

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система керування якістю повітря в приміщеннях на основі
мультисенсорних вимірювань

Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

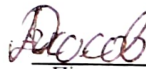
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ

Виконав здобувач III курсу, група КІ2с-23-1



Підпис

Артем АЧКАСОВ

Ініціали, прізвище

Керівник

Науковий ступінь, учене звання



Підпис

Сергій ЛИСЕНКО

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

Науковий ступінь, учене звання

Підпис

Сергій ЛИСЕНКО

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС

«01» червня 2026 р.

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІІС


Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Ачкасову Артему Денисовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань

Керівник проекту (роботи) Лисенко Сергій Миколайович, д.т.н., проф.

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

Затверджена наказом ректора університету від 01.03.2026 р. № 5

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Аналіз предметної області та сучасних підходів до керування якістю повітря в приміщеннях

Проектування та розроблення кіберфізичної системи керування якістю повітря в приміщеннях

Практична реалізація та перевірка роботи кіберфізичної системи керування якістю повітря

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

Архітектура ПЗ проекту

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи

Апаратне забезпечення проекту

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проектування системи керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – проектування системи керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач 
Підпис

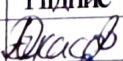
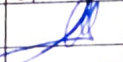


Артем АЧКАСОВ
Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис


Сергій ЛИСЕНКО
Імя, ПРІЗВИЩЕ

№ р я д к а	Ф о р м а т	Позначення	Найменування	К і л - л и с т і в	№ ек з	П р и м і т к а
			<u>Текстові документи</u>			
1		КВРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Пояснювальна записка	67		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КВРКІ.230193.23.01.44 Е8	Архітектура програмного забезпечення	1		
3		КВРКІ.230193.23.01.44 Е8	Схема логіки роботи	1		
4		КВРКІ.230193.23.01.44 Е3	Схема електрична принципова	1		

					КВРКІ.230193.23.01.44 ВП			
Зм	Арж	№ докум	Підпис	Дата	Кіберфізична система керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Ачкасов		01.06.26		У	1	1
Перевір.		Лисенко		01.06.26		ХНУ, КІ2с-23-1		
Н. контр.		Лисенко		01.06.26				
Затв.		Павлова		01.06.26				

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань».

Автор роботи: Артем АЧКАСОВ.

Керівник роботи: Сергій ЛИСЕНКО.

Пояснювальна записка: 67 с., 13 рис., 1 табл., 3 дод., 53 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

ВЕНТИЛЯЦІЯ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, КОНДИЦІОНУВАННЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР ESP32, МУЛЬТИСЕНСОРНІ ВИМІРЮВАННЯ, ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ, ЯКІСТЬ ПОВІТРЯ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню кіберфізичної системи керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань. Актуальність теми зумовлена тим, що в сучасних житлових, офісних і навчальних приміщеннях стан повітряного середовища істотно впливає на комфорт перебування людей, працездатність, самопочуття та загальну безпеку експлуатації внутрішнього простору.

Метою роботи є проектування, реалізація та перевірка функціонування програмно-апаратної кіберфізичної системи, що забезпечує збір, передавання, оброблення, візуалізацію та використання мультисенсорних даних для підтримання належної якості повітряного середовища в приміщенні. Для досягнення поставленої мети виконано аналіз сучасних підходів до моніторингу та керування якістю повітря, обґрунтовано вибір апаратних і програмних засобів реалізації, розроблено загальну архітектуру системи, структуру сенсорної підсистеми, алгоритм обробки даних і прийняття керувальних рішень.



Підпис здобувача

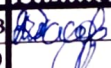

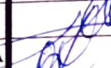

30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Аналіз предметної області та сучасних підходів до керування якістю повітря в приміщеннях	6
1.1 Поняття якості повітря в приміщеннях та основні фактори, що на неї впливають	6
1.2 Аналіз сучасних систем моніторингу якості повітря в приміщеннях	9
1.3 Принципи мультисенсорних вимірювань та узгодження даних	13
1.4 Кіберфізичні системи як основа сучасних систем керування середовищем	16
1.5 Аналіз підходів до керування вентиляцією та кондиціонуванням у приміщеннях	19
2. Проектування та розроблення кіберфізичної системи керування якістю повітря в приміщеннях	22
2.1 Загальна архітектура кіберфізичної системи керування якістю повітря	22
2.2 Обґрунтування вибору апаратних і програмних засобів реалізації системи	27
2.3 Розроблення структури сенсорної підсистеми та організація мультисенсорних вимірювань	33
2.4 Розроблення алгоритму обробки даних та прийняття керувальних рішень	37
2.5 Організація керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням у приміщенні	43
3. Практична реалізація та перевірка роботи кіберфізичної системи керування якістю повітря	48
3.1 Реалізація апаратної частини системи	48
3.2 Програмна реалізація збору, обробки даних і керування виконавчими пристроями	52

КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ

Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Артем АЧКАСОВ		01.06.20	Кіберфізична система керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань. Пояснювальна записка	у		
Перевідр.		Сергій ЛИСЕНКО		01.06.20			2	67
Н.контр.		Сергій ЛИСЕНКО		01.06.20		ХНУ КІ2с-23-1		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		01.06				

3.3 Реалізація серверної частини та засобів візуалізації параметрів повітряного середовища	57
3.4 Аналіз результатів роботи системи в різних режимах функціонування.....	62
Висновки.....	69
Перелік джерел посилань	71
Додаток А Архітектура програмного забезпечення.....	78
Додаток Б Схема логіки роботи	79
Додаток В Схема електрична принципова	80

ВСТУП

У цій кваліфікаційній роботі розглянуто проблему забезпечення стабільної якості повітря в приміщеннях в умовах постійної зміни навантаження, зовнішніх факторів і внутрішніх джерел забруднення. Сучасні житлові, навчальні та офісні простори дедалі більше насичуються технікою, зростає щільність перебування людей, активніше використовуються матеріали й побутові засоби, що впливають на склад повітря. Унаслідок цього навіть за наявності стандартних систем вентиляції та кондиціонування повітряне середовище часто втрачає стабільність, а контроль зводиться до епізодичних вимірювань або ручних налаштувань, які не враховують реальної динаміки процесів у приміщенні.

Практика показує, що якість повітря не може бути коректно описана одним параметром. Концентрація вуглекислого газу, наявність дрібнодисперсного пилу, летких органічних сполук, а також температура й вологість формують складну картину стану мікроклімату. Кожен із цих показників змінюється з різною швидкістю, має власну інерційність і по-різному впливає на комфорт і самопочуття людей.

У межах цієї кваліфікаційної роботи акцент зміщено з простого моніторингу на активне керування повітряним середовищем. Розглянуто підхід, за якого мультисенсорна система безперервно формує картину стану приміщення, а обчислювальна частина виконує аналіз отриманих даних і визначає режими роботи виконавчих механізмів. У такій архітектурі вентиляція, очищення та кондиціонування вже не працюють ізольовано, а об'єднуються в єдиний контур керування. Повітря з гіршими показниками цілеспрямовано виводиться з приміщення, тоді як у зони з нормальними або прикордонними параметрами організовується подача більш чистого та стабілізованого за температурою й вологістю повітря. Це дозволяє підтримувати динамічний баланс мікроклімату без постійного ручного втручання та без різких коливань режимів роботи обладнання.

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

Актуальність теми зумовлена також поширенням кіберфізичних підходів у побудові інженерних систем. Поєднання фізичних процесів із цифровою обробкою даних, мережевою взаємодією та алгоритмами автоматичного керування відкриває можливість створювати адаптивні системи, які не лише реагують на зміни середовища, а й ураховують тенденції цих змін у часі.

У межах роботи сформовано уявлення про систему як про єдиний кіберфізичний комплекс, у якому сенсорний рівень забезпечує збір різномірних даних, обчислювальний рівень виконує їх узгодження та інтерпретацію, а виконавчий рівень реалізує керування повітряними потоками й параметрами мікроклімату. Такий підхід дозволяє перейти від розрізнених пристроїв до цілісного рішення, здатного працювати в режимі, близькому до реального часу, і підтримувати передбачувану якість повітря в приміщенні.

Метою цієї кваліфікаційної роботи визначено розроблення та обґрунтування структури кіберфізичної системи керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань із використанням вентиляції, очищення та кондиціонування як взаємопов'язаних інструментів впливу на повітряне середовище. Для досягнення цієї мети виконано аналіз предметної області, сформовано вимоги до складу сенсорів і логіки обробки даних, описано принципи побудови архітектури системи та підходи до керування виконавчими механізмами з урахуванням реальної динаміки процесів у приміщенні.

Об'єктом цієї кваліфікаційної роботи визначено процес формування та підтримання якості повітря в закритих приміщеннях, а предметом - методи та засоби побудови кіберфізичної системи керування цим процесом на основі мультисенсорних вимірювань. Практичне значення роботи полягає в можливості використання запропонованих рішень під час створення або модернізації інтелектуальних систем мікроклімату, де важливо не лише фіксувати стан повітря, а й забезпечувати його керовану, стабільну та прогнозовану зміну відповідно до реальних умов експлуатації приміщень.

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ПОВІТРЯ В ПРИМІЩЕННЯХ

1.1 Поняття якості повітря в приміщеннях та основні фактори, що на неї впливають

У межах цієї кваліфікаційної роботи якість повітря в приміщеннях розглядається як комплексна характеристика повітряного середовища, що визначається сукупністю газових, аерозольних і мікрокліматичних параметрів та безпосередньо впливає на умови перебування людей і стабільність роботи обладнання [1], [2]. Повітря в закритому просторі не є інертним середовищем, оскільки його склад постійно змінюється під дією внутрішніх джерел забруднення, процесів тепло- та вологообміну, а також під впливом режимів вентиляції та кондиціонування [2], [3]. Унаслідок цього якість повітря доцільно трактувати як динамічний стан, що потребує безперервного контролю та корекції [1], [3].

Одним із базових показників стану повітря є концентрація вуглекислого газу, яка у практичних інженерних системах використовується як індикатор ефективності повітрообміну [2], [6]. У приміщеннях із постійним перебуванням людей цей показник зростає пропорційно до щільності заповнення та тривалості перебування без достатнього припливу свіжого повітря [2], [3]. Навіть за відсутності виражених запахів або видимого забруднення підвищений рівень CO₂ сигналізує про те, що повітряне середовище втрачає свіжість і потребує оновлення [2], [3]. З технічної точки зору цей параметр зручний для автоматизованих систем, оскільки має відносно інерційний характер і дозволяє оцінювати не лише поточний стан, а й тенденцію до погіршення умов у приміщенні [6].

Важливою складовою оцінки якості повітря є вміст дрібнодисперсних частинок, які зазвичай характеризуються фракціями PM_{2.5} та PM₁₀ [1]. Ці частинки можуть надходити із зовнішнього середовища разом із припливним

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		6

повітрям або утворюватися безпосередньо в приміщенні під час руху людей, роботи техніки та побутових процесів [1], [5]. З інженерної точки зору особливість цього параметра полягає в тому, що його рівень може різко змінюватися за короткий час, а стандартна вентиляція без фільтрації не завжди здатна забезпечити стабільне зниження концентрації [2], [5]. Саме тому контроль пилу тісно пов'язаний із застосуванням фільтраційних елементів і керуванням повітряними потоками залежно від поточної ситуації [2], [1].

Окрему групу показників формують леткі органічні сполуки, які потрапляють у повітря з будівельних і оздоблювальних матеріалів, меблів, побутових засобів та під час різних технологічних і побутових процесів [1]. На практиці ці сполуки часто фіксуються у вигляді узагальненого показника, що відображає загальний рівень хімічного навантаження на повітряне середовище [5]. Особливістю цього параметра є його залежність від температури, вологості та інтенсивності повітрообміну, оскільки підвищення температури може прискорювати виділення хімічних компонентів, а недостатня вентиляція призводить до їх накопичення у замкненому просторі [1], [2].

Температура та відносна вологість формують базовий мікрокліматичний фон, на якому проявляється дія всіх інших факторів [2]. З інженерної точки зору ці параметри мають подвійне значення [2]. З одного боку, вони безпосередньо визначають тепловий комфорт і суб'єктивне сприйняття умов у приміщенні [2]. З іншого боку, саме вони впливають на швидкість хімічних процесів, інтенсивність випаровування та поведінку аерозольних частинок у повітрі [1], [5]. Наприклад, підвищена вологість може посилювати відчуття задухи навіть за помірних концентрацій CO₂, а зниження температури при активній вентиляції може призводити до дискомфорту, якщо система кондиціонування не компенсує теплові втрати [2], [3].

З позиції побудови автоматизованих систем керування важливо враховувати не лише абсолютні значення кожного з параметрів, а й швидкість їх зміни та взаємний вплив [2], [6]. Повітряне середовище в приміщенні

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

характеризується наявністю теплової та масообмінної інерції, через що реакція на керувальні впливи має затримку в часі [2], [6]. Наприклад, увімкнення вентиляції швидко знижує концентрацію CO₂, проте стабілізація температури та вологості відбувається повільніше [2], [6]. Аналогічно, вмикання очищення повітря впливає на рівень пилу, але майже не змінює газовий склад, якщо не організовано приплив свіжого повітря [1], [2]. Ці особливості вимагають розглядати якість повітря як результат одночасної дії кількох керованих процесів [2], [6].

У реальних умовах експлуатації будівель значну роль відіграє також просторовий фактор [2], [5]. Навіть у межах одного приміщення параметри повітря можуть суттєво відрізнятися залежно від розташування джерел забруднення, людей і повітряних потоків [5]. Поблизу робочих місць, техніки або зон із підвищеною активністю концентрації домішок зростають швидше, ніж у віддалених частинах простору [5]. Це створює передумови для переходу від усереднених оцінок до зонального контролю, коли стан повітря аналізується у кількох контрольних точках, а керування повітряними потоками здійснюється з урахуванням просторового розподілу параметрів [2], [5].

У межах цієї кваліфікаційної роботи якість повітря в приміщеннях розглядається як багатопараметричний і просторово розподілений процес, що змінюється в часі під впливом антропогенних, технічних і зовнішніх чинників [1], [2], [5]. Такий підхід створює основу для застосування мультисенсорних вимірювань і переходу до активного керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням, коли рішення приймаються не за окремими показниками, а на основі узгодженої оцінки реального стану повітряного середовища в приміщенні [2], [6].

1.2 Аналіз сучасних систем моніторингу якості повітря в приміщеннях

У межах цієї кваліфікаційної роботи сучасні системи моніторингу якості повітря в приміщеннях розглянуто як сукупність технічних рішень, що забезпечують вимірювання параметрів повітряного середовища, їх візуалізацію та, у деяких випадках, формування сповіщень або базових керувальних сигналів. Ринок таких систем сьогодні представлений як простими побутовими пристроями, так і складнішими мережевими платформами для офісних і громадських будівель. Водночас аналіз практичних реалізацій показує, що більшість із них зосереджена саме на функції спостереження, тоді як повноцінне автоматизоване керування мікрокліматом реалізується обмежено або фрагментарно.

До найбільш відомих побутових рішень належать пристрої на кшталт Netatmo Healthy Home Coach який зображений на рисунку 1.1. Такі системи зазвичай вимірюють температуру, вологість, концентрацію CO₂ та рівень летких органічних сполук, після чого відображають ці дані у мобільному застосунку або на вбудованому дисплеї.



Рисунок 1.1 - Netatmo Healthy Home Coach [51]

					КВРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для спрощення сприйняття використовується шкала якості повітря або кольорові індикатори, що дозволяє швидко оцінити загальний стан середовища. Технічно ці пристрої демонструють достатню стабільність роботи та зручність у повсякденному використанні, однак їхня логіка обмежується рекомендаційним або інформаційним рівнем. Xiaomi Mi Air Quality Monitor, що поданий на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Xiaomi Mi Air Quality Monitor [52]

Зафіксоване перевищення показників зазвичай супроводжується повідомленням, після чого рішення щодо провітрювання або вмикання очищувача приймається вручну. Унаслідок цього час реакції залежить не від системи, а від уваги користувача, що знижує ефективність підтримання стабільного мікроклімату.

Більш розвинений сегмент формують IoT-платформи для моніторингу середовища, наприклад рішення на базі платформ типу TuYa Smart або Home Assistant у поєднанні з сенсорами CO₂, PM2.5 та TVOC. У таких системах дані збираються з кількох датчиків, зберігаються в базі, відображаються у вигляді графіків і можуть використовуватися для побудови простих автоматизованих сценаріїв. Наприклад, за перевищення певного рівня CO₂ може автоматично вмикатися вентилятор або надсилатися повідомлення на смартфон. З інженерної

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

точки зору це вже крок у бік інтеграції моніторингу та керування, проте логіка таких сценаріїв зазвичай залишається пороговою і не враховує багатofакторність стану повітря. Якщо зростає концентрація пилу, але температура і вологість залишаються в нормі, система може не мати достатньо інформації для вибору оптимального режиму роботи між вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням.

У корпоративному та інфраструктурному сегменті поширені рішення від великих виробників інженерних систем, зокрема Siemens, Schneider Electric або Honeywell, які пропонують платформи моніторингу мікроклімату в складі систем керування будівлями. Такі рішення зазвичай включають мережі сенсорів, контролери, програмні панелі диспетчеризації та модулі збору статистики. Наприклад, у системах класу Building Management System (BMS) показники температури, вологості та CO₂ використовуються для оптимізації роботи вентиляційних установок і систем кондиціонування. З технічної точки зору це забезпечує більш стабільну підтримку параметрів середовища, однак у багатьох випадках акцент робиться саме на енергетичній ефективності та дотриманні заданих уставок, а не на гнучкій адаптації до локальних зональних змін якості повітря. Контроль дрібнодисперсного пилу та хімічних домішок у таких системах часто або відсутній, або реалізований на обмеженому рівні через складність інтеграції відповідних сенсорів у стандартні контури керування.

Окремий інтерес становлять спеціалізовані системи, орієнтовані саме на якість повітря, наприклад платформи типу Awaір, яка подана на рисунку 1.3 або uНоо, які поєднують у собі вимірювання CO₂, PM2.5, TVOC, температури та вологості з детальною аналітикою. Такі рішення дозволяють будувати часові профілі, виявляти повторювані сценарії погіршення якості повітря та формувати рекомендації щодо провітрювання або використання очищувачів.



Рисунок 1.3 – Awair [53]

Проте й у цьому випадку основний акцент робиться на інформуванні та аналітиці, тоді як безпосереднє керування повітряними потоками часто залишається поза межами системи або реалізується через зовнішні інтеграції з обмеженою логікою.

Аналіз наведених прикладів показує, що навіть у відносно розвинених рішеннях моніторинг і керування часто залишаються розділеними на логічному рівні. Дані сенсорів або відображаються користувачу, або використовуються для простих автоматичних дій за принципом “перевищення порога - увімкнути пристрій”. Такий підхід не враховує складної взаємодії параметрів повітряного середовища та інерційності фізичних процесів у приміщенні. Наприклад, система може активувати вентиляцію за зростання CO₂, але не врахувати, що зовнішнє повітря має високий рівень PM, і внаслідок цього загальна якість повітря погіршиться. Аналогічно, вмикання кондиціонера стабілізує температуру, але не впливає на газовий склад повітря, якщо не організовано приплив свіжого повітря.

Ще одним обмеженням більшості сучасних систем є орієнтація на одну або дві контрольні точки в приміщенні. Навіть у відносно великих просторах часто використовується лише один датчик, що формує усереднену оцінку стану середовища. На практиці це не відображає реальної картини, оскільки біля джерел забруднення, робочих місць або зон підвищеної активності параметри

Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

можуть істотно відрізнятись від середніх значень. У таких умовах локальні зони з погіршеною якістю повітря залишаються поза увагою системи, а керування відбувається за усередненими показниками, які не завжди відповідають реальним потребам простору.

У підсумку аналіз сучасних систем моніторингу показує, що наявні рішення забезпечують достатній рівень спостереження та візуалізації стану повітряного середовища, а в окремих випадках - базову автоматизацію реакцій. Водночас їхні функціональні обмеження, порогова логіка прийняття рішень і слабка орієнтація на мультисенсорний та зональний підхід створюють передумови для переходу до більш цілісної кіберфізичної системи. У такій системі вимірювання не обмежуються інформуванням, а стають основою для узгодженої оцінки стану повітря та керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням як взаємопов'язаними елементами єдиного контуру підтримання якості повітря в приміщеннях.

1.3 Принципи мультисенсорних вимірювань та узгодження даних

Мультисенсорні вимірювання розглядаються як базовий підхід до формування об'єктивної та стійкої оцінки стану повітряного середовища в приміщенні [7], [14]. На відміну від систем, що спираються на один показник або один тип датчика, мультисенсорна конфігурація дозволяє одночасно враховувати кілька фізично різних параметрів, кожен з яких відображає окрему сторону процесів, що відбуваються в повітрі [14], [21]. Такий підхід особливо важливий у задачах контролю мікроклімату, де газовий склад, наявність аерозольних частинок і мікрокліматичні умови тісно пов'язані між собою, але не можуть бути коректно описані одним виміром [7], [25].

Кожен із сенсорів у складі системи має власну фізичну природу, діапазон вимірювань, інерційність і похибки [21], [28]. Наприклад, датчики вуглекислого газу зазвичай реагують повільніше, ніж датчики температури або вологості, але

забезпечують більш стабільний сигнал для оцінки загального рівня вентиляції [10], [23]. Сенсори дрібнодисперсного пилу, навпаки, можуть фіксувати різкі короточасні сплески концентрації, що відображають локальні події, такі як рух людей або побутові процеси [18], [29]. Датчики летких органічних сполук часто мають узагальнений характер і чутливі до широкого спектра речовин, що ускладнює їх інтерпретацію без урахування супутніх параметрів [18], [30]. Унаслідок цього окремий сенсор не може надати повної картини стану повітря, а лише відображає один із аспектів процесу [14], [21].

Мультисенсорний підхід дозволяє поєднати ці різноманітні джерела інформації в єдину узгоджену систему спостереження [7], [14]. З технічної точки зору це означає, що дані з різних сенсорів приводяться до спільного часового та логічного простору, після чого використовуються для формування комплексної оцінки стану середовища [21], [31]. Важливою особливістю такого підходу є можливість компенсувати обмеження одного сенсора за рахунок інформації з інших [14], [21]. Наприклад, зростання концентрації летких органічних сполук за незмінних значень пилу та CO₂ може свідчити про локальне хімічне джерело, тоді як одночасне зростання всіх показників вказує на загальне погіршення повітряного середовища та потребу в інтенсивнішому повітрообміні [18], [23].

Одним із ключових етапів реалізації мультисенсорних вимірювань є узгодження даних у часі [21], [31]. Оскільки різні датчики мають різну частоту опитування та різну швидкість реакції на зміну середовища, без попередньої синхронізації їхні показники можуть описувати різні стани системи [21], [28]. Для розв'язання цієї задачі використовується прив'язка вимірювань до єдиного часового масштабу та формування узгоджених наборів даних, які відповідають одному й тому самому моменту або визначеному часовому інтервалу [31], [34]. Такий підхід дозволяє уникнути хибних висновків, що можуть виникати через запізнення або випередження окремих каналів вимірювання [21], [31].

Важливим етапом є попередня обробка сигналів, яка включає фільтрацію шумів, згладжування випадкових коливань і виявлення аномальних значень [21],

[28]. У реальних умовах експлуатації сенсори можуть формувати короточасні стрибки показників через електричні перешкоди, механічні впливи або особливості вимірювальної схеми [28], [29]. Без відповідної обробки такі сплески призводять до помилкових керувальних рішень [21], [34]. Застосування цифрових фільтрів, ковзних середніх або інших методів згладжування дозволяє отримати більш стабільні та репрезентативні дані для подальшого аналізу [21], [31].

Окрему роль відіграє нормалізація даних, оскільки різні параметри мають різні одиниці вимірювання, діапазони та допустимі межі [7], [21]. Концентрація вуглекислого газу вимірюється в частках на мільйон, пил - у мікрограмах на кубічний метр, температура - у градусах, а вологість - у відсотках [1], [18]. Для спільної обробки ці показники приводяться до відносної або безрозмірної шкали, що відображає ступінь відхилення від бажаного рівня [7], [21]. Це дозволяє не лише порівнювати різні параметри між собою, а й формувати узагальнені індекси стану повітряного середовища, придатні для використання в алгоритмах керування [21], [31].

Узгодження даних у мультисенсорній системі також передбачає введення вагових коефіцієнтів або правил пріоритетності для окремих параметрів [14], [21]. Значущість показників може змінюватися залежно від типу приміщення та режиму його використання [10], [18]. Наприклад, у приміщеннях із великою кількістю людей більшої ваги набуває концентрація CO₂, тоді як у просторах із підвищеним рівнем пилу або хімічних домішок пріоритет переходить до показників PM або TVOC [10], [18]. Такий підхід дозволяє зробити оцінку стану повітря гнучкою та адаптивною, а не жорстко прив'язаною до фіксованого набору порогів [21], [31].

Мультисенсорний підхід підвищує загальну надійність системи, оскільки наявність кількох джерел інформації дозволяє виявляти некоректну роботу окремих сенсорів [21], [28]. Якщо один із каналів починає суттєво відхилятися від логічно пов'язаних з ним параметрів, його вплив на підсумкову оцінку може

бути зменшений або тимчасово проігнорований [21], [28]. Це дозволяє зберігати стабільність керування навіть за часткових відмов або деградації вимірювальних елементів [14], [21].

У підсумку мультисенсорні вимірювання та узгодження даних формують інформаційну основу для переходу від фрагментарного контролю окремих параметрів до цілісної оцінки стану повітряного середовища [7], [14], [21]. Саме поєднання синхронізації, попередньої обробки, нормалізації та зважування показників дозволяє отримати структурований і надійний потік даних, на базі якого можливо реалізувати більш гнучку та обґрунтовану логіку керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням у приміщеннях [21], [31], [34].

1.4 Кіберфізичні системи як основа сучасних систем керування середовищем

Кіберфізичні системи розглядаються як логічний етап розвитку автоматизованих і вбудованих систем керування, у яких фізичні процеси тісно поєднані з цифровою обробкою даних, мережевою взаємодією та алгоритмами прийняття рішень [12], [19], [27]. На відміну від класичних систем автоматизації, де обчислювальний блок часто виконує лише роль регулятора за фіксованими уставками, кіберфізичний підхід передбачає постійну взаємодію між реальним середовищем і його цифровою моделлю [19], [33]. У такій архітектурі фізичні об'єкти не просто керуються, а стають джерелом даних для безперервного аналізу, на основі якого формується адаптивна поведінка всієї системи [27], [35].

Суттєвою особливістю кіберфізичних систем є замкнений контур “вимірювання – обчислення – вплив”, який працює в режимі, близькому до реального часу [12], [19]. Сенсорний рівень формує потік даних про стан середовища, обчислювальний рівень виконує їх узгодження, інтерпретацію та аналіз, після чого результати використовуються для керування виконавчими механізмами [21], [27]. Така організація дозволяє не лише підтримувати задані

параметри, а й враховувати динаміку процесів, інерційність об'єктів і змінні умови експлуатації [19], [33]. У результаті система переходить від жорстко заданої логіки до більш гнучкої, орієнтованої на поточний стан і тенденції його зміни [27], [35].

У контексті керування середовищем кіберфізичний підхід має особливе значення, оскільки повітряне та теплове середовище в приміщеннях характеризується складною динамікою, просторовою неоднорідністю та наявністю кількох взаємопов'язаних процесів [16], [24]. Температурні поля, розподіл вологості, концентрація газових і аерозольних домішок змінюються під впливом людей, обладнання, вентиляції та зовнішніх факторів [16], [24]. Класичні системи керування, побудовані за принципом одного датчика та одного регулятора, не здатні адекватно враховувати цю багатфакторність [24], [31]. Кіберфізична архітектура, навпаки, дозволяє інтегрувати дані з кількох джерел, формувати узгоджену картину стану середовища та приймати рішення з урахуванням взаємного впливу параметрів [12], [27], [33].

Важливою складовою кіберфізичних систем є наявність програмного рівня, який виконує не лише функції обробки сигналів, а й реалізує логіку високого рівня [19], [27]. До таких функцій належить оцінка стану об'єкта керування, вибір режимів роботи виконавчих механізмів, адаптація параметрів керування та накопичення історичних даних для подальшого аналізу [27], [35]. Завдяки цьому система отримує можливість працювати не лише за поточними вимірюваннями, а й з урахуванням попередніх станів, характерних сценаріїв використання приміщення та типових змін навантаження [33], [35].

Ще однією характерною рисою кіберфізичних систем є їхня орієнтація на мережеву взаємодію та масштабованість [12], [19]. Сенсори, контролери та виконавчі модулі можуть бути розподілені в просторі та об'єднані в єдину інформаційну мережу [27], [31]. Це дозволяє реалізувати зональний підхід до керування середовищем, коли рішення приймаються не лише на основі усереднених показників, а з урахуванням локальних особливостей окремих

ділянок приміщення або групи приміщень [16], [24]. У такій конфігурації цифрова частина системи виконує роль координуючого рівня, який узгоджує роботу розподілених елементів у межах спільної мети підтримання стабільних умов [27], [33].

З інженерної точки зору перехід до кіберфізичних систем змінює саму філософію побудови керування [19], [27]. Замість жорстко заданих уставок і простих порогових правил використовується багатопараметрична оцінка стану середовища та контекстно-залежна логіка прийняття рішень [24], [33]. Наприклад, підвищення концентрації вуглекислого газу може інтерпретуватися по-різному залежно від температури, вологості та рівня забруднення зовнішнього повітря [16], [24]. У одному випадку доцільним стає інтенсивне провітрювання, в іншому – поєднання обмеженого повітрообміну з фільтрацією та стабілізацією мікроклімату [24], [31]. Саме кіберфізична архітектура дозволяє реалізувати таку умовно-залежну логіку без ускладнення апаратної частини [27], [35].

Важливим наслідком застосування кіберфізичних систем є підвищення прозорості та керованості процесів [19], [27]. Наявність цифрового рівня, що акумулює дані та формує узагальнену модель стану середовища, дозволяє не лише виконувати поточне керування, а й аналізувати ефективність прийнятих рішень, виявляти типові сценарії погіршення умов і коригувати стратегії роботи системи [33], [35]. Це створює передумови для поступового переходу від реактивного керування до більш прогнозованого та адаптивного режиму функціонування [27], [35].

У підсумку кіберфізичні системи формують концептуальну основу для сучасних систем керування середовищем, у яких поєднуються мультисенсорні вимірювання, цифрова обробка даних і керований фізичний вплив на об'єкт [12], [27], [33]. Такий підхід дозволяє розглядати повітряне та мікрокліматичне середовище не як набір ізольованих параметрів, а як цілісну динамічну систему, стан якої може оцінюватися, аналізуватися та змінюватися в узгоджений і

керований спосіб відповідно до реальних умов експлуатації приміщень [16], [24], [35].

1.5 Аналіз підходів до керування вентиляцією та кондиціонуванням у приміщеннях

Системи вентиляції та кондиціонування традиційно розглядаються як основні інженерні засоби формування мікроклімату в приміщеннях [2], [8]. Їхнє призначення полягає у забезпеченні повітрообміну, підтриманні прийняттого температурного режиму та контролі вологості, що безпосередньо впливає на комфорт і умови перебування людей [2], [11]. Проте на практиці підходи до керування цими системами суттєво відрізняються залежно від рівня автоматизації, типу об'єкта та поставлених завдань, а також не завжди враховують багатофакторний характер якості повітряного середовища [8], [15].

Найбільш поширеним підходом залишається керування за фіксованими уставками або розкладом [11], [17]. У таких системах вентиляційне обладнання працює за заданим графіком або підтримує наперед визначені значення температури й, у кращому випадку, вологості [11]. Цей підхід є відносно простим у реалізації та прогнозованим з точки зору експлуатації, однак він слабо адаптується до реальних змін навантаження [17], [22]. Кількість людей у приміщенні, інтенсивність використання обладнання та зовнішні умови можуть істотно змінюватися протягом дня, тоді як система продовжує працювати за заздалегідь заданим сценарієм [22], [26]. Унаслідок цього або витрачається надлишкова енергія, або, навпаки, повітряне середовище погіршується в періоди пікового навантаження [17], [26].

Більш гнучким є підхід, заснований на використанні локальних датчиків температури та вологості [11], [24]. У цьому випадку кондиціонування реагує на відхилення від заданих комфортних меж і намагається стабілізувати тепловий режим [24], [28]. Такий підхід широко застосовується в побутових і комерційних

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

системах клімат-контролю, оскільки дозволяє підтримувати відносно стабільні умови без постійного втручання оператора [11], [28]. Проте обмеження цього методу полягає в тому, що він майже не враховує газовий склад повітря та наявність аерозольних домішок [5], [18]. За нормальної температури та вологості система може не реагувати на зростання концентрації вуглекислого газу або пилу, хоча з точки зору якості повітря умови вже потребують корекції [5], [18].

У сучасних вентиляційних системах усе частіше використовується керування за концентрацією CO₂ як індикатором потреби в повітрообміні [3], [10]. Такий підхід дозволяє пов'язати інтенсивність вентиляції з реальною присутністю людей і динамікою заповнення приміщення [3], [23]. Коли рівень CO₂ зростає, система збільшує приплив і витяжку, а за зниження навантаження - зменшує їх інтенсивність [10], [23]. З інженерної точки зору це є кроком уперед у порівнянні з фіксованими уставками, проте й тут залишається низка обмежень [3], [26]. Концентрація CO₂ не відображає рівень пилу або хімічних домішок, а також не враховує якість зовнішнього повітря [5], [18]. За несприятливих умов просте збільшення припливу може не покращити, а інколи й погіршити загальний стан повітряного середовища [18], [26].

Окрему категорію становлять системи з використанням очищувачів повітря та фільтраційних модулів [6], [20]. У таких рішеннях акцент робиться на зниженні концентрації аерозольних частинок і частково газових домішок за рахунок механічної або адсорбційної фільтрації [6], [20]. Це дозволяє покращувати якість повітря навіть у випадках, коли зовнішнє середовище має високий рівень забруднення [1], [20]. Водночас такі системи зазвичай слабо пов'язані з контуром вентиляції та кондиціонування або працюють автономно, без урахування загального теплового балансу й газового складу повітря [6], [25]. Унаслідок цього очищення може відбуватися без належного оновлення повітря, що не розв'язує проблему накопичення вуглекислого газу та вологи [3], [25].

У більш складних інженерних рішеннях, зокрема в системах керування будівлями, застосовується комбінований підхід, коли вентиляція,

кондиціонування та інколи зволоження або осушення повітря координуються в межах спільного керувального контуру [9], [16]. Такі системи можуть враховувати кілька параметрів одночасно, зокрема температуру, вологість і концентрацію CO₂, та на цій основі обирати режими роботи обладнання [9], [16]. Проте на практиці навіть у цих випадках логіка керування часто залишається спрощеною й базується на наборі незалежних регуляторів, кожен з яких реагує на “свій” параметр [16], [31].

З інженерної точки зору важливим обмеженням багатьох існуючих підходів є недостатній урахунок інерційності процесів у приміщенні [12], [24]. Повітряний об’єм, огорожувальні конструкції та обладнання мають власну теплову й масообмінну інерцію, через що реакція на керувальні впливи не є миттєвою [12], [24]. Системи, побудовані виключно на порогових правилах, часто працюють у режимі постійних перемикачів, що знижує як комфорт, так і енергоефективність [17], [24]. Відсутність узгодженої оцінки стану середовища призводить до того, що вентиляція та кондиціонування можуть діяти не синхронно або навіть у протилежних напрямках з точки зору загальної мети підтримання якості повітря [9], [31].

У підсумку аналіз підходів до керування вентиляцією та кондиціонуванням показує, що більшість поширених рішень орієнтується на обмежений набір параметрів і використовує спрощену логіку прийняття рішень [16], [26]. Хоча такі системи дозволяють частково автоматизувати підтримання мікроклімату, вони не забезпечують цілісного керування якістю повітря як багатофакторним і динамічним процесом [5], [18], [31]. Це створює передумови для переходу до інтегрованого кіберфізичного підходу, у якому мультисенсорні дані використовуються для узгодженого керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням з урахуванням реального стану та динаміки повітряного середовища в приміщеннях [12], [27], [35].

2. ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ПОВІТРЯ В ПРИМІЩЕННЯХ

2.1 Загальна архітектура кіберфізичної системи керування якістю повітря

Загальну архітектуру кіберфізичної системи керування якістю повітря в приміщеннях побудовано як багаторівневу структуру, у якій процеси вимірювання, передавання, аналізу та впливу на повітряне середовище поєднано в одному узгодженому контурі. Така побудова обрана не випадково, оскільки саме для задач керування якістю повітря недостатньо лише періодично фіксувати окремі параметри. У реальних умовах стан повітря змінюється постійно, а швидкість і характер цих змін залежать від присутності людей, інтенсивності роботи техніки, стану зовнішнього середовища, особливостей вентиляції, наявності локальних джерел пилу чи хімічних домішок, а також від теплової інерції самого приміщення. Через це архітектуру сформовано так, щоб вона забезпечувала не просто збір інформації, а безперервний цикл спостереження, оцінювання, прийняття рішень і корекції стану повітряного середовища.

У структурі системи виокремлено фізичний і цифровий рівні, між якими організовано постійний двосторонній зв'язок. Фізичний рівень охоплює саме приміщення як середовище спостереження, сукупність сенсорних вузлів, канали переміщення повітря, вентиляційне обладнання, очищувальні пристрої, кондиціонер та допоміжні комутаційні елементи. Цифровий рівень охоплює мікроконтролерну або обчислювальну платформу, модулі зв'язку, алгоритми обробки вимірювань, логіку прийняття керувальних рішень і засоби візуалізації. Кіберфізичний характер архітектури проявляється саме в тому, що цифрова частина не існує сама по собі, а постійно реагує на фізичні зміни в середовищі та, у свою чергу, змінює це середовище через керувальні дії. Унаслідок цього формується замкнений контур зі зворотним зв'язком, у межах якого система спочатку спостерігає, далі інтерпретує ситуацію, після чого виконує корекцію й повторно контролює результат.

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Початковою ланкою архітектури виступає сенсорна підсистема, яку організовано як мультисенсорну мережу контролю параметрів повітря. До її складу включено датчики концентрації вуглекислого газу, дрібнодисперсного пилу, летких органічних сполук, температури та відносної вологості. Саме така комбінація вимірювальних каналів дозволяє отримати більш повну і технічно змістовну картину стану повітря, ніж використання одного-двох параметрів. Концентрація CO₂ відображає ступінь оновлення повітря та рівень антропогенного навантаження. Показники PM_{2.5} і PM₁₀ характеризують аерозольне забруднення, що може бути пов'язане як із зовнішнім середовищем, так і з внутрішніми джерелами. Значення TVOC дозволяють оцінити загальний рівень летких хімічних домішок, а температура та вологість формують основу для оцінки мікроклімату і водночас впливають на інтерпретацію інших показників. За рахунок поєднання цих каналів контролю архітектура системи орієнтується не на окремий симптом погіршення стану повітря, а на комплексну оцінку умов у приміщенні.

Сенсорні вузли в такій архітектурі розміщено не довільно, а з урахуванням зонального принципу спостереження. Це пояснюється тим, що повітряне середовище в реальному приміщенні не є однорідним. У різних його частинах можуть формуватися локальні області з підвищеною температурою, більшою концентрацією CO₂, пилу чи летких органічних сполук. Такі відхилення часто виникають біля робочих місць, техніки, джерел тепла, біля місць скупчення людей, поблизу дверей, вікон або вентиляційних каналів. Тому архітектуру побудовано так, щоб контролювати не лише усереднений стан приміщення, а й просторовий розподіл параметрів. Це підвищує точність оцінювання ситуації та робить керування більш адресним. Якщо в одній частині приміщення спостерігається суттєве погіршення якості повітря, система отримує можливість не чекати, поки проблема пошириться на весь об'єм простору, а реагувати раніше й точніше.

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Дані, сформовані сенсорними вузлами, надходять до обчислювального ядра системи. Саме цей блок виконує функцію координаційного центру всієї архітектури. Його призначення полягає не лише в тому, щоб зібрати числові значення з датчиків, а й у тому, щоб перетворити набір різнорідних вимірювань у зрозумілу картину поточного стану середовища. Для цього в архітектурі передбачено етап часової синхронізації даних, оскільки різні сенсори можуть працювати з різною швидкістю відгуку та різною частотою оновлення. Наприклад, температура та вологість можуть змінюватися відносно плавно, тоді як рівень пилу або летких органічних сполук у певних ситуаціях зростає стрибкоподібно. Без узгодження цих потоків даних у часі система ризикує порівнювати неодночасні стани середовища, що знижує коректність прийнятих рішень. Тому архітектурою передбачено формування узгодженого масиву даних, де кожен набір вимірювань відповідає певному часовому інтервалу спостереження.

Якщо після вмикання припливної вентиляції концентрація CO₂ знижується недостатньо швидко, архітектура дозволяє посилити інтенсивність повітрообміну або змінити конфігурацію роботи витяжного каналу. Якщо після запуску очищувача пилові частинки зменшуються, але при цьому температура надмірно змінюється через інтенсивну вентиляцію, система коригує співвідношення між підсистемами. Саме такий зворотний зв'язок відрізняє архітектуру кіберфізичної системи від звичайного сценарного керування. Тут не задається раз і назавжди фіксований набір дій, а реалізується постійна перевірка наслідків цих дій і їх подальше уточнення.

Окремий структурний рівень архітектури утворює підсистема передавання та зберігання даних. Її роль полягає в тому, щоб забезпечити зв'язок між усіма функціональними блоками та створити можливість для тривалого накопичення історії вимірювань. Передавання даних може бути організовано через дротові або бездротові канали залежно від конкретної конфігурації приміщення та складу обладнання. Збереження історичних значень є не менш важливим, ніж

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

миттєва реакція системи, оскільки саме на основі накопичених даних стає можливим аналіз типових сценаріїв погіршення якості повітря, виявлення повторюваних періодів підвищеного навантаження, порівняння ефективності різних режимів вентиляції та уточнення параметрів керування. За рахунок цього архітектура системи набуває не лише оперативного, а й аналітичного характеру.

Не менш важливою є підсистема взаємодії з користувачем, яка забезпечує прозорість функціонування всієї архітектури. Автоматизоване керування не скасовує потреби в тому, щоб стан системи залишався зрозумілим і контрольованим. Через інтерфейс користувач отримує доступ до поточних значень параметрів повітря, режимів роботи вентиляції, очищення та кондиціонування, повідомлень про відхилення та історії змін. Це дозволяє не лише спостерігати за системою, а й, за потреби, втручатися в її роботу. У структурі архітектури передбачено можливість зміни окремих порогів, налаштування режимів функціонування, перемикання між автоматичним та ручним режимами, а також фіксації подій, які можуть бути корисними для подальшого аналізу. Такий підхід робить систему не «закритою коробкою», а технічно прозорим інструментом керування мікрокліматом.

З архітектурної точки зору важливо також те, що систему побудовано модульно. Це означає, що кожна її частина виконує чітко визначену функцію, але може бути змінена або доповнена без руйнування загальної логіки побудови. Якщо в подальшому виникає потреба розширити кількість контрольованих параметрів, до архітектури можуть бути додані нові сенсори. Якщо з'являється потреба деталізувати зональне керування, можуть бути введені додаткові сенсорні вузли або окремі виконавчі канали для різних частин приміщення. Якщо потрібно покращити точність прийняття рішень, може бути модифіковано алгоритмічний блок без повної перебудови фізичної частини. Саме така модульність і масштабованість є важливою перевагою архітектури, оскільки дозволяє розглядати її не як жорстко обмежене рішення для одного приміщення, а як основу для ширшого впровадження.

режими функціонування. Якщо певний канал вимірювання втрачає достовірність, система зменшує вагу цього каналу в підсумковій оцінці або тимчасово використовує інші параметри для підтримання базового рівня керування. Якщо певний виконавчий механізм недоступний, пріоритет може бути перерозподілено між іншими доступними засобами впливу на середовище. Це підвищує загальну надійність архітектури та робить її більш придатною для реальної експлуатації.

Отже, загальну архітектуру кіберфізичної системи керування якістю повітря в приміщеннях сформовано як багаторівневу, модульну та адаптивну структуру, у якій мультисенсорне спостереження, цифрове оцінювання стану, логіка прийняття рішень, керування виконавчими механізмами, зворотний зв'язок, накопичення історичних даних і взаємодія з користувачем поєднано в одному узгодженому контурі. Головна цінність такої архітектури полягає в тому, що вона дозволяє перейти від пасивного моніторингу до активного й керованого підтримання якості повітря. Повітряне середовище в цій системі вже не сприймається як щось, що лише спостерігається, а розглядається як динамічний об'єкт, стан якого постійно оцінюється, коригується й утримується в прийнятних межах за рахунок узгодженої роботи сенсорної, обчислювальної та виконавчої частин. Саме така архітектурна основа створює підґрунтя для подальшого деталізованого опису апаратних компонентів, алгоритмів обробки даних та принципів практичної реалізації всієї системи.

2.2 Обґрунтування вибору апаратних і програмних засобів реалізації системи

У бакалаврській кваліфікаційній роботі вибір апаратних і програмних засобів реалізації системи виконано з урахуванням кількох практичних критеріїв: достатньої точності вимірювань, можливості одночасного підключення кількох різнотипних сенсорів, підтримки бездротового передавання даних, зручності програмної реалізації, масштабованості

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 27
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

архітектури та придатності до подальшого розширення. Оскільки система орієнтується не лише на спостереження, а й на керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням, технічна база має забезпечувати стабільну роботу як вимірювальної, так і виконавчої частин. Саме тому обрано не один універсальний модуль “усе в одному”, а набір узгоджених компонентів, кожен із яких закриває свою функцію на належному рівні.

Як центральну апаратну платформу доцільно використати мікроконтролерну платформу класу ESP32. Такий вибір обґрунтовується тим, що ESP32 поєднує в одному кристалі бездротовий зв’язок Wi-Fi та Bluetooth, має достатній набір периферійних інтерфейсів, зокрема I2C, UART, SPI, PWM і ADC, а також орієнтований саме на IoT-застосування. Для системи керування якістю повітря це має принципове значення, оскільки один контролер отримує можливість одночасно опитувати сенсори, формувати керувальні сигнали для виконавчих пристроїв і передавати дані на верхній рівень без потреби в окремому мережевому модулі. Додатковою перевагою є добра підтримка з боку виробника як на рівні низькорівневого фреймворку ESP-IDF, так і на рівні Arduino Core для ESP32, що спрощує побудову прошивки без втрати функціональності.

Для контролю концентрації вуглекислого газу як основний сенсор доцільно використати Sensirion SCD41. Його вибір виправдано тим, що він побудований на фотоакустичному NDIR-принципі, має цифровий інтерфейс I2C, працює в діапазоні 400–5000 ppm і додатково містить вбудований канал вимірювання температури та вологості. Для даної системи це дає одразу кілька переваг. По-перше, CO₂ у цій архітектурі виступає одним із ключових індикаторів ефективності повітрообміну та заповненості приміщення. По-друге, наявність в одному модулі температурної та вологісної компенсації спрощує загальну побудову сенсорного вузла. По-третє, цифровий вихід зменшує вплив аналогових завад і полегшує інтеграцію з контролером. У результаті цей модуль

добре підходить саме для задач постійного моніторингу внутрішнього повітря, де потрібні стабільність, компактність і зручність монтажу.

Для вимірювання дрібнодисперсних частинок PM1.0, PM2.5, PM4.0 і PM10 доцільно використати Sensirion SPS30. Такий вибір обґрунтовано тим, що цей сенсор призначений саме для задач моніторингу та контролю якості повітря, використовує лазерне розсіювання, підтримує цифровий інтерфейс, має розширений діапазон масової концентрації та орієнтований на довготривалу експлуатацію. Для архітектури бакалаврської системи це важливо з двох причин. По-перше, пилове забруднення в приміщенні часто змінюється швидко, а отже потрібен сенсор, здатний коректно реагувати на короточасні зміни. По-друге, оскільки система задумана як засіб постійного контролю, особливого значення набуває довготривала стабільність вимірювань. Використання окремого PM-сенсора також дозволяє не змішувати задачі вентиляції та очищення: якщо CO₂ відображає потребу в оновленні повітря, то PM-канал показує, коли пріоритет потрібно змістити саме в бік фільтрації.

Для оцінювання летких органічних сполук і газових домішок доцільно використати Sensirion SGP41. Обрання цього сенсора пояснюється тим, що він формує цифрові сигнали VOC і NO_x, призначений для інтеграції в очищувачі повітря та системи керованої вентиляції, має інтерфейс I2C і орієнтований на тривалу стабільну роботу в реальних умовах. У контексті цієї системи SGP41 не замінює CO₂- або PM-сенсор, а доповнює їх, оскільки дозволяє бачити той компонент якості повітря, який не проявляється безпосередньо ні через вуглекислий газ, ні через аерозольні частинки. Це особливо важливо в офісних і побутових приміщеннях, де джерелами погіршення середовища можуть бути меблі, оздоблювальні матеріали, побутова хімія або інші слабо помітні чинники. У підсумку поєднання SCD41, SPS30 і SGP41 формує саме той мультисенсорний набір, який дозволяє перейти від спрощеного контролю одного параметра до комплексної оцінки повітряного середовища.

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Виконавчу частину системи доцільно реалізувати через релейні або твердотільні комутаційні модулі, а також через канали керування швидкістю вентиляторів і логічні інтерфейси взаємодії з кондиціонером. Такий підхід обрано тому, що система повинна не просто сигналізувати про погіршення стану повітря, а фізично змінювати повітряне середовище. Для цього необхідно мати окремі канали впливу на припливну вентиляцію, витяжку, очищення повітря та кондиціонування. Поділ виконавчих пристроїв на кілька незалежних контурів дозволяє реалізувати адресну реакцію: за перевищення CO₂ система посилює повітрообмін, за високого PM зміщує акцент на очищення, а за порушення температурного комфорту змінює режим кондиціонування. На практиці це дає змогу уникнути ситуації, коли всі пристрої вмикаються одночасно без реальної потреби. Така логіка не вимагає екзотичного апаратного забезпечення, але потребує достатньо гнучкого контролера й надійної електричної розв'язки між логічною та силовою частинами, що і враховано при виборі загальної структури.

Для передавання даних між вузлами та верхнім рівнем системи доцільно використати MQTT. Його вибір обґрунтований тим, що цей протокол є легким, простим у реалізації та спеціально придатним для роботи в обмежених мережевих і обчислювальних умовах. У системі керування якістю повітря це дає важливу перевагу: сенсорні повідомлення можуть передаватися компактно, регулярно й без зайвого навантаження на мікроконтролер. Крім того, модель publish/subscribe добре відповідає архітектурі кіберфізичної системи, де одні компоненти генерують телеметрію, інші її споживають, а треті формують на її основі візуалізацію або керувальні сценарії. За рахунок цього MQTT природно вписується в структуру, де дані від датчиків, команди керування й події виконавчих механізмів існують як частини одного інформаційного потоку.

Для системи якості повітря це особливо важливо, адже фактично вся її інформаційна модель базується на часовій послідовності значень: концентрація CO₂, пилу, VOC, температури й вологості змінюється впродовж дня, а коректне керування потребує не лише поточного значення, а й розуміння динаміки.

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Збереження цих даних у спеціалізованій time-series базі спрощує побудову графіків, аналіз пікових навантажень, порівняння режимів роботи вентиляції та оцінку ефективності виконаних керувальних дій, структурну схему яких подано на рисунку 2.2.

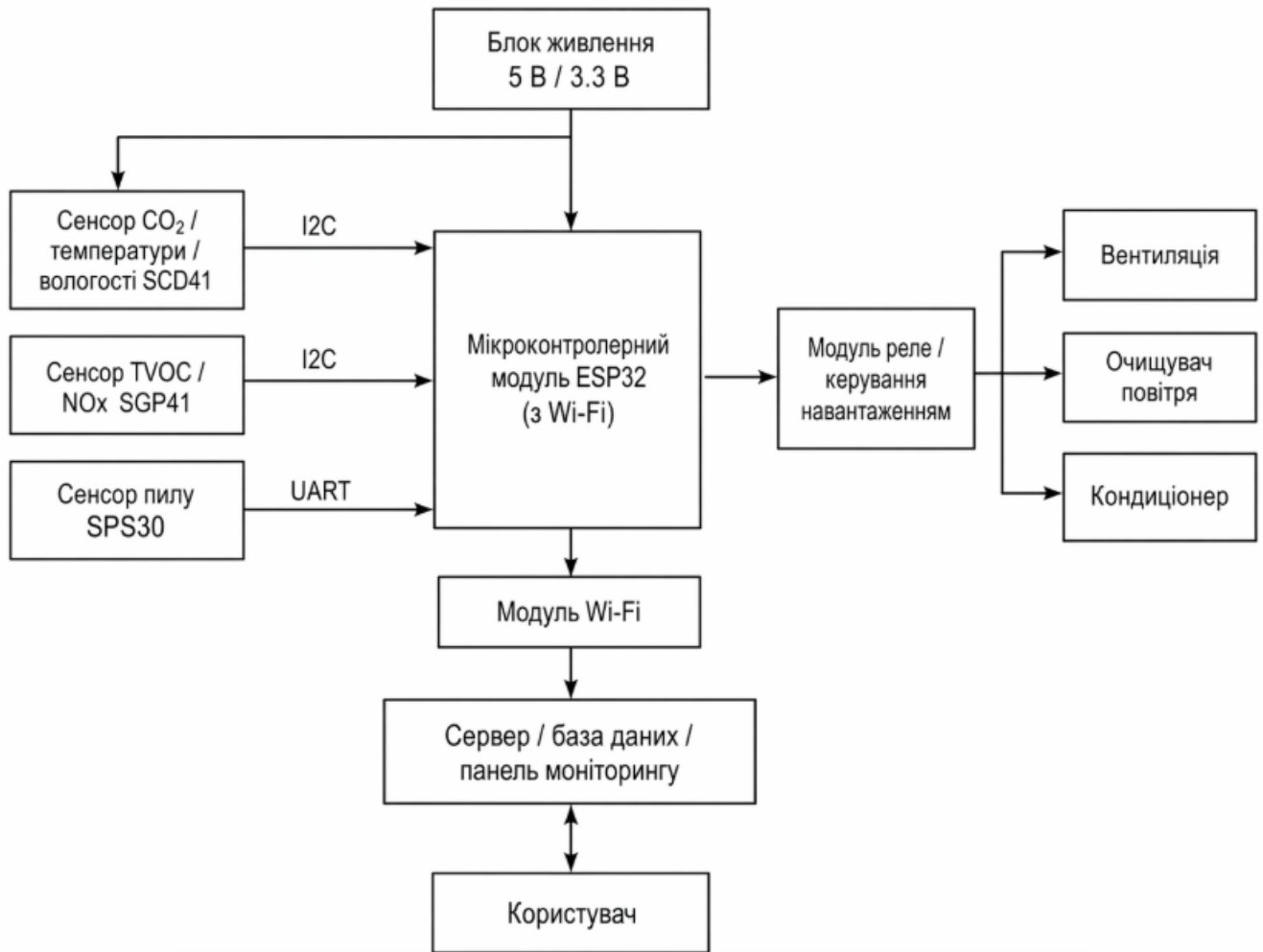


Рисунок 2.2 – Структура апаратної реалізації системи

Обраний набір апаратних і програмних засобів добре узгоджується між собою також з архітектурної точки зору. ESP32 забезпечує роль локального вузла збору та первинної обробки даних, сенсори SCD41, SPS30 і SGP41 закривають основні вимірювані компоненти якості повітря, MQTT організовує передавання телеметрії, InfluxDB накопичує історію, а Grafana забезпечує її наочне представлення. За такої побудови система залишається достатньо простою для

реалізовано повноцінну кіберфізичну систему керування якістю повітря в приміщеннях. Саме така конфігурація дозволяє забезпечити збір мультисенсорних даних, їх обробку, оцінювання стану повітряного середовища та подальше формування керувальних впливів на вентиляцію, очищення та кондиціонування в межах єдиної інтегрованої системи.

2.3 Розроблення структури сенсорної підсистеми та організація мультисенсорних вимірювань

Розроблення сенсорної підсистеми в даній бакалаврській кваліфікаційній роботі виконано з урахуванням того, що саме цей рівень визначає якість усієї подальшої обробки інформації та коректність керувальних рішень. Якщо сенсорна частина формує неповні, нестабільні або погано узгоджені дані, то навіть правильно побудований алгоритм не забезпечує адекватної реакції системи на зміну стану повітряного середовища. Саме тому структура сенсорної підсистеми сформована не як сукупність окремо підключених датчиків, а як цілісний вузол спостереження, у якому кожен вимірювальний канал виконує чітко визначену функцію і водночас доповнює інші канали.

Основу сенсорної підсистеми сформовано на базі мікроконтролерного вузла з підключеними датчиками SCD41, SPS30 та SGP41. Така конфігурація обрана тому, що вона дозволяє охопити три ключові групи параметрів, які визначають якість повітря в приміщенні. Першу групу становлять показники, пов'язані з вентиляційним станом середовища, тобто концентрація вуглекислого газу. Другу групу формують аерозольні домішки, які характеризуються масовою концентрацією дрібнодисперсного пилу. Третю групу утворюють леткі органічні сполуки та пов'язані з ними газові відхилення. Додатково в системі враховуються температура та відносна вологість, оскільки без цих параметрів неможливо коректно інтерпретувати загальний стан мікроклімату і правильно оцінити ефективність вентиляції, очищення та кондиціонування.

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 33
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Структуру сенсорного вузла організовано так, щоб кожен датчик працював у фізично доцільних умовах і не створював взаємних перешкод для інших каналів вимірювання. Датчик SCD41 використовується як основний канал визначення концентрації CO₂, а також як джерело даних про температуру та вологість, необхідних для компенсації та загальної оцінки стану середовища. Датчик SPS30 виконує контроль масової концентрації пилових частинок різних фракцій, а отже відповідає за ту частину вимірювання, яка не може бути оцінена через газові канали. Датчик SGP41 доповнює систему інформацією про леткі органічні сполуки та зміни хімічного фону повітря. У результаті сенсорний вузол не орієнтується на один показник, а формує багатоканальний цифровий образ середовища, у якому відображено кілька фізично різних, але взаємопов'язаних характеристик повітря.

Сама побудова сенсорної підсистеми виконана за модульним принципом. Центральний контролер виконує роль координуючого ядра, а кожен сенсорний модуль підключається як окремий функціональний канал. Такий підхід є важливим з кількох причин. По-перше, він спрощує технічну реалізацію та налагодження, оскільки кожен датчик може бути протестований окремо до включення в загальний цикл. По-друге, модульність підвищує надійність, тому що за відмови одного каналу вся сенсорна підсистема не втрачає працездатності повністю. По-третє, така структура створює основу для подальшого масштабування, коли за потреби до системи можуть бути додані нові сенсорні вузли або додаткові контрольні точки без повного перегляду принципу побудови.

Підключення сенсорів організовано з урахуванням особливостей їхніх інтерфейсів і режимів роботи. Датчики SCD41 та SGP41 доцільно включено до цифрової шини I2C, оскільки вони підтримують цей інтерфейс, мають невисокий обсяг службового трафіку й добре інтегруються в компактний мікроконтролерний вузол. Датчик SPS30 у структурі системи доцільно підключено через UART, оскільки для пилового сенсора важливо забезпечити

стабільний канал передавання даних і розмежувати його роботу з іншими цифровими пристроями. Схема підключення зображена на рисунку 2.4 зменшує ризик конфліктів на спільній шині та забезпечує більш стійку роботу в реальних умовах експлуатації. Уся внутрішня комунікація всередині сенсорного вузла побудована так, щоб зменшити затримки зчитування та забезпечити передбачуваний цикл опитування.

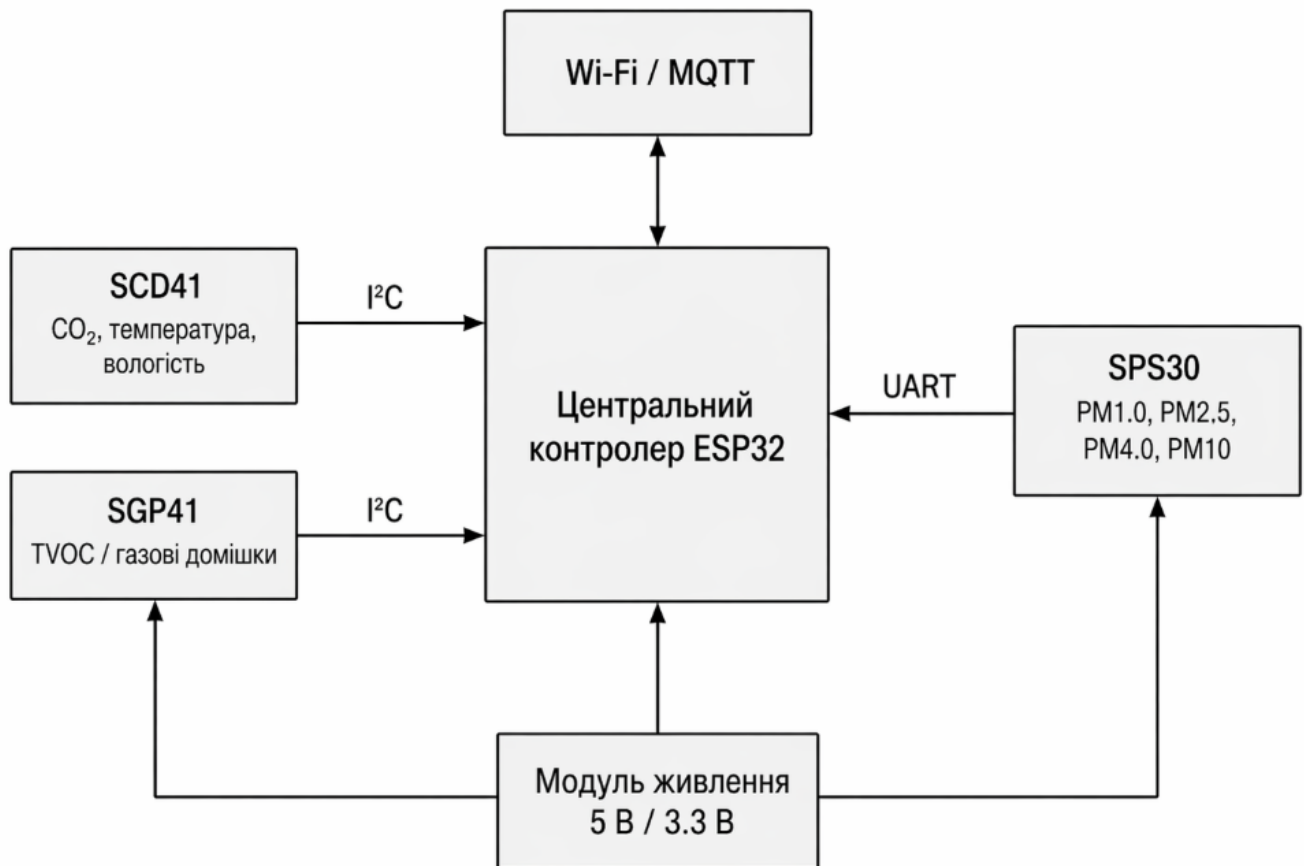


Рисунок 2.4 – Схема підключення сенсорів до центрального контролера

Окрему увагу приділено фізичному розміщенню сенсорів у вузлі. Це питання є значно важливішим, ніж може здаватися на перший погляд, оскільки навіть технічно якісний датчик здатен формувати викривлені показники за неправильного монтажу. Датчик вуглекислого газу не повинен розташовуватися безпосередньо біля отворів припливної вентиляції, оскільки це створює штучно занижені значення через локальне надходження свіжого повітря. Пиловий сенсор

не доцільно розміщувати в замкненому корпусі без достатнього повітрообміну, оскільки це спотворює оцінку концентрації частинок. Газовий сенсор летких органічних сполук також потребує стабільного доступу до повітряного потоку, але без впливу локальних перегрівів від мікроконтролера чи силових елементів. Через це конструкцію сенсорного вузла сформовано так, щоб зберегти природний або керовано організований обтік повітрям кожного вимірювального елемента та мінімізувати взаємний тепловий вплив між компонентами.

Далі отримані дані прив'язуються до часової мітки, що дозволяє чітко знати, до якого моменту належить кожен набір вимірювань. Після цього виконується перевірка коректності значень. На цьому етапі відкидаються явно некоректні або фізично малоймовірні вимірювання, наприклад різкі аномальні стрибки, які не узгоджуються з попередньою динамікою. Потім здійснюється попереднє згладжування даних, необхідне для зниження впливу шуму. Лише після цього формується узгоджений вектор стану повітряного середовища, який передається на рівень подальшого аналізу і прийняття рішень.

У структурі сенсорної підсистеми також передбачено механізми калібрувального та сервісного характеру. Для CO₂-сенсора важливо враховувати потребу у коректній базовій компенсації та стабілізації впродовж тривалої роботи. Для пилового сенсора суттєвим є дотримання чистоти повітряних каналів і врахування режиму самоочищення або перевірки стану оптичного тракту. Для VOC-сенсора важливим є правильний початковий прогрів і стабілізація в нормальних умовах перед активним використанням даних у керувальному циклі. З організаційної точки зору це означає, що сенсорна підсистема не розглядається як «раз зібрана» частина системи, яка не потребує уваги. Натомість її роботу передбачено як контрольований процес, де враховано запуск, стабілізацію, штатний режим функціонування та періодичну перевірку достовірності вимірювань.

Структуру сенсорної підсистеми розроблено як модульну, багатоканальну та просторово адаптовану частину кіберфізичної системи, яка забезпечує не

лише збирання окремих параметрів, а й формування узгодженого багатовимірною опису стану повітряного середовища. Організація мультисенсорних вимірювань побудована на принципах часової синхронізації, попередньої обробки, перевірки достовірності, нормалізації та подальшого об'єднання даних у єдиний інформаційний пакет. Це дозволяє зробити сенсорну підсистему технічно придатною для подальшої реалізації адаптивного керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням, а також створює основу для стабільної й передбачуваної роботи всієї системи в реальних умовах експлуатації приміщення.

2.4 Розроблення алгоритму обробки даних та прийняття керувальних рішень

Алгоритм обробки даних та прийняття керувальних рішень посідає центральне місце в загальній логіці кіберфізичної системи керування якістю повітря, оскільки саме на цьому рівні набір окремих вимірних значень перетворюється на осмислену реакцію системи. Якщо сенсорна підсистема відповідає за формування цифрового образу середовища, то алгоритмічний рівень визначає, як саме цей образ інтерпретується, які зміни вважаються критичними, які відхилення потребують негайного втручання, а які можуть бути компенсовані плавно, без різких перемикань обладнання. З цієї причини алгоритм не зводиться до простого порівняння показників із наперед заданими порогоми. Його побудовано як послідовність взаємопов'язаних етапів, де враховано часову динаміку, достовірність даних, взаємний вплив параметрів і наслідки кожного керувального впливу.

Загальна логіка роботи алгоритму організована у вигляді повторюваного циклу. На початку кожного циклу з сенсорної підсистеми надходять актуальні значення концентрації CO₂, масової концентрації частинок РМ, рівня летких органічних сполук, температури та відносної вологості. Отримані дані не використовуються для керування безпосередньо, оскільки сирі вимірювання

можуть містити короточасні відхилення, шуми або випадкові сплески. Тому першим етапом алгоритму передбачено перевірку цілісності пакета даних, контроль наявності всіх обов'язкових значень і перевірку того, чи відповідають вони фізично можливим межах. Якщо певний канал передає некоректне значення, система не формує рішення негайно, а позначає цей вимір як недостовірний і переходить до режиму обережної обробки.

Після приймання даних виконується їх часове узгодження. Це потрібно тому, що різні сенсори мають різну швидкість оновлення та різний час реакції на зміну повітряного середовища. Наприклад, температура та вологість змінюються плавніше, ніж концентрація пилу, яка може різко зрости протягом кількох секунд. Якщо не врахувати цю відмінність, система може порівнювати значення, що фактично належать до різних фаз стану приміщення. Щоб уникнути такого викривлення, алгоритм формує єдине часово узгоджене вікно аналізу, у межах якого всі показники приводяться до спільного інтервалу. Саме цей крок дозволяє перейти від розрізнених чисел до синхронізованого опису поточного стану повітря.

Наступним етапом є попередня обробка вимірювань. Для кожного каналу використовується окрема схема згладжування, оскільки фізична природа параметрів відрізняється. Для CO₂ застосовується м'яке усереднення, яке прибирає випадкові коливання, але не спотворює загальну тенденцію до зростання або зменшення концентрації. Для пилових каналів передбачено коротке ковзне вікно, що дозволяє не реагувати на одиничні випадкові піки, але водночас не втрачати реальні короточасні забруднення. Для TVOC використовується помірно згладжування, щоб уникнути різких стрибків, пов'язаних із нестабільністю чутливого шару сенсора. Для температури й вологості доцільно використано більш інерційний фільтр, оскільки ці параметри в більшості випадків змінюються повільніше. У результаті на виході цього блоку формується стабілізований набір значень, придатний для подальшої інтерпретації.

Після фільтрації алгоритм переходить до нормалізації параметрів. Цей етап є принципово важливим, тому що всі вимірювані величини мають різні одиниці вимірювання, різні діапазони та різну вагу в оцінці стану повітря. Концентрація CO₂ виражається в ppm, пил - у мікрограмах на кубічний метр, температура - у градусах, а вологість - у відсотках. Щоб система могла працювати з ними в єдиній логіці, кожен параметр переводиться у відносну шкалу від нуля до одиниці або в подібний нормалізований індекс. Нуль у такій шкалі відповідає комфортному або допустимому стану, а значення, близькі до одиниці, відображають небажане або критичне відхилення. За рахунок цього стає можливим не лише порівнювати різні параметри між собою, а й поєднувати їх у спільну інтегральну оцінку.

Якщо основною проблемою є температура чи вологість, ситуація класифікується як порушення теплового комфорту або мікрокліматичної рівноваги. У випадку одночасного відхилення кількох параметрів стан позначається як комбінований, і тоді рішення формується не для однієї підсистеми, а для кількох одразу.

Після класифікації стану алгоритм переходить до формування керувальної стратегії. Цей етап побудовано як ієрархічну логіку, де кожен тип проблеми має власний пріоритет і набір рекомендованих дій. Для підвищення CO₂ головним засобом впливу виступає вентиляція, оскільки саме вона забезпечує оновлення повітряного об'єму. Для високого рівня дрібнодисперсного пилу перевага надається очищенню повітря, а вентиляція активується з урахуванням загального режиму роботи системи. Для перевищення TVOC використовується комбінація повітрообміну та очищення, якщо така конфігурація доступна. Для відхилень температури або вологості пріоритет переходить до кондиціонування або до режимів, що дозволяють стабілізувати мікроклімат без надмірного порушення інших параметрів. Завдяки такій структурі алгоритм уникає грубого сценарію, коли будь-яке погіршення автоматично вмикає всі пристрої одночасно.

					КВРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Щоб система не працювала в режимі постійного перемикавання, в алгоритмі передбачено гістерезис і часове підтвердження рішень. Це означає, що для активації певного виконавчого режиму відхилення має зберігатися не один цикл, а протягом визначеного часу або кількох послідовних циклів опитування. Аналогічно для вимкнення обладнання потрібно, щоб параметр повернувся не просто нижче порога, а нижче зворотної межі та залишався там певний інтервал. Така логіка суттєво підвищує стабільність роботи системи. Без гістерезису вентиляція, очищення чи кондиціонер могли б вмикатися та вимикатися занадто часто, що не лише зменшувало б комфорт, а й прискорювало б зношування обладнання.

Для зручності реалізації виконавчу логіку поділено на режими. Вентиляція може працювати, наприклад, у базовому, підвищеному та інтенсивному режимах. Очищення повітря - у вимкненому, помірному та активному режимах. Кондиціонування - у станах очікування, охолодження, осушення або комбінованої корекції мікроклімату. Перехід між режимами визначається не одним параметром, а сукупністю факторів. Якщо CO₂ перевищує цільовий рівень незначно, вмикається підвищений припливно-витяжний режим. Якщо перевищення суттєве, система переходить до інтенсивного повітрообміну. Якщо температура вища за бажану межу, кондиціонер активується незалежно від стану CO₂, але його робота узгоджується з вентиляцією, щоб уникнути конфліктних дій.

Дуже важливою частиною алгоритму стало узгодження дій між підсистемами. У реальних умовах вентиляція, очищення та кондиціонування можуть по-різному впливати на ті самі параметри. Наприклад, активна вентиляція знижує CO₂, але здатна змінити температуру. Кондиціонер стабілізує тепловий режим, але сам по собі не розв'язує проблему накопичення вуглекислого газу. Блок-схему алгоритму зображено на рисунку 2.5.

					КВРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо архітектура системи передбачає кілька сенсорних вузлів, алгоритм додатково враховує просторовий розподіл параметрів. У такому випадку розраховується не лише загальний стан приміщення, а й виділяються зони з гіршими показниками. Логіка прийняття рішення може базуватися на максимальному відхиленні серед усіх вузлів, на середньозваженій оцінці або на комбінованому правилі, коли загальний режим визначається за середнім станом, а локальні підсилення - за найгіршою зоною. Це дозволяє не орієнтуватися виключно на усереднену картину, яка часто приховує локальні проблеми. За рахунок цього система краще пристосовується до реальної неоднорідності повітряного середовища.

У структурі алгоритму також передбачено механізм оцінювання достовірності вхідних даних. Для кожного циклу формується коефіцієнт довіри до набору вимірювань. Якщо один із каналів працює нестабільно, коефіцієнт достовірності зменшується. Якщо спостерігається збій зв'язку з окремим вузлом, система позначає відповідну зону як частково недоступну. Якщо ж кількість недостовірних каналів перевищує припустиму межу, алгоритм переходить до безпечного режиму. У такому режимі підтримується базовий рівень вентиляції, а користувачу або верхньому рівню системи передається повідомлення про зниження надійності вимірювань. Це дозволяє зберегти працездатність системи навіть у разі часткової відмови окремих датчиків.

Після формування керувальної команди вона передається на виконавчий рівень, однак алгоритм на цьому не завершується. Наступним етапом є контроль ефективності дії. Через певний інтервал часу система повторно оцінює параметри середовища й порівнює їх із попереднім станом. Якщо очікувана тенденція не підтверджується, стратегія коригується. Наприклад, якщо після переходу вентиляції в підвищений режим CO₂ не почав знижуватися, система може перейти до інтенсивного режиму або паралельно перевірити стан витяжного контуру. Якщо після активації очищувача рівень РМ зменшується надто повільно, тривалість або інтенсивність його роботи збільшується. За

рахунок цього алгоритм не є статичним, а працює як адаптивний цикл із постійною перевіркою власних рішень.

Ще однією функцією алгоритму є формування службових даних для журналу подій і подальшого аналізу. Для кожного циклу фіксуються не лише виміряні значення, а й тип визначеної ситуації, обраний режим керування, час спрацювання, тривалість активного стану виконавчих пристроїв та результат після завершення корекції. Це дає змогу надалі аналізувати роботу системи, виявляти повторювані сценарії, оцінювати ефективність окремих стратегій і уточнювати налаштування. У бакалаврській кваліфікаційній роботі така частина алгоритму є важливою ще й тому, що дозволяє перейти від опису системи до оцінки її практичної результативності.

2.5 Організація керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням у приміщенні

Організацію керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням у приміщенні розроблено як узгоджену функціональну частину кіберфізичної системи, у якій кожен виконавчий засіб працює не ізольовано, а в межах спільної логіки підтримання належного стану повітряного середовища. Такий підхід обрано з тієї причини, що в реальних умовах окреме застосування лише вентиляції, лише очищення або лише кондиціонування не забезпечує повноцінного розв'язання задачі. Вентиляція ефективно знижує концентрацію вуглекислого газу та сприяє оновленню повітряного об'єму, проте без урахування якості зовнішнього повітря вона не завжди покращує загальний стан середовища. Очищення повітря добре працює з аерозольними домішками, однак не усуває накопичення CO₂ і не стабілізує мікроклімат. Кондиціонування забезпечує температурний комфорт і частково впливає на вологість, але саме по собі не розв'язує проблему оновлення повітря. Через це керування побудовано так, щоб вентиляція, очищення та кондиціонування працювали як

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

взаємопов'язані канали впливу, що підпорядковуються єдиній логіці оцінювання стану приміщення.

Функціонально підсистему керування організовано навколо трьох основних напрямів впливу на середовище. Перший напрям пов'язано з регулюванням повітрообміну, тобто з керуванням припливною та витяжною вентиляцією. Другий напрям стосується локального або загального очищення повітря від дрібнодисперсних частинок і частини газових домішок. Третій напрям охоплює кондиціонування, тобто стабілізацію температури та, за наявності відповідних можливостей обладнання, корекцію вологості. Кожен із цих напрямів має власну фізичну роль, але в системі їх роботу підпорядковано спільній меті - підтриманню прийнятної якості повітря без різких коливань режимів роботи та без конфліктів між окремими виконавчими елементами.

Організація керування вентиляцією в цій системі базується на тому, що саме повітрообмін розглядається як головний засіб боротьби з накопиченням вуглекислого газу та загальним «застоєм» повітря в приміщенні. Якщо мультисенсорна підсистема фіксує поступове або стійке зростання CO₂, логіка керування розцінює це як ознаку недостатнього оновлення повітряного об'єму і формує команду на посилення вентиляції. При цьому робота вентиляційної частини не обмежується принципом простого вмикання або вимикання. Керування організовано ступенево, щоб інтенсивність повітрообміну змінювалася відповідно до реального рівня відхилення. За незначного перевищення показників активується помірний режим, який дозволяє скоригувати стан середовища без різкого втручання. Якщо перевищення стає більш суттєвим або зростання концентрації є швидким, вентиляція переходить у підсилений режим. У випадках, коли ситуація наближається до критичної або триває впродовж тривалого часу, система використовує інтенсивний режим припливу й витяжки.

Важливим принципом цієї організації керування стало недопущення конфліктних режимів між вентиляцією та кондиціонуванням. У реальному

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

приміщенні можлива ситуація, коли інтенсивна вентиляція подає зовнішнє повітря, яке суттєво відрізняється за температурою від внутрішнього середовища, у той час як кондиціонер намагається стабілізувати заданий режим. Якщо така взаємодія не контролюється, частина енергії витрачається непродуктивно, а саме повітряне середовище стає нестабільним. Через це алгоритм керування організовано так, щоб вентиляційний і кондиціонувальний контури не діяли всупереч один одному. Якщо активний приплив неминучий через перевищення CO₂, кондиціонер переходить у режим компенсації, але з урахуванням того, що пріоритет у цей момент належить безпосередньо оновленню повітря. Якщо ж ситуація дозволяє обмежитися локальною температурною корекцією без значного збільшення припливу, система використовує м'якший режим кондиціонування, не створюючи зайвого навантаження на повітрообмін.

Фактичне керування виконавчими пристроями, яке показано в структурній схемі на рисунку 2.6 організовано через комутаційний блок, пов'язаний із мікроконтролерним вузлом. Для вентиляційних і очищувальних елементів можуть використовуватися релейні або напівпровідникові ключі, які забезпечують надійне вмикання та вимикання навантаження. Якщо обладнання підтримує кілька швидкісних режимів, структура керування доповнюється каналами ступеневого або широтно-імпульсного регулювання. Це дає можливість реалізувати не двопозиційне, а більш плавне керування, коли система не лише визначає факт активації, а й задає інтенсивність роботи виконавчого пристрою. Для кондиціонера керування може бути реалізоване через інфрачервоний інтерфейс, логічні входи або релейне перемикання, залежно від обраної моделі і конкретної конфігурації системи. У будь-якому випадку структура організації керування залишається однаковою: рішення формується на цифровому рівні, після чого передається до виконавчого контуру та контролюється за результатом.

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.6 – Структурна схема керування виконавчими пристроями системи.

У випадку кількох сенсорних точок керування організовано з урахуванням просторової неоднорідності приміщення. Якщо одна зона має гірші показники, ніж інші, система не повинна орієнтуватися виключно на усереднене значення всього об'єму повітря. Саме тому в логіці керування враховано як загальний інтегральний стан приміщення, так і наявність локальних проблемних ділянок. Якщо в певній частині простору зафіксовано локальне накопичення CO₂ або пилу, система може підсилити загальний режим вентиляції й одночасно змінити розподіл потоків так, щоб швидше вплинути саме на цю зону.

Певну роль в організації керування відіграє також взаємодія з користувачем. Незважаючи на автоматизований характер системи, у ній передбачено відображення поточного режиму роботи кожної підсистеми, щоб стан вентиляції, очищення й кондиціонування був зрозумілим та контрольованим. Користувач має змогу бачити, який саме параметр став причиною активації конкретного виконавчого каналу, який режим обрано,

скільки часу він працює і чи досягнуто очікуваного ефекту. За потреби допускається перехід у ручний режим, проте загальна логіка побудована так, щоб основне функціонування залишалось автоматичним.

Окремо слід підкреслити, що керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням у цій роботі організовано не як набір трьох незалежних автоматів, а як єдина система впливу на повітряне середовище. Саме ця узгодженість і є головною відмінністю запропонованої структури від звичайних побутових рішень, де кондиціонер підтримує температуру, очищувач працює за власним локальним сценарієм, а вентиляція або взагалі не автоматизована, або підпорядковується окремому простому правилу.

Організацію керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням у приміщенні побудовано як багаторівневий узгоджений контур, у якому кожен виконавчий засіб має власну сферу відповідальності, але працює в межах спільної логіки. Вентиляція відповідає за оновлення повітря та зниження CO₂, очищення - за боротьбу з аерозольними та частково хімічними домішками, кондиціонування - за стабілізацію температурного режиму та комфортного мікроклімату.

У другому розділі розроблено загальну архітектуру кіберфізичної системи керування якістю повітря в приміщеннях, обґрунтовано вибір апаратних і програмних засобів її реалізації, сформовано структуру сенсорної підсистеми та описано принцип організації мультисенсорних вимірювань. Також розроблено алгоритм обробки даних і прийняття керувальних рішень, визначено логіку взаємодії між вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням та подано підхід до організації взаємодії користувача із системою через засоби візуалізації. У підсумку сформовано цілісну технічну основу для практичної реалізації розробленої системи та подальшої перевірки її функціонування в різних режимах роботи.

3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПЕРЕВІРКА РОБОТИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ПОВІТРЯ

3.1 Реалізація апаратної частини системи

Практичну реалізацію системи розпочато з побудови її апаратної частини, оскільки саме вона формує фізичну основу для подальшого збору даних, передавання інформації, виконання алгоритмів обробки та керування станом повітряного середовища. Апаратну частину реалізовано як цілісний технічний вузол, у якому вимірювальні модулі, центральний контролер, блок живлення та засоби взаємодії з виконавчими пристроями поєднано в єдиній структурі. Такий підхід дозволив не розглядати окремі компоненти ізольовано, а сформувати завершений комплекс, придатний до реального функціонування в режимі моніторингу та автоматизованого впливу на параметри повітря в приміщенні.

Як центральний елемент апаратної частини використано мікроконтролерний модуль ESP32. Його вибір обумовлено тим, що дана платформа поєднує достатню кількість цифрових інтерфейсів, підтримку бездротового зв'язку та можливість одночасного виконання кількох функцій, пов'язаних із зчитуванням сенсорних даних, їх первинною обробкою та формуванням керувальних сигналів. У межах реалізованої системи саме ESP32 виконує роль координаційного ядра, до якого під'єднано всі основні вимірювальні канали та комутаційні елементи. Через цей модуль проходить основний інформаційний потік, що надалі використовується для оцінювання стану середовища та активації виконавчих пристроїв.

Для побудови мультисенсорного вимірювального вузла використано три основні сенсори, кожен із яких відповідає за окрему групу параметрів. Контроль концентрації вуглекислого газу, температури та вологості реалізовано на основі датчика SCD41. Його застосування дозволило об'єднати в одному модулі кілька важливих для системи каналів вимірювання, що спростило загальну схему підключення та зробило конструкцію компактнішою. Для фіксації летких

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

органічних сполук і загального рівня газових домішок використано сенсор SGP41. Його інтеграція дала змогу розширити інформативність системи та перейти від контролю лише CO₂ до ширшого уявлення про хімічний стан повітряного середовища. Для оцінювання аерозольного забруднення застосовано сенсор SPS30, який забезпечує визначення масової концентрації пилових частинок кількох фракцій. За рахунок такої конфігурації апаратна частина отримала можливість контролювати не один окремий показник, а формувати багатоканальний опис стану повітря в приміщенні.

Структуру апаратної реалізації системи наведено на рисунку 3.1. На цій схемі показано взаємозв'язок між центральним контролером, сенсорними модулями, блоком живлення, каналом бездротового передавання даних і виконавчими пристроями, що задіяні для зміни стану повітряного середовища.

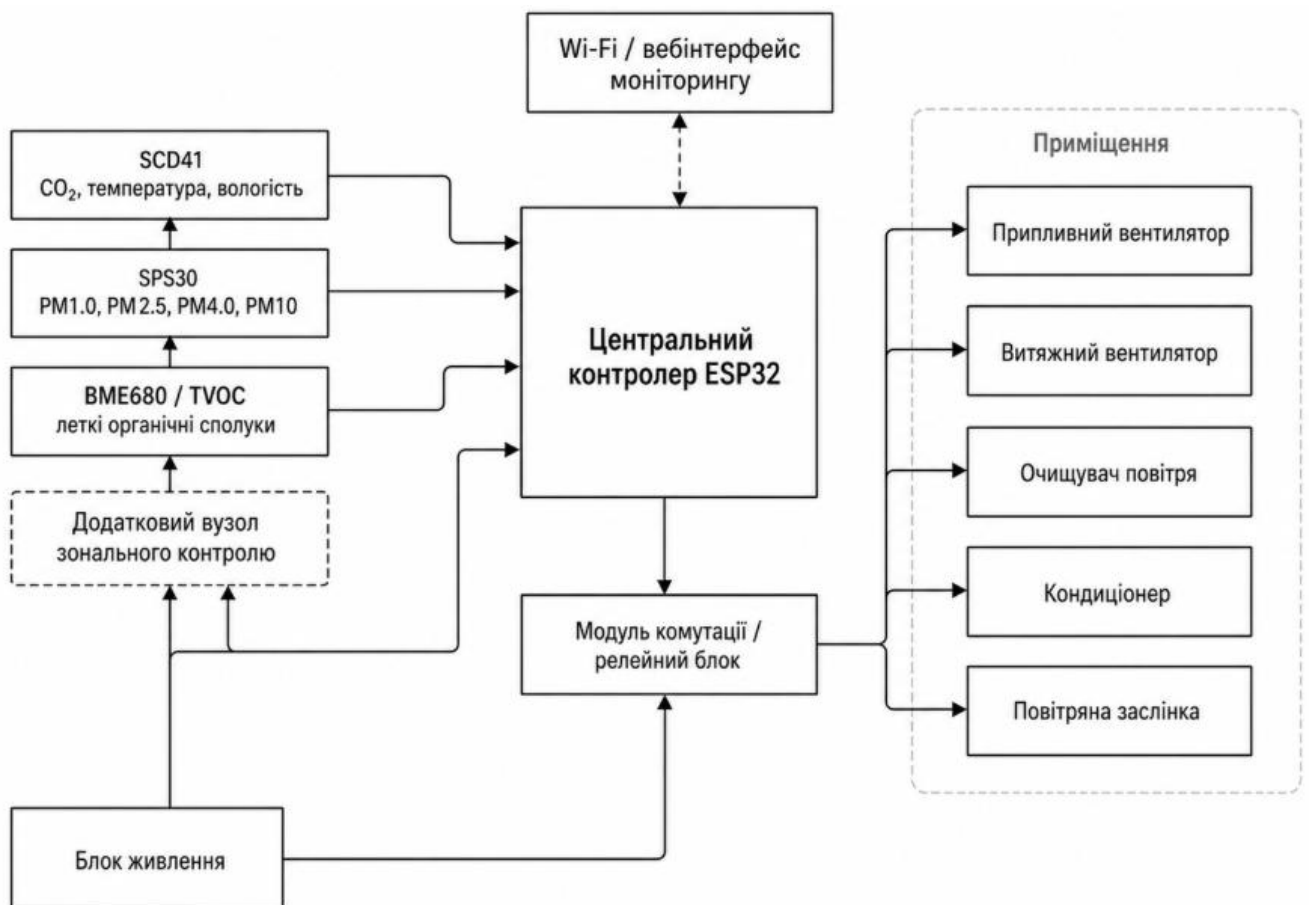


Рисунок 3.1 – Структура апаратної реалізації системи

Підключення сенсорів до центрального контролера організовано з урахуванням їхніх технічних особливостей. Датчики SCD41 і SGP41 інтегровано через інтерфейс I2C, що дало змогу реалізувати компактну цифрову шину для кількох пристроїв із мінімальною кількістю з'єднань. Пиловий сенсор SPS30 підключено через інтерфейс UART, оскільки такий спосіб забезпечує стабільний обмін даними саме для цього типу модуля. При побудові електричних з'єднань особливу увагу зосереджено на спільному потенціалі землі, стабільності живлення та мінімізації впливу можливих перешкод, оскільки некоректна організація живлення або комунікаційних ліній могла б призвести до спотворення показників або періодичної втрати зв'язку з окремими сенсорами.

Живлення апаратної частини реалізовано через окремий блок стабілізації напруги 5 В і 3.3 В. Необхідність такого рішення пояснюється тим, що окремі елементи системи працюють на різних рівнях живлення, а стабільність напруги безпосередньо впливає як на коректність вимірювань, так і на надійність роботи комутаційної частини. Центральний контролер та сенсорні модулі підключено до відповідних стабілізованих виходів, що дозволило уникнути коливань напруги та забезпечити більш передбачуваний режим функціонування всієї системи. Така організація живлення також спростила загальне компонування апаратної частини та зробила її більш придатною до лабораторної перевірки.

Для реалізації фізичного впливу на повітряне середовище в апаратну структуру включено модуль керування навантаженням, через який організовано комутацію виконавчих пристроїв. У системі передбачено окремі канали впливу на припливну вентиляцію, витяжну вентиляцію, очищувач повітря та кондиціонер. Подібний поділ дозволив реалізувати не спрощений спосіб реакції, за якого при будь-якому відхиленні активується все доступне обладнання, а більш гнучкий варіант, коли система отримує можливість окремо впливати на різні аспекти повітряного середовища. Якщо основною проблемою стає накопичення CO₂, пріоритет переходить до вентиляції. Якщо фіксується підвищене пилове навантаження, активується очищення повітря. Якщо

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порушується температурний комфорт, система передає сигнал до контуру кондиціонування. Унаслідок цього апаратна частина від початку орієнтується на реалізацію багатоканального керування, а не лише на просте релейне вмикання одного навантаження.

Окремої уваги під час реалізації апаратної частини потребувало просторове розміщення компонентів. Сенсорні модулі не можна було розташовувати надто близько до джерел тепла, силових елементів або ліній живлення, оскільки це могло б спотворити результати вимірювання температури, вологості чи газових параметрів. Саме тому під час складання макета сенсори винесено на достатню відстань від мікроконтролерного модуля та комутаційної частини, а їхнє розташування організовано так, щоб забезпечити контакт із повітрям приміщення, а не із локальним середовищем усередині електронного вузла. Для пилового сенсора особливо важливим виявився вільний доступ до повітряного потоку, тому його положення обрано так, щоб отвори забору повітря не перекривалися провідниками чи корпусними елементами.

Передавання даних на верхній рівень системи реалізовано за рахунок вбудованих мережевих можливостей ESP32. Завдяки цьому апаратна частина не потребує зовнішнього Wi-Fi-модуля або додаткового мережевого контролера. Отримані сенсорні значення можуть передаватися на серверну частину системи безпосередньо після первинної обробки. Така побудова зменшує кількість компонентів, спрощує конструкцію та підвищує її загальну надійність. Водночас це робить апаратну реалізацію більш зручною для експериментального використання, оскільки система одразу може працювати не лише як локальний вимірювальний вузол, а і як повноцінний елемент мережевої кіберфізичної структури.

З практичної точки зору реалізовану апаратну частину доцільно розглядати як експериментальний стенд, у якому відтворено всі головні функціональні елементи майбутньої системи. На цьому стенді реалізовано повний апаратний ланцюг: зчитування параметрів повітря, передавання їх до центрального

контролера, формування вихідних сигналів і фізичне керування виконавчими пристроями. Саме це дає підстави розглядати апаратну частину не як умовний макет, а як працездатну технічну основу, на якій уже може бути реалізовано повний цикл алгоритмічного керування.

3.2 Програмна реалізація збору, обробки даних і керування виконавчими пристроями

програмну частину системи реалізовано як зв'язаний набір модулів, що забезпечують послідовне виконання кількох основних задач: зчитування даних із сенсорів, первинну перевірку та підготовку вимірних значень, формування узгодженого набору параметрів повітряного середовища, передавання цих даних на верхній рівень системи та створення керувальних команд для виконавчих пристроїв. Така побудова програмної логіки дала змогу уникнути надмірного ускладнення прошивки й водночас забезпечити повноцінну роботу всієї кіберфізичної системи в реальному режимі. Основну частину програмної реалізації виконано для мікроконтролерного модуля ESP32, оскільки саме він виступає центральною ланкою, через яку проходять і вхідні дані від сенсорів, і вихідні команди на вентиляцію, очищення та кондиціонування.

Програмну структуру сформовано модульно. Це означає, що логіку роботи не зведено до одного великого безперервного фрагмента коду, а поділено на кілька функціональних блоків. Один блок відповідає за ініціалізацію апаратних ресурсів, другий - за зчитування сенсорів, третій - за первинну обробку й нормалізацію значень, четвертий - за обмін даними через мережу, п'ятий - за формування керувальних рішень, а шостий - за передачу цих рішень на виконавчий рівень. Саме такий підхід виявився найбільш доцільним, оскільки він спрощує налагодження, дозволяє перевіряти кожну логічну частину окремо й полегшує подальше розширення функціональності системи.

На початковому етапі роботи прошивки виконано ініціалізацію всіх основних компонентів. У цьому режимі контролер встановлює параметри цифрових інтерфейсів, активує шину I2C для датчиків SCD41 і SGP41, налаштовує UART для сенсора SPS30, ініціалізує виводи керування виконавчими пристроями та встановлює з'єднання з бездротовою мережею. Одночасно формуються початкові змінні, у яких зберігаються поточні значення параметрів повітря, службові ознаки стану системи та проміжні результати обчислень.

Узагальнену структуру програмної реалізації, де показано взаємодію модуля зчитування, обробки, мережевого обміну та керування виконавчими пристроями, наведено на рисунку 3.2.

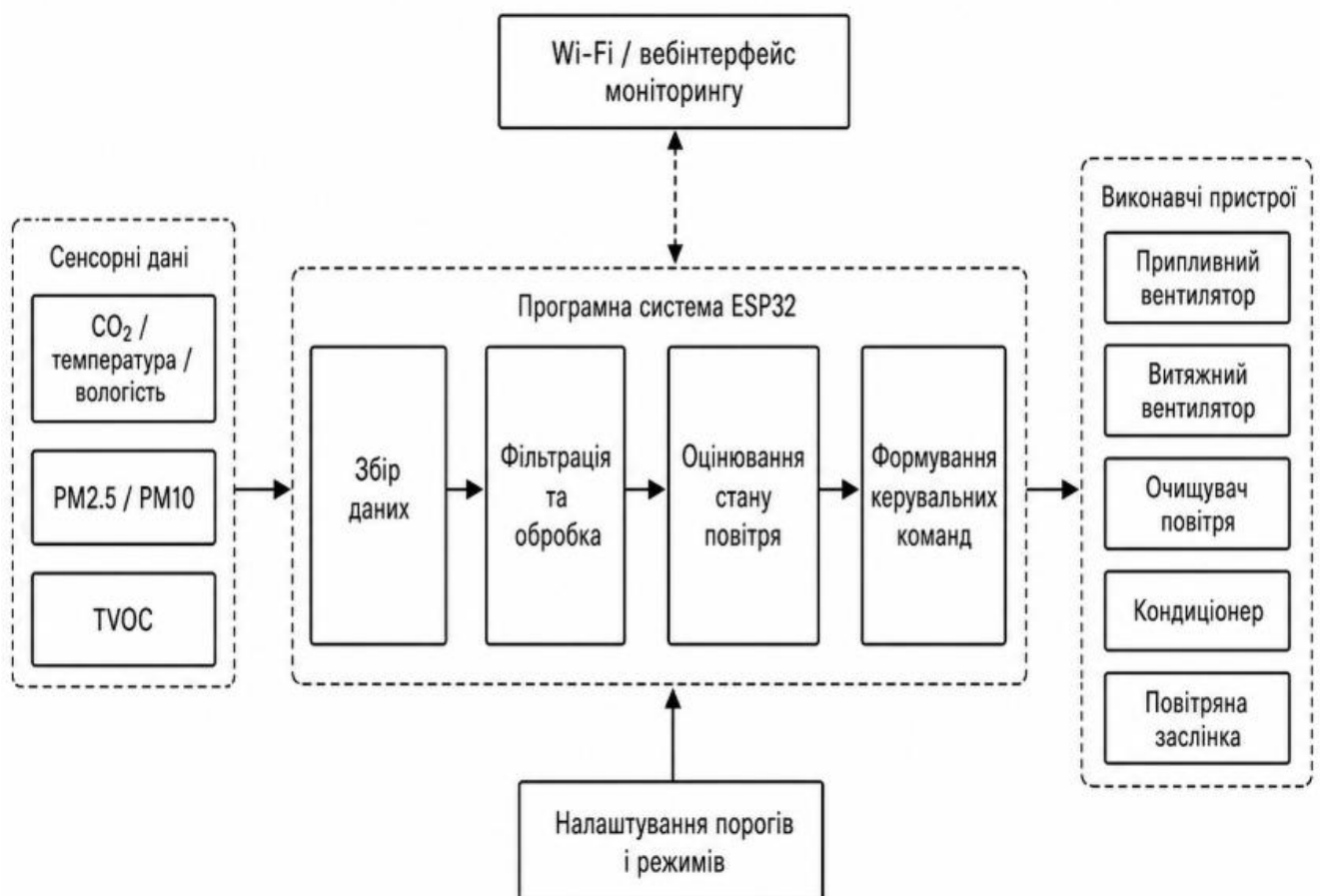


Рисунок 3.2 – Структура програмної реалізації збору, обробки даних і керування виконавчими пристроями

Цикл роботи програмної частини організовано так, щоб кожен прохід через основний цикл формував актуальний цифровий опис стану приміщення. Спочатку виконується зчитування показників із сенсорів. Для зменшення навантаження на контролер і уникнення зайвих повторів опитування для різних сенсорів використано узгоджений інтервал оновлення. На практиці це означає, що зчитування не виконується безперервно в максимально швидкому темпі, а проводиться з розумною періодичністю, достатньою для контролю реальних змін середовища. Такий підхід позитивно впливає і на стабільність вимірювань, і на загальну передбачуваність роботи системи.

Після отримання даних виконується перевірка їх коректності. На цьому етапі контролюється, чи не вийшли значення за фізично допустимі межі, чи не з'явилися аномальні стрибки, які не відповідають реальному перебігу процесів, і чи не втрачено зв'язок із певним вимірювальним каналом. Якщо окремих параметр виявляється підозрілим, він не використовується одразу в алгоритмі керування, а або повторно перевіряється в наступному циклі, або тимчасово замінюється останнім коректним значенням. За рахунок цього програмна частина не допускає різких помилкових реакцій виконавчих пристроїв через одиничний збій сенсора або короткочасну нестабільність обміну.

Щоб зробити текст підрозділу більш прикладним, нижче наведено короткий фрагмент програмної логіки зчитування й підготовки даних. Тут показано сам принцип послідовного отримання параметрів із сенсорів і збереження їх у змінних, які надалі використовуються для аналізу.

```
co2Value = scd41.getCO2();  
tempValue = scd41.getTemperature();  
humValue = scd41.getHumidity();  
tvocValue = sgp41.getVOC();  
pm25Value = sps30.getPM2_5();
```

Після зчитування виконується первинна обробка. На цьому етапі реалізовано згладжування показників, оскільки сирі значення не завжди відображають стабільний стан середовища. Для CO₂, TVOC і PM використано м'яке усереднення кількох останніх значень, що дозволяє зменшити вплив

випадкових коливань, але не приховує реальну тенденцію до зростання або зменшення параметра. Для температури та вологості акцент зроблено на плавності оновлення, оскільки ці величини змінюються повільніше і не потребують надто агресивної фільтрації. У результаті кожен цикл обробки завершується формуванням набору стабілізованих значень, які вже придатні для подальшого аналізу.

У програмі передбачено, що кожен параметр має власний діапазон допустимих значень, а також умови активації того чи іншого виконавчого контуру. Водночас рішення не формується лише за одним виміром. Спочатку враховується тип відхилення, після чого визначається, який саме канал впливу є пріоритетним.

У практичній реалізації базову керувальну логіку побудовано як набір зрозумілих умов, які легко контролювати й налагоджувати. За перевищення концентрації CO₂ активується вентиляційний контур. За підвищення пилового навантаження запускається очищення повітря. За відхилення температури вмикається кондиціонування. Якщо одночасно перевищується кілька показників, програма дозволяє активувати більше одного виконавчого каналу, але з урахуванням того, щоб їхня робота не конфліктувала між собою.

Скорочений приклад такого фрагмента наведено нижче:

```
if (co2Value > co2Limit) {  
    digitalWrite(ventRelay, HIGH);  
} else {  
    digitalWrite(ventRelay, LOW);  
}  
if (pm25Value > pmLimit) {  
    digitalWrite(purifierRelay, HIGH);  
}
```

Хоча наведені фрагменти виглядають дуже простими, у повній реалізації до них додано часові затримки, гістерезис та перевірку стійкості перевищення, щоб система не перемикала обладнання надто часто. Це особливо важливо для виконавчих пристроїв, які не повинні реагувати на одиничні короткі сплески. Тому фактична логіка роботи побудована так, щоб рішення підтверджувалося кількома послідовними циклами вимірювання. Лише після цього команда

вважається достатньо обґрунтованою для передачі на виконавчий рівень. Така програмна організація підвищує стабільність усієї системи та робить її поведінку більш передбачуваною.

Окрему увагу під час програмної реалізації приділено узгодженню роботи виконавчих пристроїв. У простому варіанті можна було б реалізувати повністю незалежні канали для вентиляції, очищення та кондиціонування. Однак на практиці така логіка часто призводить до суперечливих дій. Наприклад, вентиляція може активно змінювати температуру приміщення, а кондиціонер - намагатися цю зміну компенсувати без реальної потреби. Щоб уникнути подібних ситуацій, у програмній частині передбачено перевірку вже активних режимів перед запуском нового контуру. За рахунок цього рішення формується не як набір окремих команд, а як узгоджений керувальний стан системи.

Також у програмі реалізовано формування службових повідомлень про стан системи. Це стосується не лише основних параметрів повітря, а й діагностичних ознак, наприклад успішності підключення до мережі, наявності зв'язку з MQTT-брокером, коректності відповіді сенсорів і поточного режиму виконавчих пристроїв. Така інформація є дуже важливою під час налагодження, оскільки дозволяє швидко визначити, чи пов'язана проблема з реальним станом повітряного середовища, чи збої виникли в самій технічній системі. У результаті програмна частина виконує не тільки функцію робочого алгоритму, а й функцію самоконтролю.

Ще одним важливим моментом стало забезпечення циклічної роботи прошивки без тривалих блокувань. Це означає, що у програмній реалізації уникнуто надмірно довгих затримок, які могли б уповільнювати опитування сенсорів або реакцію на зміну параметрів середовища. Натомість логіку організовано через короткі регулярні цикли, де кожен модуль виконує свою частину роботи і передає результат далі. За рахунок цього система підтримує стійку роботу навіть при одночасному виконанні кількох задач: зчитування

сенсорів, локальної обробки, мережевого передавання та керування релейними виходами.

У цій програмній реалізації важливо й те, що вона не є перевантаженою зайвими функціями. Основний акцент зосереджено саме на тих можливостях, які потрібні для коректної роботи бакалаврської системи: регулярне зчитування параметрів, їх обробка, мережеве передавання, базова класифікація стану повітря і формування керувальних команд. Саме така стримана структура виявилася найбільш доцільною, оскільки вона дозволила отримати працездатну й зрозумілу програмну основу без зайвого ускладнення архітектури.

У підсумку програмну реалізацію збору, обробки даних і керування виконавчими пристроями побудовано як модульну та узгоджену частину всієї кіберфізичної системи. У ній реалізовано повний цикл роботи з даними: від зчитування показників із сенсорів і первинної фільтрації до публікації телеметрії та активації виконавчих контурів. За рахунок цього програмна частина стала не допоміжним додатком до апаратної реалізації, а повноцінним механізмом, який забезпечує практичне функціонування всієї системи керування якістю повітря в приміщенні.

3.3 Реалізація серверної частини та засобів візуалізації параметрів повітряного середовища

Серверну частину системи реалізовано як окремий функціональний рівень, призначений для приймання телеметрії від мікроконтролерного вузла, збереження часових рядів, формування журналу змін стану повітряного середовища та відображення поточних і архівних показників у зручному для аналізу вигляді. Якщо апаратна частина забезпечує фізичне вимірювання параметрів і первинну реакцію на їх зміну, то серверний рівень формує вже більш повну інформаційну картину, у якій окремі числові значення перетворюються на впорядковану історію спостережень і подій. Саме за рахунок цього система

перестає бути лише локальним вимірювальним вузлом і набуває рис повноцінного засобу моніторингу та керування, у якому дані не просто короткочасно обробляються, а накопичуються, аналізуються та використовуються для подальшого оцінювання ефективності роботи.

Загальну логіку побудови серверної частини організовано за принципом послідовного проходження інформації між кількома програмними компонентами. На першому етапі центральний контролер ESP32 формує телеметричні повідомлення, які містять значення CO₂, PM, TVOC, температури, вологості, а також службові ознаки стану системи. Далі ці дані передаються через MQTT до серверного середовища, де приймаються брокером повідомлень. Після цього серверна частина виконує маршрутизацію потоку даних до модуля збереження, а вже на завершальному етапі накопичена інформація використовується для побудови інформаційної панелі, графіків, індикаторів та журналу подій. Така структура виявилася зручною з технічної точки зору, оскільки кожен рівень виконує окрему функцію, але вся система в цілому працює як один узгоджений програмний контур.

Для організації передавання телеметрії на серверний рівень використано протокол MQTT. Такий вибір пояснюється тим, що він добре підходить для IoT-систем, у яких дані передаються регулярно, невеликими пакетами та з мінімальним мережевим навантаженням. У практичній реалізації ESP32 публікує повідомлення у визначені теми, а серверний брокер приймає їх і передає далі іншим програмним модулям. Перевага такого підходу полягає в тому, що мікроконтролерний вузол не потребує складної серверної логіки на власному рівні. Йому достатньо сформувані структурований пакет із поточними значеннями і відправити його в мережу. Уся подальша робота зі збереженням, накопиченням і візуалізацією виконується вже на сервері, що суттєво спрощує прошивку й робить архітектуру системи більш гнучкою.

Саме така прив'язка до часової шкали робить серверну частину справді корисною, а не формальною складовою системи.

Узагальнену структуру серверної частини та засобів візуалізації параметрів повітряного середовища подано на рисунку 3.3. На схемі показано взаємодію мікроконтролерного вузла, MQTT-брокера, бази даних, інтерфейсу візуалізації та користувача.

Для відображення накопичених даних і поточного стану системи використано Grafana, оскільки цей інструмент добре пристосований до роботи з часовими рядами, підтримує побудову інтерактивних графіків і дозволяє швидко створювати інформаційні панелі з кількома типами візуальних елементів. У межах бакалаврської кваліфікаційної роботи такий вибір виявився вдалим через поєднання простоти налаштування та достатньо широких можливостей. За рахунок прямої інтеграції з InfluxDB візуалізаційний рівень отримує доступ до всіх накопичених вимірювань без необхідності створювати окремий спеціалізований вебзастосунок із нуля. Це дозволило зосередити увагу не на побудові складного фронтенда, а на змістовному представленні параметрів повітряного середовища та режимів роботи системи.

У структурі панелі моніторингу відображення інформації організовано на кількох рівнях. Перший рівень утворюють поточні показники CO₂, PM2.5, PM10, TVOC, температури та вологості, які подаються у вигляді окремих індикаторів або числових блоків. Такий спосіб подання дає змогу швидко оцінити стан середовища без необхідності аналізувати графіки. Другий рівень утворюють часові діаграми, на яких показано зміну кожного параметра впродовж вибраного інтервалу часу. Це дозволяє побачити динаміку, а не лише окремий поточний зріз. Третій рівень складають дані про стан виконавчих пристроїв, тобто інформація про те, чи активна вентиляція, чи працює очищувач повітря, чи ввімкнено кондиціонування, а також у якому саме режимі функціонує система в поточний момент.

Побудову графічної панелі організовано так, щоб вона була зрозумілою не лише з технічної точки зору, а й у контексті повсякденного використання. Саме тому інтерфейс не перевантажено великою кількістю службових деталей на

головному екрані. Основна увага зосереджується на тих параметрах, які найшвидше дозволяють оцінити поточну ситуацію в приміщенні. Якщо, наприклад, концентрація CO₂ починає зростати, це одразу стає помітним як на індикаторі поточного значення, так і на часовому графіку. Якщо підвищується РМ, це також відображається окремим каналом. Якщо змінюється температура або вологість, графіки й числові поля дозволяють простежити не лише сам факт зміни, а й її темп. Унаслідок цього візуалізація працює не як формальне доповнення, а як реальний засіб розуміння поведінки системи.

Окрему увагу приділено відображенню подій і станів керування. Для практичної експлуатації недостатньо просто бачити, що параметр перевищив певну межу. Не менш важливо розуміти, як саме система на це відреагувала. Тому в серверній частині організовано фіксацію та подання подій, пов'язаних із перемиканням режимів виконавчих пристроїв. Якщо активується припливна або витяжна вентиляція, це відображається в журналі станів. Якщо запускається очищувач повітря або кондиціонер, відповідний запис також зберігається. Такий підхід дозволяє зіставляти зміни параметрів середовища з фактичними реакціями системи. За рахунок цього стає можливим не лише контролювати поточний стан, а й аналізувати ефективність прийнятих рішень.

Важливою частиною серверної реалізації стало забезпечення безперервності накопичення даних. Оскільки система працює циклічно, а вимірювання надходять регулярно, серверна частина повинна була стабільно приймати повідомлення та коректно записувати їх у базу без втрати часової послідовності. Саме тому логіку приймання і запису організовано таким чином, щоб навіть у разі тимчасових затримок окремі записи не порушували загальної структури часових рядів. Для аналізу роботи системи це має велике значення, оскільки пропуски або хаотичне зміщення часових міток значно ускладнили б інтерпретацію результатів.

З технічного погляду серверна частина реалізує не лише накопичення телеметрії, а й роль проміжного аналітичного середовища. Саме тут стає

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

можливим оцінити поведінку системи за довший період часу, простежити повторювані сценарії, виявити години найбільшого погіршення якості повітря або зіставити різні режими роботи вентиляції та очищення. Наприклад, на рівні миттєвого спостереження важко зробити висновок, чи достатньо ефективною є поточна інтенсивність вентиляції. Проте якщо переглянути накопичений графік за кілька годин або діб, стає видно, чи швидко після активації виконавчих пристроїв стабілізується середовище, наскільки довго зберігається підвищений рівень CO₂ або як часто повторюються стрибки пилового навантаження. Саме ця аналітична глибина і є одним із ключових результатів реалізації серверної частини.

У межах інформаційної панелі також доцільно відображати службові показники, які характеризують роботу самої системи. До них належать статус мережевого з'єднання, факт оновлення даних, коректність отримання пакетів від ESP32, а також поточний стан каналів керування. Така інформація не завжди є головною для кінцевого користувача, але вона суттєво підвищує контрольованість системи під час налагодження, випробувань і подальшого використання. Якщо певний параметр перестає оновлюватися або один із каналів починає поводитися нестабільно, це можна виявити не через непрямі ознаки, а безпосередньо на рівні інформаційної панелі.

Організація взаємодії з користувачем через веборієнтовану панель також дала змогу реалізувати більш зручне сприйняття інформації порівняно з локальним виведенням лише на дисплей мікроконтролерного вузла. Локальні елементи відображення мають обмеження і за розміром, і за кількістю одночасно доступних параметрів, і за гнучкістю побудови графіків. Натомість вебінтерфейс дозволяє відображати цілий набір показників, масштабувати часові інтервали, швидко переходити між різними вкладками та бачити зв'язок між параметрами й подіями керування. Саме це зробило реалізований варіант серверної частини більш придатним не лише для демонстраційного використання, а й для реального контролю за якістю повітряного середовища.

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Практична реалізація серверного рівня також підтвердила доцільність поділу системи на локальну та верхню частини. Локальний рівень на базі ESP32 забезпечує швидку реакцію на зміни стану повітря та формує первинне керування. Верхній серверний рівень, у свою чергу, накопичує інформацію, забезпечує зручну візуалізацію та розширює аналітичні можливості системи. Така дворівнева побудова виявилася збалансованою: з одного боку, не перевантажується мікроконтролер, а з іншого - не втрачається можливість детального моніторингу та оцінювання роботи всієї системи в часовому розрізі.

У підсумку серверну частину та засоби візуалізації параметрів повітряного середовища реалізовано як повноцінний інформаційний рівень кіберфізичної системи. Через використання MQTT, InfluxDB і Grafana забезпечено приймання телеметрії, її впорядковане збереження, побудову графіків, відображення поточних значень параметрів і станів виконавчих пристроїв, а також формування журналу подій. Така реалізація дозволила перетворити набір окремих сенсорних даних на наочну й зручну для аналізу інформаційну модель стану приміщення. Саме це створює основу для подальшої експериментальної перевірки системи та для оцінювання її ефективності в різних режимах функціонування.

3.4 Аналіз результатів роботи системи в різних режимах функціонування

Аналіз результатів роботи розробленої системи виконано на основі спостереження за її поведінкою в кількох характерних режимах функціонування. Основну увагу зосереджено не лише на факті відображення сенсорних параметрів, а й на тому, як саме система інтерпретує поточний стан повітряного середовища, які виконавчі контури активує та наскільки узгоджено працюють вентиляція, очищення й кондиціонування в різних ситуаціях. Такий підхід дозволив оцінити систему не як простий вимірювальний стенд, а як завершену кіберфізичну структуру, у якій сенсорний, алгоритмічний і виконавчий рівні взаємодіють у межах одного безперервного циклу.

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Під час аналізу особливу увагу приділено двом практичним сценаріям. Перший сценарій відображає режим, у якому домінуючим фактором погіршення стану повітряного середовища виступає концентрація вуглекислого газу. Другий сценарій демонструє ситуацію, коли система фіксує переважання пилового навантаження та відповідно змінює логіку реагування. Саме ці два режими є найбільш показовими, оскільки вони відображають різні за фізичною природою типи відхилень і дають можливість простежити, чи дійсно реалізована система здатна диференційовано реагувати на зміну параметрів, а не працює за однаковим шаблоном у будь-якій ситуації.

Наведений режим є показовим з тієї причини, що система не запускає всі доступні засоби впливу одночасно, а використовує саме той контур, який найбільше відповідає характеру виявленої проблеми. Це підтверджує правильність реалізованої логіки прийняття рішень. За підвищення CO₂ пріоритет надано вентиляції, оскільки саме вона повинна забезпечити оновлення повітряного об'єму. Очищувач повітря при цьому залишається в допоміжному режимі, що також виглядає технічно виправдано, адже в даному випадку пилове навантаження не є головною причиною погіршення інтегрального стану середовища. Кондиціонування не активується, оскільки температура залишається в межах прийняттого рівня. Отже, вже на цьому прикладі видно, що система не реагує надмірно, а виконує саме адресне коригування середовища.

У журналі реакцій видно записи про корекцію режиму, а в блоці логіки стенда відображено послідовність етапів: синхронізацію каналів, нормалізацію параметрів, формування інтегральної оцінки та вибір режиму вентиляції, очищення і клімату.

Головна сторінка функціонування подано на рисунку 3.3. На цьому екрані видно, що система перебуває в стані спостереження, а серед вимірних параметрів найбільш вираженим фактором виступає саме CO₂. Зафіксоване значення 1145 ppm перевищує комфортний рівень для звичайного режиму перебування в приміщенні, тоді як інші параметри не мають настільки різкого

					КВРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

числових значень, а й логічне пояснення того, який саме фактор є домінуючим і чому система обрала відповідний спосіб впливу. Це особливо важливо для бакалаврської реалізації, оскільки показує, що програмна і серверна частини системи розроблені не лише як технічний засіб збору телеметрії, а як інформаційно зрозумілий інструмент моніторингу та керування. Така подача результатів підвищує практичну цінність системи, оскільки користувач отримує не “чорну скриньку”, а прозору логіку роботи.

З аналізу наведених режимів також простежується, що система придатна до роботи в умовах змінного характеру повітряного середовища. У реальному приміщенні неможливо заздалегідь гарантувати, що основною проблемою завжди буде один і той самий параметр. У різні моменти часу переважати може або накопичення CO₂ через присутність людей, або пилове навантаження, або мікрокліматичне відхилення. Саме тому важливо, що реалізована система не є жорстко спеціалізованою лише під один сценарій, а здатна перебудовувати режим керування відповідно до того, який фактор виявляється провідним у поточний момент.

Окремо варто підкреслити, що результати, наведені на рисунках 3.4 і 3.5, підтверджують правильність побудови серверного рівня та засобів візуалізації. Дані подаються не у вигляді розрізнених чисел, а у формі цілісного інформаційного простору, де поєднано поточні показники, часові графіки, журнал подій та стан виконавчих пристроїв. За рахунок цього аналіз роботи системи стає не лише можливим, а й достатньо наочним. Саме така організація інтерфейсу дозволяє швидко побачити, як змінюється стан середовища, коли спрацьовують виконавчі контури та які наслідки має їх активація.

У підсумку аналіз результатів роботи системи в різних режимах функціонування показав, що розроблена кіберфізична система здатна коректно розпізнавати різні типи погіршення якості повітря, змінювати пріоритет керування між вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням, а також наочно відобразити власну логіку прийняття рішень через серверний рівень та

інформаційну панель. Це свідчить про працездатність побудованої архітектури та підтверджує, що реалізована система може використовуватися не лише як демонстраційний макет, а як технічно змістовна основа для подальшого розвитку й практичного впровадження.

Оцінку ефективності розробленої кіберфізичної системи доцільно виконувати не лише з позиції самого факту працездатності, а й з урахуванням того, наскільки узгоджено вона реагує на зміну повітряного середовища, наскільки швидко формує керувальний вплив, чи забезпечує помітну зміну контрольованих параметрів і чи залишається придатною до використання в реальних умовах приміщення. Саме такий підхід дозволяє розглядати систему не як суто демонстраційний стенд, а як технічне рішення, здатне виконувати практичну функцію контролю та корекції якості повітря на основі мультисенсорних вимірювань.

Саме тому розроблену систему доцільно розглядати як базову технічну платформу, яка вже є працездатною в поточній конфігурації, але має резерв для подальшої адаптації під складніші умови.

Окрему роль у практичному застосуванні відіграє серверна частина та засоби візуалізації. Їхня наявність підвищує корисність системи не лише для автоматичного керування, а й для аналізу накопичених даних. Завдяки графікам і журналам подій можна простежувати повторювані сценарії погіршення якості повітря, оцінювати, в які періоди система працює найінтенсивніше, і робити висновки про характер використання приміщення. Це означає, що розроблене рішення придатне не лише для миттєвого реагування, а й для більш глибокого спостереження за середовищем у часовому розрізі.

Для систематизації результатів оцінювання доцільно також подати узагальнювальну таблицю, у якій стисло відображено основні критерії ефективності та відповідні прояви під час практичної роботи системи. Це дозволить зробити висновки більш структурованими та наочними.

У таблиці 3.1 доцільно відображено такі критерії, як швидкість реакції,

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

адекватність вибору виконавчого контуру, узгодженість роботи вентиляції, очищення та кондиціонування, стабільність передавання даних, наочність візуалізації, масштабованість і вимоги до практичної експлуатації. Такий матеріал добре підсилює текстовий аналіз, оскільки переводить частину висновків у компактну й зручну для сприйняття форму.

Таблиця 3.1 – Результати функціонування системи в різних режимах

Режим роботи	Домінуючий фактор	Активовані виконавчі пристрої	Основний ефект
Режим 1	високий CO ₂	припливна вентиляція, витяжна вентиляція	зниження концентрації CO ₂
Режим 2	високий РМ	очишувач повітря, вентиляція	зниження пилового навантаження
Режим 3	порушення температури	кондиціонер	стабілізація температури
Режим 4	комбіноване відхилення	вентиляція, очищення, кондиціонування	комплексна нормалізація параметрів

Система коректно поєднує мультисенсорний контроль, локальне прийняття рішень, серверне збереження телеметрії та наочну візуалізацію результатів. Її сильними сторонами є адресність реагування, модульність побудови, зрозуміла логіка взаємодії між підсистемами та можливість подальшого масштабування. Водночас практичне використання вимагає уважного ставлення до розміщення сенсорів, стабільності живлення, технічного обслуговування вимірювальних елементів і врахування конкретних особливостей приміщення. Саме поєднання цих переваг і обмежень дозволяє розглядати розроблену систему як реальну основу для подальшого розвитку, удосконалення та впровадження в задачах автоматизованого керування якістю повітря.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто актуальну задачу побудови кіберфізичної системи керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань. Актуальність обраного напрямку зумовлена тим, що стан повітряного середовища в закритих приміщеннях формується під впливом кількох взаємопов'язаних чинників одночасно, серед яких особливу роль відіграють концентрація вуглекислого газу, вміст дрібнодисперсних частинок, рівень летких органічних сполук, температура та відносна вологість.

У першому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи розкрито сутність якості повітря в приміщеннях як багатопараметричного та динамічного об'єкта контролю. Показано, що для коректного оцінювання стану середовища недостатньо відстежувати лише температурний режим або рівень CO₂, оскільки реальна ситуація визначається сукупною дією газових, аерозольних і мікрокліматичних факторів. Також проаналізовано сучасні підходи до моніторингу й керування повітряним середовищем та виявлено, що більшість поширених рішень має обмежену функціональність або недостатній рівень інтеграції між сенсорним, аналітичним і виконавчим контурами. Це дозволило обґрунтувати доцільність застосування саме кіберфізичного підходу, у межах якого вимірювання, цифрова обробка даних і фізичний вплив на об'єкт поєднуються в єдиному зворотному контурі.

У другому розділі розроблено загальну архітектуру системи, визначено її основні функціональні рівні та обґрунтовано вибір апаратних і програмних засобів реалізації. Як центральний елемент системи обрано мікроконтролерний модуль ESP32, що забезпечує достатні обчислювальні можливості, підтримку цифрових інтерфейсів і мережеву взаємодію. Для формування мультисенсорного вимірювального вузла використано датчики SCD41, SGP41 і SPS30, які дозволяють контролювати концентрацію CO₂, температуру, вологість, леткі органічні сполуки та пилові частинки. Розроблено структуру сенсорної

					КвРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підсистеми, у якій передбачено часову синхронізацію вимірювань, попередню перевірку коректності даних, згладжування значень і формування узгодженого вектора стану повітряного середовища.

У третьому розділі виконано практичну реалізацію апаратної та програмної частин системи. Реалізовано апаратний стенд, у якому поєднано центральний контролер, сенсорні модулі, блок живлення та виконавчі канали керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням. Програмну частину побудовано модульно, що дозволило організувати стабільне зчитування сенсорних даних, їх первинну обробку, локальне формування керувальних команд та передавання телеметрії на серверний рівень через MQTT. Серверну частину реалізовано на базі InfluxDB і Grafana, що забезпечило накопичення часових рядів, візуалізацію поточних і архівних параметрів, а також відображення журналу реакцій системи.

Оцінка ефективності розробленої системи показала, що її сильними сторонами є комплексний характер контролю, узгодженість між сенсорним і виконавчим рівнями, модульність побудови, можливість накопичення історичних даних і зручність візуалізації результатів.

У підсумку мети бакалаврської кваліфікаційної роботи досягнуто. Розроблено та реалізовано кіберфізичну систему керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань, яка забезпечує збирання даних про стан середовища, їх аналіз, формування керувальних рішень і вплив на вентиляцію, очищення та кондиціонування в межах єдиного замкненого контуру. Отримані результати підтверджують, що запропонований підхід є технічно доцільним, функціонально обґрунтованим і придатним для подальшого розвитку в напрямі створення більш масштабних та інтелектуалізованих систем автоматизованого керування мікрокліматом і якістю повітря в приміщеннях.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Saini J., Dutta M., Marques G. Indoor Air Quality Monitoring Systems Based on Internet of Things: A Systematic Review. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17. P. 4942. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17144942>. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/8/2659> (дата звернення: 19.02.2026).

2. Jo J., Jo B., Kim J., Kim S., Han W. Development of an IoT-based indoor air quality monitoring platform. Journal of Sensors. 2020. P. 8749764. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8749764>. URL: <https://journal.mtu.edu.iq/index.php/MTU/article/view/1987> (дата звернення: 19.02.2026).

3. Zagatti E. [et al.]. On-Site Monitoring Indoor Air Quality in Schools: A Real-World Activity. Journal of Chemical Education. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00065>.

4. Pulimeno M. [et al.]. Indoor air quality at school and students' performance. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7420173/> (дата звернення: 19.02.2026).

5. Concas F. [et al.]. Low-Cost Outdoor Air Quality Monitoring and Sensor Calibration: A Survey. ACM Computing Surveys. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3446005>.

6. Taheri S. [et al.]. Learning-based CO₂ concentration prediction: Application to indoor air quality control using demand-controlled ventilation. Building and Environment. 2021. Vol. 205. P. 108164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108164>.

7. Taheri S. [et al.]. Learning-based CO₂ concentration prediction: Application to indoor air quality control using demand-controlled ventilation. Building and Environment. 2021. Vol. 205. P. 108164. URL:

					КВРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://scholarworks.indianapolis.iu.edu/bitstream/handle/1805/31788/Taheri2021Learning-PUBLICACCESS.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).

8. World Health Organization. Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. 2021. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/339857/9789240021280-eng.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).

9. REHVA. REHVA COVID-19 guidance document (Version 4.1). 2021. URL: https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4.1_15042021.pdf (дата звернення: 19.02.2026).

10. National Department of Health (South Africa). Guidelines for ventilation to prevent the spread of the SARS-CoV-2 virus (Version 1). 2021. URL: https://cdn.ymaws.com/www.saiosh.co.za/resource/resmgr/docs/2021_folder_2/v1_guidelines_for_ventilatio.pdf (дата звернення: 19.02.2026).

11. Ivković M. [et al.]. IoT System for Indoor Air Quality Monitoring in Accordance with ... 2025. URL: <https://ijeec.etf.ues.rs.ba/index.php/ijeec/article/download/203/154> (дата звернення: 19.02.2026).

12. Yin H. [et al.]. Online monitoring of PM_{2.5} and CO₂ in residential buildings: long-term monitoring and ventilation comparison. Building and Environment. 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132321008490> (дата звернення: 19.02.2026).

13. Alvear-Puertas V. E. [et al.]. Smart and Portable Air-Quality Monitoring IoT Low-Cost System. 2022. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9504070/> (дата звернення: 19.02.2026).

14. Demanega I. [et al.]. Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. 2020-2021. URL: https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/performance_assessment_of_low-

cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions.pdf (дата звернення: 19.02.2026).

15. Guerrero-Ulloa G., Andrango-Catota A., Abad-Alay M., Hornos M. J., Rodríguez-Domínguez C. Development and Assessment of an Indoor Air Quality Control IoT-Based System. *Electronics*. 2023. Vol. 12, No 3. P. 608. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12030608>.

16. Qian Y. [et al.]. How to measure and control indoor air quality based on digital twin platforms. *Building and Environment*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132324001914> (дата звернення: 19.02.2026).

17. Sørensen S. B. [et al.]. Low-cost sensor-based investigation of CO₂ and volatile organic compounds in classrooms. *Building and Environment*. 2024. P. 111369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111369>.

18. Sørensen S. B. [et al.]. Low-cost sensor-based investigation of CO₂ and VOC in classrooms. *Building and Environment*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132324002117> (дата звернення: 19.02.2026).

19. Canha N. [et al.]. Monitoring Indoor Air Quality in Classrooms Using Low-Cost Sensors. *Atmosphere*. 2024. Vol. 15, No 12. P. 1450. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15121450>. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/15/12/1450> (дата звернення: 19.02.2026).

20. Lavrinovica I. [et al.]. A Comprehensive Review of Sensor-Based Smart Building ... *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No 21. P. 10057. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142110057>.

21. Rahmadani A. A. [et al.]. Real-Time Air Quality Monitoring Through IoT and Web Application. *Future Internet*. 2024. Vol. 14, No 1. P. 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi14010002>.

22. Ayat Y. [et al.]. IoT-Enabled E-Noses and Low-Power Devices for Air Quality Monitoring. 2024. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405896324006840> (дата звернення: 19.02.2026).

23. Imankulova B., Zhakipova A., Razaque A. IoT-based real-time indoor air quality monitoring and web server management system using Raspberry Pi. 2023. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3966/W2Paper6.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).

24. Kairuz-Cabrera D. [et al.]. Development of a Unified IoT Platform for Assessing Air Quality. 2023. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/9430/02c189b50b48660948fe8fdff9fd388bda10.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).

25. Biondo E. [et al.]. Real-time indoor air quality (IAQ) monitoring system. 2023. URL: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstreams/2f789769-b5ef-452d-8feb-78fdac186712/download> (дата звернення: 19.02.2026).

26. Sulighetean C. I. Air quality monitoring system to detect levels of pollutants in indoor environments. 2023. URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstreams/49d076db-24a4-4032-923f-a56b8a2d04a9/download> (дата звернення: 19.02.2026).

27. Alsaferiy W. [et al.]. Sensing within Smart Buildings: A Survey. ACM Computing Surveys. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1145/3596600>.

28. Yun S. [et al.]. Investigation of indicators for personal exposure and occupancy using smart sensors in offices. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823007697> (дата звернення: 19.02.2026).

29. Ródenas García M. [et al.]. Review of low-cost sensors for indoor air quality. 2022. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/05704928.2022.2085734> (дата звернення: 19.02.2026).

30. Lu X. CO₂ Demand-Controlled Ventilation: Commercial Buildings. 2022. URL: https://repository.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1344&context=construction_management_pubs (дата звернення: 19.02.2026).

					КВРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 74
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		

31. ISO. Indoor air - Part 41: Assessment and classification. 2021. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/> (дата звернення: 19.02.2026).

32. European Commission, JRC. Level(s) indicator 4.1: Indoor air quality. 2021. URL: https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-02/UM3_Indicator_4.1_v1.1_37pp.pdf (дата звернення: 19.02.2026).

33. Gura V. T., Monastyrskyi L. ІОТ-рішення для моніторингу якості повітря з допомогою ESP32. Штучний інтелект. 2023. Т. 28, № 3. С. 86–93. DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2023.03.086>.

34. BCA (Singapore), NEA, BCA, MOH. Updated Guidance Note on Improving Ventilation and Indoor Air Quality in Buildings. 2023. URL: <https://www1.bca.gov.sg/docs/default-source/docs-corp-news-and-publications/circulars/updated-guidance-note-on-improving-ventilation-and-indoor-air-quality-in-buildings-for-a-healthy-indoor-environment-by-neabcamoh.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).

35. Istituto Superiore di Sanità. CO₂ monitoring for prevention and management in indoor environments. 2022. URL: <https://publ.iss.it/ITA/Items/GetPDF?uuid=9faca881-eb08-4c76-ba57-a148f8e64851> (дата звернення: 19.02.2026).

36. Mota A., Serôdio C., Briga-Sá A., Valente A. Implementation of an Internet of Things Architecture to Monitor Indoor Air Quality: A Case Study During Sleep Periods. Sensors. 2025. Vol. 25, No 6. P. 1683. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25061683>.

37. Lopes S. I. [et al.]. Low-Cost Sensor Systems and IoT Technologies for Indoor Air Quality Monitoring: Instrumentation, Models, Implementation, and Perspectives for Validation. Sensors. 2025. Vol. 25, No 24. P. 7567. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25247567>.

38. Pietraru R. N. [et al.]. Reengineering Indoor Air Quality Monitoring Systems to ... Sensors. 2024. Vol. 24, No 8. P. 2659. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24082659>.

					КВРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 75
Зм.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата		

39. Alsamrai O. [et al.]. A Systematic Review for Indoor and Outdoor Air Pollution Monitoring. Sustainability. 2024. Vol. 16. P. 4353. URL: <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/28370/sustainability-16-04353.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).

40. Aguilar J. F. A. [et al.]. Monitoring Air Quality and Comfort for Citizen Health. Open Journal of Internet of Things. 2024. URL: https://www.ronpub.com/OJIOT_2024v9i1n01_Aguilar.pdf (дата звернення: 19.02.2026).

41. Adamopoulos I. P. [et al.]. Quality of indoor air in educational institutions and adverse public health in Europe: a scoping review. 2025. URL: <https://www.ejgm.co.uk/download/quality-of-indoor-air-in-educational-institutions-and-adverse-public-health-in-europe-a-scoping-15962.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).

42. Lee K. [et al.]. A study on indoor air quality at daycare centers using IoT ... 2025. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13467581.2024.2412154> (дата звернення: 19.02.2026).

43. Tong L. [et al.]. A sensor-fused BIM-based intelligent control system for smart buildings. Scientific Reports. 2025. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-30460-0> (дата звернення: 19.02.2026).

44. Alongi A. [et al.]. Smart sensors for Indoor Environmental Quality in smart buildings. 2025. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14786451.2025.2578592> (дата звернення: 19.02.2026).

45. Przystupa K. [et al.]. Ensuring Energy Efficiency of Air Quality Monitoring ... Energies. 2025. Vol. 18, No 14. P. 3768. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18143768>.

46. Pietraru R. N. [et al.]. Contributions to the Development of Fire Detection and Indoor Air Quality Monitoring Integration. Sensors. 2025. Vol. 25, No 20. P. 6375. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25206375>.

47. Marinho J. [et al.]. Immersive, Secure, and Collaborative Air Quality Monitoring. Computers. 2025. Vol. 14, No 6. P. 231. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers14060231>.

48. ISO. Indoor air - Part 37: Measurement of PM_{2,5} mass concentration. 2019. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/66283/bc5e1dfdaf2043f5ac3d36cf94356255/ISO-16000-37-2019.pdf> (дата звернення: 19.02.2026).

49. Mendeley Data. Dataset of Indoor Air Pollutant Concentration using Low-Cost Sensors. 2021. URL: <https://data.mendeley.com/datasets/7bsc526pzn/1> (дата звернення: 19.02.2026).

50. De Jonge K. Simulation Case-study on Outdoor Air Quality demand controlled ventilation. 2023. URL: https://www.aivc.org/sites/default/files/1_C45.pdf (дата звернення: 19.02.2026).

51. Netatmo Healthy Home Coach. URL: <https://www.ctrs.com.ua/ru/ustrojstva-umnogo-doma/domashnyaya-meteostantsiya-netatmo-healthy-home-coach-658025.html> (дата звернення: 19.02.2026).

52. Xiaomi Mi Air Quality Monitor. URL: https://rozetka.com.ua/ua/xiaomi_skv4009cn/p35058823/ (дата звернення: 19.02.2026).

53. Awair. URL: <https://www.amazon.com/Awair-Element-Indoor-Quality-Monitor/dp/B082ZF4H37> (дата звернення: 19.02.2026).

					КВРКІ.230193.23.01.44 ПЗ	Арк. 77
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Г (обов'язковий)

Текст системного програмного забезпечення

```
/*
    air_quality_node.ino
    Приклад прошивки ESP32 для
    кіберфізичної системи керування якістю
    повітря.
    У демонстраційному режимі значення
    сенсорів імітуються. За потреби сюди
    можна додати бібліотеки Sensirion
    SCD41, SPS30 та SGP41.
*/
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>

const char* WIFI_SSID = "YOUR_WIFI";
const char* WIFI_PASSWORD =
"YOUR_PASSWORD";
const char* SERVER_URL =
"http://192.168.1.100:5050/api/telemetry"
;

const int SUPPLY_PIN = 18;
const int EXHAUST_PIN = 19;
const int PURIFIER_PIN = 23;
const int CONDITIONER_PIN = 5;

unsigned long lastSend = 0;
const unsigned long SEND_INTERVAL =
3000;

String buildPayload() {
    float co2 = 720 + random(-40,
220);
    float pm25 = 8 + random(0, 25) /
2.0;
    float pm10 = 20 + random(0, 55) /
2.0;
    float voc = 120 + random(0, 120);
    float temperature = 22.5 +
random(-20, 35) / 10.0;
    float humidity = 45 + random(-80,
120) / 10.0;
    float outsidePm = 18 + random(-50,
140) / 10.0;
    String json = "{";
    json += "\"zone\":" + "esp32-
zone\",";
    json += "\"co2\":" + String(co2,
1) + ",";
    json += "\"pm25\":" + String(pm25,
1) + ",";
    json += "\"pm10\":" + String(pm10,
1) + ",";
    json += "\"voc\":" + String(voc,
1) + ",";
    json += "\"temperature\":" +
String(temperature, 1) + ",";
    json += "\"humidity\":" +
String(humidity, 1) + ",";
    json += "\"outside_pm25\":" +
String(outsidePm, 1);
    json += "}";
    return json;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(SUPPLY_PIN, OUTPUT);
    pinMode(EXHAUST_PIN, OUTPUT);
    pinMode(PURIFIER_PIN, OUTPUT);
}
```

```

    pinMode(CONDITIONER_PIN, OUTPUT);
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.begin(WIFI_SSID,
WIFI_PASSWORD);
    Serial.print("Connecting to Wi-
Fi");
    while (WiFi.status() !=
WL_CONNECTED) { delay(500);
Serial.print("."); }
    Serial.println();
    Serial.print("ESP32 IP: ");
    Serial.println(WiFi.localIP());
    randomSeed(analogRead(0));
}

void loop() {
    if (millis() - lastSend <
SEND_INTERVAL) return;
    lastSend = millis();
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED)
{
        HTTPClient http;
        String payload = buildPayload();
        http.begin(SERVER_URL);
        http.addHeader("Content-Type",
"application/json");
        int code = http.POST(payload);
        Serial.print("POST code: ");
        Serial.println(code);
        Serial.println(payload);
        http.end();
    }
}

```

Файл controller.py

```

from dataclasses import dataclass,
asdict

def clamp(v, lo=0, hi=1):
    return max(lo, min(hi, v))

```

```

def score(v, good, bad):
    return clamp((float(v)-
good)/(bad-good))

def comfort(v, low_good, high_good,
low_bad, high_bad):
    v=float(v)
    if low_good <= v <= high_good:
return 0
    if v < low_good: return
clamp((low_good-v)/(low_good-low_bad))
    return clamp((v-
high_good)/(high_bad-high_good))

```

```
@dataclass
```

```
class Evaluation:
```

```
    aqi: float
```

```
    risk: float
```

```
    mode: str
```

```
    dominant: str
```

```
    decision: str
```

```
    supply: int
```

```
    exhaust: int
```

```
    purifier: int
```

```
    conditioner: int
```

```
    damper: int
```

```
    scores: dict
```

```
    def dict(self):
```

```
        return asdict(self)
```

```
def evaluate(data):
```

```
    co2_s = score(data.get('co2',
700), 700, 1600)
```

```
    pm_s =
max(score(data.get('pm25', 8), 10, 75),
score(data.get('pm10', 20), 25, 150))
```

```
    voc_s = score(data.get('voc',
120), 120, 360)
```

```

temp_s =
comfort(data.get('temperature', 23), 20,
25.5, 16, 31)
hum_s =
comfort(data.get('humidity', 45), 35, 60,
20, 75)
risk = clamp(co2_s*0.30 +
pm_s*0.25 + voc_s*0.20 + temp_s*0.15 +
hum_s*0.10)
aqi = round((1-risk)*100, 1)
risk_pct = round(risk*100, 1)
scores = {'co2': round(co2_s,3),
'pm': round(pm_s,3), 'voc':
round(voc_s,3), 'temperature':
round(temp_s,3), 'humidity':
round(hum_s,3)}
dominant = max(scores.items(),
key=lambda x: x[1])[0]
names = {'co2':'CO2', 'pm':'PM',
'voc':'VOC', 'temperature':'температура',
'humidity':'вологість'}
dominant_name =
names.get(dominant, dominant)

if risk < 0.18: mode =
'СТАБІЛЬНО'
elif risk < 0.38: mode =
'СПОСТЕРЕЖЕННЯ'
elif risk < 0.62: mode =
'КОРЕКЦІЯ'
elif risk < 0.82: mode =
'ІНТЕНСИВНЕ ОЧИЩЕННЯ'
else: mode = 'КРИТИЧНИЙ РЕЖИМ'

outside_pm =
float(data.get('outside_pm25', 18))
t =
float(data.get('temperature', 23))
supply, exhaust, purifier,
conditioner, damper = 18, 18, 15, 0, 35
notes=[]

```

```

if co2_s > .35:
    if outside_pm > 45:
        supply, exhaust,
purifier, damper = max(supply,35),
max(exhaust,65), max(purifier,75), 25
        notes.append('CO2
підвищений, але зовнішній пил високий:
приплив обмежено, очищення посилено')
    else:
        supply, exhaust, damper
= max(supply,65), max(exhaust,72), 60
        notes.append('акцент
зроблено на припливно-витяжному
повітрообміні')
        if pm_s > .3:
            purifier = max(purifier,
int(45 + pm_s*55))
            exhaust = max(exhaust, 48)
            if outside_pm > 45: supply,
damper = min(supply,40), 22
            notes.append('пилове
навантаження компенсується фільтрацією та
контрольованим потоком')
            if voc_s > .3:
                exhaust, purifier =
max(exhaust, int(55+voc_s*35)),
max(purifier, 60)
                notes.append('хімічний фон
знижено через витяжку та очищення')
            if t > 25.5:
                conditioner =
max(conditioner, int(35 + min((t-25.5)*15,
55)))
                notes.append('температура
стабілізується кондиціонуванням')
            if hum_s > .45:
                exhaust = max(exhaust, 60)
                notes.append('відхилення
вологості враховано через посилення
витяжки')

```

```

    if risk >= .82:
        exhaust, purifier = 95, 95
        supply = 45 if outside_pm >
45 else 88
        damper = 20 if outside_pm >
45 else 75
        notes.append('критичний
режим активує максимальну безпечну
реакцію')
        if not notes:
            notes.append('параметри
прийнятні, система підтримує фонову
циркуляцію')

    return Evaluation(aqi, risk_pct, mode,
dominant_name, ' '.join(notes),
int(supply), int(exhaust), int(purifier),
int(conditioner), int(damper),
scores).dict()

```

Файл database.py

```

import sqlite3
from pathlib import Path

DB = Path(__file__).with_name('air_cps.db')

def conn():
    c=sqlite3.connect(DB,
check_same_thread=False)
    c.row_factory=sqlite3.Row
    return c

def init_db():
    c=conn()
    c.execute(''CREATE TABLE IF NOT
EXISTS measurements(
        id INTEGER PRIMARY KEY
AUTOINCREMENT, created_at TEXT DEFAULT
CURRENT_TIMESTAMP,

```

```

        zone TEXT, co2 REAL, pm25
REAL, pm10 REAL, voc REAL, temperature
REAL, humidity REAL, outside_pm25 REAL,
        aqi REAL, risk REAL, mode
TEXT, dominant TEXT, decision TEXT,
        supply INTEGER, exhaust
INTEGER, purifier INTEGER, conditioner
INTEGER, damper INTEGER)''')
    c.execute(''CREATE TABLE IF NOT
EXISTS events(id INTEGER PRIMARY KEY
AUTOINCREMENT, created_at TEXT DEFAULT
CURRENT_TIMESTAMP, level TEXT, title TEXT,
details TEXT)''')
    c.commit(); c.close()

def save(data, ev):
    c=conn()
    c.execute(''INSERT INTO
measurements(zone,co2,pm25,pm10,voc,tempe
rature,humidity,outside_pm25,aqi,risk,mod
e,dominant,decision,supply,exhaust,purifi
er,conditioner,damper)
VALUES(?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,?,
?)'', (
        data.get('zone'),
data.get('co2'), data.get('pm25'),
data.get('pm10'), data.get('voc'),
data.get('temperature'),
data.get('humidity'),
data.get('outside_pm25'),
        ev['aqi'], ev['risk'],
ev['mode'], ev['dominant'],
ev['decision'], ev['supply'],
ev['exhaust'], ev['purifier'],
ev['conditioner'], ev['damper']))
    c.commit(); c.close()

def event(level,title,details=''):
    c=conn(); c.execute('INSERT
INTO
        events(level,title,details)

```

```

VALUES(?,?,?)',(level,title,details));
c.commit(); c.close()

def latest():
    c=conn(); r=c.execute('SELECT *
FROM measurements ORDER BY id DESC LIMIT
1').fetchone(); c.close(); return dict(r)
if r else None

def hist(limit=120):
    c=conn();
rows=c.execute('SELECT * FROM measurements
ORDER BY id DESC LIMIT ?',
(limit,)).fetchall(); c.close(); return
[dict(r) for r in reversed(rows)]

def events(limit=50):
    c=conn();
rows=c.execute('SELECT * FROM events ORDER
BY id DESC LIMIT ?', (limit,)).fetchall();
c.close(); return [dict(r) for r in rows]

def summary():
    c=conn();
total=c.execute('SELECT COUNT(*) c FROM
measurements').fetchone()['c'];
avg=c.execute('SELECT AVG(aqi) v FROM
measurements').fetchone()['v'] or 0;
mx=c.execute('SELECT MAX(risk) v FROM
measurements').fetchone()['v'] or 0;
corr=c.execute("SELECT COUNT(*) c FROM
measurements WHERE mode NOT IN
('СТАБИЛЬНО', 'СПОСТЕРЕЖЕННЯ')").fetchone(
)['c']; c.close()
    return
{'total':total, 'avg_aqi':round(avg,1), 'ma
x_risk':round(mx,1), 'corrections':corr, 'l
atest':latest()}

def clear():

```

```

c=conn(); c.execute('DELETE FROM
measurements'); c.execute('DELETE FROM
events'); c.commit(); c.close()

```

Файл simulator.py

```

import argparse, json, math, random,
time, urllib.request, urllib.error

URL='http://127.0.0.1:5050/api/tele
metry'

def post(url, payload):
    req=urllib.request.Request(url,
data=json.dumps(payload).encode(),
headers={'Content-
Type':'application/json'}, method='POST')
    with
urllib.request.urlopen(req, timeout=3) as
r: return json.loads(r.read().decode())

def values(i, scenario):
base={'co2':720+80*math.sin(i/7)+random.r
andint(-30,30), 'pm25':9+random.uniform(-
1,2), 'pm10':22+random.uniform(-
3,4), 'voc':130+random.randint(-
8,15), 'temperature':23+random.uniform(-
.3,.4), 'humidity':45+random.uniform(-
2,2), 'outside_pm25':18+random.uniform(-
5,5)}
    if scenario=='people':
base['co2']=850+i*22+random.randint(-
25,45);
base['temperature']+=min(i*.03,2.8);
base['humidity']+=min(i*.07,8)
    elif scenario=='dust':
base['pm25']=18+i*1.4+random.uniform(-
3,7);
base['pm10']=45+i*2.4+random.uniform(-
7,14);

```

```

base['outside_pm25']=55+random.uniform(-
8,18)
        elif          scenario=='voc':
base['voc']=160+i*7+random.randint(-
15,25);
base['temperature']+min(i*.02,1.8)
        elif          scenario=='mixed':
base['co2']+min(i*18,620);
base['pm25']+max(0,i-18)*1.8;
base['pm10']+max(0,i-18)*3.4;
base['voc']+max(0,i-42)*7;
base['humidity']+max(0,i-35)*.22
        elif          scenario=='recovery':
base['co2']=max(620,1750-
i*30+random.randint(-20,20));
base['pm25']=max(7,72-
i*1.5+random.uniform(-2,2));
base['pm10']=max(18,140-
i*2.7+random.uniform(-5,5));
base['voc']=max(110,390-
i*4+random.randint(-8,8))
        return {k:round(v,2) for k,v in
base.items()}

def main():
    p=argparse.ArgumentParser();
p.add_argument('--scenario',
choices=['normal','people','dust','voc','
mixed','recovery'], default='mixed');
p.add_argument('--count', type=int,
default=90); p.add_argument('--interval',
type=float, default=1); p.add_argument('--
url', default=URL); p.add_argument('--
zone', default='lecture-room');
a=p.parse_args()
    print('[SIM]          scenario:',
a.scenario, 'url:', a.url)
    for i in range(a.count):

payload=values(i,a.scenario);
payload['zone']=a.zone

```

```

try:
res=post(a.url,payload);
ev=res['evaluation'];      print(f"[SIM]
{i+1:03d}          CO2={payload['co2']}
PM={payload['pm25']} VOC={payload['voc']}
-> {ev['mode']} AQI={ev['aqi']}")
except
urllib.error.URLError as e: print('[SIM]
connection error:', e)
        time.sleep(a.interval)

if __name__=='__main__': main()

Файл app.py

from flask import Flask, jsonify,
render_template, request
from controller import evaluate
from database import init_db, save,
event, summary, hist, events, latest, clear

app = Flask(__name__)

def data_from_payload(p):
    return {
        'zone':
p.get('zone','lecture-room'),
        'co2':
float(p.get('co2',700)),          'pm25':
float(p.get('pm25',8)),          'pm10':
float(p.get('pm10',18)),
        'voc':
float(p.get('voc',120)),          'temperature':
float(p.get('temperature',23)),
        'humidity': float(p.get('humidity',45)),
        'outside_pm25':
float(p.get('outside_pm25',18))
    }

@app.route('/')

```

```

def index(): return ':0','conditioner':0,'damper':0,'mode':'04
render_template('index.html') ІКУВАННЯ'})

@app.route('/api/telemetry', return jsonify({k:row[k] for k
methods=['POST']) in
def telemetry(): ['supply','exhaust','purifier','condition
er','damper','mode','decision']})

data=data_from_payload(request.get_json(f
orce=True, silent=True) or {})
ev=evaluate(data)
save(data, ev)
event('CONTROL' if
ev['risk']>38 else 'INFO', ev['mode'],
ev['decision'])
return
jsonify({'status':'accepted','evaluation'
:ev,'commands':{'supply':ev['supply'],'ex
haust':ev['exhaust'],'purifier':ev['purif
ier'],'conditioner':ev['conditioner'],'da
mper':ev['damper'],'mode':ev['mode']})})

@app.route('/api/state')
def state(): return
jsonify(summary())

@app.route('/api/history')
def history(): return
jsonify(hist(int(request.args.get('limit'
,120))))

@app.route('/api/events')
def api_events(): return
jsonify(events(int(request.args.get('limi
t',50))))

@app.route('/api/commands')
def commands():
row=latest()
if not row: return
jsonify({'supply':0,'exhaust':0,'purifier

```

```

':0,'conditioner':0,'damper':0,'mode':'04
ІКУВАННЯ'})
return jsonify({k:row[k] for k
in
['supply','exhaust','purifier','condition
er','damper','mode','decision']})

@app.route('/api/clear',
methods=['POST'])
def api_clear():
clear(); event('INFO','Журнал
очищено','Дані стенда видалено через
інтерфейс'); return
jsonify({'status':'ok'})

if __name__ == '__main__':
init_db(); event('INFO','Сервер
запущено','AirFlow CPS Studio готовий до
приймання телеметрії')
app.run(host='127.0.0.1', port=5050,
debug=False)

Файл index.html

<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
<meta charset="UTF-8"><meta
name="viewport" content="width=device-
width, initial-scale=1.0">
<title>AirFlow CPS
Studio</title><link rel="stylesheet"
href="/static/style.css">
</head>
<body>
<div class="shell">
<header class="topbar"><div
class="brand"><span class="brand-
mark"></span><div><strong>AirFlow CPS
Studio</strong><small>цифровий двійник
керування якістю

```

```

повітря</small></div></div><div
class="top-actions"><button
id="clearBtn">Очистити стенд</button><span
class="pulse-dot"></span><span>live
contour</span></div></header>
    <section class="workspace">
        <aside class="left-rail"><div
class="vertical-title">MULTISENSOR
CORE</div><div class="sensor-pill
co2"><span>CO2</span><strong
id="co2Value">–
</strong><small>ppm</small></div><div
class="sensor-pill
pm"><span>PM2.5</span><strong
id="pmValue">–
</strong><small>µg/m3</small></div><div
class="sensor-pill
voc"><span>VOC</span><strong
id="vocValue">–
</strong><small>index</small></div><div
class="sensor-pill
temp"><span>T</span><strong
id="tempValue">–
</strong><small>°C</small></div><div
class="sensor-pill
hum"><span>RH</span><strong
id="humValue">–
</strong><small>%</small></div></aside>
    <main class="digital-twin"><div
class="room-card"><div class="room-
header"><div><span
class="caption">цифровий двійник
приміщення</span><h1
id="modeTitle">Очікування
телеметрії</h1></div><div class="aqi-orb"
id="aqiOrb"><span id="aqiValue">–
</span><small>AQI</small></div></div><div
class="room-map"><div class="air-stream
stream-a"></div><div class="air-stream
stream-b"></div><div class="air-stream
stream-c"></div><div class="zone zone-

```

```

a"><b>Зона A</b><span>робочі
місця</span></div><div class="zone zone-
b"><b>Зона B</b><span>повітряний
канал</span></div><div class="zone zone-
c"><b>Зона C</b><span>локальне
джерело</span></div><div class="device
intake">приплив</div><div class="device
exhaust">витяжка</div><div class="device
purifier">очищення</div><div class="device
ac">клімат</div></div><div
class="decision-strip"><span>домінуючий
фактор</span><strong id="dominantFactor">–
</strong><p id="decisionText">Після
запуску симулятора тут відображається
пояснення керувального
рішення.</p></div></div><div
class="timeline-card"><div class="mini-
title"><span>часова
динаміка</span><strong>якість /
ризик</strong></div><canvas id="timeline"
width="900"
height="220"></canvas></div></main>
    <aside class="right-rail"><div
class="vertical-title">ACTUATOR
CONTOUR</div><div
class="actuator"><span>Припливна
вентиляція</span><div class="bar"><i
id="supplyBar"></i></div><strong
id="supplyText">0%</strong></div><div
class="actuator"><span>Витяжна
вентиляція</span><div class="bar"><i
id="exhaustBar"></i></div><strong
id="exhaustText">0%</strong></div><div
class="actuator"><span>Очишувач
повітря</span><div class="bar"><i
id="purifierBar"></i></div><strong
id="purifierText">0%</strong></div><div
class="actuator"><span>Кондиціонування</s
pan><div class="bar"><i
id="conditionerBar"></i></div><strong
id="conditionerText">0%</strong></div><di

```

```

v      class="actuator"><span>Заслінка
рециркуляції</span><div      class="bar"><i
id="damperBar"></i></div><strong
id="damperText">0%</strong></div></aside>
      </section>
      <section      class="bottom-
grid"><article class="event-console"><div
class="mini-title"><span>журнал
реакцій</span><strong>події виконавчого
контуру</strong></div><div id="events"
class="events"></div></article><article
class="protocol-note"><div class="mini-
title"><span>логіка
стенда</span><strong>мультисенсорна оцінка
→ рішення → вплив</strong></div><div
class="flow-
steps"><div><b>01</b><span>синхронізація
каналів</span></div><div><b>02</b><span>н
ормалізація CO2 / PM / VOC / T /
RH</span></div><div><b>03</b><span>інтегр
альний індекс
стану</span></div><div><b>04</b><span>реж
им вентиляції, очищення і
клімату</span></div></div></article></sec
tion>
      </div><script
src="/static/app.js"></script>
      </body>
</html>

```

Файл style.css

```

:root{--bg:#0b1116;--panel:#111b23;--
line:#243440;--text:#ecfeff;--
muted:#8aa3ad;--cyan:#22d3ee;--
green:#4ade80;--yellow:#facc15;--
orange:#fb923c;--red:#f87171;--
violet:#a78bfa}*[box-sizing:border-
box]body{margin:0;background:radial-
gradient(circle at 18%
10%,rgba(34,211,238,.14),transparent

```

```

28%),radial-gradient(circle at 85%
15%,rgba(167,139,250,.14),transparent
24%),var(--bg);color:var(--text);font-
family:Inter,Segoe UI,Arial,sans-
serif;min-
height:100vh}.shell{width:min(1440px,calc
(100% - 28px));margin:0 auto;padding:18px
0 32px}.topbar{min-height:72px;border:1px
solid var(--line);border-
radius:26px;background:rgba(17,27,35,.82)
;backdrop-
filter:blur(12px);display:flex;align-
items:center;justify-content:space-
between;padding:14px 22px;margin-
bottom:18px;box-shadow:0 30px 80px
rgba(0,0,0,.22)}.brand{display:flex;gap:1
4px;align-items:center}.brand-
mark{width:42px;height:42px;border-
radius:15px;background:linear-
gradient(135deg,var(--cyan),var(--
violet));box-shadow:0 0 35px
rgba(34,211,238,.5)}.brand
strong{display:block;font-
size:19px}.brand small{color:var(--
muted)}.top-actions{display:flex;align-
items:center;gap:12px;color:var(--
muted)}button{background:#1d4ed8;color:#f
ff;border:0;border-
radius:16px;padding:11px 17px;font-
weight:800;cursor:pointer}.pulse-
dot{width:10px;height:10px;border-
radius:50%;background:var(--green);box-
shadow:0 0 0
rgba(74,222,128,.8);animation:pulse 1.8s
infinite}@keyframes pulse{70%{box-shadow:0
0 0 14px
rgba(74,222,128,0)}}.workspace{display:gr
id;grid-template-columns:190px 1fr
260px;gap:18px;align-items:stretch}.left-
rail,.right-rail,.room-card,.timeline-
card,.event-console,.protocol-

```

```

note{border:1px solid var(--
line);background:linear-
gradient(180deg,rgba(17,27,35,.96),rgba(1
2,20,27,.96));border-radius:30px;box-
shadow:0 24px 70px rgba(0,0,0,.26)}.left-
rail,.right-
rail{padding:18px;display:flex;flex-
direction:column;gap:14px}.vertical-
title{font-size:11px;letter-
spacing:.18em;color:var(--muted);font-
weight:900;text-
transform:uppercase;margin-
bottom:4px}.sensor-pill{padding:16px
14px;border-
radius:22px;background:rgba(255,255,255,.
035);border:1px solid
rgba(255,255,255,.08);position:relative;o
verflow:hidden}.sensor-
pill:before{content:"";position:absolute;
inset:auto 0 0
0;height:4px;background:var(--
cyan)}.sensor-
pill.pm:before{background:var(--
yellow)}.sensor-
pill.voc:before{background:var(--
violet)}.sensor-
pill.temp:before{background:var(--
orange)}.sensor-
pill.hum:before{background:var(--
green)}.sensor-pill span{font-
size:12px;color:var(--muted);font-
weight:900}.sensor-pill
strong{display:block;font-
size:27px;margin:7px 0}.sensor-pill
small{color:var(--muted)}.digital-
twin{display:grid;grid-template-rows:auto
290px;gap:18px}.room-
card{padding:22px}.room-
header{display:flex;justify-
content:space-between;gap:18px;align-
items:flex-start}.caption,.mini-title

```

```

span{color:var(--cyan);font-
size:11px;letter-spacing:.15em;text-
transform:uppercase;font-
weight:900}h1{margin:8px 0 0;font-
size:34px;line-height:1.05}.aqi-
orb{width:126px;height:126px;border-
radius:50%;border:8px solid
rgba(34,211,238,.25);display:flex;flex-
direction:column;justify-
content:center;align-
items:center;background:radial-
gradient(circle,rgba(34,211,238,.2),rgba(
34,211,238,.04));box-shadow:inset 0 0 30px
rgba(34,211,238,.13)}.aqi-orb span{font-
size:35px;font-weight:900}.aqi-orb
small{color:var(--muted);font-
weight:800}.room-map{height:430px;margin-
top:20px;border:1px solid
rgba(255,255,255,.1);border-
radius:30px;background:linear-
gradient(135deg,#10202a,#0a1118);position
:relative;overflow:hidden}.room-
map:before{content:"";position:absolute;i
nset:30px;border:1px dashed
rgba(236,254,255,.18);border-
radius:24px;transform:skew(-
7deg)}.zone{position:absolute;width:180px
;height:112px;border-
radius:24px;border:1px solid
rgba(255,255,255,.14);background:rgba(236
,254,255,.045);display:flex;flex-
direction:column;justify-
content:center;padding:18px;z-
index:3}.zone b{font-size:20px}.zone
span{color:var(--muted);font-
size:13px;margin-top:5px}.zone-
a{left:70px;top:70px}.zone-
b{right:110px;top:90px}.zone-
c{left:42%;bottom:55px}.device{position:a
bsolute;padding:12px 15px;border-
radius:18px;background:#0b1116;border:1px

```

```

solid          var(--line);font-
weight:900;color:var(--text);z-
index:5}.intake{left:18px;top:45%}.exhaus
t{right:18px;top:45%}.purifier{left:32%;t
op:30px}.ac{right:34%;bottom:26px}.air-
stream{position:absolute;height:12px;bord
er-radius:999px;background:linear-
gradient(90deg,transparent,rgba(34,211,23
8,.9),transparent);filter:blur(.2px);opa-
city:.65;animation:stream 2.5s linear
infinite}.stream-
a{width:55%;left:15%;top:44%;transform:ro-
tate(-7deg)}.stream-
b{width:42%;right:12%;top:62%;transform:r-
otate(11deg);animation-delay:.6s}.stream-
c{width:48%;left:24%;top:27%;transform:ro-
tate(5deg);animation-
delay:1.2s}@keyframes
stream{0%{opacity:.15;translate:-35px
0}50%{opacity:.9}100%{opacity:.15;transla-
te:35px 0}}.decision-strip{margin-
top:18px;border:1px solid
rgba(255,255,255,.1);border-
radius:22px;padding:16px;background:rgba(
255,255,255,.035)}.decision-strip
span{color:var(--muted);font-
size:12px;text-
transform:uppercase;letter-
spacing:.1em}.decision-strip
strong{display:block;margin-
top:5px;color:var(--cyan);font-
size:20px}.decision-strip p{margin:8px 0
0;color:#d5e7ed;line-
height:1.55}.timeline-
card{padding:18px}.mini-
title{display:flex;justify-content:space-
between;gap:10px;margin-
bottom:12px}.mini-title strong{font-
size:14px}canvas{width:100%;height:auto;b-
order-
radius:20px;background:#071016;border:1px

```

```

solid
rgba(255,255,255,.08)}.actuator{padding:1
5px;border-
radius:22px;background:rgba(255,255,255,.
035);border:1px solid
rgba(255,255,255,.08)}.actuator
span{display:block;color:var(--
muted);font-size:13px;margin-
bottom:10px}.bar{height:12px;border-
radius:999px;background:#071016;overflow:
hidden}.bar
i{display:block;height:100%;width:0%;bord-
er-radius:inherit;background:linear-
gradient(90deg,var(--cyan),var(--
green));transition:width .5s}.actuator
strong{display:block;margin-top:8px;text-
align:right}.bottom-
grid{display:grid;grid-template-
columns:1.1fr .9fr;gap:18px;margin-
top:18px}.event-console,.protocol-
note{padding:18px}.events{display:grid;ga-
p:9px;max-
height:300px;overflow:auto}.event{border-
left:4px solid var(--
cyan);background:rgba(255,255,255,.035);p-
adding:11px 12px;border-radius:14px}.event
b{display:block}.event span{color:var(--
muted);font-size:12px}.event p{margin:5px
0 0;color:#d7e8ef}.flow-
steps{display:grid;grid-template-
columns:repeat(2,1fr);gap:12px}.flow-
steps div{min-height:96px;border:1px solid
rgba(255,255,255,.1);background:rgba(255,
255,255,.035);border-
radius:22px;padding:15px}.flow-steps
b{display:block;color:var(--cyan);font-
size:24px}.flow-steps
span{display:block;margin-
top:8px;color:#d7e8ef}body.danger .room-
map{box-shadow:inset 0 0 60px
rgba(248,113,113,.16)}body.warn .room-

```

```

map{box-shadow:inset 0 0 60px
  rgba(250,204,21,.13)}@media(max-
  width:1100px){.workspace{grid-template-
  columns:1fr}.left-rail,.right-
  rail{display:grid;grid-template-
  columns:repeat(2,1fr)}.digital-twin{grid-
  template-rows:auto}.bottom-grid{grid-
  template-columns:1fr}.room-
  map{height:360px}@media(max-
  width:650px){.topbar{height:auto;align-
  items:flex-start;flex-
  direction:column}.left-rail,.right-
  rail,.flow-steps{grid-template-
  columns:1fr}.room-header{flex-
  direction:column}.aqi-
  orb{width:104px;height:104px}.zone{width:
  140px;height:92px}.workspace{gap:14px}}

```

Файл app.js

```

  async function getJSON(url,
  options={}){const r=await
  fetch(url,options);if(!r.ok)throw new
  Error('HTTP '+r.status);return await
  r.json()}
  function
  text(id,v){document.getElementById(id).te
  xtContent=v}
  function
  bar(id,v){document.getElementById(id+'Bar
  ').style.width=(v||0)+'%';document.getEle
  mentById(id+'Text').textContent=(v||0)+'%
  '}
  function
  bodyMode(mode){document.body.classList.re
  move('danger','warn'); if(!mode)return;
  if(mode.includes('КРИТИЧНИЙ')||mode.inclu
  des('ІНТЕНСИВНЕ'))document.body.classList
  .add('danger'); else
  if(mode.includes('КОРЕКЦІЯ'))document.bod
  y.classList.add('warn')}

```

```

function
updateLatest(x){if(!x){text('modeTitle','
  Очікування телеметрії');return}
text('modeTitle',x.mode);
text('aqiValue',Math.round(x.aqi));
text('co2Value',Math.round(x.co2));
text('pmValue',Number(x.pm25).toFixed(1))
; text('vocValue',Math.round(x.voc));
text('tempValue',Number(x.temperature).to
  Fixed(1));
text('humValue',Math.round(x.humidity));
text('dominantFactor',x.dominant||'-');
text('decisionText',x.decision||'-');
bar('supply',x.supply);
bar('exhaust',x.exhaust);
bar('purifier',x.purifier);
bar('conditioner',x.conditioner);
bar('damper',x.damper); bodyMode(x.mode);
const
  hue=Math.round((Number(x.aqi||0)/100)*130
  );
const
  orb=document.getElementById('aqiOrb');
  orb.style.borderColor=`hsl(${hue},80%,58%
  )`; orb.style.boxShadow=`inset 0 0 32px
  hsla(${hue},80%,58%,.22),0 0 42px
  hsla(${hue},80%,58%,.18)`}
  function draw(rows){const
  c=document.getElementById('timeline'),ctx
  =c.getContext('2d'),w=c.width,h=c.height,
  p=36;ctx.clearRect(0,0,w,h);ctx.fillStyle
  ='#071016';ctx.fillRect(0,0,w,h);if(!rows
  .length){ctx.fillStyle='#8aa3ad';ctx.font
  ='18px Segoe UI';ctx.fillText('Після
  запуску simulator.py тут з'явиться
  динаміка стану
  повітря',28,58);return}ctx.strokeStyle='r
  gba(255,255,255,.08)';for(let
  i=0;i<=4;i++){let y=p+(h-
  p*2)*i/4;ctx.beginPath();ctx.moveTo(p,y);
  ctx.lineTo(w-p,y);ctx.stroke()}function
  line(k,col){ctx.strokeStyle=col;ctx.lineWidth

```

```

idth=3;ctx.beginPath();rows.forEach((r,i)
=>{let x=p+(w-p*2)*i/Math.max(rows.length-
1,1),val=Math.max(0,Math.min(100,Number(r
[k]||0)),y=h-p-(val/100)*(h-
p*2);if(i===0)ctx.moveTo(x,y);else
ctx.lineTo(x,y));ctx.stroke()}line('aqi'
,'#22d3ee');line('risk','#fb923c');ctx.fi
llStyle='#ecfeff';ctx.font='12px Segoe
UI';ctx.fillText('AQI',p,18);ctx.fillStyl
e='#fb923c';ctx.fillText('ризик',p+44,18)
}

function events(rows){const
b=document.getElementById('events');
if(!rows.length){b.innerHTML='<div
class="event"><b>Подій немає</b><p>Система
очікує перші вимірювання.</p></div>';
return} b.innerHTML=rows.map(r=>`<div
class="event"><span>${r.created_at} .
${r.level}</span><b>${r.title}</b><p>${r.
details||''}</p></div>`).join('')
async function refresh(){try{const
[s,h,e]=await
Promise.all([getJSON('/api/state'),getJSO
N('/api/history?limit=100'),getJSON('/api
/events?limit=35')]);updateLatest(s.lates
t);draw(h);events(e)}catch(err){console.e
rror(err)}}
document.getElementById('clearBtn').addEv
entListener('click',async()=>{await
getJSON('/api/clear',{method:'POST'});ref
resh());refresh();setInterval(refresh,14
00);

```

Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Артем АЧКАСОВ

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань

Експерт: Сергій ЛИСЕНКО

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 2.17%

Коефіцієнт подібності 2: 0.48%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 1

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-19 17:50:33.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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


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

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

Обґрунтування:

2026-05-19

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

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

Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Помилки в документах: 8%**

ID: 271737 Назва: БКР Кіберфізична система керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань Додано в БД: 2026-05-19 Автора: Артем АЧКАСОВ Керівники: Сергій ЛИСЕНКО Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	128825	863	1208 (1%)	14 (2%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Ачкасов Артем Денисович

Тема: Кіберфізична система керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 67

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою роботи є проєктування, реалізація та перевірка функціонування програмно-апаратної кіберфізичної системи керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань. Прийняті рішення включають використання мікроконтролера ESP32 як центрального ядра системи, інтеграцію датчиків для контролю рівня вуглекислого газу, температури, вологості, дрібнодисперсного пилу та летких органічних сполук, а також розробку алгоритмів керування вентиляцією, очищенням і кондиціонуванням через комутаційні модулі. Для накопичення та візуалізації даних реалізовано серверну частину із використанням протоколу MQTT та інформаційних панелей Grafana.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню. Усі вимоги вказані у завданні на кваліфікаційну роботу, а саме аналіз предметної області, проєктування та практична реалізація кіберфізичної системи керування якістю повітря в приміщеннях, виконані в повному обсязі.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі проаналізовано предметну область, існуючі системи моніторингу та обґрунтовано доцільність застосування кіберфізичного мультисенсорного підходу. В другому розділі спроектовано загальну архітектуру системи, обґрунтовано вибір платформи ESP32 з відповідними датчиками та розроблено алгоритми для узгодженого керування

мікрокліматом. В третьому розділі успішно виконано програмно-апаратну реалізацію експериментального зразка, налаштовано серверний рівень для візуалізації телеметрії та протестовано роботу прототипу в різних режимах.

4. Позитивні сторони роботи: Висока практична цінність роботи полягає у створенні повноцінного замкненого кіберфізичного контуру, який дозволяє узгоджено керувати вентиляцією, очищенням та кондиціонуванням повітря на основі динамічного аналізу кількох параметрів одночасно.

5. Негативні сторони роботи: відсутність практичної апаратної реалізації фізичного пристрою; недостатня увага аналізу предметної області; недостатньо чітко описано процес складання програмно-технічного засобу

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно згідно з чинними стандартами оформлення документації.

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


8. Інші зауваження: _____

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

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

Корсунька Л.О., к.т.н., доцент, доцент кафедри АКІТР

“01” червня 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Артем АЧКАСОВ

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи КІ2с-23-1

ЗАЯВА

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

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

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

1 травня 2026 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система керування якістю повітря в приміщеннях на основі мультисенсорних вимірювань

Автор Артем АЧКАСОВ

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: д.т.н., проф Сергій ЛИСЕНКО

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 укріття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

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

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

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 2,17%; та системою Anti-Plagiarism складає 0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис

Підпис

Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Сергій ЛИСЕНКО

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ