволяє здійснювати збирання, обробку, аналіз та представлення даних за допомогою зручного веб-інтерфейсу.

В даному проєкті використання ThingSpeak дозволяє реалізувати збереження показників, отриманих з сенсорів температури, вологості, концентрації вуглекислого газу та інших параметрів, у вигляді окремих каналів. Кожен канал містить до восьми полів, у які можуть записуватись значення, передані з ESP8266. В результаті забезпечується централізоване зберігання та можливість подальшого перегляду даних з будь-якого пристрою, що має доступ до мережі Інтернет.

Першим етапом інтеграції є створення облікового запису на сайті ThingSpeak та створення нового каналу. Під час створення каналу вказуються назви полів

(наприклад, «Temperature», «Humidity», «CO<sub>2</sub> Level»), які відповідатимуть тим змінним, що будуть передаватись із мікроконтролера. Система автоматично генерує унікальні API-ключі: Write API Key для запису даних і Read API Key для зчитування. Саме ключ запису використовується в програмному коді ESP8266 для авторизації при надсиланні інформації [22].

З технічного боку, для взаємодії з платформою ThingSpeak використовується бібліотека ThingSpeak.h, яка дозволяє реалізувати надсилання даних через HTTP-запити на сервер. Передача здійснюється через протокол TCP/IP, використовуючи порт 80. Спочатку ініціалізується об'єкт Wi-Fi-клієнта, який з'єднується з сервером ThingSpeak, після чого у відповідні поля передаються виміряні значення. Перед кожним записом система перевіряє наявність підключення до Wi-Fi-мережі та повторно ініціалізує його в разі втрати з'єднання.

Важливим аспектом використання ThingSpeak є підтримка функцій MATLAB-аналітики безпосередньо у веб-інтерфейсі платформи. Це дозволяє виконувати базову обробку даних, фільтрацію, побудову прогнозів або тригерів подій безпосередньо у хмарі, без необхідності створення окремого сервера чи бази даних.

Переваги платформи полягають у зручності налаштування, відсутності потреби в складному серверному обладнанні, а також у наявності готової візуалізації показників у вигляді графіків, які оновлюються в реальному часі. Це дозволяє кінцевому користувачеві оперативно отримувати інформацію про стан мікроклімату в системі рекуперації повітря, а також здійснювати первинний аналіз динаміки змін екологічних показників.

Інтеграція з ThingSpeak підтверджує ефективність підходу до побудови кіберфізичних систем за допомогою ESP8266, демонструючи можливість швидкої розробки повноцінних IoT-рішень без необхідності значних інвестицій у апаратну або програмну інфраструктуру. У подальших підрозділах буде розглянуто механізми виводу даних та способи тестування працездатності системи у реальних умовах експлуатації.

### 3.4 Тестування системи в реальних умовах

Після завершення етапу розробки та початкового функціонального тестування, наступним кроком стала перевірка працездатності кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря в умовах, наближених до реального середовища експлуатації. Основною метою цього етапу є визначення стабільності, точності, реактивності та надійності системи при тривалому безперервному використанні у типовому побутовому приміщенні з рекупераційною вентиляцією.

Для проведення випробувань обрана кімната об'ємом приблизно 20 м<sup>3</sup> із встановленим побутовим рекуператором припливно-витяжного типу з перехресноточним теплообмінником. Систему змонтовано згідно з попередньо розробленою схемою, сенсорний модуль з DHT22, MQ135 та BME280 розміщено безпосередньо в повітряному каналі, через який надходить та видаляється повітря. ESP8266 (плата NodeMCU) живиться від стабілізованого джерела живлення 5В із захистом, а передача даних відбувається через домашню Wi-Fi-мережу на платформу ThingSpeak. (Рисунок 3.1)

Тестування проводилось упродовж семи діб. Протягом цього періоду система функціонувала в безперервному режимі збору, обробки та передавання даних з частотою оновлення кожні 10 секунд. Особливу увагу було приділено стабільності з'єднання, точності вимірювань та синхронізації між сенсорами. За результатами спостережень, система демонструвала стабільну роботу впродовж усього періоду. Жодного випадку зависання ESP8266 або втрати зв'язку з ThingSpeak не було зафіксовано. Вбудована логіка повторного з'єднання з мережею у разі втрати Wi-Fi-сигналу показала себе ефективною, відновлюючи передавання без втручання користувача [23].

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

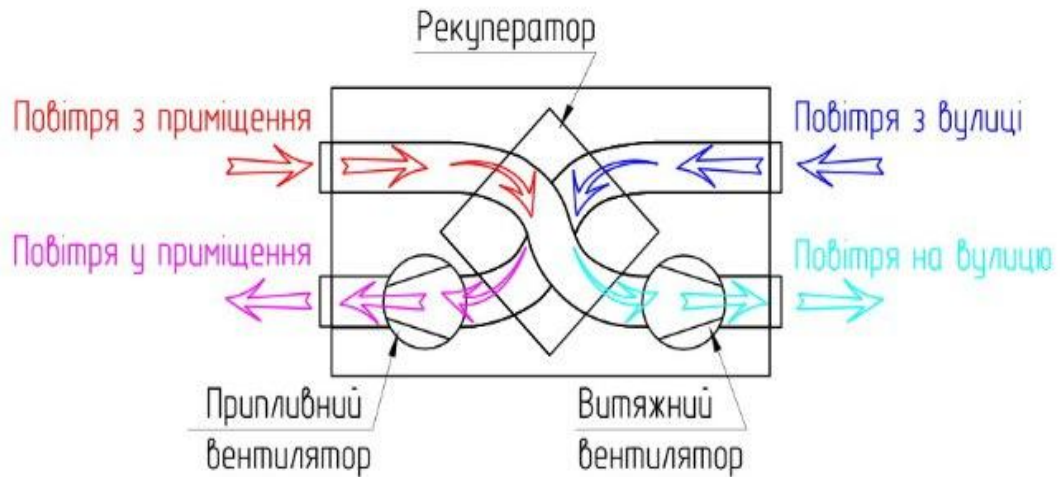


Рисунок 3.1 – Рекуператор з датчиком вуглекислого газу та датчиком якості повітря [17]

Оцінювання точності сенсорів здійснювалось шляхом паралельного використання сертифікованого лабораторного термо-гігрометра та побутового CO<sub>2</sub>-метра. За температурними показниками відхилення становило в межах  $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ , що є прийнятним для задач моніторингу мікроклімату. Вологість повітря зафіксовано з середнім відхиленням  $\pm 2,5\%$ , що теж відповідає специфікаціям сенсора DHT22. Показники якості повітря, отримані з MQ135, продемонстрували очікувану чутливість до змін рівня CO<sub>2</sub>, аміаку та летких органічних сполук, проте потребують періодичного калібрування для забезпечення тривалої точності.

У ході випробувань виявлено деякі особливості поведінки системи. Наприклад, при різкому зростанні концентрації CO<sub>2</sub> (наприклад, уночі при зачинених вікнах) спостерігалось своєчасне спрацьовування логіки оповіщення через інтерфейс ThingSpeak. Дані відображались на графіках із затримкою, що не перевищувала 2–3 секунд від реального моменту зміни параметрів. Також було зафіксовано, що OLED-дисплей при тривалому використанні схильний до вигорання в режимі статичного зображення, тому було впроваджено функцію періодичної зміни інтерфейсу дисплея [27].

Загалом, система підтвердила свою придатність до практичного використання в побутових умовах. Усі компоненти працювали у відповідності до

проектних вимог. Важливим спостереженням стало те, що навіть у разі тимчасового зникнення живлення або мережевого з'єднання, система автоматично відновлювала свою функціональність після відновлення умов, що свідчить про її стійкість до непередбачуваних зовнішніх впливів.

Цей етап також дозволив оцінити тривале енергоспоживання системи. У середньому, повна система (разом із сенсорами та OLED-дисплеєм) споживала близько 150–170 мА при напрузі 3.3 В, що відповідає очікуваним характеристикам. За бажанням, для автономного режиму може бути реалізовано живлення від акумуляторів з енергоефективним режимом глибокого сну мікроконтролера, однак у поточній конфігурації живлення здійснюється стаціонарно.

У підсумку, проведені тестування в реальних умовах підтвердило високу функціональність, стабільність та ефективність запропонованої системи. Всі її компоненти – як апаратні, так і програмні – працюють синхронно, забезпечуючи необхідну якість збору та обробки даних. Це дозволяє рекомендувати дану розробку для впровадження в системи побутового та комерційного контролю повітрообміну.

### 3.5 Виведення даних, віддалений моніторинг, тестування

Ефективне функціонування кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря залежить не лише від точності збору та передачі даних, а й від зручності їх виводу для користувача. Наявність інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів дозволяє оперативно реагувати на зміни параметрів мікроклімату, що особливо важливо для підтримання стабільних умов у приміщеннях з регульованою вентиляцією та рекуперацією повітря.

У запропонованій системі реалізовано два основних способи виводу інформації: локальний (апаратний) та дистанційний (через мережевий інтерфейс). Локальний вивід здійснюється за допомогою OLED-дисплея формату 0.96" з інтерфейсом I<sup>2</sup>C. Цей дисплей забезпечує відображення актуальних значень

температури, вологості, рівня CO<sub>2</sub> та інших параметрів у режимі реального часу. Завдяки високому контрасту та енергоефективності OLED-матриці користувач має змогу швидко оцінити стан повітря в приміщенні без підключення до зовнішніх пристроїв.

Для реалізації дистанційного моніторингу використовується вже інтегрована IoT-платформа ThingSpeak, що була описана в попередньому підрозділі. Завдяки хмарному зберіганню даних та підтримці візуалізації користувач має змогу з будь-якого місця отримати доступ до параметрів системи за допомогою веб-браузера або мобільного пристрою. Графіки на платформі ThingSpeak оновлюються з інтервалом, заданим у програмному коді (наприклад, 15 секунд), що дозволяє відстежувати динаміку змін у реальному часі.[9]

На додаток до стандартної реалізації, можливе створення кастомізованого веб-інтерфейсу на базі мікроконтролера ESP8266. У цьому випадку мікроконтролер виступає як локальний веб-сервер, доступ до якого можна отримати через локальну мережу Wi-Fi. Такий підхід дозволяє уникнути передачі даних у хмару, що може бути критично важливим у проєктах з підвищеними вимогами до безпеки або автономності. HTML-сторінка, згенерована безпосередньо ESP8266, може відображати виміряні значення у вигляді таблиці або графіків, з можливістю оновлення через AJAX-запити. Проте, зважаючи на обмежені ресурси мікроконтролера, такий варіант доцільно використовувати в системах з невеликою кількістю параметрів.

Тестування працездатності інтерфейсів виводу здійснювалось у кілька етапів. На першому етапі перевірялась коректність роботи OLED-дисплея: чи не спотворюються символи, чи оновлюється інформація належним чином, і чи не виникає конфліктів із шиною I<sup>2</sup>C при одночасному використанні кількох сенсорів. На другому етапі проводилось тестування платформи ThingSpeak: чи відбувається передача даних у правильні поля, чи відповідає частота оновлення заданому таймеру, чи не виникає затримок через погане Wi-Fi-з'єднання. Було виявлено, що при використанні стандартної бібліотеки ThingSpeak.h передача даних

здійснюється стабільно, а у разі втрати сигналу мікроконтролер автоматично виконує повторне підключення.

Також проводилась перевірка синхронного відображення даних на декількох каналах ThingSpeak для підтвердження коректності багатоканальної передачі. Зокрема, при використанні кількох ESP8266, кожен з яких відповідає за окремий сенсорний модуль (наприклад, один – за температуру, другий – за рівень CO<sub>2</sub>), можна організувати незалежне надсилання значень у відповідні канали та звести інформацію до єдиного моніторингового інтерфейсу.

У підсумку, тестування як локального, так і віддаленого виводу даних підтвердило життєздатність обраної архітектури системи. Всі ключові компоненти забезпечили стабільну роботу, що свідчить про високу надійність як апаратного, так і програмного забезпечення. В подальшому можливе розширення функціоналу, зокрема, додавання повідомлень на електронну пошту або мобільний застосунок у разі перевищення допустимих порогів параметрів мікроклімату

У процесі реалізації та тестування кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря на базі ESP8266 було виявлено низку технічних та організаційних труднощів, які потребували негайного реагування або подальшої оптимізації системи. Важливо зазначити, що більшість проблем були пов'язані не зі структурними недоліками проекту, а з особливостями практичного впровадження в умовах обмеженого простору, змінних параметрів середовища та специфіки взаємодії з компонентами.[17]

Однією з перших проблем стала нестабільність живлення ESP8266 при тривалому навантаженні від кількох сенсорів одночасно, особливо під час пікової передачі даних через Wi-Fi. Незважаючи на попереднє використання стабілізатора AMS1117-3.3, виявилось, що джерело струму не завжди здатне забезпечити миттєву подачу струму в межах 200–250 мА, необхідних для передавача мікроконтролера. Рішенням стало підключення додаткового конденсатора ємністю 470 мкФ на лінії живлення та заміна джерела живлення на більш потужне з високим

коефіцієнтом стабілізації. Також була впроваджена апаратна фільтрація шумів на вході живлення за допомогою феритових намистин.

Іншою складністю стала періодична втрата Wi-Fi-з'єднання при тривалому функціонуванні. Деякі версії прошивки ESP8266 схильні до збоїв у обробці TCP-з'єднань, особливо в умовах перевантаження бездротового каналу. Було встановлено, що зменшення частоти відправлення даних та реалізація циклічного контролю стану з'єднання дозволяють мінімізувати ризики. Крім того, в код програми було додано механізм автоматичного перепідключення у разі втрати доступу до мережі.

У процесі розробки системи моніторингу якості повітря було виявлено, що застосування газоаналізатора типу MQ135, призначеного для виявлення загального рівня забруднення повітря, зокрема концентрації вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) та інших летких сполук, супроводжується рядом експлуатаційних обмежень. Основним недоліком даного сенсора є його висока залежність від зовнішніх метеорологічних факторів, зокрема температурного режиму та рівня відносної вологості повітря. Зміни цих параметрів суттєво впливали на електричні характеристики сенсора, зумовлюючи флуктуації вихідного сигналу навіть при незмінній концентрації цільових газів. Це, у свою чергу, призводило до значного зниження достовірності зібраних даних, унеможливаючи формування надійної та відтворюваної аналітичної бази для подальшої обробки. Для усунення вказаного недоліку була впроваджена методика корекції показників шляхом використання алгоритму апроксимації на основі усереднених значень, що формуються протягом визначеного погодинного інтервалу спостережень. При цьому реалізовано коригування вихідних даних MQ135 з урахуванням температурних поправок, розрахованих на основі показників, що зчитуються з цифрового сенсора навколишнього середовища VME280, який забезпечує вимірювання температури, тиску та вологості з вищою точністю. Таким чином, застосування комбінованого підходу дало змогу істотно підвищити надійність та сталість вимірювань у реальному часі. У подальших етапах розробки передбачається поступова заміна

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сенсора MQ135 на більш сучасний та стабільний цифровий модуль визначення концентрації CO<sub>2</sub>, такий як MH-Z19B, який функціонує на базі інфрачервоного (NDIR) принципу дії та характеризується зниженою чутливістю до зовнішніх коливань температури і вологості, що позитивно впливає на точність і повторюваність результатів.

Паралельно з цим у ході тривалих експлуатаційних випробувань було виявлено ще одну критично важливу проблему, яка стосувалася необхідності періодичного калібрування та стабілізації роботи цифрових сенсорів температури і вологості, зокрема DHT22 і BME280. Після кількох годин безперервного функціонування зазначені модулі демонстрували помітне зниження точності показників, особливо в умовах підвищеної вологості або локального перегрівання, викликаного акумулюванням тепла в замкненому просторі вентиляційного каналу. Для компенсації негативного впливу зазначених чинників було розроблено програмно-апаратну процедуру планової ініціалізації сенсорного модуля, що реалізується засобами середовища розробки Arduino IDE. Ініціалізація відбувається з визначеним часовим інтервалом і забезпечує перезапуск сенсорів з оновленням їх внутрішніх параметрів, що дозволяє суттєво продовжити період їхньої стабільної роботи без потреби ручного втручання. Окрім того, з метою забезпечення оперативного контролю та попереднього аналізу поточних параметрів навколишнього середовища було реалізовано інтеграцію OLED-дисплея з I2C-інтерфейсом, що дає змогу виводити ключові показники у реальному часі, а також візуально фіксувати можливі відхилення або аномалії у роботі системи.

Не менш важливим фактором, що потребував технічного вирішення, стала оптимізація умов монтажу всієї системи безперервного моніторингу у конструкції вентиляційного каналу, що експлуатується в умовах промислових або побутових вібрацій, а також температурних коливань. У процесі натурного тестування було встановлено, що незначні механічні зсуви або термічне розширення матеріалів можуть призводити до дестабілізації положення сенсорних модулів та

мікроконтролера, що негативно впливало на точність вимірювань і загальну надійність роботи системи. Для усунення цих проблем було прийнято інженерне рішення щодо використання герметичних пластикових корпусів із внутрішніми амортизаційними прокладками, які здатні поглинати коливання низької частоти та компенсувати вплив термічних деформацій. Крім того, усі електричні з'єднання було додатково захищено шляхом фіксації термоусадковими ізоляційними трубками, що забезпечують не лише механічну стійкість, а й підвищену вологозахисність контактів. Такий підхід дозволив істотно знизити ризики механічного ушкодження критичних компонентів системи, а також забезпечити довготривалу стабільність її роботи у складних експлуатаційних умовах.

Ще одна проблема полягала у відображенні даних на OLED-дисплеї, який після кількох годин роботи показував артефакти або часткове згасання пікселів. Це викликано тривалим статичним навантаженням на екран. Щоб уникнути вигорання, було реалізовано циклічне оновлення інтерфейсу з динамічними елементами та режим сну дисплея в нічний час. Крім того, візуалізація була дубльована у веб-інтерфейсі, що зменшило залежність користувача від фізичного екрану.

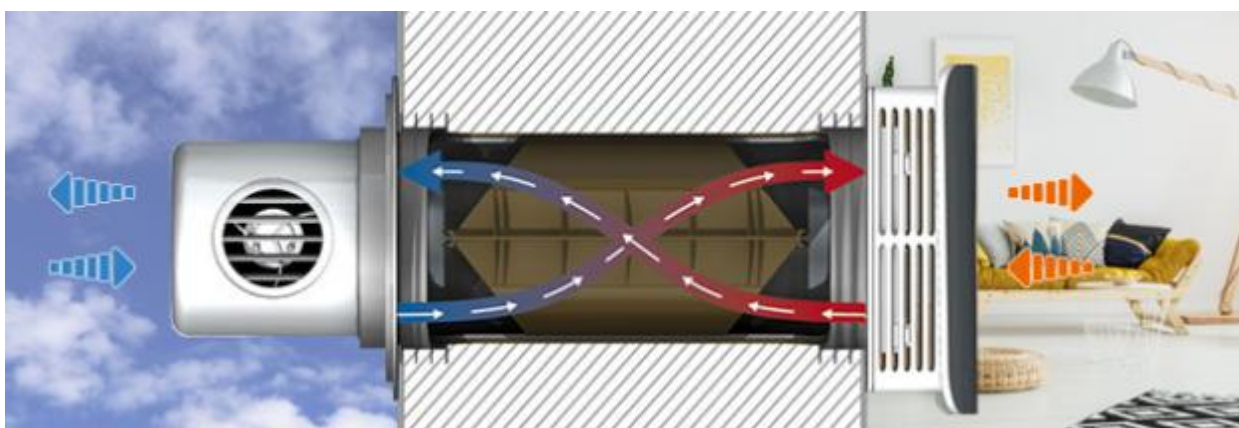


Рисунок 3.1 – Варіанти фізичного монтажу пристрою на основі ESP8266 [17]

Загалом, усі виявлені технічні та програмні проблеми були вирішені або мінімізовані шляхом комбінування апаратних і програмних засобів. Система після

доопрацювання продемонструвала високу надійність, автономність та адаптованість до реального використання. Аналіз цих проблем дозволив сформулювати цінний практичний досвід, який може бути корисним для подальших модернізацій або впровадження аналогічних кіберфізичних систем у суміжних сферах [17].

### 3.6 Висновок по третьому розділу

У ході реалізації кіберфізичної системи моніторингу рекуперації повітря було здійснено повний цикл розробки, включаючи проєктування, збирання, програмування, налаштування віддаленого моніторингу та випробування в реальних умовах експлуатації. Усі структурні компоненти системи — апаратні, комунікаційні та програмні — було успішно інтегровано в єдину інформаційно-керуючу платформу, орієнтовану на безперервний збір, аналіз та передавання екологічних параметрів.

Вибір мікроконтролера ESP8266 виявився обґрунтованим з огляду на його функціональні характеристики, доступність і підтримку бездротових протоколів передачі даних. Реалізація на базі Arduino IDE забезпечила гнучкість програмної частини, а використання платформи Thingspeak дозволило реалізувати наочну візуалізацію даних у хмарному середовищі, забезпечивши доступність показників у режимі реального часу.

Під час роботи було враховано кілька технічних аспектів, пов'язаних із живленням, стабільністю з'єднання, електромагнітною сумісністю та захистом мікроконтролера від перенапруг. Особливу увагу приділено схемотехнічним рішенням для забезпечення надійної роботи системи у змінних умовах середовища.

Проведене тестування підтвердило працездатність і доцільність запропонованої архітектури. Система виявилася стабільною в роботі, достатньо точною в контексті вимірювання параметрів мікроклімату, а також придатною до

масштабування та модернізації. Аналіз ефективності показав, що така система може бути основою для побудови розумних екологічних рішень у житлових, комерційних та промислових просторах.

В результаті, отримано практичну реалізацію поставлених завдань, відкривши перспективи подальшого розвитку системи в напрямках автоматизації керування рекуперацією повітря, інтеграції в ширші екосистеми Інтернету речей та застосування алгоритмів інтелектуального аналізу даних.

					<u>КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ</u>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

## ВИСНОВКИ

В результаті виконаних теоретичних та практичних досліджень було розроблено та втілено кіберфізичну систему моніторингу рекуперації повітря, засновану на мікроконтролері ESP8266. Здійснено повний цикл розробки: від аналізу предметної області та обґрунтування технічних рішень до збирання, програмування, тестування та оцінки ефективності функціонування системи в реальних умовах.

У першому розділі проведено аналіз основних понять та технологій, пов'язаних з рекуперацією повітря та кіберфізичними системами. Розглянуто принципи роботи рекуператорів, їх типи, структуру та сучасні тренди розвитку систем контролю мікроклімату. Особливу увагу приділено можливостям мікроконтролера ESP8266, його технічним характеристикам, перевагам та застосуванню в системах Інтернету речей.

У другому розділі здійснено детальне технічне обґрунтування та підготовку до створення системи. Описано вибір сенсорів, апаратного забезпечення, типу живлення та варіанти монтажу. Надано розгорнуте технічне проектування, з урахуванням питань електроживлення, захисту, конструктивної реалізації, зв'язку з зовнішніми платформами. Здійснено структурний аналіз функціональних елементів та сформовано концепцію програмної і апаратної взаємодії компонентів системи.

У третьому розділі реалізовано створену систему на практиці. Здійснено збирання фізичного пристрою, розроблено прошивку для ESP8266 з використанням середовища Arduino IDE а також реалізовано зв'язок із хмарною платформою Thingspeak для віддаленого моніторингу, проведено серію тестів з вимірювання параметрів повітря. Аналіз результатів показав стабільну роботу системи, відповідність технічним очікуванням та потенціал для подальшого вдосконалення, включаючи розширення функціоналу і застосування у реальних побутових та промислових умовах.

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Shun W. G., Muda W. M. W., Hassan W. H. W., Annuar A. Z. Wireless sensor network for temperature and humidity monitoring systems based on NodeMCU ESP8266 // *International Conference on Advances in Cyber Security*. – Singapore: Springer Singapore, 2019. – С. 262–273. – URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2693-0\\_19](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2693-0_19) (дата звернення: 22.05.2025).

2. Ashwini M. S., Ganesh P., Dwarakanath G. V. Air Pollution Monitoring System Using NodeMCU and Air Quality Sensors // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. – 2019. – Vol. 8, No. 9. – С. 3048–3049. – DOI:10.35940/ijitee.I8587.078919 – URL: <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i9/I8587078919.pdf> (дата звернення: 22.05.2025).

3. Parida D., Behera A., Naik J. K., Pattanaik S., Nanda R. S. Real-time environment monitoring system using ESP8266 and Thingspeak on internet of things platform // *2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS)*. IEEE, 2019. P. 225–229. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9065451> (дата звернення: 19.05.2025).

4. Zidni M., Ichsan M. H. H., Akbar S. R. Sistem Monitoring Kesehatan Udara menggunakan Sensor MQ7 dan MQ135 terhadap Berbagai Gas Berbahaya pada Mobil // *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*. – 2022. – Т. 6, № 9. – С. 4322–4328. – URL: <https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/11566> (дата звернення: 25.05.2025).

5. Muamaroh N., Christanto F. W. Pengukur Penggunaan Air Otomatis Menggunakan Water Flow Sensor YF-S201 dan NodeMCU ESP8266 Berbasis IoT // *JIKO (Jurnal Informatika dan Komputer)*. 2024. Vol. 8, No. 1. P. 88–99. URL: <https://ejournal.akakom.ac.id/index.php/jiko/article/view/1104> (дата звернення: 21.05.2025).

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Ковальчук В. Я. Теплогазопостачання та вентиляція. – URL: <https://www.yakaboo.ua/ua/teplogazopostachannja-ta-ventiljacija.html> (дата звернення: 22.05.2025).
7. Елементи контролера Raspberry Pi 4. – URL: <https://evo.net.ua/izuchaem-raspberrypi.-chast-1.-znakomstvo/> (дата звернення: 21.05.2025).
8. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi. – URL: <https://networkdiscount.com.ua/p1351615191-mikrokompyuter-raspberrymodel.html> (дата звернення: 22.05.2025).
9. Технічні характеристики Raspberry Pi 4. – URL: <https://www.kosmodrom.ua/odnoplatty-kompyuter-raspberry/raspberry-pi-4-modelb-4gb.html> (дата звернення: 22.05.2025).
10. ThingSpeak: How to analyze. – URL: [https://thingspeak.com/pages/how\\_to#analyze](https://thingspeak.com/pages/how_to#analyze) (дата звернення: 20.05.2025).
11. ESP32 vs. STM32 vs. ESP8266 vs. RP2040: A Comparative Overview. – URL: <https://eelectronics.medium.com/esp32-vs-stm32-vs-esp8266-vs-rp2040-a-comparative-overview-81c22c81d04d> (дата звернення: 21.05.2025).
12. HRV Wireless to Open HAB (Instructables). – URL: [https://ingmarverheij.com/en/built-smart-heat-recovery-system/?utm\\_source=chatgpt.com](https://ingmarverheij.com/en/built-smart-heat-recovery-system/?utm_source=chatgpt.com) (дата звернення: 23.05.2025).
13. Cyber-physical air monitoring system using ESP8266. *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, No. 3. – Article No. 720. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/3/720> (дата звернення: 22.05.2025).
14. Kamil A.A., Mousa A.J., Abdul-Rahaim L.A. Smart cloud computing system for environment based on MQTT protocol and Node MCU (ESP8266) // *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. 2024. Vol. 57(5). P. 1503. URL: <https://www.proquest.com/openview/7ec2436d2c04a082d1e88fd72b714561/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2069456> (дата звернення: 25.05.2025).
15. IoT-based air recovery system using ESP8266. *IEEE Xplore*. 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9609897> (дата звернення: 21.05.2025).

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. ESP8266 smart ventilation system. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2022. Vol. 11, No. 3. С. 1514–1521. URL: <https://www.beei.org/index.php/EEI/article/view/2669> (дата звернення: 21.05.2025).

17. Александров А.С. Рекуперация вентиляции: необходимый аспект современного жилья. *Материалы Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції «Молодь у науці та освіті в умовах воєнного стану»* / редкол.: Литовченко О.В. (відп. ред.), Шеїн Т.В. (заст. відп. ред.), Романенко Т.В., Ландик О.Г., Павловська Л.М. 2023. С. 173. URL: [https://natc.org.ua/docs/Conferencia/2023/Conferencia\\_mat\\_09112023.pdf#page=173](https://natc.org.ua/docs/Conferencia/2023/Conferencia_mat_09112023.pdf#page=173) (дата звернення: 24.05.2025).

18. Low-cost air quality sensing with ESP8266 // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 722. – Article No. 137851. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720318982> (дата звернення: 23.05.2025).

19. Wireless sensor network ESP8266 for HVAC systems // *Advances in Smart Grid and Renewable Energy*. – Singapore: Springer, 2020. P. 193–201. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2693-0\\_19](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2693-0_19) (дата звернення: 19.05.2025).

20. Cyber-physical air monitoring system using ESP8266 // *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 3. Article No. 720. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/3/720> (дата звернення: 19.05.2025).

21. Lans J.L.A., Mathijssen N.M.C., Bode A., Van Den Dobbelsteen J.J., Van Der Elst M., Luscuere P.G. Operating room ventilation systems: recovery degree, cleanliness recovery rate and air change effectiveness in an ultra-clean area // *Journal of Hospital Infection*. 2022. Vol. 122. P. 115–125. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925400521018165> (дата звернення: 27.05.2025).

22. IoT-based air recovery system ESP8266 // *IEEE Xplore*. 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9609897> (дата звернення: 19.05.2025).

23. ESP8266 smart ventilation system // *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2021. Vol. 10, No. 4. URL: <https://www.beei.org/index.php/EEI/article/view/2669> (дата звернення: 27.05.2025).

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. ESP8266-based environmental monitoring system. *SCIRP – Scientific Research Publishing*. URL: [https://www.scirp.org/html/93497\\_93497.htm](https://www.scirp.org/html/93497_93497.htm) (дата звернення: 26.05.2025).

25. Low-cost air quality sensing with ESP8266 // *ScienceDirect – Science of The Total Environment*. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720318982> (дата звернення: 26.05.2025).

26. Zhang M., Duan Z., Zhang B., Yuan Z., Zhao Q., Jiang Y., Tai H. Electrochemical humidity sensor enabled self-powered wireless humidity detection system. *Nano Energy*. 2023. Vol. 115. P. 108745. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211285523005827> (дата звернення: 21.05.2025).

27. Framework for Sustainable Wireless Sensor Network Based Environmental. *Wiley Online Library*, 2022. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/.../2022/7823481> (дата звернення: 25.05.2025).

28. Sung W.-T., Hsiao S.-J. Building an indoor air quality monitoring system based on architecture of the Internet of Things // *EURASIP J. on Wireless Communications and Networking*, 2021, Art. 153. – URL: <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-021-02030-1> (дата звернення: 26.05.2025).

29. BME680 and ESP8266 Based Indoor Air Quality Monitoring System // *Hackatronic (DIY)*, 2023. URL: <https://hackatronic.com/bme680-and-esp8266-based-indoor-air-quality-monitoring-system/> (дата звернення: 20.05.2025).

30. IoT Environmental Monitoring System Using Arduino and NodeMCU ESP8266. *UPC – UpCommons*, 2023. – URL: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/.../TFG\\_Alejandro\\_Lezcano\\_Sirre\\_IoT.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/.../TFG_Alejandro_Lezcano_Sirre_IoT.pdf) (дата звернення: 23.05.2025).

31. Wireless Sensor Network for Temperature and Humidity Monitoring Systems based on NodeMCU ESP8266 / Shun W.G. et al. // *ResearchGate*, 2020. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/338640249\\_...](https://www.researchgate.net/publication/338640249_...) (дата звернення: 29.05.2025).

32. Kaur S., Khanna V. Implementation and comparison of MQTT, WebSocket, and HTTP protocols for smart room IoT application in Node-RED. *IoT for Sustainable Smart Cities and Society* / Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 165–193.

					КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-89554-9\\_8](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-89554-9_8) (дата звернення: 28.05.2025).

33. Mano Paul P., Dhariwal S., Ebin P.M., Greeshya B.B., Brundha G., Reddy E.Y., Sreenivasalu B. Smart Air Pollution Monitoring System Using NodeMCU // *Congress on Intelligent Systems*. Singapore: Springer, 2025. P. 641–652. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-96-2694-6\\_42](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-96-2694-6_42) (дата звернення: 24.05.2025).

34. Naik H., Tiwari S. Numerical investigations on fluid flow and heat transfer characteristics of different locations of winglets mounted in fin-tube heat exchangers // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. Vol. 22. P. 100795. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2451904920303152> (дата звернення: 25.05.2025).

35. Berkani D. et al. An Intelligent Edge-Deployable Indoor Air Quality Monitoring and Activity Recognition Approach // *arXiv*, 2023. – URL: <https://arxiv.org/abs/2311.03920> (дата звернення: 25.05.2025).

36. 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 // *Proceedings of the 2024 Ninth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*. IEEE, 2024. P. 1–6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10956737> (дата звернення: 23.05.2025).

37. Simamora D. et al. Indoor Air Quality Detection Robot Model Based on the Internet of Things // *arXiv*, 2025. – URL: <https://arxiv.org/abs/2505.19600> (дата звернення: 20.05.2025).

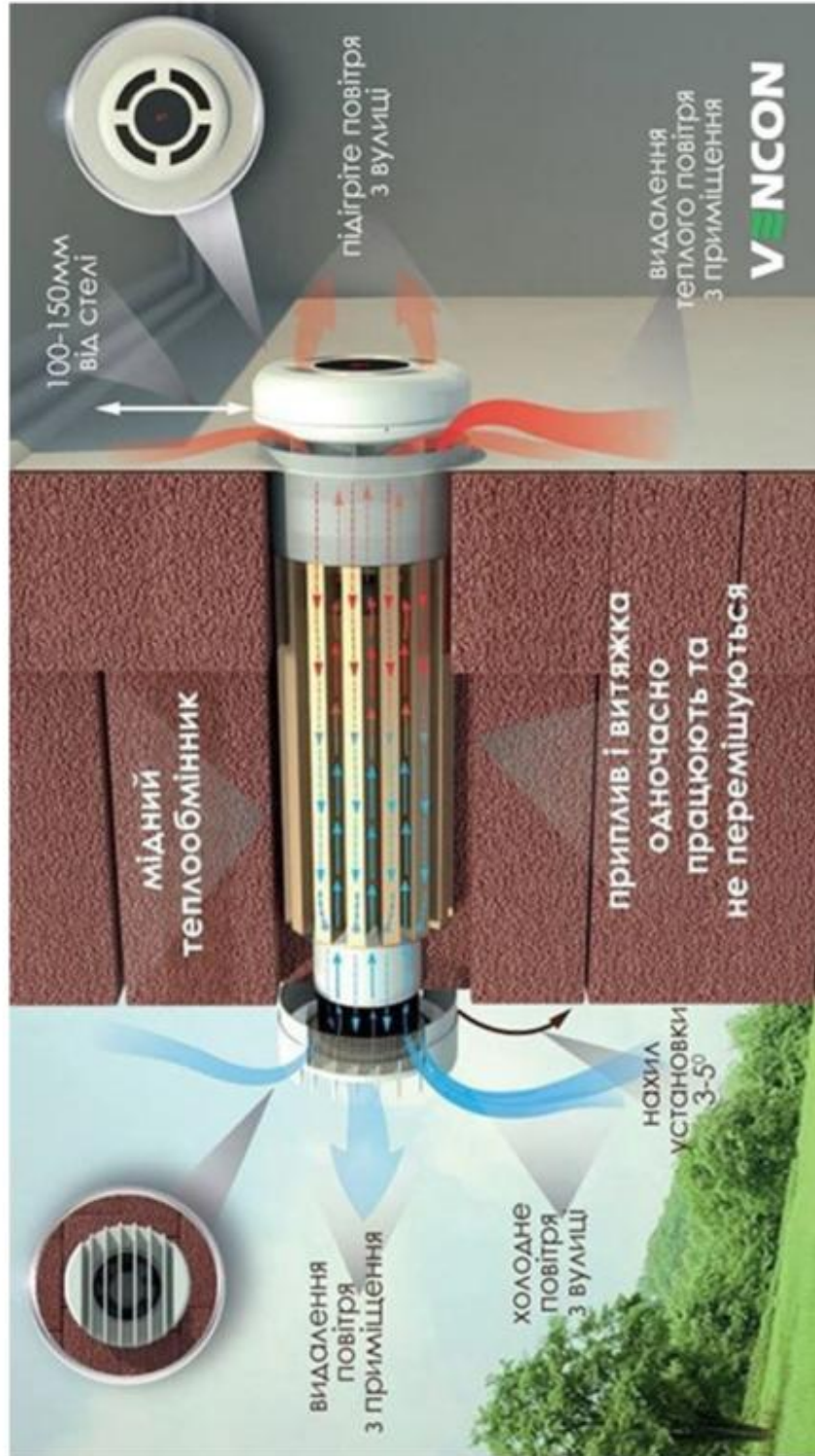
38. Karar M. E. et al. GASDUINO – Wireless Air Quality Monitoring System Using IoT // *arXiv*, 2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2005.04126> (дата звернення: 22.05.2025).

40. A low-cost IoT-based real-time pollution monitoring system using GPS, ESP8266 // *SAGE Journals*, 2024. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/> (дата звернення: 26.05.2025).

						КВРКІ 210122.21.01.61 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Додаток А  
(обов'язковий)

«АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ»



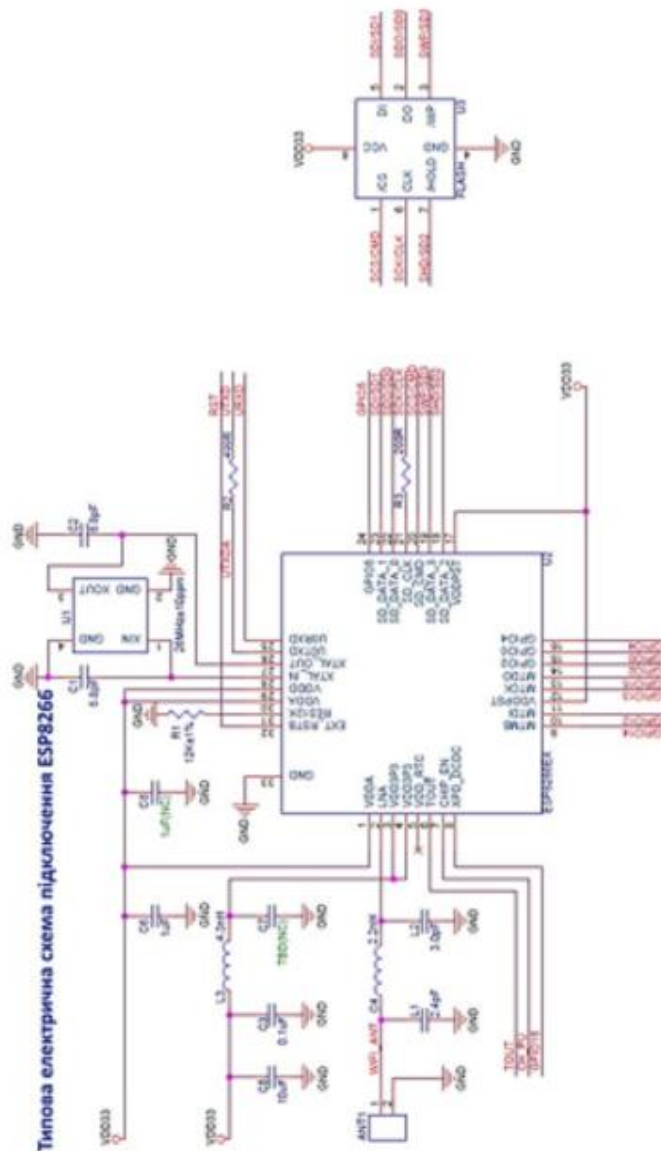
КорКІ 210122.21.01.61.ПЗ

КорКІ 210122.21.01.61.ПЗ		Полісся	Міська	Міський
Знак	№ докум.	Підпис	Дата	
Листовий	Ручка В.В.			
Перенес.	Міський А.О.			
Р. листи				
Т. сторін	Листовий С.М.			
Зам.	Листовий Л.І.			
		ХНУ, ГР №21-1		

## Додаток Б (обов'язковий)

### «СХЕМА ПІДКЛЮЧЕННЯ ESP8266»

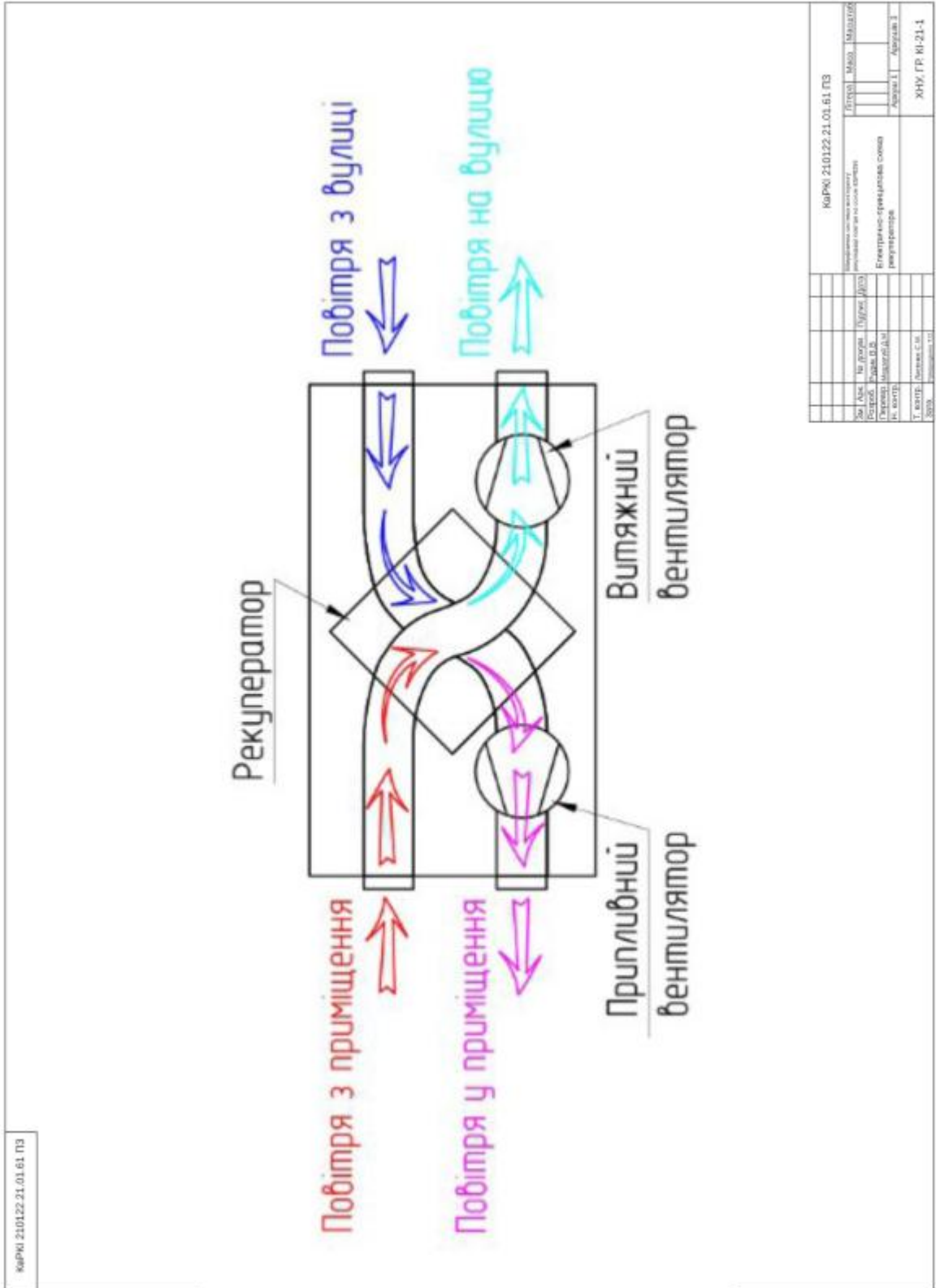
№РКІ 210122.21.01.01 ПЗ



№РКІ 210122.21.01.01 ПЗ		Листів	Місяць	Модуль
№	Автори	№	Видання	Підпис
1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
Схема призначена для використання				
в програмі				
1	2	3	4	5
Архив 1 Архив 2				
ХНУ, ГР, №123-1				
2018				

**Додаток В**  
(обов'язковий)

**«ЕЛЕКТРИЧНО ПРИНЦИПОВА СХЕМА»**



Картка 210122.21.01.61.ПЗ

Картка 210122.21.01.61.ПЗ		Будова		МАН		МАН	
Місце встановлення		Місце встановлення		Місце встановлення		Місце встановлення	
Дир. АС	На розроб.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.
Проєкт.	Розроб.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.
Ін. конст.	Монтаж	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.
І. в. в. в.	Відмова	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.
В. в. в.	Відмова	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.
Картка 210122.21.01.61.ПЗ		Будова		МАН		МАН	
Місце встановлення		Місце встановлення		Місце встановлення		Місце встановлення	
Дир. АС	На розроб.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.
Проєкт.	Розроб.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.
Ін. конст.	Монтаж	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.
І. в. в. в.	Відмова	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.
В. в. в.	Відмова	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.	Л. С. С.

**Додаток Г**  
(обов'язковий)

**КОД ПРОГРАМИ**

```
#include "stm32f1xx_hal.h"

I2C_HandleTypeDef hi2c1;
TIM_HandleTypeDef htim1;
UART_HandleTypeDef huart1;
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_I2C1_Init(void);
static void MX_TIM1_Init(void);
static void MX_USART1_UART_Init(void);
int main(void)
{
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
    MX_GPIO_Init();
    MX_I2C1_Init();
    MX_TIM1_Init();
    MX_USART1_UART_Init();

    // Запуск PWM на каналі 1 таймера 1
    HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1);

    while (1)
    {
        }
}
```

## 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:** Владислав РУДИК

**Співавтор:**

**Назва:** Рудик\_Кіберфізична система моніторингу рекуперації повітря на основі ESP8266

**Експерт:**

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**Коефіцієнт подібності 1:** 2.4%

**Коефіцієнт подібності 2:** 1.4%

**Мікропробіли:** 325

**Заміна букв:** 30

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2025-06-20 04:39:25.0

**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:**

2025-06-20

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

# Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 0.0%

Dictionaries check: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Errors in the documents: 13%

ID: 247091 Title: БКР Кіберфізична система моніторингу рекуперації повітря на основі ESP8266 Added in a DB: 2025-06-19 Authors: Владислав РУДИК Heads: Дмитро ДЕНИСЮК Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	98029	682	443 (0%)	5 (1%)

## Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

## РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Рудик Владислав Вікторович

Тема: Кіберфізична система моніторингу рекуперації повітря на основі ESP8266

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень   3   Кількість сторінок записки   61  

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: є розробка системи моніторингу рекуперації повітря на платформі ESP8266
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі здійснено огляд основ рекуперації повітря, принципів функціонування рекуператорів, видів систем мікроклімату та кіберфізичних систем. Проаналізовано технічні можливості мікроконтролера ESP8266 у контексті концепції Інтернету речей (IoT). У другому розділі було розроблено технічну концепцію системи, включаючи вибір сенсорів, елементів живлення та способів монтажу. Наведено опис логіки взаємодії апаратних та програмних складових з зовнішніми платформами.  
У третьому розділі було виконано фізичне складання пристрою, прошивка на базі Arduino IDE, а також налаштовано зв'язок з платформою ThingSpeak. Проведено тестування, результати якого показали стабільну роботу системи та її готовність до подальшого розвитку.
4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.
5. Негативні сторони роботи: недостатня увага до реалізації фізичної частини проекту.

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: \_\_\_\_\_

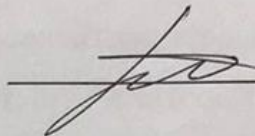
9. Оцінка дипломної роботи: задовільно

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

Басуля Ручкач Олександрович

доц. кафедри КМ

“ 20 ” 06 2025 р.

 (підпис)

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

Владислав Рудик

---

ПІБ 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.



\_\_\_\_\_ 2025 року

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА  
ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система моніторингу рекуперації повітря на основі ESP8266

Автор Владислав РУДИК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність 123– Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: Дмитро ДЕНИСЮК

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

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

Підтвердження:

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

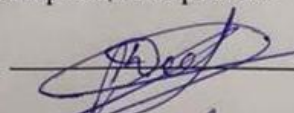
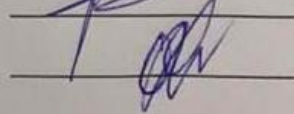
- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 2,37% і адресується до 20 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 0%, 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