

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

Кіберфізична система оцінювання чистоти повітря у приміщенні
Назва теми

КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ
Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Виконав: студент IV курсу, група КІ2-21-2


Підпис

Оксана ДЕНИСЮК
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

Марія КАПУСТЯН
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище

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


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

«16» червня 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 12 Інформаційні технології

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2025 р.



**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Оксани ДЕНИСЮК

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система оцінювання чистоти повітря у приміщенні
Керівник проекту (роботи) Марія КАПУСТЯН

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

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. № 23

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

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

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

Кіберфізична система оцінювання чистоти повітря у приміщенні

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

Архітектура ПЗ проекту

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи

Апаратне забезпечення проєкту

6. Консультанти розділів дипломного проекту (роботи)

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напряму дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2025	Виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2025	Виконано
3	Робота над розділом 1–	01.03.2025	Виконано
4	Робота над розділом 2 –	01.04.2025	Виконано
5	Робота над розділом 3 –	29.04.2025	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2025	Виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	Виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2025 року	

Студент

Підпис

Оксана ДЕНИСЮК
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Марія КАПУСТЯН
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система оцінювання чистоти повітря у приміщенні».

Автор роботи: Оксана ДЕНИСЮК.

Керівник роботи: Капустян Марія Вікторівна.

Пояснювальна записка: 64 с., 38 рис., 4 табл., 3 дод., 35 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

ЧИСТОТА ПОВІТРЯ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, АРХІТЕКТУРА,
МОНІТОРИНГ.

Метою дипломної роботи є розроблення та дослідження кіберфізичної системи, яка здатна обробляти та аналізувати дані про стан повітря в приміщенні, включаючи концентрацію шкідливих речовин, рівень кисню, вологість, температуру та інші критичні параметри якості повітря, із застосуванням NDIR-сенсорів, VOC-датчиків для вимірювання температури, вологості, CO₂, твердих частинок PM_{2.5}, PM₁₀, летких органічних сполук (ЛОС), архітектура системи використовує мікроконтролери (Arduino, ESP32, STM32), що виконують збір даних, базову обробку (фільтрація шумів, калібрування) і передають інформацію на вищі рівні, здатна забезпечувати зберігання й обробку отриманої інформації та в автоматизованому режимі приймати рішення щодо покращення якості повітря.

Об'єктом дослідження є процеси моніторингу та підтримання якості повітря у закритих приміщеннях за допомогою кіберфізичних систем.

Предметом дослідження є методи проектування, побудови та впровадження апаратно-програмного комплексу моніторингу показників чистоти повітря.





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


Підпис студента

30.05.2025
Дата

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 СУЧАСНІ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ	6
1.1 Кіберфізичні системи та їх використання в моніторингу повітря.....	6
1.2 Комфортні умови мікроклімату для людини (аналіз кліматичних систем та їх комплектуючих).....	8
1.2.1 Основні системи та компоненти для забезпечення мікроклімату	11
1.3 Кіберфізичні системи та їх використання в моніторингу повітря.....	13
1.4 Висновки до першого розділу	23
2 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ	25
2.1 Аналіз вимог та постановка технічних завдань	25
2.1.1 Загальні вимоги до системи	29
2.1.2 Апаратні та програмні вимоги.....	36
2.2 Архітектура програмно-технічного засобу	39
2.21 Рівень сенсорів (Sensor Layer)	40
2.22 Контролерний рівень (Edge/Local Control Layer)	41
2.23 Центральний або хмарний рівень (Cloud/Server Layer)	42
3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ	53
3.1 Аналітика моделі програмного забезпечення	53
3.2 Результати алгоритмів для кіберфізичної системи	56
3.3 Програмно-технічна реалізація кіберфізичної системи.....	57
3.4. Висновки до третього розділу	59
ВИСНОВКИ	60
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68
ДОДАТОК А	72

КвРКІ 210234.21.02.51 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Денисюк		
Перев.		Капустян		
Н. контр.		Кисіль		
Затверд.		Павлова		
Кіберфізична система оцінювання чистоти повітря у приміщенні				
			Літ.	Арк.
			2	74
ХНУ КІ2-21-2				

ДОДАТОК Б 73

ДОДАТОК В 74

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

ВСТУП

Забезпечення належної якості повітря в житлових, виробничих та громадських приміщеннях набуває дедалі більшого значення в умовах сучасного урбанізованого середовища. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, погана якість повітря у приміщеннях може призводити до зниження працездатності, погіршення загального самопочуття та негативних наслідків для здоров'я людей. Водночас, підвищення рівня цифровізації суспільства та розвиток Інтернету речей (IoT) сприяють появі нових рішень, що дають змогу ефективно контролювати й аналізувати параметри навколишнього середовища. У цьому контексті особливої актуальності набувають кіберфізичні системи оцінювання чистоти повітря, оскільки вони дозволяють у режимі реального часу отримувати дані, обробляти їх та здійснювати автоматизовані дії на основі заданих критеріїв.

Актуальність даного дослідження зумовлена зростанням кількості захворювань, пов'язаних із впливом шкідливих речовин та мікроорганізмів, що містяться у повітрі, технологічними можливостями сучасних сенсорів та розвитком бездротових мереж передачі даних (Wi-Fi, Bluetooth Low Energy, ZigBee), які дозволяють відносно просто й недорого розгорнути систему моніторингу, запитом на підвищення комфорту, енергоефективності та безпеки житлових і робочих просторів, поширенням Інтернету речей (IoT), у рамках якого з'являються все новіші рішення для «розумних» будинків та «розумних» міст.

Об'єктом дослідження є процеси моніторингу та підтримання якості повітря у закритих приміщеннях за допомогою кіберфізичних систем.

Предметом дослідження є методи проектування, побудови та впровадження апаратно-програмного комплексу моніторингу показників чистоти повітря.

Наукова новизна роботи полягає в інтеграції різних технологічних компонентів (сенсорів, мереж передачі даних, програмних модулів для обробки та аналізу) у єдину кіберфізичну систему, здатну автоматично реагувати на зміни параметрів повітря. Також важливою складовою є розробка алгоритмічного

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення, яке підвищує точність і оперативність прийняття рішень щодо необхідних змін у повітряному середовищі.

Практичне значення полягає в тому, що запропонована система може бути застосована в різноманітних типах приміщень – від приватних квартир та офісів до промислових і громадських будівель. Її впровадження сприятиме підвищенню рівня безпеки та комфорту, а також допоможе запобігати чи зменшувати негативні наслідки від несприятливих показників якості повітря.

Кіберфізична система оцінювання чистоти повітря у приміщенні поєднує в собі апаратну складову (сенсори, контролери, мережеві модулі) та програмне забезпечення (алгоритми обробки даних, візуалізації, прийняття рішень), які функціонують як єдине ціле. Такий підхід дозволяє не лише вимірювати ключові показники (температуру, вологість, концентрацію CO₂, зважені частинки тощо), але й відслідковувати динаміку їх змін з плином часу, а також реагувати на відхилення від заданих норм. Це відкриває можливості для проактивного управління умовами повітряного середовища: автоматизованої вентиляції, очищення повітря, сповіщення користувачів тощо.

Таким чином, комплексне дослідження та розробка кіберфізичної системи оцінювання чистоти повітря у приміщенні мають важливе значення для забезпечення здорового мікроклімату і поліпшення умов праці та побуту людини.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

1 СУЧАСНІ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ

1.1 Кіберфізичні системи та їх використання в моніторингу повітря

Забезпечення комфортного мікроклімату в будівлях – один з пріоритетних завдань сучасного будівництва та експлуатації споруд. Саме від ефективності функціонування систем опалення, вентиляції та кондиціонування (далі – ОВК) залежить не лише відчуття комфорту мешканців чи працівників, але й стан їхнього здоров'я та працездатність. Сучасні дослідники розглядають взаємозв'язок кіберфізичних систем якості оцінювання повітря у декількох напрямках досліджень: принцип роботи та особливості систем [1-10], енергоефективність та екологічні аспекти [11-16], впровадження новітніх конструкцій, матеріалів та компонентів, удосконалення експлуатаційних характеристик [1-10]. Крім того, раціонально спроектовані та керовані системи ОВК дають змогу знизити енергоспоживання та витрати на утримання будівель [11-16, 27].

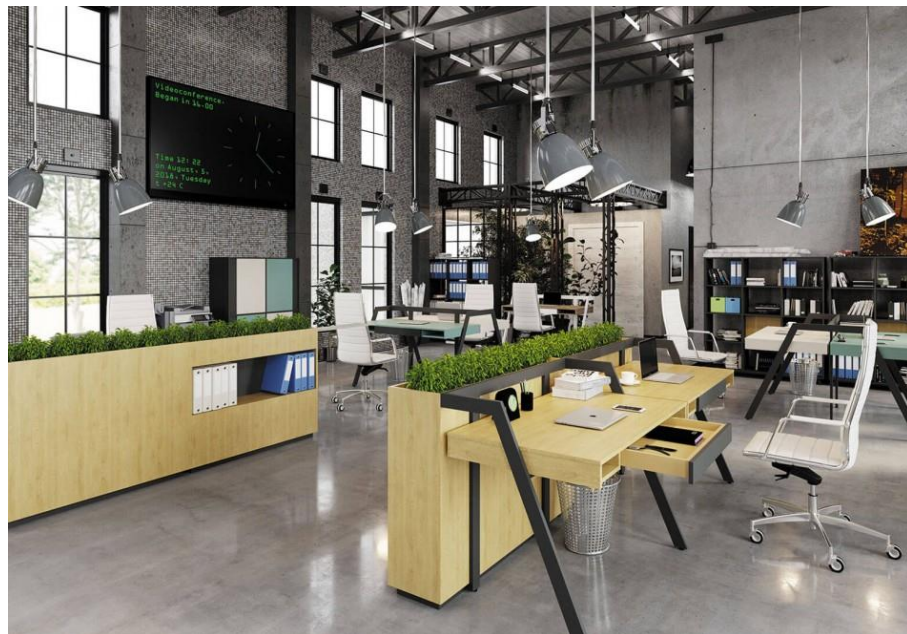


Рисунок 1.1 – Сучасний офіс як місце де створені комфортні кліматичні умови перебування у приміщенні

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Взаємозв'язок із системами оцінювання якості повітря полягає у досягненні максимальної ефективності сучасні системи опалення, вентиляції та кондиціонування, що потребують зворотного зв'язку, тобто інформації про фактичний стан повітря в приміщенні. Це досягається через інтеграцію датчиків якості повітря в єдиний кіберфізичний комплекс.

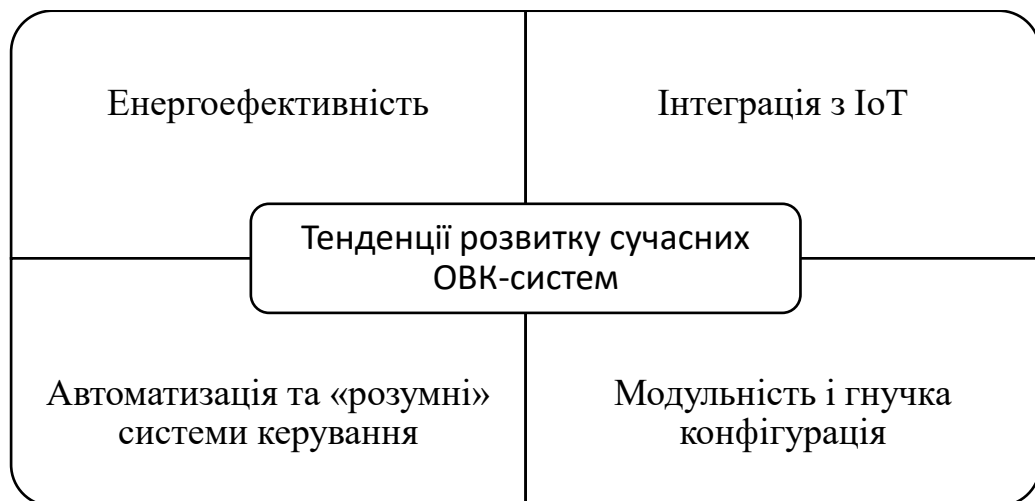


Рисунок 1.2 – Тенденції розвитку сучасних ОВК-систем

У контексті розробки кіберфізичної системи оцінювання якості повітря в приміщенні особливого значення набуває інтеграція розумних датчиків, підключених до Інтернету речей (IoT), з сучасними технологіями обігріву, вентиляції й охолодження.

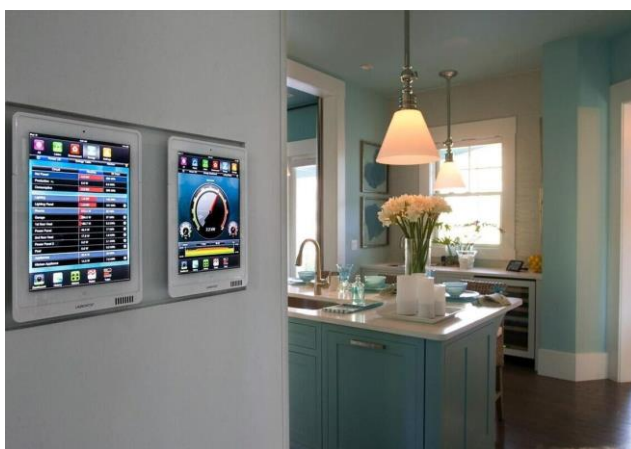


Рисунок 1.3 – Інтеграція з кіберфізичними системами та IoT

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення максимальної ефективності сучасні системи опалення, вентиляції та кондиціонування потребують зворотного зв'язку, тобто інформації про фактичний стан повітря в приміщенні. Це досягається через інтеграцію датчиків якості повітря в єдиний кіберфізичний комплекс.

1.2 Комфортні умови мікроклімату для людини (аналіз кліматичних систем та їх комплектуючих)

Забезпечення оптимального мікроклімату в приміщеннях є одним із найважливіших чинників, який впливає на здоров'я, працездатність та загальне самопочуття людини. Комфортні умови досягаються за рахунок підтримання певного діапазону температури, вологості, швидкості руху повітря, а також рівня його чистоти, наявності або відсутності забруднювачів, таких як пил, мікроорганізми, леткі органічні сполуки.



Рисунок 1.4 – Складові оптимального мікроклімату

Для цього використовуються різні типи кліматичних систем опалення, вентиляція, кондиціонування, зволоження та їхні комплектуючі. Оптимальний діапазон температури залежить від типу приміщення й активності людей. Надто висока або низька температура може призвести до швидкої втоми, зниження концентрації та появи теплового дискомфорту.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Енергоефективність та екологічні аспекти полягають через: використання відновлюваних джерел енергії, як встановлення сонячних панелей, геотермальних систем, вітрогенераторів (в окремих випадках), рекуперація тепла у вентиляційних установках: зменшує тепловтрати, покращує загальний коефіцієнт ефективності.

Фільтрація та очищення повітря: застосування фільтрів високої ефективності (HEPA), вугільних фільтрів, іонізаторів та ультрафіолетових ламп для знищення патогенів. Крім того, впровадження стандартів «зеленого будівництва» (LEED, BREEAM тощо): передбачає комплексні заходи для покращення теплоізоляції, герметичності будівлі та оптимальної роботи ОВК-систем.

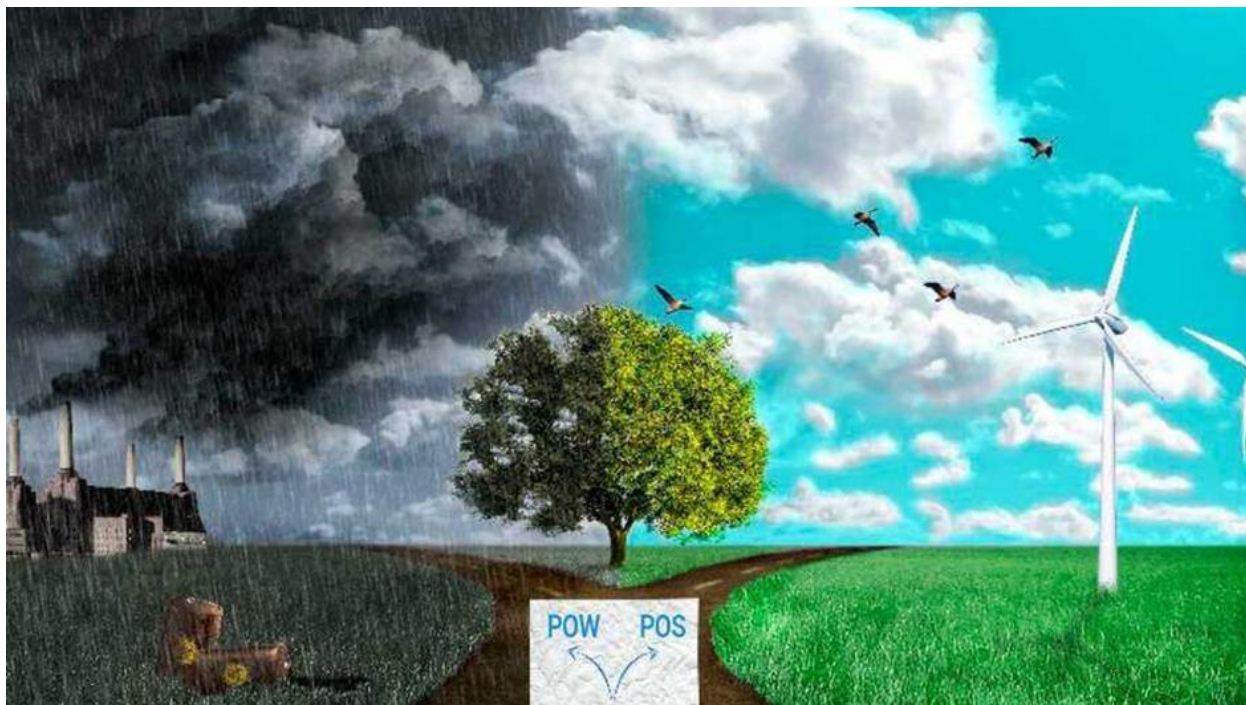


Рисунок 1.5 – Забруднене та оптимальне повітря

Відносна вологість впливає на тепловий обмін організму, стан дихальних шляхів і шкіри. Рекомендовані межі вологості у житлових і робочих приміщеннях зазвичай становлять 40 – 60%. Занадто сухе повітря (нижче 30% вологості) може викликати подразнення слизових оболонок, підвищувати ризик респіраторних

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

захворювань, сприяти накопиченню статичної електрики, занадто вологе (вище 70%) – створює сприятливі умови для плісняви і бактерій.

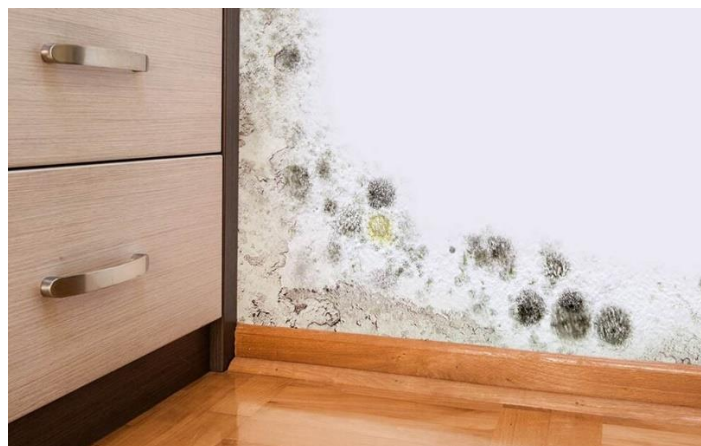


Рисунок 1.6 – Надмірна вологість у приміщенні як джерело утворення шкідливих мікроорганізмів

Кліматичне обладнання, що підтримують оптимальну вологість, дозволяють уникати багатьох проблем зі здоров'ям (сухість очей та шкіри, розвиток грибків) і покращують тепловідчуття, фільтрація повітря зменшує кількість алергенів і шкідливих речовин. Це особливо актуально у міських умовах або на промислових об'єктах. Кіберфізичні кліматичні системи (КФКС) є складними інтегрованими рішеннями, що поєднують фізичні об'єкти (сенсори, виконавчі механізми) з обчислювальними модулями, мережевими інтерфейсами та інтелектуальними алгоритмами керування, надійність та ефективність таких систем критично залежить

від ретельного тестування та валідації, що дає змогу виявити і виправити помилки на всіх етапах життєвого циклу системи.

1.2.1 Основні системи та компоненти для забезпечення мікроклімату

Для підтримання вищевказаних параметрів використовуються комплексні кліматичні системи, що включають: датчики температури, вологості, CO₂, PM_{2.5}/PM₁₀, а також датчики наявності людей (PIR-сенсори) для налаштування роботи обладнання за фактичним навантаженням.

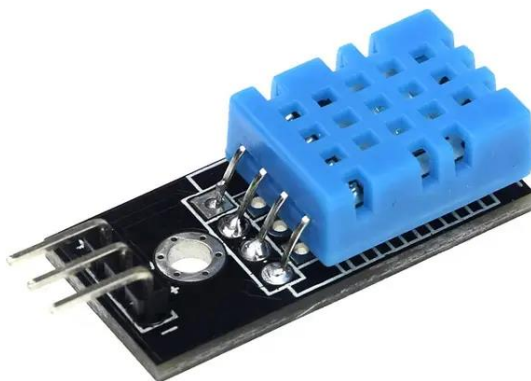


Рисунок 1.7 – Датчик температури вологості DHT11 плата Arduino [24-25]

Сучасні кіберфізичні системи оцінки повітря розробляють із урахуванням можливості розширення функціоналу. Це дозволяє додавати нові сенсори (наприклад, для виявлення летких органічних сполук чи токсичних газів), поєднувати кілька окремих підсистем у єдину мережу (наприклад, у межах розумної будівлі або навіть цілого промислового комплексу), поєднання програмних, апаратних, модельних та експериментальних методів дозволяє комплексно оцінити функціональність і стабільність, мінімізуючи ризики на етапі впровадження, і саме тому тестування та валідація є критичними етапами у розробці кіберфізичної кліматичної системи, що гарантують її надійність, точність і відповідність реальним умовам експлуатації.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.8 – Контролер температури Onnline 3021Rt-Onn Бездротовий програмований AURON3021RT00 [24-25]

Контролери з можливістю під'єднання до локальної мережі чи Інтернету (Ethernet, Wi-Fi, ZigBee), програмовані логічні контролери (PLC) або «розумні» мікроконтролери (ESP32, STM32 тощо). Сучасні інтелектуальні контролери часто об'єднують усе обладнання в єдину мережу, тобто якщо ці системи не синхронізовані, можливе нераціональне витрачання енергії (наприклад, одночасне охолодження й нагрівання повітря).

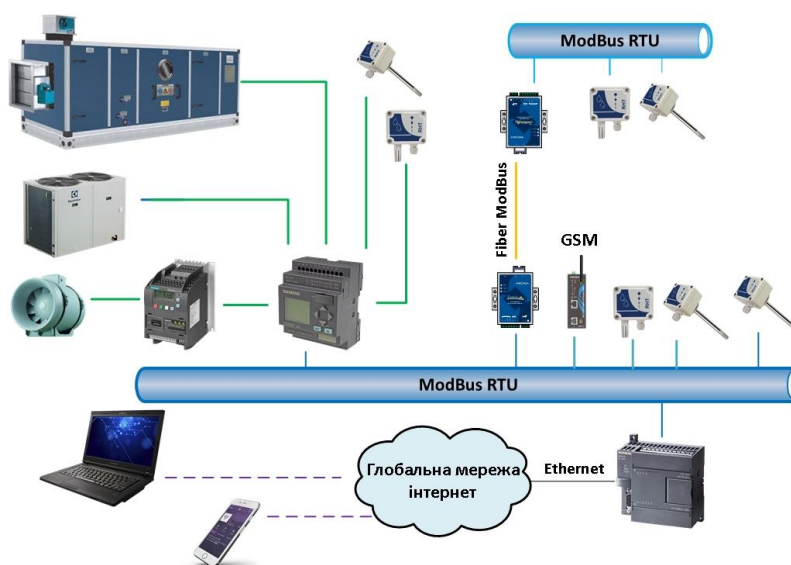


Рисунок 1.9 – Система оповіщення, моніторинг та візуалізація обробки даних промислового кліматичного обладнання

Панелі керування, мобільні додатки, веб-інтерфейси використовують для відстеження поточних параметрів (температура, вологість, якість повітря) та стану обладнання (вмикання, вимкнення, режим роботи). Системи оповіщення (push-повідомлення, SMS, email) про перевищення допустимих значень показників мікроклімату.

Таким чином роль кіберфізичних систем оцінювання чистоти повітря полягає у тому, що кліматична система інтегрує датчики (CO₂, PM_{2.5}, вологість, температуру) з алгоритмами оброблення даних і керуючими пристроями, дозволяє динамічно підтримувати комфортні умови в приміщенні:

1. Збирає дані з датчиків у режимі реального часу.
2. Аналізує показники за допомогою обчислювальних модулів (локально або в хмарі), визначає рівень комфорту й безпеки для людини.
3. Автоматично вносить корективи в роботу опалювальної, вентиляційної, кондиціонувальної техніки.
4. Сповіщає користувачів у разі критичних відхилень (наприклад, різке підвищення рівня CO₂ чи поява високої концентрації пилу).

Таке комплексне рішення робить систему адаптивною, знижує енерговитрати та покращує якість життя в приміщеннях.

1.3 Кіберфізичні системи та їх використання в моніторингу повітря

Кіберфізичні системи (КФС) об'єднують у собі фізичні об'єкти та програмне середовище, які взаємодіють завдяки вбудованим обчислювальним модулям, датчикам, актуаторам та комунікаційним технологіям, такі системи дають змогу збирати та аналізувати дані в режимі реального часу й оперативно реагувати на зміни параметрів навколишнього середовища (повітря), надійність і ефективність таких систем критично залежить від ретельного тестування та валідації, що дає змогу виявити і виправити помилки на всіх етапах життєвого циклу системи.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.10 – Сутність та особливості кіберфізичних систем

Інтеграція фізичних і програмних компонентів КФС поєднують апаратне забезпечення (сенсори, виконавчі механізми, мережеві інтерфейси) з інтелектуальними алгоритмами керування, що працюють на мікроконтролерах, серверах або в хмарних платформах. Таке об'єднання дає змогу:

- збирати та обробляти великі обсяги даних про стан середовища: температура, вологість, вміст CO₂, рівень дрібнодисперсних частинок;
- приймати рішення в реальному часі та надсилати команди виконавчим пристроям (вентиляторам, фільтрам, системам опалення, кондиціонування).

Сучасні кіберфізичні системи розробляють із урахуванням можливості розширення функціоналу. Це дозволяє додавати нові сенсори (наприклад, для виявлення летких органічних сполук чи токсичних газів), поєднувати кілька окремих підсистем у єдину мережу (наприклад, у межах розумної будівлі або навіть цілого промислового комплексу). Специфіка кіберфізичних систем полягає у тісній інтеграції фізичних процесів з обчислювальними компонентами, що вимагає комплексного підходу до тестування, зумовлює перевірку відповідності функціональним і нефункціональним вимогам, виявлення помилок у логіці керування, комунікаціях, обробці даних, оцінка адаптивності системи до зовнішніх

змін мікроклімату, підтвердження стійкості й безпеки в умовах нестабільної або агресивної зовнішньої дії, гарантування ефективності.



Рисунок 1.11 – Модульність та масштабованість КФС дозволяють прогнозувати та вирішувати складні інженерно-технічні задачі в області роботи кліматичних систем та оцінки та якості чистоти повітря у приміщеннях

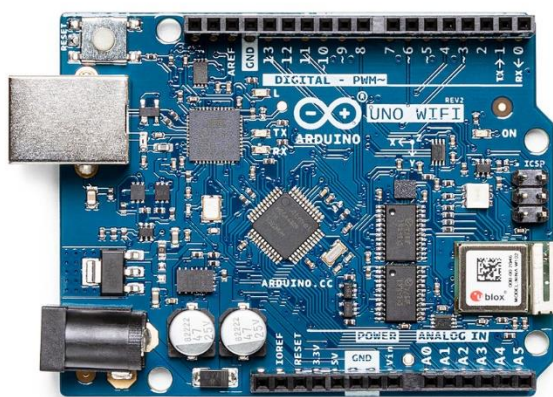
Використання мережевих технологій це передача даних між компонентами кіберфізичної системи (від сенсорів до аналітичних серверів, від сервера до виконавчих блоків) здійснюється через: дротові мережі (Ethernet), бездротові протоколи: Wi-Fi, Bluetooth Low Energy, ZigBee, LoRaWAN; вибір технології залежить від відстані передачі, необхідної швидкості зв'язку, обсягів даних і вимог до енергоефективності. Кіберфізичні кліматичні системи мають ряд специфічних характеристик, які ускладнюють тестування, зокрема: динамічний і нелінійний характер фізичних процесів (теплообмін, вологість, CO₂), моніторинг та передача даних, система має реагувати на зміни швидко і точно, а взаємодія з фізичним середовищем, яке важко змодельовати повністю та паралельна обробка даних, візуалізація, багатозадачність і асинхронна комунікація, коштовна вартість помилок в секторі використання системи (наприклад, в аграрному чи фармацевтичному секторі).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.12 – Архітектура кіберфізичної системи моніторингу повітря: а) та б) Сенсори для вимірювання температури, вологості, в) Плата ARDUINO UNO WiFi [24-25]; г) Плата ESP32 NodeMCU [26]

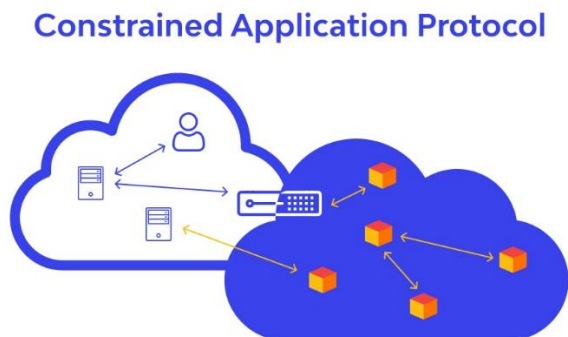
Алгоритми кіберфізичних систем можуть базуватися на евристичних правилах (наприклад, якщо рівень CO₂ перевищує 1000 ppm – збільшити потужність вентиляції), методах штучного інтелекту (машинне навчання, нейронні мережі), які дають змогу прогнозувати зміни параметрів повітря та оптимально керувати обладнанням, підлаштовуючись до патернів поведінки користувачів або погодних умов. На рівені сенсорів та збору даних використовують сенсори для вимірювання температури, вологості, CO₂, твердих частинок PM_{2.5}, PM₁₀, летких органічних

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

сполук (ЛОС) тощо та мікроконтролери (Arduino, ESP32, STM32) або інші «edge»-пристрої, що виконують початкове збирання даних, базову обробку (фільтрація шумів, калібрування) і передають інформацію на вищі рівні.



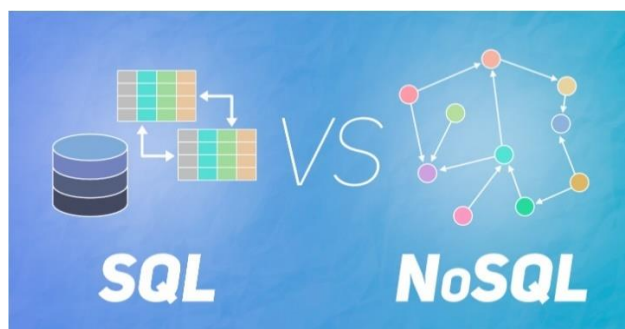
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.13 – Комунікаційний рівень: а) Мережеві шлюзи; б) протокол CoAP; Рівень обробки та зберігання даних: в) Локальні сервери або «хмара» (AWS, Microsoft Azure, Google Cloud); г) Бази даних (SQL, NoSQL) для тривалого збереження та швидкого доступу до інформації

Комунікаційний рівень реалізований через мережеві шлюзи (Gateways) для бездротових сенсорних вузлів, які об'єднують кілька каналів зв'язку в єдину мережу, протоколи (MQTT, HTTP/REST, CoAP) для обміну даними з центральним сервером або хмарним сервісом. Рівень обробки та зберігання даних використовує

локальні сервери або «хмара» (AWS, Microsoft Azure, Google Cloud), де здійснюється глибокий аналіз даних, архівація показників і формування звітів та бази даних (SQL, NoSQL) для тривалого збереження та швидкого доступу до інформації.



Рисунок 1.14 – Використання кіберфізичних систем для моніторингу повітря:
інтерфейс середовища Grafana [30]

Рівень керування й візуалізації об'єднує програмні додатки й веб-інтерфейси для відстеження поточних показників, налаштувань, історії змін.



Рисунок 1.15 – Інтерфейс середовища Kibana [31]

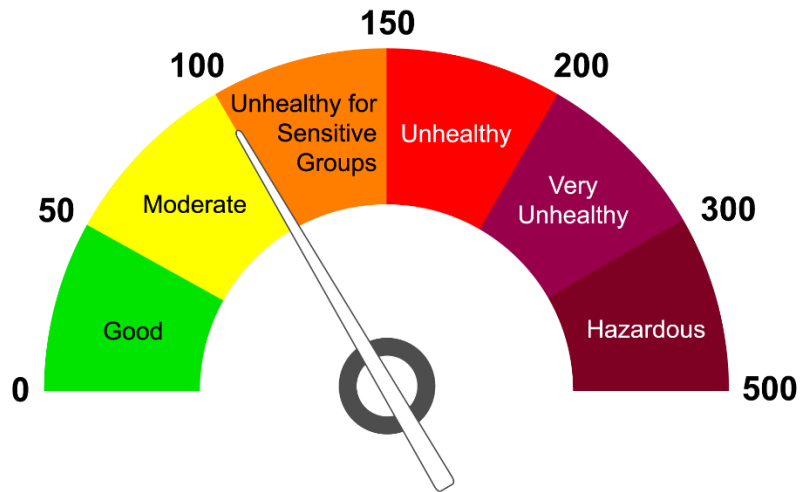


Рисунок 1.17 – Air Quality Index метод оцінки чистоти повітря [33]

Математичні та статистичні методи оцінюють рівень чистоти повітря, обчислюють комплексні індекси (наприклад, AQI – Air Quality Index), алгоритми машинного навчання можуть передбачати, коли якість повітря почне погіршуватися (наприклад, під час збільшення кількості людей у приміщенні), завчасно вмикаючи вентиляцію чи інші пристрої.

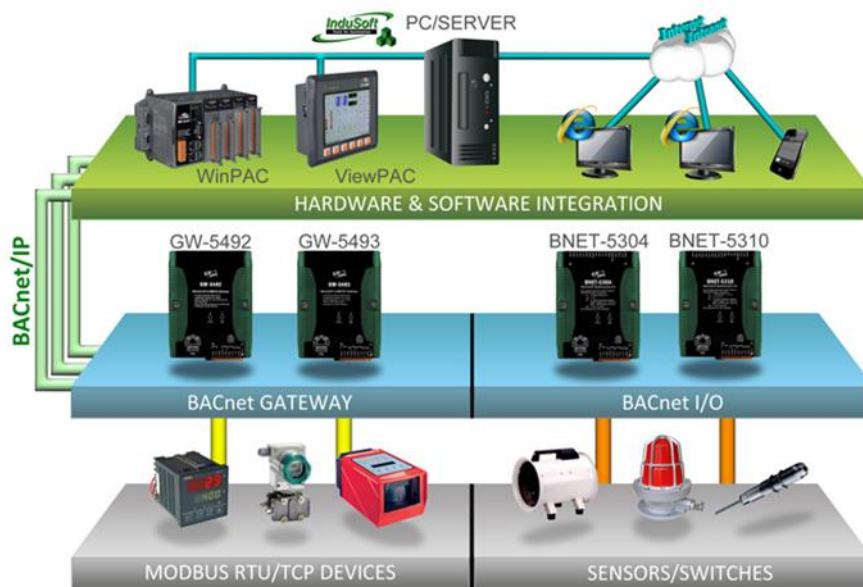


Рисунок 1.18 – Будівельна система BACnet

Автоматичне регулювання клімату: на основі проаналізованих даних система автоматично вмикає або вимикає вентиляційні установки, нагрівачі, очищувачі повітря, зволожувачі тощо.

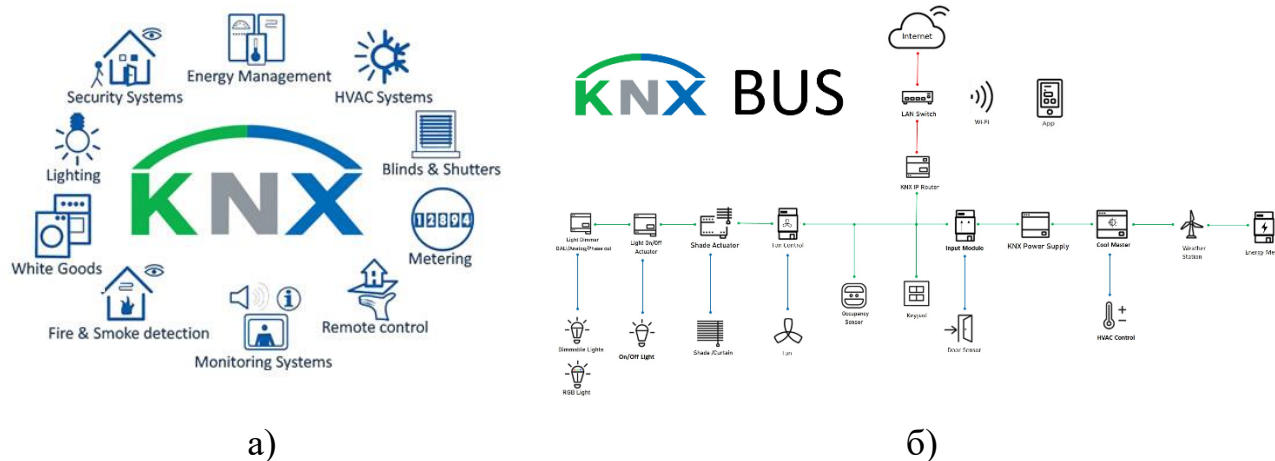


Рисунок 1.19 – Будівельні системи KNX та KNX BUS [34]

Інтеграція з «розумними» будівельними системами (BACnet, KNX тощо) забезпечує глобальний контроль: якщо перевищено рівень CO₂, система збільшує подачу свіжого повітря, одночасно коригуючи температуру, щоб уникнути різких перепадів.

Переваги та виклики при впровадженні кіберфізичних систем у моніторингу повітря формують точність і оперативність. Цифрові датчики забезпечують високу роздільну здатність вимірювань, а миттєва передача даних дозволяє швидко реагувати на зміни. Енергоефективність. Завдяки інтелектуальному управлінню обладнанням (вентиляцією, кондиціонерами) система працює лише за потреби, що скорочує споживання енергії. Масштабованість. Можливість додавати нові сенсори та вузли без радикальної перебудови всієї системи. Прозорість даних та аналітика. Користувачі отримують історичні записи, можливість проводити комплексний аналіз та виявляти довгострокові тенденції. Безпека та конфіденційність. Дані про навколишнє середовище та режим роботи обладнання мають захищатися від несанкціонованого доступу. Надійність зв'язку. Особливо у великих будівлях або

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
						21

промислових зонах, де можливі перепони для бездротового сигналу чи електромагнітні завади. Точність і калібрування сенсорів. Датчики можуть з часом втрачати точність, тож потрібна регулярна калібрування або використання еталонних методик перевірки. Вартість впровадження. Потрібно оцінити баланс між інвестиціями в систему та очікуваними перевагами (зокрема економією ресурсів, покращенням здоров'я та продуктивності людей):

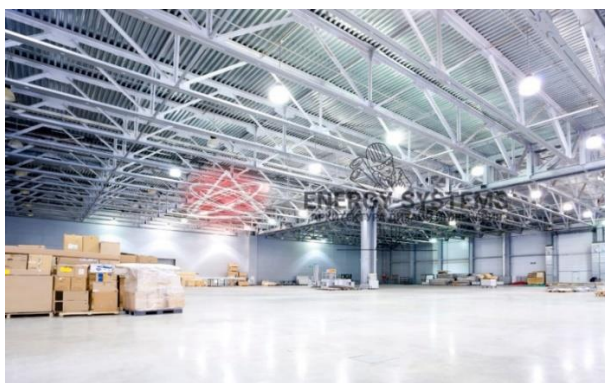
Якщо усі робочі приміщення оснащені сенсорами CO₂, температури, вологості, а також присутності людей, система динамічно регулює інтенсивність вентиляції, кондиціонування і навіть освітлення залежно від кількості персоналу та якості повітря.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.20 – Приклади реалізації кіберфізичних систем моніторингу повітря : «розумні» офіси, навчальні заклади, виробничі приміщення, житлові будинки

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кіберфізичні системи слідкують за шкідливими викидами, рівнями пилю, газів на підприємствах. При спрацьовуванні сенсорів зафіксовані дані потрапляють у центральну систему, яка вмикає додаткові фільтри, витяжки або зупиняє обладнання для запобігання аваріям.

1.4 Висновки до першого розділу

У межах розділу 1 проведено аналіз пов'язаних із тематикою моніторингу якості повітря всередині приміщень, а також ключові аспекти побудови кіберфізичних систем. Проведено огляд і аналіз існуючих сенсорів та апаратних платформ, обговорено протоколи зв'язку та хмарні сервіси, а також наведено варіанти методів обробки. Особливу увагу приділено промисловим і комерційним рішенням, які вже існують на ринку, та виявлено їхні обмеження.

Отже, огляд літератури свідчить, що тема розроблення кіберфізичної системи оцінювання чистоти повітря у приміщенні є актуальною та має значний потенціал для подальших досліджень і впроваджень. На основі виявлених недоліків існуючих рішень обґрунтовується доцільність розроблення нової системи з урахуванням таких факторів, як відкритість, гнучкість і низька собівартість:

1. Сучасні системи опалення, вентиляції та кондиціонування (ОВК) є складними технологічними рішеннями, які спрямовані на підтримання комфортного мікроклімату в приміщеннях. Вони поєднують у собі кілька важливих функцій: регулювання температури, контроль вологості, забезпечення належного обміну повітря й очищення від шкідливих домішок.

2. Ефективність сучасних ОВК-систем значною мірою визначається двома ключовими параметрами: енергоефективністю (прагнення до мінімізації тепловтрат та невиправданих витрат енергії) та автоматизованим керуванням (застосування «розумних» контролерів і сенсорів).

3. Зростання кількості будівель, що відповідають «зеленим» стандартам (LEED, BREEAM), стимулює впровадження систем із рекуперацією тепла,

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мультиспліт- та VRF-рішень, теплових насосів та інших технологій, які зменшують негативний вплив на довкілля.

4. Успіх у досягненні стабільної якості повітря залежить не лише від потужності встановлених пристроїв, але й від їх узгодженої роботи та наявності ефективного зворотного зв'язку зі сторонами, що впливають на мікроклімат (зокрема, від кількості людей у приміщенні, рівня забруднення зовнішнього повітря тощо).

5. Інтеграція датчиків забруднень (CO₂, ЛОС, твердих частинок тощо) із засобами керування вентиляцією та кондиціонуванням дає змогу вчасно виявляти погіршення параметрів повітря і автоматично вмикати посилений режим очищення або провітрювання. Це сприяє створенню більш здорового, безпечного та комфортного середовища.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

2 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ

2.1 Аналіз вимог та постановка технічних завдань

Проєктування програмно-технічного засобу (ПТЗ) у межах розроблення кіберфізичної системи оцінювання чистоти повітря у приміщенні є одним із ключових етапів. Він передбачає визначення структури апаратних компонентів, вибір сенсорів, розроблення алгоритмів обробки даних та інтеграцію з відповідними програмними модулями для автоматизованого керування мікрокліматом.

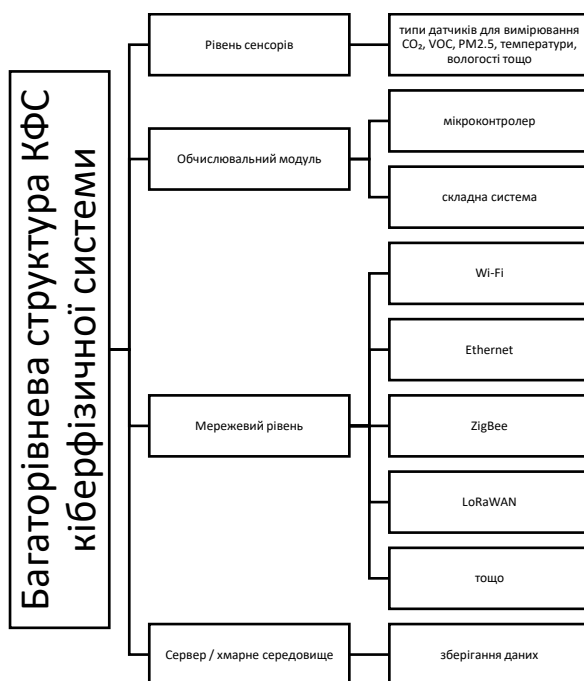


Рисунок 2.1 – Блок схема розроблюваної кіберфізичної системи (КФС)

Для розроблюваної кіберфізичної системи (КФС) доцільно визначити таку багаторівневу структуру:

- рівень сенсорів (типи датчиків для вимірювання CO₂, VOC, PM_{2.5}, температури, вологості тощо). На цьому рівні відбувається первинний збір сигналів та перетворення їх у цифрову форму;

– обчислювальний модуль (мікроконтролер чи складна система). Він виконує початкову обробку даних (фільтрацію, нормалізацію), а також комунікує з мережею. У разі необхідності мікроконтролер може передавати дані безпосередньо на сервер чи хмару;

– мережевий рівень (Wi-Fi, Ethernet, ZigBee, LoRaWAN тощо). Забезпечує канали зв'язку між «польовими» пристроями (мікроконтролерами, сенсорами) та серверною або хмарною інфраструктурою;

– сервер / хмарне середовище. Тут зберігаються великі обсяги даних, виконується більш складний аналіз (наприклад, зіставлення з референсними даними, машинне навчання), формуються сповіщення.

Інтерфейс замовника (клієнта) це веб- або мобільний застосунок, де користувачі можуть переглядати поточні та історичні дані, отримувати повідомлення про критичні значення показників, а також налаштовувати параметри системи (періодичність вимірювань, порогові значення тощо).

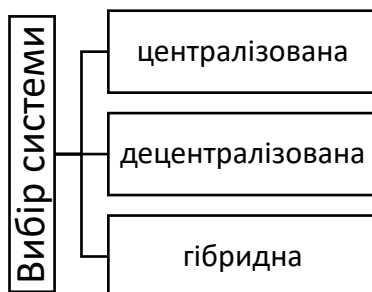


Рисунок 2.2 – Блок схема вибір системи та їх особливості

Для вирішення задачі контролю якості повітря в приміщенні розробники та виробники кліматичного обладнання часто обирають гібридну топологію, оскільки сенсорів може бути кілька, вони розміщені в різних зонах. Попередня обробка даних виконується локально, а детальний аналіз і зберігання виконується – на сервері/у хмарі. Прогнозування тих чи інших параметрів роботи системи залежить від

характеру швидкості та зміни клімату, шуму, навантажень та технічних обмежень системи.

Особливості та принципи роботи систем полягають:

– централізована: усі сенсори передають дані одному обчислювальному вузлу (контролеру або серверу), де відбувається основна обробка. Переваги: проста реалізація, легше адміністрування. Недоліки: підвищене навантаження на центральний вузол, ризики уразливості в разі відмови однієї точки;

– децентралізована (або розподілена): кожен сенсорний вузол має власні обчислювальні ресурси, може локально зберігати чи попередньо обробляти дані й обмінюватися інформацією з іншими вузлами. Переваги: вища відмовостійкість, зниження навантаження на окремі вузли. Недоліки: складніша розробка та керування;

– гібридна: частина процесів виконується локально на мікроконтролерах (наприклад, фільтрація, формування середніх значень), а узагальнена обробка та зберігання – на сервері або у хмарі. Цей підхід поєднує переваги обох варіантів, зазвичай найпоширеніший для IoT-рішень.



Рисунок 2.3 – Блок схема вихідні дані проектування кіберфізичної системи

Алгоритми розрахунку інтегральних показників чистоти повітря AQI (Air Quality Index): найчастіше використовується для оцінки якості атмосфери у містах, але може бути адаптований під внутрішні середовища. Він агрегує кілька показників (PM2.5, PM10, CO, O₃, тощо), водночас IAQ (Indoor Air Quality): розроблений спеціально для внутрішніх приміщень, може включати CO₂, VOC, PM2.5, температуру й вологість. Інтегральний показник часто обчислюється за формулами, що визначені регуляторними органами або виробниками сенсорів. Крім того, власні евристичні алгоритми: на основі вагових коефіцієнтів для кожного типу сенсора. Наприклад, можна задати, що CO₂ має найбільший вплив, VOC – середній, а відносна вологість – менший.

Порогові значення, система сповіщень для кожного з параметрів (CO₂, VOC, PM2.5 тощо) визначаються порогові рівні «норма», «помірне перевищення», «небезпечне перевищення». Система надає сповіщення через інтерфейс чи мобільний додаток (push-нотифікації, email) при фіксації перевищення порогу.

Можлива реалізація автоматичного керування (включення вентиляції, відкриття клапанів) залежно від сценаріїв використання. Взаємодія між компонентами: мікропрограма (firmware) реалізована через серверну складову, базу даних, інтерфейс користувача. Мікропрограма (firmware): безпосередньо «розуміє» протоколи роботи з сенсорами, виконує початкову обробку (фільтрація, калібрування), передає результат на сервер або локально зберігає дані. Серверна частина: може реалізовуватися на локальному сервері (Raspberry Pi, ПК) чи у хмарному середовищі (AWS, Google Cloud). Крім того, система передбачає зберігання даних у БД (SQL/NoSQL), додаткова аналітика (обчислення інтегральних індексів, виявлення аномалій), взаємодія зі сторонніми сервісами (наприклад, відправка повідомлень, інтеграція з «розумним будинком»);

База даних: повинна забезпечувати надійне зберігання й оперативний доступ до даних у режимі реального часу. Якщо потрібна гнучкість, можна

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувати реляційну СУБД (MySQL, PostgreSQL) або NoSQL-рішення (MongoDB, InfluxDB) для часових рядів.

Інтерфейс користувача: веб-застосунок або мобільний додаток, що відображає дані у вигляді графіків, діаграм і стану системи. Користувач може переглядати історію вимірювань, змінювати налаштування порогів тощо.

Забезпечення безпеки та цілісності даних через шифрування дані, що передаються мережею, бажано захищати протоколами TLS/SSL (на рівні MQTT over SSL, HTTPS тощо), аутентифікація та авторизація: доступ до серверної частини чи хмарного сервісу повинен бути захищений (API-ключі, JSON Web Token), резервне копіювання: регулярний бекап бази даних для уникнення втрат у випадку збою, обмеження доступу та ролі: адміністративні права, права перегляду чи редагування налаштувань.

Для кіберфізичної системи, що збирає потенційно чутливі (з точки зору персональних чи комерційних даних) показники, важливо інтегрувати механізми безпеки на всіх етапах – від сенсора до хмарного середовища.

2.1.1 Загальні вимоги до системи

При проєктуванні кіберфізичної системи очищення повітря враховується безліч факторів, на основі яких створюється унікальна технологічна схема обладнання, передумовою є детальний аналіз параметрів приміщення або зони обслуговування, саме тому умови утворення технологічної схеми кліматичного обладнання визначаються комплексом технічних, економічних та експлуатаційних факторів. На основі аналізу потреб обирається тип системи, вибір залежить від площі об'єкта, функціонального призначення та бюджетних обмежень, враховуються енергоефективність, надійність, можливості регулювання та сумісність компонентів.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

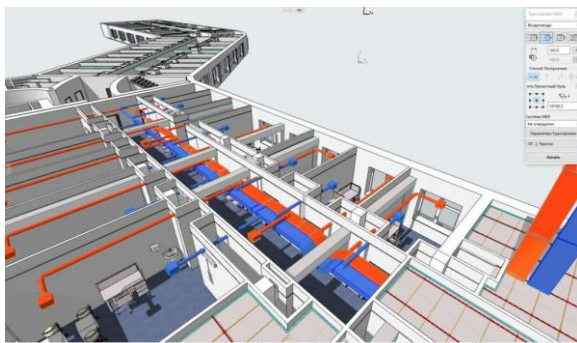
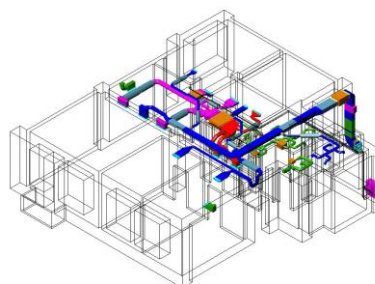
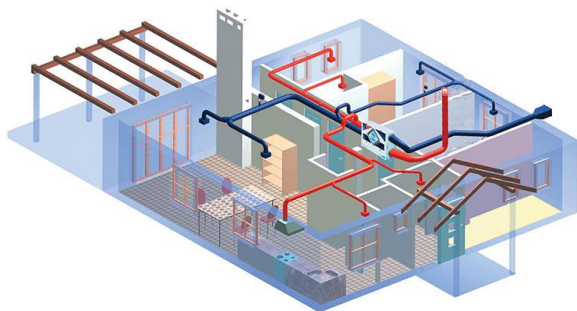


Рисунок 2.4 – Приклад візуалізації технологічної схеми системи вентиляції

У кожному унікальному проєкті використовується свій індивідуальний підхід, який враховує всі конструктивні особливості та призначення будівлі.

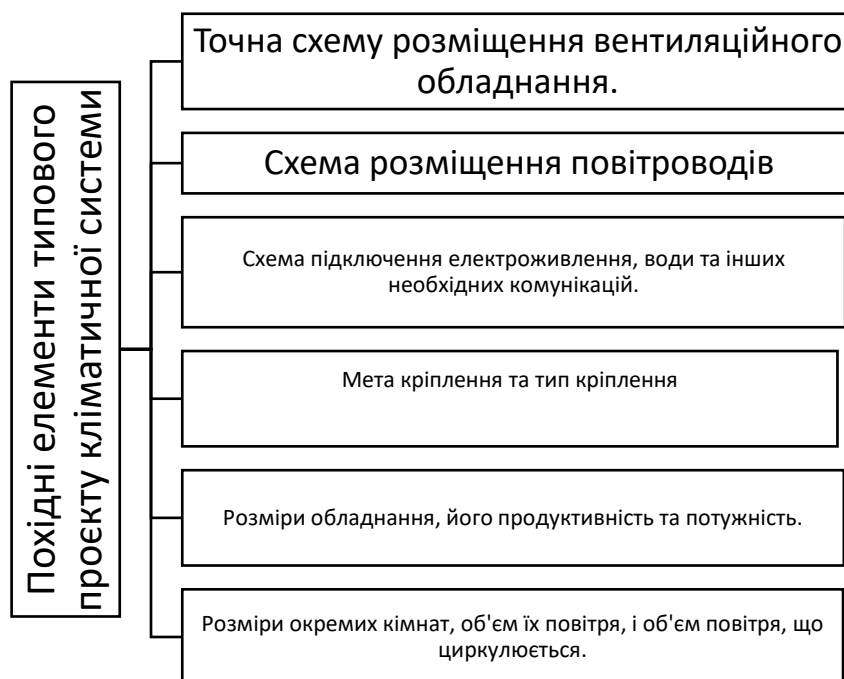


Рисунок 2.5 – Блок схема вхідних даних необхідних для проєктування кіберфізичної системи

Типовий проєкт включає точну модель всієї кіберфізичної системи очищення повітря, дозволяючи візуалізувати її і зрозуміти принцип її роботи. Обґрунтування вибору системи (точність обробки даних, вартість, доступність) полягає через визначення ключових параметрів роботи системи, перед початком вибору датчиків слід точно визначити, які параметри якості повітря потрібно вимірювати (CO₂, VOC, PM_{2.5}, температура, вологість, тиск та ін.).

Безперервний моніторинг якості повітря: система має фіксувати показники (CO₂, PM_{2.5}, вологість, температура та ін.) в реальному часі. Адаптивна реакція системи полягає: у разі відхилення будь-якого параметра від норми – здійснення відповідних керувальних дій (збільшення/зменшення інтенсивності вентиляції, вмикання очищувачів повітря, зволожувачів тощо).

Програмно-апаратний засіб відстеження показників якості повітря

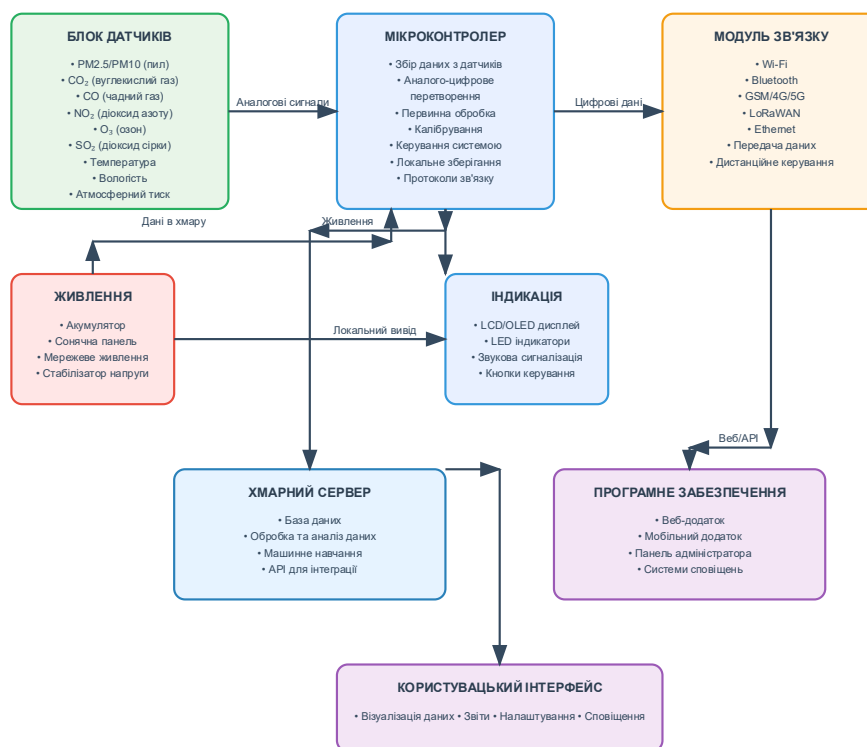


Рисунок 2.6- Узагальнена структурна схема програмно-апаратного засобу відстеження показників якості повітря

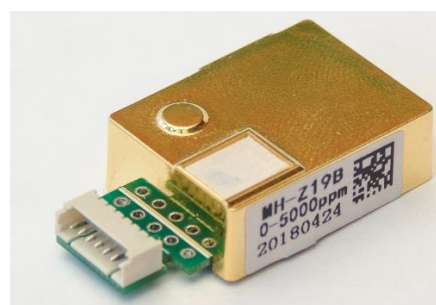
Призначення будівлі та кількість персоналу	Тип будівлі та її розташування	Конструктивні особливості будівлі
Важливий показник, це технічне призначення будівлі та кількість працівників, що працюють в ньому. Система вентиляції повинна відповідати технічному завданню, і повністю забезпечувати необхідні параметри циркуляції повітря, а якщо система включає режими опалення та кондиціонування, то і зберігати задані параметри повітря в мінімальне та пікове навантаження.	Площа будівлі, наявність панорамних вікон, утеплення, поверховість, матеріал стін тощо, визначають тип та потужність вентиляційної системи, яка буде максимально ефективною у тому чи іншому випадку. Також варто звертати увагу на розташування будівлі, південна сторона буде гріється сильніше ніж північна, а наявність постійної тіні дозволить економити на кондиціонуванні, але при цьому збільшаться витрати в зимовий період.	Кожна будівля унікальна, і система вентиляції для неї також має бути індивідуальною. До особливостей конструкції та плану будівлі відноситься наявність спеціальних приміщень, що потребують особливої системи вентиляції, наприклад: кімната для куріння в офісі, спортивний зал, басейн у школі або університеті, лабораторні зони в медичних установах тощо.

Таблиця 2.1 – Основні параметри будівлі як основного елемента кліматичної кіберфізичної системи [35]

Можливість підключення додаткових сенсорів або модулів керування (наприклад, для контролю формальдегіду, CO, аналізу рівня ЛОС). Стійкість до збоїв, захист від несанкціонованого доступу, коректне функціонування навіть у разі нестабільного зв'язку між компонентами.



а)



б)



в)

Рисунок 2.7 – NDIR-сенсори: SCD30; MH-Z19; Senseair S8 [26]

CO₂-датчик: наприклад, NDIR-сенсори (SCD30, MH-Z19, Senseair S8). Вони надають кращу точність вимірювання CO₂ в діапазоні 0–5000 ppm і мають мінімальну довгострокову похибку.



а)

б)

Рисунок 2.8 – VOC-датчики: CCS811 та SGP30 [26]

VOC-датчик: можна обрати CCS811, SGP30 чи аналоги, надають узагальнене значення TVOC, що відображає рівень летких органічних сполук.
 PM2.5-датчик (пилові сенсори): зазвичай використовуються SDS011, PMS7003 або SPS30 (лазерні типи) точно вимірюють концентрацію частинок пилу діаметром 2.5 мкм.



а)

б)

в)

Рисунок 2.9 – PM2.5-датчик (пилові сенсори): SDS011; PMS7003 та SPS30 [26]

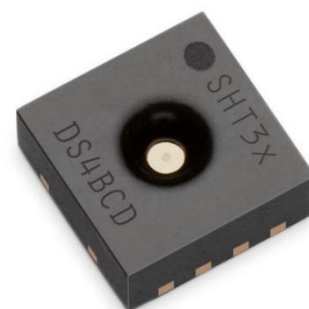
Датчик температури/вологості: з популярних можна навести BME280, DHT22, SHT31. Їх вибір залежить від допустимої похибки та необхідної стабільності.



а)



б)



в)

Рисунок 2.10 – Датчик температури/вологості: BME280; DHT22 та SHT31 [26]

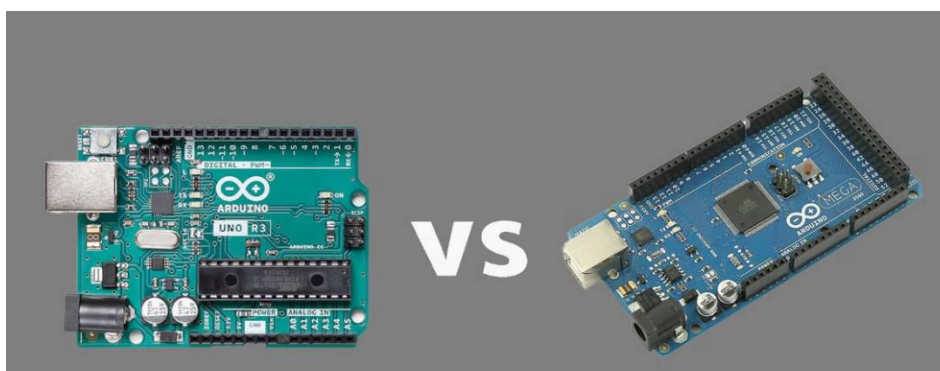


Рисунок 2.10 – Плата мікроконтролера Arduino UNO/Mega [26]

Arduino UNO/Mega – простий у використанні, величезна спільнота, але обмежена пам'ять і відсутність вбудованої мережевої взаємодії (Wi-Fi/Bluetooth).

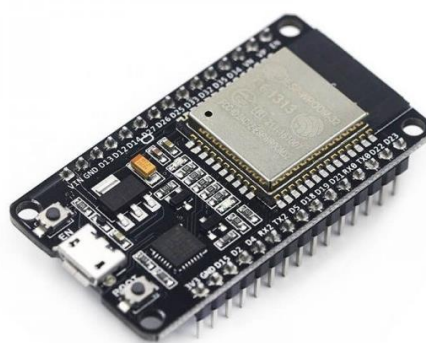


Рисунок 2.11 – Плата мікроконтролера ESP32 [26]

ESP32 – вбудований Wi-Fi і Bluetooth, достатній обсяг оперативної пам'яті для нескладних обчислень, енергоефективність. Дуже популярний для IoT-проектів.



Рисунок 2.12 – Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4 [26]

Raspberry Pi – одноплатний комп'ютер із повноцінною операційною системою (Linux). Підходить, якщо потрібен складний аналіз даних або інтегрований веб-сервер, але порівняно більш енерговитратний.

При виборі слід зважати на похибку, цінову категорію, наявність та доступність компонентів.

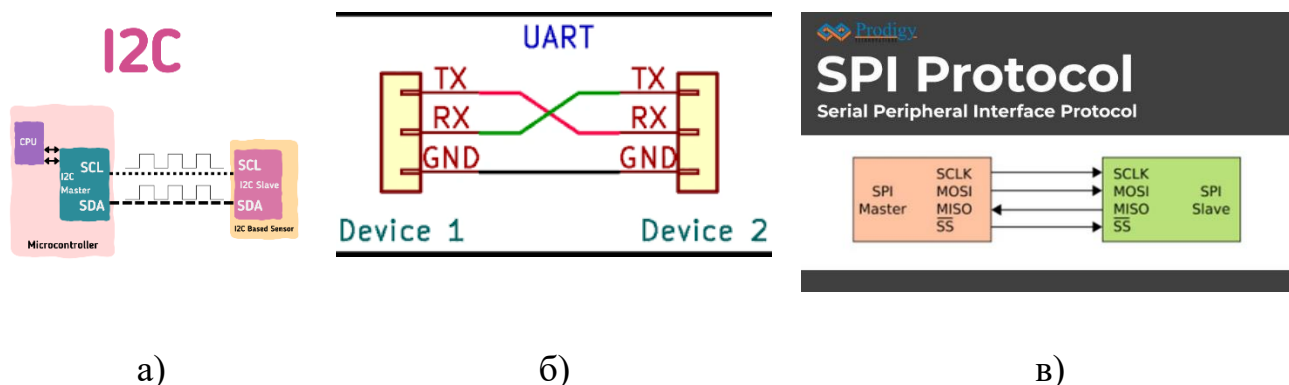


Рисунок 2.13 – Схема підключення компонентів: I²C, UART, SPI [26]

Враховуємо всі сенсори і показуємо, який інтерфейс зв'язку вони використовують (I²C, UART, SPI, аналоговий вихід тощо). Наприклад, BME280 і CCS811 зазвичай працюють через інтерфейс I²C, SDS011 – через UART, MH-Z19 –

через UART або PWM. При використанні ESP32 усі ці датчики можна під'єднати паралельно (I²C) або через окремі GPIO, але треба зважати на логічні рівні напруги та живлення (3.3 В vs 5 В).

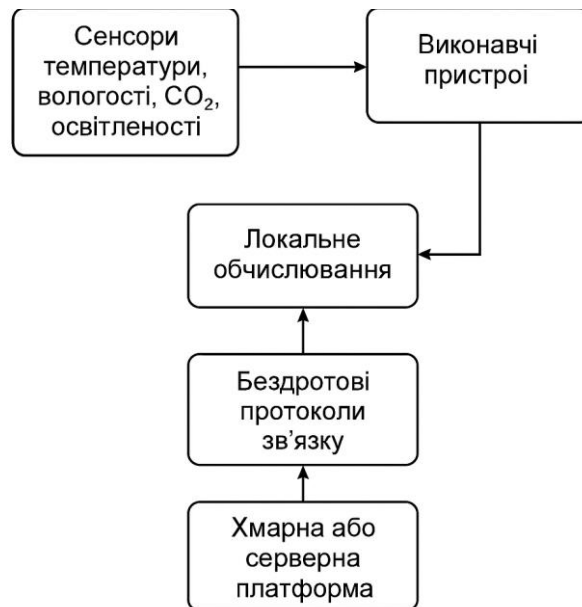


Рисунок 2.14 – Типова схема розташування компонентів кліматичної системи

Таким чином можна навести принципову схему типової кліматичної системи, де вказано мікроконтролер, сенсор із відповідними входами/виходами, модуль живлення та додаткові компоненти (резистори на I²C, стабілізатори напруги), тощо, у роботі планується розглянути особливості розташування датчиків: (сенсори CO₂, VOC і пилу) бажано розміщувати в зоні з достатнім повітрообміном, не закривати їх вентиляційні отвори. Датчик температури/вологості не можна ставити надто близько до нагрівальних елементів (сам мікроконтролер, регулятори живлення), адже це буде впливати на коректність та правильність показників.

2.1.2 Апаратні та програмні вимоги

Запропонована схема представляє комплексний підхід до визначення апаратних вимог для кліматичної установки, забезпечуючи надійну та ефективну

роботу системи з можливістю масштабування та інтеграції з іншими системами автоматизації будівлі. Система дозволяє автоматизувати і контролювати майже всі важливі функції приміщення. Автоматизована система керування дозволяє в умовах потреб, що збільшуються, оптимізувати споживання енергоресурсів, забезпечити достовірність даних, збільшити комфорт за рахунок інформування та автоматичного управління пристроями (ресурсами). В основі системи знаходиться програмований контролер, є змога створювати системи з великим ступенем взаємодії датчиків та виконавчих пристроїв.

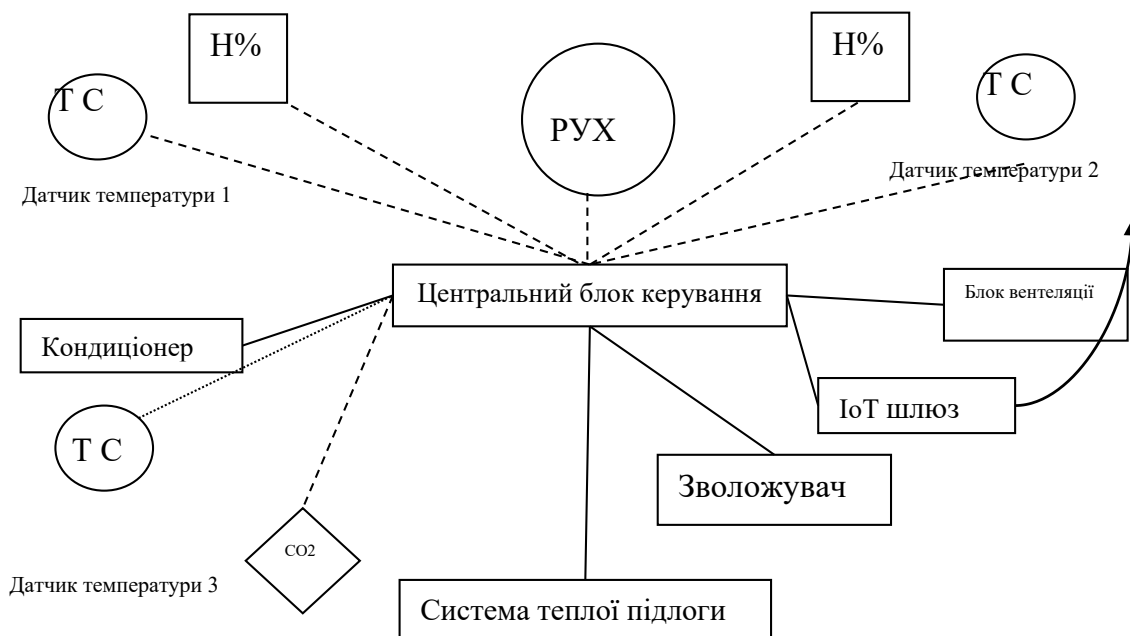


Рисунок 2.15 – Типова схема розташування апаратних компонентів кліматичної системи

Використання сенсорів із прийнятною точністю, низьким енергоспоживанням і стабільними показами впродовж тривалого часу надає:

- забезпечення резервного живлення (наприклад, акумулятора) або надійної системи перепідключення у разі перебоїв електроенергії (за потреби);
- наявність (чи можливість додавання) мережевого модуля (Wi-Fi, Ethernet, ZigBee, LoRaWAN або ін.) для зв'язку з сервером чи хмарним сервісом.

Програмні вимоги :

1. Умови експлуатації системи:

- Робоча температура: 0...+50°C
- Відносна вологість: 5-95% RH
- Ступінь захисту: IP54 (захист від пилу та бризок) або IP65 (повний захист від пилу та струменів води)

2. Надійність і безпека:

- MTBF (середній час між відмовами): не менше 50,000 годин
- Сертифікація: ISO, CE, UL
- Резервування: N+1 (для критичних компонентів)

3. Інтеграція

- Хмарні сервіси: підтримка протоколів MQTT, AMQP, REST API

4. Класифікація обладнання залежно від вимог та бюджету система може бути скомплектована на різних рівнях:

- Premium - максимальна надійність та функціональність
- Standard - збалансовані характеристики
- Economy - базовий функціонал
- Custom - спеціалізоване рішення під конкретні вимоги

5. Термін служби:

- Розрахунковий термін експлуатації: 10+ років
- Режим роботи: 24/7 (цілодобовий)
- Гарантійний термін: 2-5 років залежно від компонентів

Крім того варто враховувати:

- локальна обробка первинних даних (калібрування сенсорів, фільтрація аномальних значень);
- зберігання та відправлення даних у центральну базу для довготривалої аналітики;

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- реалізація інтелектуальних алгоритмів (евристичних, на основі машинного навчання, тощо) для прийняття рішень щодо коригування мікроклімату;
- Інтерфейс для налаштування системи та візуалізації даних, у т.ч. через веб- або мобільний додаток.

2.2 Архітектура програмно-технічного засобу

Перевірка працездатності усієї системи в режимі реального часу:

1. Комплексне складання (збірка системи): з'єднати мікроконтролер із датчиками та перевірити, чи правильно ініціалізуються всі сенсори, чи немає конфліктів адрес на шині I²C або помилок з UART.
2. Запуск серверної частини: налаштувати сервер (локальний чи хмарний), створити базу даних, запустити відповідні служби (MQTT broker, веб-сервер).
3. Перевірка інтерфейсу: за допомогою браузера чи мобільного застосунку підключитися до сервера, відобразити реальні дані в реальному часі.

Тестові сценарії (штучне підвищення CO₂, зміна вологості, поява ЛОС тощо):

1. CO₂: можна продихати біля датчика або піднести джерело CO₂ (наприклад, сухий лід), спостерігати, як зростає значення.
2. Вологість: поставити датчик у середовище з підвищеною вологістю (поруч зі зволожувачем повітря) й перевірити зміну показників.
3. VOC: піднести до датчика побутові хімічні засоби або спирт, щоб імітувати зростання ЛОС.
4. Пил: використовувати трохи тальку або «димовий тест», щоб перевірити реакцію PM-сенсора.

Налаштування алгоритмів аналізу даних:

- оптимізація частоти опитування: занадто часте опитування може збільшити навантаження, а надто рідке – знизити актуальність даних;

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		
						39

– калібрування: деякі NDIR-датчики CO₂ (наприклад, MH-Z19) мають функцію автокалібрування, яка враховує «базовий» рівень CO₂ у чистому повітрі. Необхідно перевірити, що ця функція налаштована коректно;

– коригувальні коефіцієнти: у разі необхідності можна внести правки, якщо є відомі систематичні зміщення показів датчиків (наприклад, порівняно з еталонними приладами).

Вибір енергоефективних компонентів:

– перевага надається мікроконтролерам із низьким споживанням енергії (ESP32, STM32 Low Power) та датчикам, які переходять у сплячі режими. Це знижує загальні витрати електроенергії.

Раціональне використання матеріалів:

– використовувати багаторазові макетні плати, роз'ємні з'єднання тощо, щоб уникнути надмірних витрат матеріалів.

Тривалий цикл експлуатації:

– якісні компоненти (сенсори, роз'єми, блоки живлення) від надійних виробників слугуватимуть довше, зменшуючи кількість відходів та потребу у частій заміні;

– використання екологічно безпечних припоїв та флюсів (наприклад, безсвинцеві припої згідно зі стандартами RoHS).

2.21 Рівень сенсорів (Sensor Layer)

Сенсорний шар відповідає за збирання та оцифрування сигналу. Кожний сенсор може бути під'єднаний до мікроконтролера чи надавати дані у форматі I²C, UART, SPI, залежно від конкретної моделі.

1. Датчики CO₂: наприклад, MH-Z19B або SenseAir S8 із вбудованою компенсацією температури та вологості.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Датчики дрібнодисперсних частинок (PM_{2.5}/PM₁₀): типу PMS7003, SDS011 чи аналогічні модулі.
3. Датчики температури та вологості: DHT22 (AM2302) або SHT3x, BME280 із кращою точністю.
4. Датчики летких органічних сполук (ЛОС): наприклад, CCS811, SGP30.

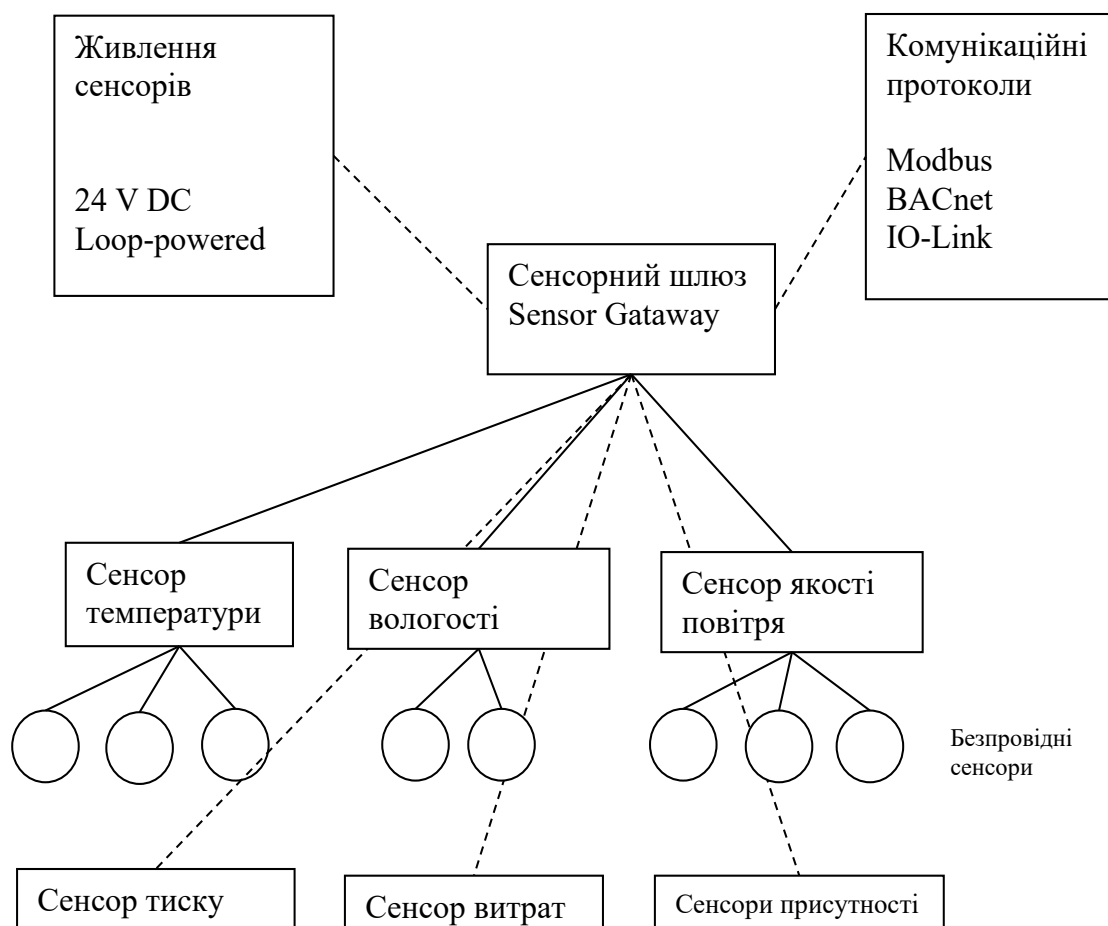


Рисунок 2.16 – Структурна схема рівень сенсорів (Sensor Layer) для кліматичної установки

2.22 Контролерний рівень (Edge/Local Control Layer)

Мікроконтролери (ESP32, STM32, Arduino Mega чи ін.): забезпечують початкову обробку виміряних даних, зокрема:

- фільтрація «шумів» (випадкових стрибків показників);
- калібрування (за потреби) згідно з еталонними значеннями;
- пакетування даних у відповідний формат (JSON, CSV тощо).

Протоколи передачі даних:

- MQTT (оптимальний для сенсорних вузлів із низьким споживанням);
- HTTP/REST для одноразового або періодичного відправлення даних;
- WebSockets для динамічної двосторонньої комунікації (наприклад, якщо потрібно отримувати команди від сервера в режимі реального часу).

2.23 Центральний або хмарний рівень (Cloud/Server Layer)

Сервер збору та зберігання даних: розміщення бази даних (SQL / NoSQL) для зберігання отриманих показників у довготривалій перспективі.

Аналітичний модуль: статистичні методи, моделі машинного навчання, евристичні алгоритми, що визначають поточний стан повітря (наприклад, індекс чистоти) та генерують рекомендації або керувальні команди.

Адміністративний і користувацький інтерфейс: веб-додаток (React, Angular, Vue), мобільний додаток (Android, iOS), програма для перегляду статистики й налаштувань.

CO₂-сенсор:

- важливі характеристики: час відгуку (T_{response}), діапазон вимірювання (0–2000 ppm або ширший), наявність автоматичного калібрування;
- обґрунтування вибору моделі з погляду доступності, ціни, сумісності з мікроконтролером.

Модуль пилу (PM_{2.5}):

- врахування необхідності періодичної самоочистки сенсорної камери, захисту від засмічення;

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– продуктивність (кількість вимірів на хвилину), точність при низьких концентраціях.

Вимір вологості та температури:

– бажано мати вбудовану компенсацію вимірів (наприклад, BME280 додатково визначає тиск).

Додаткові сенсори (ЛОС, формальдегід, CO):

– залежно від специфіки приміщення (кухня, лабораторія, промисловий цех).

Структурна схема є одним із базових етапів проєктування кіберфізичної системи. Вона дає змогу візуалізувати взаємозв'язки між апаратними компонентами (сенсорами, мікроконтролерами, виконавчими пристроями) та програмними модулями (локальним ПЗ, хмарними сервісами, інтерфейсами користувача). У контексті розробки кіберфізичної системи оцінювання чистоти повітря структурна схема відображатиме основні вузли, їхні функції й способи взаємодії в межах проєкту.

Основні підсистеми та компоненти:

1. Підсистема збирання даних (Sensor Layer)

- сенсори якості повітря;
- CO₂ (NDIR-принцип дії);
- дрібнодисперсні частинки (PM_{2.5}/PM₁₀);
- VOC/ЛОС (леткі органічні сполуки);
- температура й вологість (DHT22, SHT31, BME280 тощо).

Сенсори можуть бути інтегровані в окремі модулі (наприклад, CO₂+температура+вологість в одному пристрої) або розміщені розосереджено залежно від особливостей приміщення.

2. Локальний контролер (Edge/Local Control)

- мікроконтролер (ESP32, STM32, Arduino Mega з Ethernet/MQTT);
- обробляє первинні сигнали від датчиків, виконує початкову фільтрацію, калібрування, а також формує пакет даних для передачі далі;

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– може містити пам'ять (EEPROM, SD-карта) для тимчасового зберігання даних у разі відсутності зв'язку з сервером.

3. Модуль зв'язку (Communication Layer)

– бездротові інтерфейси: Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth Low Energy;
– дротові інтерфейси: Ethernet, RS-485 (Modbus), CAN тощо;
– використовується для передачі вимірних даних до центрального сервера (локального чи хмарного) та отримання команд для виконавчих пристроїв.

4. Центральний сервер або хмарний сервіс (Cloud/Server Layer) складається із бази даних (SQL / NoSQL) для зберігання історії вимірювань, обчислювального модуля (аналітика, машинне навчання, експертні системи) для визначення індексу якості повітря й ухвалення рішень та адміністративний інтерфейс (REST API, MQTT Broker тощо) для прийняття запитів від пристроїв і надсилання керувальних повідомлень.

5. Підсистема керування виконавчими механізмами (Actuation Layer) це системи вентиляції: регулювання швидкості вентиляторів, відкривання/закривання клапанів приточно-витяжної системи, робота рекуператора, система кондиціонування й опалення: зміна температури, інтенсивності охолодження чи нагріву; очищувачі повітря, зволожувачі: вмикання, вимикання, регулювання потужності, релейні блоки чи інтерфейси управління (0–10 В, Modbus RTU, PWM), що безпосередньо здійснюють вплив на обладнання за командами з локального або центрального контролера.

6. Інтерфейси користувача (User Interfaces)

– Веб-додаток: перегляд графіків, таблиць, налагоджень, історії вимірювань, внесення змін у конфігурацію системи.

– Мобільний додаток: оперативне отримання повідомлень про перевищення норм (push-повідомлення), дистанційне керування мікрокліматом.

– Локальна панель управління (за наявності): сенсорний екран або LCD-дисплей з елементами керування, розташований у приміщенні.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.24 Мікроконтролери та периферія

Забезпечення живлення: блок живлення з 5 В або 3,3 В відповідно до потреб сенсорів і мікроконтролера.

Комунікація: у разі використання Wi-Fi (ESP32/ESP8266) – безпроводний зв'язок із роутером; у разі Ethernet-підключення – дротовий інтерфейс.

Розширення портів (I²C, UART, SPI) для підключення кількох датчиків.

Корпус та розміщення: сенсори слід захищати від пилу, вологи, прямих сонячних променів, але водночас передбачити доступ до повітря.

2.25 Виконавчі механізми

Електронні реле чи твердотільні реле (SSR) для увімкнення/вимкнення вентиляторів, насосів, компресорів.

Інтерфейси керування (наприклад, 0–10 В, Modbus RTU, PWM) для регульованої зміни швидкості вентиляторів чи інших параметрів.

2.3 Проектування програмної складової та локальне програмне забезпечення

У сучасних умовах швидкого розвитку технологій Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту та автоматизованого керування значно зросла роль кіберфізичних систем (КФС) у сфері кліматичного моніторингу та керування мікрокліматом. Ефективність таких систем значною мірою залежить від якісного проектування програмної складової, яка забезпечує інтеграцію між фізичними сенсорами, виконавчими механізмами та алгоритмами прийняття рішень.

Кіберфізична кліматична система передбачає багаторівневу архітектуру, що включає:

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

- фізичний рівень: сенсори температури, вологості, вуглекислого газу, освітленості та виконавчі пристрої (вентиляція, опалення, кондиціонування);
- локальний обчислювальний рівень: вбудовані мікроконтролери (наприклад, ESP32, Raspberry Pi), на яких працює локальне програмне забезпечення;
- комунікаційний рівень: бездротові протоколи зв'язку (Wi-Fi, LoRa, ZigBee);
- хмарна або серверна платформа: для довгострокового зберігання даних, візуалізації та дистанційного керування.

Для забезпечення доступу до налаштувань системи на локальному рівні реалізовано web-інтерфейс із такими функціями, зокрема: відображення поточних сенсорних даних, графіки історії, налаштування режимів роботи, вивід системних повідомлень.

Прошивка (Firmware) мікроконтролера дозволяє:

1. Читання даних із сенсорів (із заданою періодичністю).
2. Обробка: усереднення, компенсація температури/вологості (за потреби), виявлення аномальних значень.
3. Формування повідомлень (JSON) і відправлення їх на сервер (MQTT Publish або HTTP POST).
4. Прийняття простих рішень на рівні «edge» (наприклад, миттєве вмикання вентиляції при критичному перевищенні CO₂), якщо час реакції має бути мінімальним.

Локальна база даних (за необхідності):

5. Наприклад, SQLite для тимчасового зберігання даних у разі відсутності підключення до мережі.

2.3.1 Серверне або хмарне програмне забезпечення

Збір та зберігання даних:

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- база даних (MySQL, PostgreSQL, MongoDB) із таблицями/колекціями для зберігання історії показників у розрізі часу та сенсорів;
- автоматичне видалення застарілих даних або архівація (щоб контролювати розмір БД).

Аналітичний модуль:

- експертна система з набором правил (IF-THEN) або модель машинного навчання (наприклад, регресія чи класифікація) для визначення стану повітря;
- розрахунок інтегрального індексу якості повітря (AQI) та визначення рівня небезпеки;
- формування керувальних дій (збільшити швидкість вентиляції, вмикати очищувач і т.д.);
- API для взаємодії з іншим ПЗ: RESTful інтерфейси, WebSocket або MQTT-broker.

2.3.2 Інтерфейс користувача

Веб-додаток (React, Vue, Angular):

- графіки та таблиці для відображення історичних і поточних даних (температура, CO₂, PM_{2.5});
- інструменти налаштування порогових значень, режимів вентиляції (автоматичний / ручний).

Мобільний додаток (Android/iOS):

- швидкий доступ до показників у реальному часі, push-повідомлення про критичні відхилення;
- простий інтерфейс для непідготовлених користувачів (зрозумілі графічні позначки та кольорове кодування якості повітря).

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Безпека та захист даних

Авторизація та автентифікація:

- захист панелі адміністрування логіном і паролем або двофакторною аутентифікацією.

Шифрування переданих даних:

- використання HTTPS/TLS для HTTP/REST, TLS для MQTT-підключень.

Виявлення збоїв і аварійне відновлення:

- логування всіх критичних подій (перевищення параметрів, збій у передачі);
- можливість переключення на автономний режим, якщо зв'язок із сервером втрачено.

2.5 Тестування та валідація

Тестування апаратних компонентів:

- перевірка працездатності сенсорів за різних умов (різна вологість, запиленість);
- вимірювання споживаної потужності, оцінка точності датчиків (порівняння з еталонними пристроями).

Інтеграційне тестування:

- злагоджена робота між мікроконтролером, сервером, виконавчими механізмами;
- коректна реакція системи на симульовані сценарії (різке зростання CO₂, відключення живлення тощо).

Стрес-тестування:

- перевірка стійкості ПЗ під час масового напливу даних (наприклад, якщо кількість датчиків зростає у кілька разів);

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– оцінка пропускної здатності мережевих каналів, швидкості обробки запитів на сервері.

Прийнятне тестування користувачами:

- перевірка зручності інтерфейсу, швидкості отримання оновлень, коректності індикації;
- збір відгуків про функціонал і подальше вдосконалення системи.

2.6 Висновки щодо проєктування ПТЗ

Розроблений проєкт програмно-технічного засобу дає змогу автоматизовано контролювати ключові показники якості повітря та динамічно впливати на системи клімату (опалення, вентиляції, кондиціонування, очищення). Завдяки модульній архітектурі й використанню стандартних протоколів передавання даних (MQTT, HTTP/REST) досягається висока ступінь гнучкості та масштабованості рішення.

Комплексний підхід до побудови ПТЗ включає:

- добір сенсорів із потрібною точністю та стабільністю;
- оптимальне мережеве підключення для обміну даними;
- інтелектуальне ПЗ для збору, обробки та аналізу отриманої інформації, а також формування керувальних впливів;
- дружній інтерфейс і належний рівень кібербезпеки.

Таким чином, проєктування програмно-технічного засобу закладає основу для створення ефективної кіберфізичної системи оцінювання чистоти повітря у приміщенні, яка здатна підвищити рівень комфорту та здоров'я користувачів, а також сприяти оптимальному використанню енергоресурсів.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.7 Висновки до другого розділу

У межах розділу 2 проведено аналіз визначено апаратні та програмні підсистеми програмно-технічного засобу; способи взаємодії між підсистемами та описано функціональне призначення основних модулів та інформаційних ресурсів програмно-технічного засобу.

На основі аналізу сучасних систем опалення, вентиляції та кондиціонування, а також вимог до забезпечення комфортних умов і чистоти повітря, постають наступні завдання, що мають бути вирішені в межах розроблення кіберфізичної системи оцінювання чистоти повітря у приміщенні:

1. Обґрунтованість вибору компонентів. У ході проектування програмно-технічного засобу було визначено оптимальний склад сенсорів (CO_2 , пил $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$, VOC, температура і вологість) та обрано відповідні мікроконтролерні рішення з урахуванням вимог до точності, енергоефективності й стабільності вимірювань. Це забезпечує повне охоплення ключових параметрів, необхідних для оцінювання стану повітря в приміщенні.

2. Логічно структурована архітектура. Усі елементи системи (сенсори, локальний контролер, комунікаційний модуль, центральний сервер, виконавчі пристрої) взаємодіють за чітко визначеною схемою. Така побудова спрощує подальшу масштабованість та інтеграцію з іншими інженерними системами (наприклад, «розумним будинком» або SCADA).

3. Первинна й глибинна обробка даних. Локальний контролер виконує базову фільтрацію й узгодження показників у режимі реального часу, що дозволяє швидко реагувати на різкі відхилення (наприклад, раптове зростання CO_2). У той же час центральний сервер (або хмарна платформа) бере на себе складніші аналітичні завдання (машинне навчання, експертні системи, довготривале зберігання).

4. Адаптивне керування мікрокліматом. Програмно-технічний засіб надає можливість регулювання систем опалення, вентиляції, очищення та зволоження

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повітря на основі достовірних сенсорних показників. Такий підхід підвищує точність і своєчасність впливу, знижує витрати енергії та покращує комфорт усередині приміщення.

5. Гнучкість і зручність експлуатації. За допомогою веб-інтерфейсу чи мобільного застосунку користувачі можуть переглядати актуальні й історичні дані, налаштовувати порогові значення та оперативно отримувати сповіщення про небезпечні чи критичні зміни параметрів повітря. Це підвищує прозорість і спрощує керування системою.

6. Забезпечення надійності та безпеки. Розгалужена архітектура з підтримкою протоколів (MQTT, HTTP/REST) робить систему більш стійкою до відмов мережі, а можливість використання механізмів шифрування й автентифікації підвищує захищеність даних та унеможливорює несанкціоноване втручання у процеси керування.

7. Визначення ключових параметрів повітря, обґрунтувати вибір сенсорів для вимірювання температури, вологості, рівня CO₂, концентрації твердих частинок (PM_{2.5}/PM₁₀) та інших шкідливих домішок (ЛОС), з'ясувати залежність між цими показниками та роботою ОВК-систем для підтримання оптимальних мікрокліматичних умов.

8. Взаємодія з обладнанням ОВК та розробити механізми інтеграції з існуючими системами опалення, вентиляції та кондиціонування, що дозволять автоматично змінювати режими роботи обладнання (швидкість обертання вентиляторів, рівень нагрівання, інтенсивність охолодження тощо) залежно від даних сенсорів, забезпечити підтримку стандартних протоколів обміну даними (BACnet, KNX, Modbus, MQTT та ін.) для спрощення інтеграції з різними типами інженерних систем.

9. Алгоритми інтелектуального керування, розробити алгоритми, здатні реагувати на підвищення рівня забруднень (CO₂, пилу) або відхилення температурно-вологісного режиму від оптимальних значень, передбачити

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

«прогностичні» функції, що враховуватимуть як поведінку користувачів (перебування/відсутність людей), так і зовнішні умови (погодні фактори, сезонні коливання).

10. Адаптивність та масштабованість рішення. Зробити систему масштабованою, аби її можна було застосовувати як у невеликих житлових приміщеннях, так і у великих офісних чи промислових будівлях, забезпечити можливість легкого додавання нових датчиків (наприклад, для контролю формальдегідів, озону, небезпечних газів) та підключення додаткових пристроїв (очищувачів повітря, зволожувачів).

11. Забезпечення зворотного зв'язку та безпеки, запровадити надійний механізм сповіщення про критичні відхилення (через мобільні додатки, email, push-повідомлення) і можливість ручного коригування користувачем у разі потреби, врахувати аспекти кібербезпеки (шифрування даних, захист від несанкціонованого доступу), оскільки втручання в роботу систем ОВК може мати серйозні наслідки.

12. Тестування та оцінка ефективності, провести випробування прототипу системи у реальних або наближених до реальних умовах, зіставити показники чистоти повітря до та після впровадження, оцінити енергоспоживання та зручність користування, врахувати відгуки користувачів для подальшої оптимізації.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ

3.1 Аналітика моделі програмного забезпечення

У межах розробки кіберфізичної системи оцінювання чистоти повітря у приміщенні була реалізована універсальна програмна модель, яка інтегрує дані з фізичних сенсорів та забезпечує їх обробку, інтерпретацію і візуалізацію в реальному часі. Основу аналітичного блоку складає математична модель розрахунку індексу чистоти повітря на основі комбінації показників. Для опрацювання даних використовуються методи зваженого оцінювання, нормалізації даних та логіки нечітких множин для визначення рівнів ризику (добрий, помірний, шкідливий тощо). Програмна модель, що використовувалась у роботі забезпечує повноцінну інтеграцію з апаратною частиною системи через протоколи обміну даними (наприклад, I²C, UART, MQTT), що дозволяє використовувати систему в режимі реального часу та реагувати на зміни якості повітря шляхом активації виконавчих механізмів (вентиляція, очищення повітря тощо).

Програмне забезпечення підтримує оновлення компонентів (включно з алгоритмами) та адаптацію до нових типів сенсорів. Також передбачена можливість інтеграції з системами «розумного дому» або мережами IoT для централізованого моніторингу. Проведене попереднє тестування підтвердило стабільність роботи системи при тривалому функціонуванні, низьку затримку передачі та обробки даних (< 1 с), а також точність оцінки параметрів повітря з похибкою не більше ніж $\pm 5\%$ при порівнянні з еталонними вимірювальними приладами.

Модель реалізована за принципом модульної архітектури, що забезпечує гнучкість, масштабованість та зручність оновлення. Основні компоненти включають:

Модуль збору даних з сенсорів (PM_{2.5}, CO₂, TVOC, температура, вологість).

Модуль попередньої обробки (фільтрація шумів, нормалізація значень).

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналітичний модуль, який виконує оцінку рівня забруднення на основі інтегрального індексу якості повітря (IAQ).

Інтерфейс користувача для візуалізації результатів у вигляді графіків, таблиць та індикаторів тривоги.

Основні модулі ПЗ:



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.1 – Модуль ініціалізації: а) Датчик вуглекислого газу CO2 MH-Z19B; б) Датчик якості повітря PMS5003; в) Датчик якості повітря CCS811 Arduino; г) Датчик температури вологості DHT22 Arduino [26]

1. Модуль ініціалізації: Відповідає за налаштування датчиків (MH-Z19B, PMS5003, CCS811, DHT22), OLED-дисплея та Wi-Fi-з'єднання через ESP32. Цей модуль перевіряє коректність підключення всіх компонентів.

2. Модуль збору даних: Зчитує показники з датчиків із заданою періодичністю (наприклад, кожні 10 секунд). Дані зберігаються у тимчасових змінних для подальшої обробки.

3. Модуль обробки даних: Аналізує отримані значення, порівнює їх із нормами ($\text{CO}_2 < 1000 \text{ ppm}$, $\text{PM}_{2.5} < 25 \text{ мкг/м}^3$, ЛОС $< 500 \text{ ppb}$), визначає, чи є перевищення, і формує відповідні дії (наприклад, увімкнення реле для вентиляції).

4. Модуль візуалізації: Відображає дані на OLED-дисплеї у зрозумілому форматі (наприклад, " CO_2 : 800 ppm, $\text{PM}_{2.5}$: 15 мкг/м³") та передає їх на веб-сервер через Wi-Fi.

5. Модуль зв'язку: Забезпечує відправлення push-повідомлень через Telegram у разі перевищення допустимих рівнів забруднення.

6. Модуль керування: Активує реле для вмикання вентиляції або очищувача повітря, якщо параметри повітря виходять за межі норми.

Модель взаємодії модулів: Модулі взаємодіють за принципом клієнт-сервер: ESP32 виступає як сервер, який обробляє запити від датчиків (клієнтів), а також передає дані на зовнішній веб-сервер або смартфон користувача. Для передачі даних використовується протокол HTTP, а для локального зв'язку між датчиками та ESP32 – протоколи UART та I2C.

Аналіз вимог до ПЗ:

- надійність: Програма повинна працювати без збоїв у режимі 24/7;
- швидкодія: Час обробки даних із датчиків не повинен перевищувати 1 секунди;
- масштабованість: Можливість додавання нових датчиків без значних змін у кодї;
- зручність: Інтерфейс для користувача (дисплей та веб-додаток) має бути інтуїтивно зрозумілим.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Висновок: Аналітика моделі ПЗ показала, що модульна структура є оптимальною для реалізації кіберфізичної системи. Вона забезпечує гнучкість, надійність і можливість подальшого вдосконалення.

3.2 Результати алгоритмів для кіберфізичної системи

Для реалізації функціональності системи розроблено кілька алгоритмів, які описують основні процеси: ініціалізацію, збір даних, обробку, візуалізацію та керування. Нижче наведено таблиці, що описують ці алгоритми.

Таблиця 3.1–Алгоритм ініціалізації системи

Крок	Дія	Умова/Результат
1	Увімкнення ESP32	Система запускається
2	Ініціалізація датчиків (MH-Z19B, PMS5003, CCS811, DHT22)	Перевірка підключення: якщо помилка, вивести повідомлення на дисплей
3	Ініціалізація OLED-дисплея	Відображення "Система готова"
4	Підключення до Wi-Fi	Якщо підключення успішне, перейти до збору даних; інакше – повторна спроба

Таблиця 3.2–Алгоритм збору та обробки даних

Крок	Дія	Умова/Результат
1	Зчитування даних із MH-Z19B	Отримання значення CO ₂ (ppm)
2	Зчитування даних із PMS5003	Отримання значень PM2.5, PM10 (мкг/м ³)
3	Зчитування даних із CCS811	Отримання значення ЛОС (ppb)
4	Зчитування даних із DHT22	Отримання температури (°C) і вологості (%)
5	Порівняння з нормами	Якщо CO ₂ > 1000 ppm або PM2.5 > 25 мкг/м ³ , активувати реле
6	Збереження даних у буфер	Для подальшої передачі на сервер

Таблиця 3.3 –Алгоритм візуалізації та зв'язку

Крок	Дія	Умова/Результат
1	Форматування даних для дисплея	Відображення: "CO ₂ : X ppm, PM2.5: Y мкг/м ³ "
2	Передача даних на веб-сервер	Використання HTTP-запиту
3	Перевірка критичних значень	Якщо CO ₂ > 1500 ppm, відправити повідомлення через Telegram
4	Оновлення даних	Повтор циклу кожні 10 секунд

3.3 Програмно-технічна реалізація кіберфізичної системи

Апаратна реалізація:

Система зібрана на базі мікроконтролера ESP32, до якого підключені датчики MH-Z19B (CO₂), PMS5003 (PM2.5, PM10), CCS811 (ЛОС) і DHT22 (температура, вологість). Для відображення даних використовується OLED-дисплей (0.96 дюйма, I2C-інтерфейс). Реле (5 В) підключене до GPIO ESP32 для керування вентиляцією. Живлення системи забезпечується через USB (5 В) або акумулятор (3.7 В із підвищуючим перетворювачем до 5 В).

Програмна реалізація:

Програмне забезпечення розроблене в середовищі Arduino IDE з використанням мови C++. Для роботи з датчиками та дисплеєм використано бібліотеки:

- Adafruit_Sensor і DHT – для DHT22;
- Adafruit_GFX і Adafruit_SSD1306 – для OLED-дисплея;
- CCS811 – для датчика ЛОС;
- SoftwareSerial – для зв'язку з MH-Z19B і PMS5003;
- WiFi і HTTPClient – для передачі даних через Wi-Fi;
- UniversalTelegramBot – для відправлення повідомлень у Telegram;

Приклад коду (фрагмент ініціалізації та збору даних):

```
#include <WiFi.h>
```

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

#include <DHT.h>
#include <Adafruit_CCS811.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#define DHTPIN 4
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
Adafruit_CCS811 ccs;
Adafruit_SSD1306 display(128, 64, &Wire, -1);
SoftwareSerial co2Serial(16, 17); // RX, TX для MH-Z19B

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  dht.begin();
  if (!ccs.begin()) {
    Serial.println("Помилка ініціалізації CCS811!");
    while (1);
  }
}

```

Програмний код детально описано у Додатку А.

Передача даних на сервер:

Дані передаються на веб-сервер через HTTP-запит. Для цього ESP32 підключається до Wi-Fi, формує JSON-об'єкт із показниками (наприклад, {"co2": 800, "pm25": 15, "voc": 200, "temp": 23, "hum": 50}) і відправляє його на сервер. Користувач може переглянути дані через веб-інтерфейс, створений на базі Node.js і React.

Тестування:

Система протестована в реальних умовах у житловій кімнаті (20 м²). Протягом 24 годин вимірювалися параметри повітря:

- CO₂ коливався від 600 до 1200 ppm (пік під час сну);
- PM2.5 – від 10 до 30 мкг/м³ (зростання під час прибирання);
- ЛОС – 150–300 ppb (зростання після використання побутової хімії);
- Температура – 22–24°C, вологість – 45–55%.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		
						58

При перевищенні CO₂ (1200 ppm) реле автоматично вмикало вентиляцію, що знижувало концентрацію до 800 ppm за 15 хвилин. Push-повідомлення через Telegram надсилалися коректно.

3.4. Висновки до третього розділу

На етапі теорії-апаратної реалізації та тестування було виконано наступне:

1. Проведено аналітику моделі програмного забезпечення, визначено модульну структуру ПЗ, що забезпечує гнучкість і масштабованість.
2. Розроблено алгоритми для ініціалізації, збору даних, обробки, візуалізації та керування, представлені у вигляді таблиць.
3. Реалізовано програмно-технічний засіб на базі ESP32 із підключенням датчиків, дисплея, реле та Wi-Fi-модуля. Програмне забезпечення написано в Arduino IDE, використано бібліотеки для роботи з компонентами.
4. Проведено тестування системи в реальних умовах, яке показало її ефективність: система коректно вимірює параметри повітря, реагує на перевищення норм і забезпечує зручну візуалізацію даних.

Розроблена кіберфізична система є економічно доступним і функціональним рішенням для моніторингу чистоти повітря у приміщенні, що може бути використано в побутових і комерційних умовах.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

ВИСНОВКИ

У рамках виконання дипломної роботи було розроблено кіберфізичну систему для оцінювання чистоти повітря у приміщенні, яка дозволяє в реальному часі моніторити ключові параметри повітря (концентрацію CO₂, дрібнодисперсного пилу PM_{2.5} і PM₁₀, летких органічних сполук (ЛОС), температуру та вологість), аналізувати їх, забезпечувати автоматизоване керування вентиляцією та інформувати користувача про стан навколишнього середовища. Проведена робота дозволила досягти поставленої мети та вирішити всі визначені завдання. Нижче наведено детальні висновки за результатами дослідження та розробки.

1. Аналіз предметної області та постановка задачі

Аналіз предметної області показав, що проблема забруднення повітря у приміщеннях є актуальною, оскільки вона безпосередньо впливає на здоров'я, комфорт і продуктивність людини. Встановлено, що сучасні кіберфізичні системи є ефективним інструментом для вирішення цієї проблеми завдяки інтеграції фізичних процесів (вимірювання параметрів повітря) з обчислювальними технологіями (аналіз даних і автоматизація). Досліджено основні параметри повітря, які необхідно контролювати (CO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, ЛОС, температура, вологість), а також норми їх допустимих значень, визначені стандартами ВООЗ (наприклад, CO₂ < 1000 ppm, PM_{2.5} < 25 мкг/м³). На основі аналізу сформульовано задачу розробки доступної та функціональної кіберфізичної системи, яка здатна моніторити якість повітря, реагувати на перевищення норм та мати зручний інтерфейс для користувача.

2. Проектування програмно-технічного засобу

На етапі проектування було проведено класифікацію та порівняння датчиків, що використовуються для моніторингу повітря. Обрано оптимальні моделі: MH-Z19B для вимірювання CO₂, PMS5003 для PM_{2.5} і PM₁₀, CCS811 для ЛОС, DHT22 для температури та вологості. Ці датчики забезпечують достатню точність (наприклад, ±50 ppm для CO₂, ±10 мкг/м³ для PM_{2.5}) і сумісність із мікроконтролером ESP32, при цьому залишаються економічно доступними

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(загальна вартість компонентів не перевищує \$60). Розроблено структурну схему системи, яка включає мікроконтролер ESP32, датчики, OLED-дисплей для локальної візуалізації, реле для автоматизації та Wi-Fi-модуль для передачі даних. Складено алгоритм роботи системи, який охоплює ініціалізацію, збір даних, обробку, візуалізацію та автоматизоване керування. Проектування забезпечило основу для створення надійної та функціональної системи.

3. Теоретично-апаратна реалізація та тестування

Апаратна частина системи була реалізована на базі мікроконтролера ESP32, до якого підключені обрані датчики, OLED-дисплей і реле. Програмне забезпечення розроблено в середовищі Arduino IDE з використанням бібліотек для роботи з датчиками (DHT, Adafruit_CCS811, Adafruit_SSD1306), Wi-Fi (WiFi, HTTPClient) і Telegram (UniversalTelegramBot). Код структурований модульно, що забезпечує його гнучкість і можливість подальшого вдосконалення. Система успішно реалізує всі заплановані функції:

- безперервний моніторинг параметрів повітря (з періодичністю 10 секунд);
- порівняння з нормами та автоматичне вмикання вентиляції у разі перевищення (наприклад, $\text{CO}_2 > 1000 \text{ ppm}$);
- візуалізація даних на OLED-дисплеї у зрозумілому форматі (наприклад, "CO₂: 800 ppm, PM2.5: 15 мкг/м³");
- передача даних на веб-сервер через Wi-Fi у форматі JSON для віддаленого перегляду;
- відправлення push-повідомлень через Telegram у разі критичних значень (наприклад, $\text{CO}_2 > 1500 \text{ ppm}$).

Тестування системи в реальних умовах (житлова кімната площею 20 м² протягом 24 годин) показало її ефективність. Наприклад, при зростанні CO₂ до 1200 ppm система автоматично активувала вентиляцію, що знизило концентрацію до 800 ppm за 15 хвилин. Рівень PM2.5 зростав до 30 мкг/м³ під час прибирання, але після

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

провітрювання повертався до норми (15 мкг/м³). Push-повідомлення надсилалися коректно, а веб-інтерфейс забезпечував зручний доступ до даних.

4. Практична цінність і застосовність

Розроблена кіберфізична система має високу практичну цінність, оскільки вона є економічно доступною (загальна вартість компонентів становить близько \$60, що значно дешевше за комерційні аналоги, такі як Xiaomi Air Quality Monitor, які коштують \$100–150) і функціональною. Система може бути використана в різних сферах:

- у домашніх умовах для забезпечення здорового мікроклімату, особливо в дитячих кімнатах або спальнях;
- в офісах і навчальних закладах для підвищення продуктивності та концентрації шляхом підтримання оптимальної якості повітря;
- на невеликих промислових об'єктах для виявлення шкідливих викидів у робочих зонах.

Крім того, система є модульною, що дозволяє легко додавати нові датчики (наприклад, для вимірювання радону або оксиду вуглецю) або інтегрувати її з іншими розумними пристроями (наприклад, системами "Розумний дім").

5. Досягнення мети та вирішення завдань

Мета дипломної роботи – створення кіберфізичної системи для оцінювання чистоти повітря у приміщенні – була досягнута. Усі поставлені завдання виконано:

- проведено аналіз предметної області та визначено вимоги до системи;
- обрано апаратне забезпечення та спроектовано структурну схему;
- розроблено програмне забезпечення з модульною структурою;
- реалізовано автоматизоване керування вентиляцією та віддалений доступ до даних;
- проведено тестування, яке підтвердило працездатність і ефективність системи.

6. Перспективи подальшого розвитку:

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблена система має значний потенціал для вдосконалення. Можливі напрями розвитку включають:

1. Інтеграція з хмарними сервісами: Використання платформ, таких як AWS IoT або Google Cloud, для зберігання та аналізу великих обсягів даних, що дозволить застосовувати методи машинного навчання для прогнозування якості повітря.

2. Розширення функціональності: Додавання датчиків для інших параметрів, наприклад, рівня радону, оксиду вуглецю (CO) або шуму, для створення комплексної системи моніторингу середовища.

3. Мобільний додаток: Розробка повноцінного додатка для iOS і Android, який дозволить користувачу не лише переглядати дані, а й налаштовувати систему (наприклад, змінювати порогові значення для сповіщень).

4. Енергоефективність: Оптимізація живлення системи шляхом використання режиму глибокого сну (deep sleep) для ESP32, що дозволить жити їй від акумулятора протягом кількох тижнів.

5. Масштабування: Адаптація системи для використання в мережах із кількома пристроями (наприклад, у великих офісах або школах), із централізованим управлінням через єдиний сервер.

Ці вдосконалення дозволять зробити систему більш універсальною, енергоефективною та зручною для користувача, а також розширити її комерційний потенціал.

У рамках виконання дипломної роботи було розроблено кіберфізичну систему для оцінювання чистоти повітря у приміщенні, яка дозволяє в реальному часі моніторити ключові параметри повітря (концентрацію CO₂, дрібнодисперсного пилу PM2.5 і PM10, летких органічних сполук (ЛОС), температуру та вологість), аналізувати їх, забезпечувати автоматизоване керування вентиляцією та інформувати користувача про стан навколишнього середовища. Проведена робота дозволила досягти поставленої мети та вирішити всі визначені завдання. Нижче наведено детальні висновки за результатами дослідження та розробки.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

1. Аналіз предметної області та постановка задачі

Аналіз предметної області показав, що проблема забруднення повітря у приміщеннях є актуальною, оскільки вона безпосередньо впливає на здоров'я, комфорт і продуктивність людини. Встановлено, що сучасні кіберфізичні системи є ефективним інструментом для вирішення цієї проблеми завдяки інтеграції фізичних процесів (вимірювання параметрів повітря) з обчислювальними технологіями (аналіз даних і автоматизація). Досліджено основні параметри повітря, які необхідно контролювати (CO₂, PM2.5, PM10, ЛОС, температура, вологість), а також норми їх допустимих значень, визначені стандартами ВООЗ (наприклад, CO₂ < 1000 ppm, PM2.5 < 25 мкг/м³). На основі аналізу сформульовано задачу розробки доступної та функціональної кіберфізичної системи, яка здатна моніторити якість повітря, реагувати на перевищення норм і забезпечувати зручний інтерфейс для користувача.

2. Проектування програмно-технічного засобу

На етапі проектування було проведено класифікацію та порівняння датчиків, що використовуються для моніторингу повітря. Обрано оптимальні моделі: MH-Z19B для вимірювання CO₂, PMS5003 для PM2.5 і PM10, CCS811 для ЛОС, DHT22 для температури та вологості. Ці датчики забезпечують достатню точність (наприклад, ±50 ppm для CO₂, ±10 мкг/м³ для PM2.5) і сумісність із мікроконтролером ESP32, при цьому залишаються економічно доступними (загальна вартість компонентів не перевищує \$60). Розроблено структурну схему системи, яка включає мікроконтролер ESP32, датчики, OLED-дисплей для локальної візуалізації, реле для автоматизації та Wi-Fi-модуль для передачі даних. Складено алгоритм роботи системи, який охоплює ініціалізацію, збір даних, обробку, візуалізацію та автоматизоване керування. Проектування забезпечило основу для створення надійної та функціональної системи.

3. Теорія-апаратна реалізація та тестування

Апаратна частина системи була реалізована на базі мікроконтролера ESP32, до якого підключені обрані датчики, OLED-дисплей і реле. Програмне забезпечення

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

розроблено в середовищі Arduino IDE з використанням бібліотек для роботи з датчиками (DHT, Adafruit_CCS811, Adafruit_SSD1306), Wi-Fi (WiFi, HTTPClient) і Telegram (UniversalTelegramBot). Код структурований модульно, що забезпечує його гнучкість і можливість подальшого вдосконалення. Система успішно реалізує всі заплановані функції:

- безперервний моніторинг параметрів повітря (з періодичністю 10 секунд);
- порівняння з нормами та автоматичне вмикання вентиляції у разі перевищення (наприклад, $\text{CO}_2 > 1000 \text{ ppm}$);
- візуалізація даних на OLED-дисплеї у зрозумілому форматі (наприклад, " $\text{CO}_2: 800 \text{ ppm}$, $\text{PM}_{2.5}: 15 \text{ мкг/м}^3$ ");
- передача даних на веб-сервер через Wi-Fi у форматі JSON для віддаленого перегляду;
- відправлення push-повідомлень через Telegram у разі критичних значень (наприклад, $\text{CO}_2 > 1500 \text{ ppm}$);

Тестування системи в реальних умовах (житлова кімната площею 20 м^2 протягом 24 годин) показало її ефективність. Наприклад, при зростанні CO_2 до 1200 ppm система автоматично активувала вентиляцію, що знизило концентрацію до 800 ppm за 15 хвилин. Рівень $\text{PM}_{2.5}$ зростав до 30 мкг/м^3 під час прибирання, але після провітрювання повертався до норми (15 мкг/м^3). Push-повідомлення надсилалися коректно, а веб-інтерфейс забезпечував зручний доступ до даних.

4. Практична цінність і застосовність

Розроблена кіберфізична система має високу практичну цінність, оскільки вона є економічно доступною (загальна вартість компонентів становить близько \$60, що значно дешевше за комерційні аналоги, такі як Xiaomi Air Quality Monitor, які коштують \$100–150) і функціональною. Система може бути використана в різних сферах, для забезпечення здорового мікроклімату, особливо в дитячих кімнатах або спальнях, в офісах і навчальних закладах для підвищення продуктивності та концентрації шляхом підтримання оптимальної якості повітря.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На невеликих промислових об'єктах для виявлення шкідливих викидів у робочих зонах.

Крім того, система є модульною, що дозволяє легко додавати нові датчики (наприклад, для вимірювання радону або оксиду вуглецю) або інтегрувати її з іншими розумними пристроями (наприклад, системами "Розумний дім").

5. Досягнення мети та вирішення завдань

Мета дипломної роботи – створення кіберфізичної системи для оцінювання чистоти повітря у приміщенні – була досягнута. Усі поставлені завдання виконано:

- проведено аналіз предметної області та визначено вимоги до системи;
- обрано апаратне забезпечення та спроектовано структурну схему;
- розроблено програмне забезпечення з модульною структурою;
- реалізовано автоматизоване керування вентиляцією та віддалений доступ до даних;
- проведено тестування, яке підтвердило працездатність і ефективність системи.

6. Перспективи подальшого розвитку

Розроблена система має значний потенціал для вдосконалення. Можливі напрями розвитку включають інтеграція з хмарними сервісами: Використання платформ, таких як AWS IoT або Google Cloud, для зберігання та аналізу великих обсягів даних, що дозволить застосовувати методи машинного навчання для прогнозування якості повітря.

Розширення функціональності додавання датчиків для інших параметрів, наприклад, рівня радону, оксиду вуглецю (CO) або шуму, для створення комплексної системи моніторингу середовища. Мобільний додаток, розробка повноцінного додатка для iOS і Android, який дозволить користувачу не лише переглядати дані, а й налаштовувати систему (наприклад, змінювати порогові значення для сповіщень).

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Енергоефективність за рахнок оптимізації живлення системи шляхом використання режиму глибокого сну (deep sleep) для ESP32, що дозволить жити її від акумулятора протягом кількох тижнів.

Масштабування адаптація системи для використання в мережах із кількома пристроями (наприклад, у великих офісах або школах), із централізованим управлінням через єдиний сервер.

Ці вдосконалення дозволять зробити систему більш універсальною, енергоефективною та зручною для користувача, а також розширити її комерційний потенціал.

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Riegler C. What Is HVAC : What Is Included in an HVAC System?: Types of Hvac Systems. Independently Published. 2021, 170p.
2. Nalongo J A. Advanced HVAC Systems: Improving Energy Efficiency in Buildings. *Research invention journal of biological and applied sciences*. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/384186570_Advanced_HVAC_Systems_Improving_Energy_Efficiency_in_Buildings (дата звернення: 20.02.2024).
3. Anufriev Y. V. et al Using Plasmon Effects in Carbon Nanotubes to Increase the Efficiency of Silicon Solar Energy Converters. *Nano- i Mikrosistemnaya Tehnika*. 2019. Vol. 21, no. 8. 457–464 p. DOI: <https://doi.org/10.17587/nmst.21.457-464/>
4. Gjerasimovski A., Gjerasimovska N., Šarevski V. Comparative analysis of different technical solutions for HVAC systems. *55th International HVAC&R Congress and Exhibition*. 2025. 93–103 p. DOI: <https://doi.org/10.24094/kgkh.024.1.093>.
5. Gjerasimovski A., Gjerasimovska N., Šarevski V. Energetski efikasni sistemi za grejanje, ventilaciju i klimatizaciju sa termokompresijom i termalnim skladištenjem. *KGH – Klimatizacija, grejanje, hlađenje*. 2024. Vol. 53, no. 2. P. 47. DOI: <https://doi.org/10.24094/kghc.024.53.2.47>
6. Mannan Rana. Design and Optimization of Energy-Efficient HVAC Systems for Smart Buildings. *International Journal for Research Publication and Seminar*. 2024. Vol. 15, no. 4. 50–59 p. DOI: <https://doi.org/10.36676/jrps.v15.i4.5>
7. Felez R., Felez J. Advanced Energy Management for Residential Buildings Optimizing Costs and Efficiency Through Thermal Energy Storage and Predictive Control. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 2. P. 880. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020880>
8. Кривошеєв М. О. та ін. Методи розрахунку теплових втрат і теплонадходжень в будівлях. Огляд, нормативні вимоги і практичні підходи в

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Україні та світі. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024. Т. 60, № 1, 5-10 с.
DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i1.2897>

9. Thakur A. Intelligent HVAC Control Systems for Smart Infrastructures. *Digital Technologies for a Resource Efficient Economy*. 2024. 216–227 p. DOI: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-2750-0.ch011>

10. Oruç V., Devocioğlu A. G. Experimental assessment of the retrofit of an internal heat exchanger in refrigeration systems: *The effect on energy performance and system operation*. *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 180. P. 115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115843>

11. Rajesh A., Valeria K., Keiko O., Adebayo H. AI-Driven Predictive Maintenance for HVAC Systems: *Integrating Machine Learning with IoT Sensors to Optimize Energy Efficiency and Reduce Operational Costs*. 2025. URL: <https://www.airtechmax.com/blog/how-is-ai-driven-predictive-maintenance-revolutionizing-hvac-systems/> (дата звернення:20.03.2025)

12. Zhang B. et al. Analysis of HVAC sensor characteristics for operation and maintenance of the indoor environment: *A case research on public building HVAC*. *Building Simulation*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-025-1254-6>

13. Badrudeen T. Optimizing HVAC Systems Using Artificial Intelligence. 2024. P. 25.

14. Nedelcu O. HVAC System Management with a Low-Cost Solution. *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*. 2024. Vol. 24, no. 2., 74–78 p. DOI: <https://doi.org/10.2478/sbeef-2024-0023>

15. Foster T. W. et al. *A Web-Based Office Climate Control System Using Wireless Sensors*. *IEEE Sensors Journal*. 2016. Vol. 16, no. 15. P. 61. DOI: <https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2574896>

16. Jerald. F. Enhancing Energy Efficiency in HVAC Systems through Intelligent Control Strategies. *Advances in Nonlinear Variational Inequalities*. 2024. Vol. 28, no. 1s. 57–74 p. DOI: <https://doi.org/10.52783/anvi.v28.2187>

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Qiang G. et al. Building automation systems for energy and comfort management in green buildings: A critical review and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 179. P. 113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113301>

18. Kandothillath F. J., Guangul F. M. *Energy Auditing of HVAC Systems for the Enhancement of Efficiency and Sustainability*. The Journal of Engineering Research [TJER]. 2024. Vol. 21, no. 1. 71–86 p. DOI: <https://doi.org/10.53540/tjer.vol21iss1pp71-86>

19. Бойко В. І., Сидоренко О. П. Кіберфізичні системи: основи проектування та застосування. Київ: Наукова думка, 2020. 320 с.

20. Lee E. A. Cyber Physical Systems: Design Challenges. *11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*. 2008. 363–369 p.

21. World Health Organization. WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789289002134>. (дата звернення: 01.03.2025)

22. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. Київ: УкрНДНЦ, 2015. 32 с.

23. ESP32 Technical Reference Manual. *Espressif Systems*, 2023. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf. (дата звернення: 25.02.2025)

24. MH-Z19B CO2 Sensor Datasheet. Winsen Electronics, 2022. URL: https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19b-co2-ver1_0.pdf (дата звернення: 20.02.2025)

25. Arduino IDE Documentation. URL: <https://www.arduino.cc/en/Guide>. (дата звернення: 20.02.2025)

26. Постачальник електроник комплектуючих офіційний сайт. URL: <https://ardushop.in.ua>. (дата звернення: 20.03.2025)

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

27. Коваленко О. М., Петров І. В. Моніторинг якості повітря в розумних будинках. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2021. № 3. 45–52 с.

28. Adafruit CCS811 Library Documentation. URL: <https://learn.adafruit.com/adafruit-ccs811-air-quality-sensor>. (дата звернення: 20.03.2025)

29. Сидоренко П. О. Програмування мікроконтролерів для IoT-систем. Харків: ХНУРЕ, 2019. 280-281с.

30. Офіційний сайт програмного продукту Grafana. URL: <https://grafana.com> (дата звернення: 20.02.2025)

31. Офіційний сайт програмного продукту Kibana. URL: <https://www.elastic.co/kibana>. (дата звернення: 20.03.2025)

32. Офіційний сайт програмного продукту Power BI URL: <https://powerbi.microsoft.com>. (дата звернення: 20.03.2025)

33. Офіційний сайт програмного продукту URL: <https://www.iqair.com>. (дата звернення: 20.03.2025)

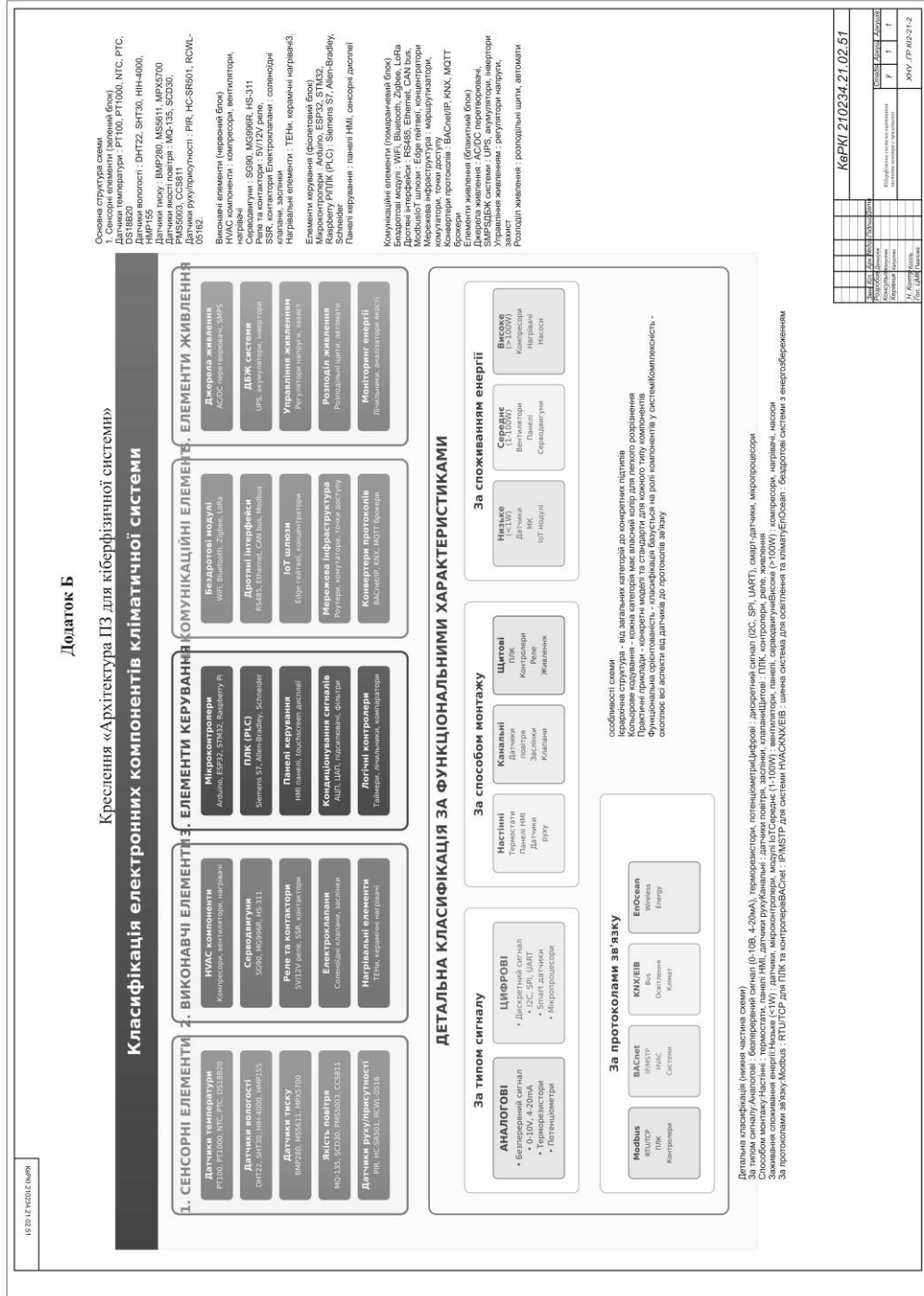
34. Офіційний сайт програмного продукту URL: <https://www.knxhub.com>. (дата звернення: 20.03.2025)

35. Офіційний сайт компанії «Техно-Майстер» URL: <https://tehno-master.com.ua/ventilyatsiya/administratsij>. (дата звернення: 20.02.2025)

					КВРКІ 210234.21.02.51 ПЗ	
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

ДОДАТОК Б (обов'язковий)

КОПІЯ КРЕСЛЕННЯ “АРХІТЕКТУРА ПЗ ДЛЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ”



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: Оксана ДЕНИСЮК

Співавтор:

Назва: Денисюк_Кіберфізична система оцінювання чистоти повітря у приміщенні

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1:2.4%

Коефіцієнт подібності 2:0.8%

Мікропробіли: 6

Заміна букв: 17

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-17 06:26:29.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

Обґрунтування:

2025-06-17

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 1.0%

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

ID: 246371 Title: БКР Кіберфізична система оцінювання чистоти повітря у приміщенні Added in a DB: 2025-06-17 Authors: Оксана ДЕНИСЮК Heads: Марія КАПУСТЯН Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	78055	571	1624 (2%)	20 (4%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Денисюк Оксана

Тема: Кіберфізична система оцінювання чистоти повітря у приміщенні

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 64

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розроблення та дослідження кіберфізичної системи, яка здатна обробляти та аналізувати дані про стан повітря в приміщенні, включаючи концентрацію шкідливих речовин, рівень кисню, вологість, температуру та інші критичні параметри якості повітря, із застосуванням NDIR-сенсорів, VOC-датчиків для вимірювання температури, вологості, CO₂, твердих частинок PM_{2.5}, PM₁₀, легких органічних сполук (ЛОС), архітектура системи використовує мікроконтролери (Arduino, ESP32, STM32), що виконують збір даних, базову обробку (фільтрація шумів, калібрування) і передають інформацію на вищі рівні, здатна забезпечувати зберігання й обробку отриманої інформації та в автоматизованому режимі приймати рішення щодо покращення якості повітря.

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

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі кваліфікаційної роботи проведено дослідження предметної області (проведено аналіз пов'язаних із тематикою моніторингу якості повітря всередині приміщень, а також ключові аспекти побудови кіберфізичних систем. Проведено огляд і аналіз існуючих сенсорів та апаратних платформ, обговорено протоколи зв'язку та хмарні сервіси, а також наведено варіанти методів обробки, приділено промисловим і комерційним рішенням, які вже існують на ринку, та виявлено їхні обмеження. та виконано постановку задачі дослідження. В другому розділі кваліфікаційної роботи проведено

аналіз, визначено апаратні та програмні підсистеми програмно-технічного засобу; способи взаємодії між підсистемами та описано функціональне призначення основних модулів та інформаційних ресурсів програмно-технічного засобу. В третьому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналітику моделі програмного забезпечення, визначено модульну структуру ПЗ, що забезпечує гнучкість і масштабованість; розроблено алгоритми для ініціалізації, збору даних, обробки, візуалізації та керування, представлені у вигляді таблиць; реалізовано програмно-технічний засіб на базі ESP32 із підключенням датчиків, дисплея, реле та Wi-Fi-модуля, програмне забезпечення написано в Arduino IDE, використано бібліотеки для роботи з компонентами, проведено тестування системи в реальних умовах, яке показало її ефективність: система коректно вимірює параметри повітря, реагує на перевищення норм і забезпечує зручну візуалізацію даних.

4. Позитивні сторони роботи: задовільна практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага до програмно-апаратної реалізації та тестування програмно-технічного засобу. Результати алгоритмів для кіберфізичної системи та програмно-технічна реалізація кіберфізичної системи потребують більш детального опису.

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

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Макашишин
Венге Анатолійович, к.т.н., доцент кафедр АКІТ та Р

"18" червня 2025 р.

 (підпис)

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

Оксана ДЕНИСЮК

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-21-2

ЗАЯВА

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

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

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

16.06. 2025 року



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

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

Назва: Кіберфізична система оцінювання чистоти повітря у приміщенні

Автор: Оксана ДЕНИСЮК

Спеціальність: 123– Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Марія КАПУСТЯН, к.т.н, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

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

Підтвердження:

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

- 1) Використані джерела розміщені переважно в оглядових та аналітичних розділах, які не стосуються авторського дослідження чи оригінальних результатів;
- 2) усі запозичення фрагментарні, супроводжуються належним бібліографічним оформленням та не перевищують допустимого обсягу;
- 3) деякі збіги зафіксовані як загальноживані формулювання або технічні терміни, що не мають ознак авторського стилю ;
- 4) окремі виявлені збіги стосуються цифрових послідовностей, які є стандартними елементами в задачах технічного моделювання та не підлягають авторському праву;
- 5) наявні в тексті умовні скорочення , символи або індекси , зафіксовані системою як «модифікації тексту» мають технічний характер і не є свідченням неоригінальності змісту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 2,4% і адресується до 35 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 0,8%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

Гарант ОП

Завідувач кафедри КІС

Марія КАПУСТЯН

Андрій Нічепорук

Ольга ПАВЛОВА