

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система моніторингу концентрації пилу в приміщенні на базі  
ESP32/Arduino  
Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 022020.22.01.62 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група КІ2-22-1

Керівник

Науковий ступінь, учене звання

Нормоконтролер канд. фіз.-мат. наук, доцент

Науковий ступінь, учене звання

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри КІС  
« 01 » червня 2026 р.

дата

  
Підпис

Вадим ДРИГУЛА  
Ініціали, прізвище

  
Підпис

Олексій ЛИГУН  
Ініціали, прізвище

  
Підпис

Тетяна КИСІЛЬ  
Ініціали, прізвище

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ініціали, прізвище

Хмельницький 2026

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувачка кафедри КІС

  
Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дригулі Вадиму Сергійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система моніторингу концентрації пилу в приміщенні на базі ESP32/Arduino

Керівник проекту (роботи) Лигун Олексій Олегович

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

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Аналіз відомих рішень та вибір стратегії і засобів реалізації завдання

Архітектура розподіленої універсальної системи

Алгоритмічне та програмне забезпечення розподіленої універсальної системи

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

Архітектура ПЗ проекту

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи

Апаратне забезпечення проекту

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих рішень та вибір стратегії і засобів реалізації завдання	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – Архітектура розподіленої універсальної системи	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – Алгоритмічне та програмне забезпечення розподіленої універсальної системи	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	24.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	25.05.2026	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач

Підпис

Валим ДРИГУЛА

Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис

Олексій ЛИГУН

Імя, ПРІЗВИЩЕ



## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система моніторингу концентрації пилу в приміщенні на базі ESP32/Arduino».

Автор роботи: Вадим ДРИГУЛА.

Керівник роботи: Олексій ЛИГУН.

Пояснювальна записка: 69 с., 4 рис., 4 дод., 50 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

API, ESP32, GYVERLIBS, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ, ПИЛ, РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА.

Ця кваліфікаційна робота бакалавра зосереджена на розробці та всебічному дослідженні програмно-апаратної кіберфізичної системи, призначеної для моніторингу концентрації пилу у приміщеннях, функціонал якої реалізовано на мікроконтролерній платформі ESP32. Актуальність обраної тематики зумовлена зростаючими вимогами до екологічної безпеки та підтримання оптимальної якості повітря в житлових, офісних, а також серверних приміщеннях. У таких середовищах наявність дрібнодисперсного пилу становить потенційну загрозу, здатною негативно впливати як на стан здоров'я людини, так і на функціональну стабільність комп'ютерного обладнання. Відповідно, оперативний контроль за вмістом твердих частинок (PM2.5) є важливим.

Метою дослідження є розробка апаратно-програмного комплексу для збору, обробки та візуалізації даних про стан повітря в реальному часі. Він базується на аналізі методів нефелометрії, використанні датчика Waveshare Dust Sensor, платформи ESP32 та розподіленій архітектурі з локальним API на основі бібліотеки GyverLibs. Особливістю є інтеграція механізмів самоорганізації, що забезпечують дистанційний контроль через веб-інтерфейс (локальна Wi-Fi) та візуалізацію даних на дисплеї 1602A.





  
Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Аналіз відомих рішень та вибір стратегії і засобів реалізації завдання .....	6
1.1 Походження, сучасний стан та порівняльний аналіз методів вимірювання дрібних часток у повітрі.....	6
1.2. Технічне обґрунтування вибору обчислювальної платформи на базі архітектури AVR.....	14
1.3. Стратегія побудови апаратної частини без використання паяних з'єднань.....	16
1.4. Методологія програмної обробки сигналів та вибір алгоритмів фільтрації .....	18
2 Архітектура розподіленої універсальної системи .....	21
2.1 Архітектура системи в загальному з поясненнями .....	21
2.2 Функціонал завдань, які може виконувати система в своїх компонентах .....	30
2.3 Реалізація самоорганізації в архітектурі системи.....	38
3 Алгоритмічне та програмне забезпечення розподіленої універсальної системи .....	44
3.1 Алгоритми псевдокодом з поясненнями.....	44
3.2 Структура і склад ПЗ.....	49
3.3 Веб-базований інтерфейс для дистанційного керування та моніторингу .....	55
3.4 Приклади застосування системи .....	62
Висновки.....	67
Перелік джерел посилань .....	69
Додаток А Копія креслення «Структура кіберфізичної системи» .....	74

КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ				
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
Виконав	Вадим ДРИГУЛА			
Перевір.	Олексій ЛИГУН			
Н.контр.	Гетяна КИСЛЬ			
Затвер.	Ольга ПАВЛОВА			01.06
Кіберфізична система моніторингу концентрації пилю в приміщенні на базі ESP32/Arduino				
		Літера	Арк.вщ	Арк.вщів
		у	2	69
ХНУ КІ2-22-1				

Додаток Б Копія креслення «Алгоритми роботи ПЗ мікроконтролера» .....	75
Додаток В Копія креслення «Схема електрична принципова» .....	76
Додаток Г Лістинг коду програмного забезпечення прошивки мікроконтролера .....	77

					КВРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

## ВСТУП

Забезпечення оптимального мікроклімату у внутрішніх приміщеннях передумовою не лише для підтримання належного стану здоров'я людини, але й для забезпечення її сталої працездатності та когнітивних функцій. Сучасні екологічні дослідження систематично демонструють, що концентрація забруднюючих речовин у повітрі всередині будівель, включаючи житлові та офісні простори, нерідко перевищує аналогічні показники на відкритому повітрі. Ця тенденція значною мірою зумовлена низкою чинників, серед яких недостатня ефективність систем вентиляції, використання певних будівельних матеріалів та наявність численних побутових джерел пилу і хімічних випарів. Особливу епідеміологічну небезпеку становлять дрібнодисперсні аерозольні частки, які через свої мікроскопічні розміри здатні проникати глибоко у дихальні шляхи, а також, у випадку PM<sub>2.5</sub>, долати альвеолярно-капілярний бар'єр, спричиняючи широкий спектр респіраторних захворювань, алергічні реакції та, за певних умов, системні запальні процеси, що можуть впливати на серцево-судинну та нервову системи. Отже, моніторинг та контроль якості повітря всередині приміщень набуває значення для превентивної медицини та гігієни довкілля.

Традиційні професійні станції моніторингу якості повітря, що застосовуються для детального аналізу та сертифікації, характеризуються високою вартістю, складністю експлуатації та потребою у спеціалізованому обслуговуванні, що значно обмежує їхнє широке впровадження для повсякденного або персонального використання. Ці системи, як правило, використовуються для великомасштабних екологічних досліджень або для виконання регуляторних вимог у промисловості. Проте, стрімкий розвиток мікроелектроніки, включаючи мініатюризацію сенсорів та здешевлення обчислювальних компонентів, відкриває принципово нові можливості для розробки доступних, компактних та ефективних персональних пристроїв, призначених для безперервного контролю стану повітря. Створення таких

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систем, що базуються на відкритих апаратних платформах, які сприяють інноваціям та зменшують бар'єри для розробників, є одним з найбільш актуальних та перспективних напрямків сучасної інженерної думки та технологічного розвитку, що відповідає суспільному запиту на підвищення рівня обізнаності щодо якості оточуючого середовища та сприяє персоніфікованому підходу до збереження здоров'я.

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

# 1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ РІШЕНЬ ТА ВИБІР СТРАТЕГІЇ І ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАВДАННЯ

## 1.1 Походження, сучасний стан та порівняльний аналіз методів вимірювання дрібних часток у повітрі

В умовах стрімких змін, питання екологічної безпеки набуває першочергового значення для сталого розвитку людства. Активне розростання міст, концентрація населення в урбанізованих центрах, розширення промислового виробництва та збільшення кількості автотранспорту призводять до неминучого погіршення якості атмосферного повітря. Особливу увагу слід приділяти контролю за чистотою повітря всередині приміщень, де людина проводить значну частину свого часу – вдома, на роботі, в навчальних закладах та лікарнях. Згідно з дослідженнями, сучасна людина проводить у закритих приміщеннях до 90% свого часу [21, 32]. Якість повітря, що визначається комплексом фізичних, хімічних та біологічних факторів, безпосередньо впливає на наше здоров'я, продуктивність праці, когнітивні функції та загальну тривалість життя [34].

Вивчення історії формування методів виявлення дрібних часток у повітрі дає можливість більш глибоко зрозуміти принципи роботи сучасних технологій та оцінити їхній потенціал. Необхідно проаналізувати різноманітні існуючі методи для з'ясування їхньої ефективності та надійності [20]. Порівняльний аналіз дозволяє визначити переваги та недоліки кожного з методів, а також встановити, які з них є найбільш прийнятними для конкретних умов застосування.

Історичний огляд еволюції цих методів демонструє прогрес у нашому розумінні складу повітря та його впливу на стан здоров'я людини. Впровадження інноваційних технологій дозволяє визначати частинки дедалі меншого розміру та з більшою точністю вимірювати їхню концентрацію в повітрі [28]. Це сприяє більш повному розумінню джерел забруднення та розробці стратегій для

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

покращення якості повітря. Методи виявлення дрібних часток в повітрі мають довгу історію розвитку, починаючи з простих візуальних спостережень і закінчуючи складними інструментальними методами [30]. Спочатку, оцінка якості повітря базувалася на органолептичних властивостях, таких як запах і видимість диму або пилу. З розвитком наукових знань і техніки почали з'являтися перші інструменти для вимірювання концентрації забруднюючих речовин.

В 19-му столітті були розроблені перші хімічні методи аналізу повітря, які дозволяли визначати вміст певних газоподібних забруднювачів. На початку 20-го століття з'явилися перші прилади для вимірювання концентрації пилу в повітрі, такі як імкінджери та фільтри [25]. Ці прилади дозволяли збирати проби повітря і потім визначати масу пилу за допомогою зважування.

В середині 20-го століття, з розвитком електроніки та оптики, почали з'являтися більш досконалі методи вимірювання, такі як нефелометрія та спектрометрія [24]. Нефелометрія базується на вимірюванні розсіяного світла, яке виникає при проходженні світлового променя через забруднене повітря. Спектрометрія дозволяє визначати концентрацію різних речовин за їхніми спектрами поглинання або випромінювання.

У другій половині 20-го століття були розроблені автоматичні станції моніторингу якості повітря, які дозволяють проводити безперервні вимірювання концентрації різних забруднюючих речовин [31]. Ці станції оснащені різними сенсорами та аналізаторами, які передають дані в центральний комп'ютер для обробки та аналізу.

В даний час існує велика кількість різних методів виявлення дрібних часток в повітрі, які різняться за принципом дії, чутливістю, точністю та вартістю [21]. До основних методів відносяться:

Фільтрація: цей метод полягає у відборі проб повітря через фільтр, на якому затримуються тверді частинки. Після цього фільтр зважується, і визначається маса затриманих частинок [26].

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптичні методи: ці методи базуються на вимірюванні розсіяного або поглинутого світла. До них відносяться нефелометрія, турбідиметрія та спектрометрія [27].

Електричні методи: ці методи базуються на вимірюванні електричного заряду частинок. До них відносяться електростатична преципітація та іонізаційна спектрометрія.

Аеродинамічні методи: ці методи базуються на вимірюванні швидкості осідання частинок в повітрі. До них відносяться імпінджери та циклони.

Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, і вибір конкретного методу залежить від поставлених завдань та наявного обладнання [29].

Порівняльний огляд методів виявлення дрібних часток в повітрі дозволяє визначити найбільш ефективні та надійні методи для різних ситуацій [38]. При виборі методу необхідно враховувати такі фактори, як:

Необхідна чутливість та точність вимірювань

Діапазон розмірів частинок, які необхідно виявляти

Вартість обладнання та експлуатаційні витрати

Необхідність проведення безперервних вимірювань

Наявність кваліфікованого персоналу

Сучасні технології, що використовуються для визначення наявності дрібних часток у повітрі, дають змогу збирати вичерпні дані про їхні розміри, концентрацію та хімічний склад [18]. Це, своєю чергою, значно покращує можливості контролю за чистотою повітря та допомагає в розробці дієвих стратегій для охорони здоров'я населення.

Серед багатьох забруднюючих речовин, як створених людиною, так і природних, особливу небезпеку для живих організмів становлять зважені тверді частки. У наукових працях та нормативних актах різних країн їх часто називають терміном Particulate Matter (PM) [21]. Цей термін охоплює дуже різномірну суміш мікроскопічних твердих частинок і крихитних крапель рідини, які перебувають у повітрі в завислому стані.

Склад атмосферних частинок – явище надзвичайно мінливе. Ці частинки можуть варіюватися від порівняно безпечних, таких як звичайний мінеральний пил або частинки ґрунту, до вкрай шкідливих. До останніх належать сполуки важких металів, побічні продукти неповного згоряння палива (наприклад, сажа), алергени, що походять від рослин, і навіть патогенні мікроорганізми. Зважаючи на таку різноманітність, ретельний аналіз цих частинок має вирішальне значення для точної оцінки стану навколишнього середовища.

При оцінці потенційних ризиків для здоров'я людини першочергову увагу приділяють аеродинамічному діаметру частинок. Цей параметр є основним критерієм для класифікації частинок на різні фракції. Особливу небезпеку становлять частинки розміром менше 10 мікрметрів (PM10), але найбільшу загрозу несуть найдрібніші частинки, відомі як PM2.5, діаметр яких не перевищує 2,5 мікрметри [32]. Ці дрібні частинки здатні проникати крізь природні захисні бар'єри дихальної системи людини, що робить їх особливо небезпечними [34]. Їх здатність обходити захисні механізми пов'язана з їхнім малим розміром, що дозволяє їм проникати глибоко в легені, спричиняючи серйозні проблеми зі здоров'ям. З цієї причини моніторинг і контроль PM2.5 є аспектами охорони здоров'я та екологічної політики. Глибоке розуміння складу, походження та поведінки таких частинок в атмосфері має важливе значення для розробки дієвих стратегій зменшення їхнього впливу на здоров'я населення та екосистеми.

Великі частинки аерозолу затримуються волосками в носі та слизовими оболонками верхніх дихальних шляхів. Вони осідають у трахеї та видаляються з організму природним шляхом. Але дрібніші фракції аерозолу безперешкодно проникають глибоко в легені, досягаючи бронхіол та альвеол. Ще менші наночастинки здатні проникати крізь стінку альвеол у кров. Звідти вони разносяться по всьому тілу, спричиняючи системні запальні реакції, оксидативний стрес, утворення тромбів і загострення серцево-судинних захворювань.

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для створення нової кіберфізичної системи, яка вимірюватиме рівень забруднення повітря, потрібно було обрати відповідний метод вимірювання [1]. Тому в цій роботі ми детально вивчили різні фізичні принципи, які використовуються для реєстрації аерозолів. Розвиток методів вимірювання аерозолів пройшов довгий шлях [20]. Раніше використовувалися прості механічні методи. Зараз існують точні оптоелектронні і лазерні системи. Ми проаналізували історію розвитку цих методів, щоб зрозуміти їхні переваги та недоліки, і на цій основі вибрати найкращий метод для нашої системи. Ми розглянули принципи роботи різних приладів, їхню точність, чутливість, а також можливість застосування в кіберфізичній системі. Також ми враховували вартість і складність технічного обслуговування різних методів. Це дозволило нам зробити обґрунтований вибір методу вимірювання, який найкраще підходить для нашої розробки. Важливим етапом було дослідження сучасних тенденцій у цій галузі, щоб забезпечити конкурентоспроможність нашої системи та її відповідність актуальним вимогам екологічного моніторингу.

Гравіметричний аналіз історично склався як найперший та досі залишається найбільш обґрунтованим з точки зору метрології методом [30]. Він визнаний у всьому світі як еталонний. Суть цього підходу полягає у використанні основних законів класичної фізики, а саме у безпосередньому вимірюванні маси досліджуваної речовини.

Процес вимірювання включає застосування спеціальних аспіраторів. Ці пристрої забезпечують примусове проходження точно визначеного об'єму досліджуваного повітря через аналітичний фільтр. Для виготовлення таких фільтрів зазвичай застосовують гідрофобні матеріали, наприклад, скловолокно, кварцове волокно або пористі полімерні мембрани. Важливо, щоб ці матеріали характеризувалися стабільною масою та не поглинали вологу з повітря.

Пояснюючи детальніше, гравіметричний аналіз дозволяє визначити кількість конкретної речовини у зразку, базуючись на точному вимірюванні маси цієї речовини після її виділення у чистому вигляді. Наприклад, якщо ми хочемо

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначити вміст твердих частинок у повітрі, ми пропускаємо певний об'єм повітря через фільтр. Всі частинки, які є у повітрі, залишаються на фільтрі. Потім ми вимірюємо масу фільтра до і після проходження повітря. Різниця між цими значеннями і буде масою твердих частинок, які були у відібраному об'ємі повітря.

Використання аспіраторів є важливим етапом, оскільки вони дозволяють контролювати об'єм повітря, який проходить через фільтр [26]. Це принципово для точного розрахунку концентрації речовини у повітрі. Гідрофобні матеріали для фільтрів необхідні для того, щоб уникнути похибок, пов'язаних з поглинанням вологи з повітря, що може суттєво вплинути на результати вимірювання маси. Стабільність маси матеріалів фільтра також є вирішальною, оскільки будь-які зміни маси самого фільтра під час вимірювання призведуть до помилок.

У наукових дослідженнях та промисловості гравіметричний аналіз застосовується для різноманітних цілей, включаючи моніторинг забруднення повітря, аналіз якості води, визначення складу ґрунтів та контроль за технологічними процесами у виробництві. Хоча існують і інші методи аналізу, гравіметрія залишається цінним інструментом завдяки своїй точності та надійності, особливо коли потрібне визначення абсолютної кількості речовини.

Відбір проб – це тривалий процес, чітко визначений нормативними актами, часто він триває двадцять чотири години, щоб отримати середньодобовий показник концентрації. Після завершення експозиції фільтр обробляють у спеціальних ексикаторах для стабілізації температури та вологості, а потім зважують на точних аналітичних вагах. Різниця між масою чистого фільтра до вимірювання та фільтра з осадом після нього дає змогу розрахувати концентрацію пилу в одиниці об'єму повітря. Попри високу точність, гравіметричний метод має деякі недоліки, які роблять його непридатним для автоматизованих систем моніторингу в реальному часі [31].

Обмеження включають: отримання даних окремими порціями, значний час очікування результатів, неможливість виявити короткі сплески забруднення, великі витрати праці та потреба у фахівцях. Далі з'явилися радіоізотопні методи, зокрема метод поглинання бета-променів [30]. Він базується на вимірюванні послаблення іонізуючого випромінювання, коли воно проходить крізь шар речовини. Прилади цього типу мають механізм протягування стрічки, яка рухається через вимірювальну камеру. Радіоактивний вуглець-14 випромінює бета-частинки, які проходять крізь пил на стрічці, а детектор (лічильник Гейгера-Мюллера або сцинтиляційний лічильник) фіксує інтенсивність випромінювання, що залишилася. Цей метод автоматизує вимірювання та дає дані щогодини з великою точністю. Проте, використання іонізуючого випромінювання суттєво обмежує застосування таких приладів через вимоги безпеки, необхідність ліцензій та складність утилізації відходів. Через це радіоізотопний метод не підходить для дому та систем Розумного будинку.

Використання п'єзоелектричних мікроваг із кварцовими резонаторами - ще один поширений спосіб [18]. Такі датчики працюють на основі п'єзоефекту. Коли частинки пилу осідають на кристал кварцового резонатора, його маса змінюється, що згідно з рівнянням Зауербрея, призводить до зміни резонансної частоти коливань. Цей метод дуже чутливий і дозволяє вимірювати масу на рівні нанограмів. Однак дослідження показують, що він дуже чутливий до змін температури та вологості. Зміни частоти через температуру та конденсація вологи можуть призвести до помилок, більших за корисний сигнал. Це вимагає складних систем для підтримки постійної температури та вологості, що ускладнює конструкцію приладу та здорожує його.

З огляду на певні недоліки наявних способів, у системах моніторингу інтернету речей доцільно застосовувати оптичні методи, зокрема нефелометрію [20]. Цей метод ґрунтується на розсіюванні світла в неоднорідному середовищі. Коли світло проходить крізь частинки в повітрі, відбувається взаємодія, яку для

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

великих частинок пояснює теорія Мі, а для малих – теорія Релея. Сила та кут розсіяного світла дають дані про кількість і розмір часток аерозолю.

У сучасній промисловості є два основні типи оптичних сенсорів: лазерні та світлодіодні [27]. Лазерні сенсори використовують світло напівпровідникового лазера, що дає змогу досягти високої точності вимірювань і виявляти дуже малі частинки. Але ці пристрої мають складну конструкцію. Зазвичай, вони потребують примусового подавання повітря для забезпечення потоку через кювету. Наявність рухомих частин зменшує надійність системи, оскільки вентилятори мають обмежений термін служби, шумлять, споживають більше енергії та з часом забруднюються, що впливає на точність вимірювань.

У цьому дипломному проєкті, спираючись на техніко-економічний аналіз, ми вирішили застосувати оптичний датчик Sharp GP2Y1010AU0F на основі інфрачервоного світлодіода [9, 11, 19].

По-перше, цей сенсор працює на пасивній конвекції повітря. Світлодіод нагрівається, і через різницю температур утворюється потік повітря через камеру вимірювання. Це означає, що не потрібні додаткові вентилятори, що робить пристрій тихим, надійним і продовжує термін його роботи.

По-друге, інфрачервоне випромінювання дає змогу зменшити вплив видимого світла ззовні.

По-третє, датчик має просту аналогову частину інтерфейсу. На відміну від цифрових датчиків, де результат уже оброблений, аналоговий вихід дає доступ до вихідного сигналу, що важливо для аналізу й розробки методів фільтрації та налаштування, особливо в наукових дослідженнях.

Подібні рішення описані у дослідженнях систем моніторингу повітря на базі Arduino та IoT платформ [10, 16, 33].

## 1.2. Технічне обґрунтування вибору обчислювальної платформи на базі архітектури AVR

Вибір апаратної платформи – важливий крок у проектуванні кіберфізичних систем [22]. Характеристики мікроконтролера впливають на можливості, швидкість, надійність, енергоефективність і вартість системи. У цій роботі вибір ускладнюється вимогами до обробки сигналів у реальному часі, продиктованими оптичним методом вимірювання.

Для керування датчиком і обробки даних ми порівняли декілька типів обчислювальних пристроїв, доступних на ринку мікроелектроніки. Ми розглянули, чи варто застосовувати одноплатні мікрокомп'ютери та мікроконтролерні системи різних архітектур.

Використання мікрокомп'ютерів із повноцінними операційними системами надає розробникам чималі обчислювальні можливості [17]. Вони придатні для складних алгоритмів, баз даних, веб-серверів, графічних інтерфейсів і мережевих протоколів. Проте, для керування апаратурою в реальному часі в них є мінус - невизначений час виконання. Операційна система є багатозадачною, де процесор розподіляє ресурси між багатьма процесами. Це викликає затримки при керуванні портами вводу-виводу. Для датчика Sharp, якому потрібна точність вимірювань на рівні мікросекунд, така поведінка неприйнятна. Також, мікрокомп'ютери споживають багато енергії, довго завантажуються та можуть пошкодити файлову систему при втраті живлення. Тому є сенс розглянути одноплатні мікрокомп'ютери та мікроконтролерні системи з іншою структурою.

Сучасні 32-розрядні мікроконтролери ARM Cortex-M мають добру продуктивність при невеликому споживанні енергії [22]. Вони швидкі, мають багато пам'яті та різні периферійні пристрої. Але їх складніше вивчити і налаштувати, особливо коли час обмежений, як у дипломному проєкті. Також, більшість цих контролерів працюють з напругою 3.3 В, тому потрібні додаткові

схеми для узгодження рівнів, якщо підключати датчики з логікою 5 В, наприклад, сенсор Sharp.

Зважаючи на різні технічні та економічні причини, ми вирішили використати платформу Arduino Nano для цього проєкту. Вона працює на 8-бітному мікроконтролері ATmega328P з AVR архітектурою [36]. Ця архітектура, створена Atmel, є типовим прикладом Гарвардської архітектури. Її головна особливість – це розділення пам'яті для програм (Flash) і даних (SRAM) та використання окремих шин для доступу до них. Це дає змогу вибирати наступну команду одночасно з виконанням поточної, що пришвидшує процес і дає можливість виконувати більшість команд за один такт. З частотою 16 МГц це забезпечує швидкість приблизно 16 мільйонів операцій за секунду, що цілком вистачає для опитування датчика та початкової обробки даних.

Здатність платформи працювати в режимі реального часу є її основною перевагою для нашого завдання. Програма, запущена на мікроконтролері без складної операційної системи, повністю контролює апаратні засоби процесора. Це дає змогу створювати часові інтервали та імпульси з точністю до такту. Така точність дуже важлива, щоб відповідати вимогам датчика Sharp, який потребує вимірювання напруги рівно через 0.28 мілісекунди після імпульсу на світлодіод. Навіть невеликі відхилення від цього часу призведуть до неточних вимірювань напруги під час перехідного процесу, що зіпсує результати експерименту.

Важливою перевагою ATmega328P є інтегрований 10-бітний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) типу SAR. Він перетворює аналогові сигнали від датчиків у цифрові коди. 10-бітна розрядність дає 1024 рівні дискретизації в діапазоні від 0 до 5 В, забезпечуючи теоретичну роздільну здатність приблизно 4.88 мВ на відлік. З огляду на чутливість датчика пилу (близько 0.5 В на 0.1 мг/м<sup>3</sup>), така точність дозволяє виявляти зміни концентрації пилу до тисячних часток міліграма на кубічний метр, чого достатньо для побутових приладів моніторингу довкілля [1, 14].

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окрім технічних аспектів, важливими були експлуатація та ергономіка. Arduino Nano має малий розмір DIP-30, тому її легко встановити на макетні плати. Вона має стабілізатор напруги, що дозволяє живлення від 6 до 12 В, і перетворювач USB-UART для програмування та передачі даних на комп'ютер. Велика спільнота розробників, відкрита документація та бібліотеки коду спрощують розробку [37], дозволяючи зосередитися на алгоритмах та аналізі даних, а не на проблемах з обладнанням.

### 1.3. Стратегія побудови апаратної частини без використання паяних з'єднань

У сучасній інженерії, особливо на початкових етапах досліджень і розробок, важливим є швидке прототипування [23]. Це створення діючих макетів продукту швидко та з невеликими витратами. Основна мета – перевірити рішення, працездатність ідей, налагодити програми та знайти можливі проблеми з апаратним забезпеченням до виготовлення дорогої плати. У цьому проєкті вирішили не використовувати традиційний монтаж, а збирати все на макетних платах.

Цей стратегічний вибір базується на важливих методологічних та практичних факторах. Спочатку, макетна плата дає велику свободу у налаштуванні електричної схеми [23]. Під час тестування часто треба швидко змінювати схему: міняти деталі, змінювати з'єднання або додавати нові частини для індикації чи зв'язку. Зі звичайною пайкою кожна зміна потребує втручання, нагрівання плати та видалення припою. Це забирає багато часу і є ризик перегріти та пошкодити чутливі компоненти. Без пайки зміни вносяться дуже швидко, просто переставляючи дроти в потрібні отвори.

Необхідно розуміти, що перехід до безпайкової технології монтажу має певні обмеження. Інженер повинен добре знати фізику електричних контактів та електромагнітні процеси в ланцюгах. Паяне з'єднання забезпечує дифузію

металів, створюючи цілісний провідник з малим опором. Натомість, пружинний контакт макетної плати є механічним і має певний перехідний опір. Цей опір може змінюватися залежно від стану контактних поверхонь, їх окислення, сили притискання пружини та вібрації. Довгі з'єднувальні провідники додають паразитну індуктивність та ємність, що може викликати небажані резонанси та спотворення сигналів.

Для цього проєкту велике значення має організація живлення, оскільки навантаження працює імпульсно. Пил-сенсор Sharp GP2Y1010AU0F генерує короткі світлові імпульси, а коли вмикається інфрачервоний світлодіод, споживання струму різко зростає.

В ідеалі джерело живлення має миттєво реагувати на зміни навантаження та підтримувати стабільну напругу, але в реальності опір дротів та контактів призводить до падіння напруги.

Тому, коли відбувається світловий імпульс, напруга в точці підключення сенсора може тимчасово знижуватися. Це небажано, бо може вплинути на роботу мікроконтролера, спричинити його перезавантаження або призвести до помилок АЦП, який використовує напругу живлення як опорну.

Для обходу цих негативних наслідків ми створили стратегію локального накопичення енергії. Вона передбачає розподілену систему збереження енергії. Ми розмістили великий електролітичний конденсатор на макетній платі поруч із виводами живлення датчика, близько до точки споживання струму. Цей конденсатор діє як локальний резерв енергії. Він заряджається від основного джерела живлення між вимірюваннями. Коли вмикається світлодіод і виникає велике споживання струму, конденсатор віддає свій заряд, компенсуючи падіння напруги в дротах. Це рішення поліпшує живлення і забезпечує стабільність вимірювань [33].

У схему додали RC-фільтр, що складається з резистора та конденсатора. Цей фільтр захищає схему двома способами: він обмежує струм світлодіода, щоб він не зіпсувався, і пригнічує високочастотні завади, не даючи їм потрапити з

цифрової частини схеми в аналогові кола датчика. Важливо правильно розташувати провідники GND. Щоб зменшити вплив зворотних струмів на сигнал, з'єднання із загальним проводом роблять у формі зірки або зводять в одну точку з низьким імпедансом. Застосування електротехніки допомагає створити надійний прототип вимірювального пристрою, незважаючи на можливі недоліки безпайкового монтажу [35].

#### 1.4. Методологія програмної обробки сигналів та вибір алгоритмів фільтрації

Апаратна розробка – це лише початковий етап створення системи. Функціональність та інтелект пристрою реалізуються на рівні вбудованого програмного забезпечення [39]. У даному проєкті ПЗ не просто зчитує дані, воно важливе для керування процесом вимірювання, обробки сигналів, фільтрації шумів, математичної інтерпретації величин та підготовки даних до передачі або візуалізації.

Електричний сигнал на вході аналого-цифрового перетворювача (АЦП) з оптичного датчика є складним і випадковим [24]. Він містить корисну інформацію, але також і різні шуми, що походять як з внутрішніх, так і зовнішніх джерел. Якщо відобразити необроблені дані з АЦП, отримаємо хаотичний графік, з якого важко виділити зміни якості повітря. Тому для правильної роботи системи необхідні дієві алгоритми цифрової фільтрації [39].

Програмна реалізація була розроблена як послідовний конвеєр обробки даних, що включає чотири логічні етапи.

Етап 1: Синхронізація часу та вибірка.

Програма керування мікроконтролером використовує алгоритм контролю часових інтервалів. Мікроконтролер, застосовуючи вбудовані апаратні таймери та функції затримки, створює сигнал для активації інфрачервоного світлодіода. Відразу після імпульсу запускається таймер відліку часу стабілізації. Згідно з

документацією виробника датчика, найкращий час для зчитування напруги на виході фотоприймача настає через 0.28 мілісекунди. Цей час потрібен для досягнення світлодіодом номінальної яскравості та завершення перехідних процесів у фототранзисторі. Програма забезпечує запуск перетворення АЦП саме в цей момент. Навіть невелике відхилення від цього часу призведе до неточних даних.

Етап 2: Статистичне очищення та видалення недоліків.

Повітря в кімнаті не зовсім однакове всюди. Інколи великі частинки пилу рухаються випадково. Якщо така частинка пролетить біля чутливого елемента датчика, це викликає раптовий стрибок сигналу - імпульсний шум. Це поодинокі явища не показує справжній рівень забруднення, але може зіпсувати обчислення середнього значення. Щоб добре впоратися з цими недоліками, ми обрали медіанну фільтрацію.

Цей фільтр працює так: контролер робить декілька швидких вимірювань поспіль [40]. Потім ці дані сортуються за зростанням. Після сортування відкидаються найменші та найбільші значення, оскільки вони, ймовірно, є шумом. Значення посередині масиву береться за поточне значення вимірюваної величини. Медіанний фільтр допомагає ігнорувати окремі помилкові вимірювання, але при цьому реагує на реальні зміни сигналу.

Етап 3: Згладжування часових рядів і виявлення тренду.

Після медіанної фільтрації дані вже очищені від значних помилок, проте все ще можуть містити певні нерівності та швидкі зміни. Щоб графіки виглядали плавно та щоб побачити довготривалі зміни в концентрації пилу, використовуємо рекурсивний цифровий фільтр - експоненційне ковзне середнє (EMA) [40].

Математично це працює так: нове значення обчислюється як сума поточного вхідного значення та попереднього вихідного значення, помножена на певні ваги. Цей фільтр діє подібно до інтегруючого RC-ланцюга, додаючи інерцію в систему. Коефіцієнт згладжування показує, наскільки велика ця

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інерція. Менший коефіцієнт краще пригнічує шум, але повільніше реагує на різкі зміни концентрації. Експериментальним шляхом ми підібрали оптимальні параметри, які дають стабільні показники та дозволяють швидко реагувати на забруднення.

Етап 4: Калібрування та інтерпретація значень фізичних величин.

На заключному етапі обробки відбувається перетворення цифрових кодів АЦП у фізичні одиниці вимірювання, такі як мікрограми на метр кубічний, для зручного сприйняття користувачем. Цей процес ґрунтується на лінійній апроксимації характеристик датчика. Варто звернути увагу, що оптичні сенсори мають нульову напругу – показник напруги на виході датчика за умови абсолютно чистого повітря. Це явище зумовлене внутрішніми перевідбиттями світла в корпусі. Перед множенням на коефіцієнт масштабування програма враховує це зміщення, віднімаючи його від поточного вимірюваного значення. Крім того, передбачено програмне калібрування, яке передбачає введення поправочних значень на основі порівняння показників пристрою з професійним аналізатором пилу [26]. Це допомагає компенсувати можливі відхилення параметрів датчика та гарантує високу точність розробленої системи.

Поєднання апаратної частини, що базується на надійних компонентах, та системи обробки даних, дає змогу створити інструмент екологічного моніторингу, здатний вирішувати поточні задачі.

## 2 АРХІТЕКТУРА РОЗПОДІЛЕНОЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

### 2.1 Архітектура системи в загальному з поясненнями

Теоретична побудова архітектури кіберфізичної системи, призначеної для моніторингу концентрації пилу, ґрунтується на принципах органічної інтеграції фізичних процесів із динамічним цифровим середовищем обробки даних у реальному часі. Цей підхід дозволяє створювати системи, які здатні не лише збирати емпіричні дані про стан фізичного світу, а й активно взаємодіяти з ним, адаптуючись до змінних умов і забезпечуючи оперативне реагування. У контексті контролю запиленості, така архітектура забезпечує безперервний збір інформації про рівень концентрації пилових частинок, перетворюючи їх у цифрові сигнали для подальшого аналізу та прийняття рішень, що є важливим для промислової безпеки, екологічного моніторингу та охорони здоров'я.

Дана архітектура структурно розглядається як ієрархічна, багаторівнева система, де кожен окремий компонент чи модуль відіграє чітко визначену, специфічну роль у забезпеченні неперервності, точності та цілісності даних протягом усього їхнього життєвого циклу від первинного вимірювання до кінцевого представлення або використання. Зазвичай, ці рівні охоплюють сенсорний шар, який відповідає за збір фізичних показників, комунікаційний рівень для надійного передавання інформації, обчислювальний рівень для її обробки та аналізу, а також рівень інтерфейсу для взаємодії з користувачем або іншими системами. Координація функцій між цими рівнями є запорукою ефективного функціонування всієї системи, оскільки кожен етап вносить свій внесок у верифікацію та валідацію отриманої інформації, протидіючи потенційним джерелам помилок.

Проте, основним методологічним і практичним викликом під час проектування та реалізації такої архітектури є необхідність забезпечення адекватної точності вимірювань, особливо в умовах використання комерційно доступних компонентів, які можуть мати певні обмеження за своїми

метрологічними характеристиками, вартістю або енергоспоживанням. Це вимагає ретельного аналізу потенційних похибок, що можуть виникати через недосконалість датчиків, вплив зовнішніх чинників або шуми в системі передачі даних. Вирішення цього складного завдання досягається за рахунок впровадження глибокої програмно-апаратної оптимізації, яка включає розробку складних алгоритмів фільтрації та калібрування, застосування методів сенсорної фузії для інтеграції даних з різних джерел, а також точне налаштування параметрів вбудованого програмного забезпечення та конфігурації апаратних засобів для максимального використання їхнього потенціалу та мінімізації систематичних і випадкових похибок.

На початковому етапі реалізації архітектурної схеми системи, що передбачає взаємодію з фізичним середовищем, вирішальне значення має вибір та інтеграція первинних сенсорних елементів. У контексті аналізу якості повітря, ця функція покладена на датчик пилу Waveshare Dust Sensor зображено на рисунку 1.1



Рисунок 1.1 – Датчик пилу [41]

Який слугує компонентом для збору емпіричних даних про концентрацію частинок. Розуміння його функціональних характеристик та надійності є важливим для забезпечення достовірності усієї подальшої інформаційної обробки. Його роль як інтерфейсу між фізичним світом та цифровою системою

підкреслює необхідність глибокого аналізу його технічних параметрів та експлуатаційних можливостей.

Функціональна логіка даної архітектури ґрунтується на чіткому розрізненні між станом чистого повітря та наявністю забруднень. У ідеальному випадку, коли досліджувана ділянка оптичної камери не містить дисперсних частинок пилу, пряме світло від інфрачервоного випромінювача не досягає фототранзистора завдяки їхньому кутовому розташуванню. Цей стан слугує базовим референсним рівнем, або нульовим показником. Натомість, при надходженні в камеру повітря, що містить будь-яку суспензію мікрочастинок, відбувається інтерференція світлових хвиль з цими об'єктами, що призводить до їхнього розсіювання у різних напрямках. Саме розсіяні промені світла реєструються фототранзистором. Важливо підкреслити, що інтенсивність цього розсіяного світла, яка фіксується приймачем, емпірично та теоретично встановлена як прямо пропорційна масовій концентрації цих часток у вимірюваному об'ємі. Ця пропорційність, хоч і може мати певні нелінійності за екстремальних концентрацій або неоднорідності розмірів частинок, є принципом для перетворення оптичного сигналу на кількісну оцінку рівня забруднення.

Центральним компонентом архітектурної схеми, який забезпечує виконання обчислювальних операцій та керування периферійними модулями, визначено мікроконтролерну платформу ESP32 який зображений на рисунку 1.2.

Цей вибір обумовлений високою обчислювальною потужністю 32-бітного двоядерного процесора Xtensa LX6, який функціонує на тактовій частоті до 240 МГц і має інтегровані модулі бездротового зв'язку Wi-Fi та Bluetooth. Наявність розвиненої периферії, зокрема прецизійного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), дозволяє здійснювати пряме зчитування сигналів із сенсорних модулів без залучення додаткових зовнішніх контролерів, що суттєво спрощує схемотехніку пристрою.



Рисунок 1.2 – ESP32 [42]

Ця платформа слугує основним обчислювальним ядром системи, відіграючи роль у інтеграції та координації всіх функціональних блоків. Вибір мікроконтролера ESP32 було теоретично обґрунтовано специфічними вимогами до обробки аналогових сигналів, які характеризуються високою динамікою та потребують значної частоти дискретизації. Це дозволяє забезпечити адекватне представлення вхідного сигналу у цифровій формі, мінімізуючи втрату інформації та спотворення, що особливо важливо для точного аналізу змін у вимірюваному середовищі. Платформа ESP32, завдяки своїй апаратній архітектурі, надає необхідні обчислювальні та периферійні ресурси для ефективного виконання таких завдань, що робить її оптимальним вибором для систем з подібними вимогами до збору та обробки даних.

Однією з переваг архітектури ESP32 є наявність інтегрованого аналогово-цифрового перетворювача, який відрізняється високою точністю та роздільною здатністю. Цей прецизійний модуль дозволяє здійснювати перетворення аналогових напруг у цифрові значення з мінімальною похибкою квантування, для досягнення високої достовірності отриманих даних. Можливість застосування вбудованого АЦП значно спрощує дизайн апаратного забезпечення, усуваючи необхідність у зовнішніх компонентах, та сприяє

скороченню потенційних джерел шуму, які могли б виникнути при використанні дискретних перетворювачів. Ця висока роздільна здатність є важливою, особливо враховуючи характеристики вихідного сигналу від датчика пилу. Дослідження показують, що цей сигнал займає відносно вузький динамічний діапазон напруги, що робить кожне найменше коливання значущим для точної інтерпретації концентрації частинок. Забезпечення достатньої роздільної здатності АЦП дозволяє розрізнити тонкі зміни в межах цього вузького діапазону, що є необхідною умовою для точного моніторингу та адекватної оцінки стану навколишнього середовища. Недостатня роздільна здатність, навпаки, могла б призвести до втрати чутливості та неможливості виявлення малих, але важливих флуктуацій.

Архітектура керування процесом вимірювання базується на суворо детермінованих часових інтервалах, що забезпечує послідовне та повторюване виконання операцій. Цей цикл включає три фази: перша активація датчика, яка ініціює його робочий стан і подачу живлення на світлодіод; друга витримка точно визначеної паузи для стабілізації фотоприймача та оптичної системи, що становить 0,28 мілісекунди; і третя безпосереднє зчитування аналогового сигналу після досягнення стаціонарного режиму. Такий ретельний поділ на фази дозволяє гарантувати, що вимірювання здійснюється лише після того, як всі компоненти системи досягнуть стабільного стану та фотоприймач повністю відреагує на світловий імпульс, що є запорукою отримання надійних та відтворюваних даних. Будь-яке відхилення від цієї жорстко визначеної часової сітки в архітектурі керування неминуче призведе до акумуляції систематичних або випадкових похибок у вимірюваннях. Наприклад, передчасне зчитування до стабілізації фотоприймача може зафіксувати перехідні процеси замість стаціонарного значення, суттєво спотворюючи кінцевий результат. З метою уникнення таких критичних порушень, система активно використовує апаратні таймери, які інтегровані у мікроконтролер. Ці таймери забезпечують надзвичайно високу точність та повторюваність часових інтервалів, незалежно

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

від навантаження процесора чи інших програмних затримок, тим самим гарантуючи детермінований характер кожного вимірювального циклу та мінімізуючи вплив зовнішніх факторів на точність збору даних.

Другим концептуальним рівнем у ієрархічній декомпозиції архітектури системи виступає етап фізичної комутації та прототипування. На цій важливій стадії макетна плата яка зображена на рисунку 1.3.

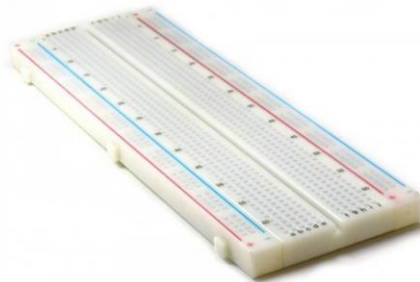


Рисунок 1.3 – Макетна плата [43]

Відома також як breadboard, набуває незамінного значення. Її роль далеко виходить за межі простого засобу з'єднання, встановлюючи її як інструмент для початкової експериментальної валідації та швидкої ітерації схемних рішень. Цей етап є містком між теоретичними моделями та їхнім матеріальним втіленням, дозволяючи інженерам і дослідникам оперативно збирати, тестувати та модифікувати електронні схеми без необхідності використання пайки. Така гнучкість істотно прискорює цикл розробки, сприяючи швидкому виявленню та усуненню потенційних недоліків, а також оптимізації функціональних параметрів. Макетна плата таким чином стає динамічною платформою для дослідження гіпотез та підтвердження теоретичних розрахунків через практичні експерименти, забезпечуючи перехід від абстрактних схемних представлень до відчутних, операційних моделей.

Згідно з принципами електротехніки, застосування безпайкових з'єднань, які є базовою особливістю макетних плат, неминує зумовлює появу додаткових паразитних електричних параметрів. До них належать не лише опори, а й ємності та індуктивності, які зазвичай відсутні в ідеалізованих схемних моделях. Ці паразитичні опори, що формуються в місцях контактів між провідниками та терміналами компонентів, а також внаслідок геометричних особливостей самої плати, здатні суттєво змінювати динамічні та статичні електричні характеристики схеми. Їхня присутність вимагає обов'язкового, скрупульозного врахування при розробці та детальному проектуванні фільтрів живлення, особливо у випадку високочутливих аналогових підсистем або високочастотних цифрових трактів. Ігнорування цих ефектів може призвести до небажаних резонансних явищ, неефективного придушення шуму та пульсацій у лініях живлення, а також до зниження загальної стабільності роботи системи. Це, у свою чергу, може мати критичні наслідки для цілісності даних та надійності функціонування всієї електронної архітектури, що підкреслює необхідність інтеграції компенсаційних заходів на ранніх етапах розробки.

Третій, заключний рівень архітектури системи визначається як шар візуалізації та інтерфейсу користувача. Його практична реалізація здійснюється за допомогою стандартного рідкокристалічного модуля 1602А приклад на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Дисплей [44]

Він забезпечує компактне та енергоефективне відображення оперативних даних. Цей вибір обумовлений його широкою розповсюдженістю в інтегрованих системах, простотою інтеграції та достатньою інформативністю для відображення показників. На цьому рівні відбувається безпосередня взаємодія системи з оператором, забезпечуючи надання інформації у зручному для сприйняття форматі.

Теоретична модель взаємодії з цим дисплейним модулем ґрунтується на принципах ефективної передачі оброблених даних, де дисплей функціонує не просто як засіб відображення сирих електричних сигналів. Натомість, він виступає в ролі кінцевого терміналу, призначеного для презентації вже обчислених, інтерпретованих значень. Зокрема, замість демонстрації безпосередньої напруги, отриманої від сенсора, система виводить точно розраховану концентрацію пилу, виражену у мікрограмах на метр кубічний. Такий підхід має критичне значення для оперативного розуміння стану об'єкта моніторингу, оскільки він трансформує необроблені фізичні показники у релевантні та кількісні метрики, що відповідають галузевим стандартам та вимогам.

Вищезазначена стратегія представлення даних зумовлює необхідність архітектури програмного забезпечення до постійного, безперервного перерахунку вхідних сенсорних даних. Цей процес включає етапи лінеаризації, калібрування та перетворення одиниць виміру, для отримання точних та достовірних значень. Завдання забезпечення такої обчислювальної інтенсивності, а також управління логікою відображення, знаходить ефективну реалізацію завдяки використанню потужного мікроконтролера ESP32. Його двоядерна архітектура, висока тактова частота та достатній обсяг оперативної пам'яті дозволяють безперебійно виконувати складні алгоритми обробки даних у реальному часі, гарантуючи при цьому стабільність функціонування інтерфейсу та оперативність оновлення інформації на дисплеї 1602A.

Етапом у формуванні сучасної архітектури є досягнення її здатності до самоорганізації та автономного функціонування. Ці характеристики не просто додають зручності, але є принципами, що забезпечують стабільність, надійність та ефективність складних систем у динамічних умовах експлуатації. Прагнення до автономності передбачає не лише здатність системи працювати без постійного втручання людини, а й її спроможність адаптуватися до змін, вирішувати непередбачені ситуації та оптимізувати свою діяльність на основі внутрішніх алгоритмів і зовнішніх даних. Самоорганізація, у свою чергу, дозволяє системі динамічно перебудовувати свої компоненти та процеси для досягнення оптимальної продуктивності та стійкості, мінімізуючи необхідність у централізованому контролі та ручному налаштуванні.

Використання двоядерної архітектури, зокрема реалізованої в контролері ESP32, відіграє вирішальну роль у досягненні цього рівня функціональності. Вона надає можливість ефективно розподілити важливі обчислювальні завдання, ізолюючи потоки обробки даних від завдань, пов'язаних з обслуговуванням інтерфейсу користувача. Такий підхід значно підвищує реактивність системи та її здатність обробляти паралельні процеси без взаємних затримок, що є невід'ємною перевагою в системах, де безперервність збору даних є пріоритетом. Розділення цих потоків дозволяє уникнути класичних проблем, таких як блокування основного циклу виконання під час оновлення графічного інтерфейсу, або тимчасові зависання, що можуть призвести до втрати важливих даних.

Ця архітектурна перевага має суттєве значення, оскільки вона істотно мінімізує ймовірність переривання процесу моніторингу, наприклад, забруднення повітря пилом, навіть під час активного оновлення інформації на дисплеї 1602A. Така концепція пропонує значний потенціал для забезпечення неперервності критичних операцій, підтверджуючи, що системні ресурси можуть бути ефективно утилізовані для виконання основних функцій збору даних без компромісів у функціональності інтерфейсу. Забезпечення

стабільності та безперебійності процесу збору даних є важливим для отримання точних, надійних та репрезентативних показників, що, в свою чергу, є основою для прийняття обґрунтованих рішень або для подальшого аналізу.

Зрештою, впровадження такої стійкої архітектури є кроком до побудови системи, що здатна функціонувати автономно протягом тривалого часу без зовнішнього втручання. Однією з інтелектуальних функцій, що підкреслює її характер інтелектуальної кіберфізичної системи, є автоматичне налаштування базової лінії напруги у відповідь на зміни в умовах навколишнього середовища. Цей механізм адаптації не лише забезпечує стабільну та точну роботу датчиків, компенсуючи можливі температурні дрейфи або зміни вологості, а й демонструє здатність системи до саморегуляції та контекстно-орієнтованої поведінки. Таким чином, система перетворюється з пасивного збирача даних на активний елемент, що здатен до динамічного пристосування, самодіагностики та оптимізації своєї діяльності, відображаючи атрибути повноцінної інтелектуальної кіберфізичної системи, здатної ефективно взаємодіяти з фізичним світом та обробляти інформацію з високою точністю.

## 2.2 Функціонал завдань, які може виконувати система в своїх компонентах

Інтеграція мікроконтролерної архітектури ESP32 надає системі унікальну здатність до паралельної обробки різнотипних завдань, що є важливим для комплексних рішень моніторингу. Ця архітектура дозволяє одночасно здійснювати низькорівневу взаємодію з фізичними сенсорами для точного збору даних про стан довкілля, включаючи показники температури, відносної вологості, а також концентрації твердих частинок. Паралельно з цим, система ефективно виконує складні високорівневі логічні операції, що охоплюють алгоритми калібрування сенсорів, фільтрації даних для усунення шуму, агрегації інформації, а також управління комунікаційними протоколами для передачі оброблених даних до віддалених серверів або локальних інтерфейсів користувача. Таким чином, ESP32 забезпечує синергію між апаратними

інтерфейсами та програмною логікою, що є передумовою для надійних вбудованих систем. Ретельний розподіл завдань між двома незалежними процесорними ядрами є фактором у запобіганні затримкам, які можуть суттєво вплинути на точність та актуальність зібраних даних. В архітектурах з одним ядром, послідовне виконання операцій, таких як обробка мережевого стеку, виконання фонових системних служб та зчитування даних з численних датчиків, неминуче призводить до конфліктів ресурсів, що тягне за собою значне збільшення латентності. Це, у свою чергу, може спричинити пропускання важливих показань, некоректне штампування часу або зниження частоти дискретизації, що є особливо неприпустимим у контексті динамічного моніторингу якості повітря. Такі затримки можуть призвести до спотворення даних, що унеможлиблює точну інтерпретацію стану атмосферного повітря та ефективно реагування на потенційні загрози. Отже, паралельна обробка забезпечує стабільну та високу частоту дискретизації, мінімізуючи артефакти даних та підвищуючи загальну достовірність системи моніторингу.

#### 1. Детерміноване керування вимірювальним циклом

Концепція детермінованого керування вимірювальним циклом, відома також як "вибірка в реальному часі", становить вимогу в архітектурі високоточних систем збору даних. Це завдання є надзвичайно критичним, оскільки його належне виконання безпосередньо впливає на достовірність і точність одержуваних результатів. Отже, воно має бути реалізоване в строго ізольованому обчислювальному потоці, якому присвоєно найвищий можливий пріоритет. Таке архітектурне рішення не є довільним; воно зумовлене потребою гарантувати цілісність даних та їхню часову відповідність, запобігаючи небажаним варіаціям, що можуть бути спричинені одночасними системними операціями з меншою чутливістю до часу. Критичність цієї функції впливає безпосередньо з її впливу на загальну надійність та валідність експериментальних або операційних даних, отриманих з вихідного сигналу датчика.

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зокрема, протокол роботи системи передбачає ініціацію точно вивіреного інфрачервоного імпульсу через ІЧ-діод датчика Waveshare. Після цієї фази збудження, зчитування аналогово-цифровим перетворювачем має бути виконано з абсолютною часовою затримкою, що становить рівно 0,28 мілісекунди. Ця мікросекундна затримка не є випадковою; вона ретельно калібрується для того, щоб гарантувати достатню стабілізацію сигналу відгуку датчика після початкового ІЧ-випромінювання. Це дозволяє захоплювати значущі точки даних, які точно відображають фізичне явище, що досліджується. Будь-яке відхилення від цього встановленого часового інтервалу може призвести до отримання даних під час нестабільної або перехідної фази відгуку датчика, що зробить вимірювання науково сумнівними та потенційно поставить під загрозу аналітичні можливості системи.

Виходячи з вищезазначеного, імперативність суворої ізоляції та прискіпливого керування паралельними процесами в цьому контексті є беззаперечною. Будь-яка форма паралельного виконання, особливо та, що стосується фонових операцій наприклад, оновлення тексту на екрані чи інші некритичні задачі системи повинна бути скрупульозно контрольованою, аби запобігти будь-якому перериванню цього мікросекундного інтервалу. Неконтрольоване витіснення або затримки, спричинені такими менш пріоритетними завданнями, неминуче призведуть до несвоєчасного захоплення сигналу, а саме, до зчитування під час перехідного процесу відгуку датчика. Такий сценарій вносить значні неточності у вимірювання, оскільки отримані дані відобразатимуть не стаціонарний або цільовий стан явища, а скоріше проміжний, еволюціонуючий стан, тим самим підриваючи валідність та корисність зібраної інформації. Отже, надійні механізми планування в реальному часі є незамінними для гарантування безперервного виконання завдання вибірки, захищаючи його від непередбачуваних затримок, властивих багатозадачним середовищам, та забезпечуючи достовірність отриманих даних. Архітектурне проектування повинно, таким чином, надавати пріоритет

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

детермінованому виконанню цієї конкретної послідовності вимірювань над усіма іншими вторинними обчислювальними вимогами.

## 2. Ресурсоємна цифрова фільтрація та статистична обробка

В контексті сучасних систем моніторингу навколишнього середовища, ефективне управління обчислювальними ресурсами є важливим для забезпечення достовірності та оперативності отримуваних даних. Архітектура, що передбачає багатоядерну обробку, дозволяє оптимізувати виконання складних завдань. Зокрема, у той час як одне з обчислювальних ядер присвячене первинному збору "сирих" даних, які можуть містити значну частку випадкових або систематичних спотворень, друге ядро функціонує паралельно, здійснюючи інтенсивну математичну обробку вже накопиченої вибірки. Такий підхід мінімізує затримки та забезпечує безперервність циклу обробки інформації, для систем реального часу, де втрата навіть короткого періоду даних може призвести до неточностей.

До методів, що застосовуються на етапі математичної обробки, належать:

**Медіанна фільтрація:** Цей метод є особливо ефективним для усунення імпульсних шумів, які часто виникають в реальних вимірювальних системах через непередбачені зовнішні фактори або короточасні збої сенсорів, а також від нерівномірності потоку частинок. Сутність медіанної фільтрації полягає у сортуванні послідовності значень в межах визначеного вікна та виборі медіанного елемента як репрезентативного значення. Це дозволяє ефективно відкидати аномальні викиди, зберігаючи при цьому цілісність значущих даних, що має вирішальне значення для подальшої інтерпретації та достовірності екологічних результатів.

**Експоненційне ковзне середнє:** Для отримання стабільного та згладженого представлення тенденцій зміни концентрації пилу, що є вкрай важливим для довгострокового аналізу та прогнозування динаміки забруднення атмосферного повітря, застосовується метод експоненційного ковзного середнього. На відміну від простого ковзного середнього, ЕМА надає більшу вагу останнім

вимірюванням, що робить його більш чутливим до актуальних змін і динамічних процесів, при цьому ефективно пригнічуючи короткострокові випадкові флуктуації, які можуть спотворити загальну картину стану повітряного середовища.

Стратегічне розпаралелювання цих ресурсоемних обчислювальних процесів має значення для забезпечення безперебійної та якісної роботи системи. Воно не лише забезпечує безперервну роботу системи сканування повітря, уникнення будь-яких призупинень, що могло б призвести до втрати важливих даних або спотворення часових рядів, але й гарантує виведення стабільних та достовірних фізичних показників, виражених у одиницях (мкг/м<sup>3</sup>). Ця методологія сприяє значному підвищенню загальної надійності вимірювальної системи та якості отримуваних даних, що є необхідною передумовою для точного екологічного моніторингу, обґрунтованого прийняття рішень та реалізації ефективних превентивних заходів у сфері охорони навколишнього середовища.

### 3. Обслуговування візуального інтерфейсу на LCD 1602A

Операції з передачі символічних даних на рідкокристалічний дисплей моделі 1602A, керований інтегральною мікросхемою HD44780, за своєю природою є досить трудомісткими з точки зору часових витрат. Архітектура драйвера HD44780 передбачає необхідність дотримання суворих часових інтервалів та специфічних пауз, що вимірюються в мілісекундах, між послідовними командами або даними для забезпечення їх коректної інтерпретації та відображення на екрані. Ці паузи є важливими для стабільної роботи контролера дисплея, дозволяючи йому завершити внутрішні операції запису чи обробки інформації, а також оновити власні регістри стану. Однак, якщо керування цим процесом здійснюється синхронно в рамках основного програмного циклу, це неминуче призводить до тимчасової зупинки або суттєвого уповільнення виконання інших, потенційно більш критичних завдань,

таких як збір даних з сенсорів або обробка системних подій, що може негативно вплинути на детермінованість і своєчасність їх виконання.

З метою оптимізації продуктивності та забезпечення безперебійної функціональності системи, завдання з оновлення візуального інтерфейсу та передачі даних на дисплей було винесено в окремий програмний потік. Такий підхід, характерний для багатозадачних систем або систем, що використовують операційні системи реального часу, дозволяє реалізувати конкурентне виконання операцій, ефективно відокремлюючи керування дисплеєм від основного циклу вимірювання та обробки даних. Завдяки цьому архітектурному рішення, система здатна здійснювати плавне та регулярне оновлення інформації на екрані, не створюючи при цьому затримок чи блокувань для важливих процесів. Це має суттєве значення для підтримання низької латентності у зборі показників та забезпечує детермінованість поведінки основної функціональності пристрою, уникнення джиттера у вимірюваннях.

Таким чином, інтеграція окремого потоку для обслуговування користувацького інтерфейсу гарантує безперервну та ефективну взаємодію з системою, надаючи актуальну інформацію користувачеві в реальному часі, тоді як основні функції моніторингу навколишнього середовища виконуються в фоновому режимі без будь-яких перешкод. Ця паралельна обробка завдань є фактором для підвищення загальної стабільності системи, її надійності та точності, особливо в контексті довготривалих вимірювань, де втрата даних або тимчасові відхилення у зборі інформації є неприпустимими. Розділення цих обов'язків також сприяє кращій ремонтпридатності та модульності коду, що є важливим аспектом у розробці складних вбудованих систем, оскільки дозволяє незалежно тестувати та вдосконалювати компоненти без впливу на інші частини системи.

#### 4. Мережевий стек та передача даних через Wi-Fi

В контексті інтеграції пристроїв Інтернету речей, таких як мікроконтролери серії ESP32, до розподілених мережевих середовищ,

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення надійного та ефективного бездротового зв'язку є важливим аспектом. З огляду на це, реалізація підтримки з'єднання Wi-Fi, яка є невід'ємною частиною функціональності вузла IoT, вимагає значних обчислювальних ресурсів. Це пов'язано з необхідністю обробки складних протоколів мережевого стека, зокрема TCP/IP, що включає в себе етапи фрагментації, інкапсуляції, маршрутизації та дефрагментації пакетів, а також керування потоком і контроль помилок. Ці операції, що виконуються на різних рівнях мережевої моделі, створюють суттєве навантаження на центральний процесор, що може призвести до потенційних затримок у виконанні інших критичних завдань системи.

Задля оптимізації продуктивності та забезпечення стабільності функціонування в таких умовах, в архітектурі системи, розробленій на базі багатоядерних мікроконтролерів, зокрема ESP32, завдання, пов'язані з обслуговуванням мережевого стека та керуванням Wi-Fi модулем, традиційно закріплюються за окремим процесорним ядром. Зазвичай для цієї мети виділяється ядро Core 0, що дозволяє відокремити інтенсивні мережеві операції від інших системних процесів. Таке архітектурне рішення є стратегічним, оскільки воно ефективно запобігає взаємному впливу різних компонентів системи. Зокрема, це дозволяє системі безперешкодно здійснювати передачу зібраних даних на віддалений сервер або оперативно приймати запити чи конфігураційні команди від системного адміністратора через бездротовий канал.

Перевагою такого розподілу ресурсів є збереження неперервної та точної роботи інших, часозалежних компонентів системи. Це особливо актуально для застосувань, що вимагають високої точності в часових інтервалах, наприклад, при роботі з прецизійними датчиками. У випадку використання датчика пилу, де для коректного збору даних і визначення концентрації мікрочастинок необхідні мікросекундні затримки та точна синхронізація імпульсів, виділення мережевих завдань окремому ядру є критичним. Це гарантує, що операції, пов'язані з передачею даних через Wi-Fi, не будуть створювати перешкод або викликати джиттер у вимірювальному процесі, забезпечуючи тим самим цілісність та

достовірність отриманих сенсорних показань. Такий підхід забезпечує надійність всієї системи та її здатність до ефективного виконання як комунікаційних, так і вимірювальних функцій одночасно.

#### 5. Автономна самодіагностика та динамічне калібрування

Аспектом функціонування даної системи є її здатність до автономного моніторингу та оцінки внутрішнього стану своїх компонентів. Цей процес, який відбувається у фоновому режимі, відіграє критичну роль у забезпеченні надійності та точності вимірювань протягом тривалого періоду експлуатації. Він вимагає значних обчислювальних ресурсів, зокрема застосування паралельних обчислень, для ефективної обробки численних потоків даних та одночасного виконання комплексних алгоритмів без впливу на основну функціональність.

Серед найважливіших завдань, які реалізуються в рамках цього фонового аналізу, слід виділити відстеження та компенсацію температурного дрейфу сенсора. Температурний дрейф є поширеним явищем у багатьох типах датчиків, де зміни температури навколишнього середовища можуть істотно впливати на їхні вихідні характеристики, спотворюючи дані. Паралельно з цим, система здійснює автоматичне та динамічне коригування базового показника так званої "напруги чистого повітря" (V0). Це значення є референсним рівнем, що відповідає відсутності вимірюваного аналіту, і його точне визначення є запорукою достовірності всіх подальших вимірювань концентрації.

Завдяки ефективній реалізації паралельних обчислень, система набуває унікальної здатності до самостійної адаптації та калібрування в умовах змін, викликаних, зокрема, поступовим забрудненням внутрішньої камери датчика. Це забруднення, яке є неминучим при тривалій експлуатації в реальних умовах, може суттєво впливати на сенсорні елементи. Однак, інтегровані механізми адаптації дозволяють системі компенсувати ці зміни, підтримуючи високий рівень точності без необхідності ручного втручання з боку оператора. При цьому принципово важливо, що всі ці адаптивні процеси відбуваються без жодного

призупинення або зниження ефективності основного функціоналу моніторингу, забезпечуючи безперервний збір та аналіз даних.

Представлений підхід, що базується на принципах функціонального розпаралелювання, є вим механізмом для трансформації сукупності різнорідних компонентів у високоінтегровану та відмовостійку кіберфізичну систему. Основна ідея полягає у відокремленому виконанні кожного окремого завдання у чітко визначеному власному часовому домені. Такий архітектурний вибір має значення для забезпечення детермінованої поведінки системи, оскільки він ефективно мінімізує інтерференцію між паралельно виконуваними процесами, яка часто призводить до непередбачуваних затримок і помилок у нерозпаралелених архітектурах. Як наслідок, вдається досягти значного підвищення операційної точності, що є важливим для багатьох застосувань у сучасних технологічних комплексах, де помилки можуть мати значні наслідки. Крім того, це сприяє суттєвому покращенню живучості пристрою, дозволяючи йому зберігати функціональність навіть за умов виникнення часткових збоїв або непередбачуваних зовнішніх впливів, тим самим зміцнюючи загальну стійкість і надійність його роботи протягом тривалого періоду експлуатації та підвищуючи його пристосованість до динамічних умов функціонування.

### 2.3 Реалізація самоорганізації в архітектурі системи

У межах функціонування даної кіберфізичної системи, концепція самоорганізації набуває найвищого значення, визначаючи її як притаманну здатність апаратно-програмного комплексу до автономного підтримання функціональності та ефективності. Це передбачає не лише стійке збереження працездатності в умовах детермінованих параметрів, але й динамічну адаптацію до непередбачуваних змін у зовнішньому середовищі, що дозволяє системі гнучко реагувати на пертурбації. Крім того, аспектом є внутрішня оптимізація архітектурних та програмних складових, що відбувається без необхідності

прямого втручання з боку адміністративного персоналу. Така автономність суттєво підвищує відмовостійкість системи, мінімізує операційні витрати та забезпечує її функціональну стабільність, навіть при виникненні нештатних ситуацій чи зміні експлуатаційних умов.

В контексті архітектурних рішень, заснованих на мікроконтролерах сімейства ESP32, механізми самоорганізації отримують конкретну реалізацію, втілюючись у взаємопов'язаних, проте відмінних за своєю природою доменах, що дозволяє досягти багаторівневої адаптивності та автономності системи. Функціонально самоорганізація дискретизується на трьох рівнях, кожен з яких відповідає за певний аспект поведінки комплексу. На алгоритмічному рівні це проявляється через інтелектуальні механізми обробки даних та прийняття рішень, де система, використовуючи, наприклад, евристичні алгоритми або елементи машинного навчання, здатна аналізувати поточний стан, прогнозувати зміни та формувати оптимальні стратегії функціонування, динамічно змінюючи свої внутрішні параметри та поведінку для досягнення цільових показників. Ресурсний рівень зосереджений на ефективному управлінні та розподілі наявних апаратних і програмних ресурсів, таких як обчислювальна потужність, пам'ять, енергоспоживання чи смуга пропускання мережі. Це включає адаптивне планування завдань, балансування навантаження та динамічне перерозподілення ресурсів між різними модулями системи, оптимізуючи їх використання відповідно до актуальних потреб та пріоритетів. Нарешті, комунікаційний рівень забезпечує узгоджену взаємодію між розподіленими компонентами КФС, дозволяючи обмінюватися інформацією про стан, подіями та прийнятими рішеннями. Ефективні та надійні протоколи комунікації є основою для децентралізованої координації, синхронізації та спільного вирішення завдань, що уможлиблює колективну адаптацію та когерентну поведінку всієї системи як єдиного цілого.

Автономна адаптація до фізичного стану компонентів

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У контексті тривалої експлуатації оптичних датчиків пилу, зокрема таких поширених моделей, як Waveshare Dust Sensor, виникає ряд технічних викликів, які суттєво впливають на достовірність одержуваних даних та стабільність вимірювань. До факторів, що деградують вимірювальні характеристики, належать неминуче поступове забруднення внутрішньої поверхні вимірювальної камери, що призводить до неконтрольованого ослаблення оптичного сигналу та зміни його траєкторії, а також природне старіння та деградація параметрів інфрачервоного випромінювача. Це старіння може проявлятися у зниженні інтенсивності випромінювання, зміні його спектральних властивостей або часового відгуку, що безпосередньо спотворює вихідні показники датчика. Зазначені внутрішні процеси обумовлюють систематичний дрейф калібрувальних параметрів, що, у свою чергу, призводить до суттєвих системних похибок у визначенні фактичної концентрації частинок у повітрі. З метою протидії цим ендогенним факторам, а також забезпечення стабільної та достовірної роботи протягом всього життєвого циклу пристрою, була реалізована інноваційна концепція самоорганізації системи. Цей підхід дозволяє інтегрованому рішенню автономно і ефективно нівелювати вплив зазначених деградаційних процесів, підтримуючи високу інженерну точність вимірювань без необхідності регулярного ручного втручання або періодичного фізичного калібрування, що є важливим для систем моніторингу якості повітря в реальних умовах експлуатації.

#### 1. Програмне самокалібрування:

Архітектура розробленої системи інтегрує складний алгоритм програмного самокалібрування, який ґрунтується на безперервному моніторингу опорного параметра, відомого як напруга чистого повітря. Цей параметр відіграє роль, представляючи собою вихідний сигнал датчика за умови повного відсутності аерозольних частинок у вимірювальній камері, і слугує базисом для всіх подальших розрахунків концентрації. Протягом тривалого часу експлуатації, система послідовно та ретельно аналізує накопичені мінімальні

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значення сигналу. Це дозволяє формувати динамічний референтний профіль, який враховує повільні зміни, викликані старінням компонентів чи забрудненням оптики. У випадку, якщо цей мінімальний поріг напруги поступово зсувається, що найчастіше є наслідком накопичення мікрочастинок пилу на внутрішніх оптичних лінзах або ж деградації ефективності ІЧ-випромінювача, система автоматично ініціює процедуру перерахунку коефіцієнтів у формулі розрахунку концентрації. Таке динамічне коригування забезпечує, що навіть за наявності фізичних змін у вимірювальному тракті, вихідні дані про концентрацію пилу залишаються максимально точними та репрезентативними щодо реального стану повітряного середовища. Це дозволяє уникнути систематичних похибок, які без такої адаптації неминуче виникли б з часом.

## 2. Компенсація шумів:

Для забезпечення максимальної достовірності вимірювань та стійкості до зовнішніх впливів, система оснащена механізмом автономної компенсації шумів. Цей механізм передбачає постійну оцінку рівня електромагнітних завад, що генеруються в навколишньому середовищі, зокрема на макетній платі або в безпосередній близькості від вимірювального пристрою. ЕМЗ можуть суттєво спотворювати аналогові сигнали датчика, приводячи до невірних показань. На основі отриманих даних про інтенсивність завад, система динамічно змінює глибину застосовуваної цифрової фільтрації, адаптуючи її до поточних умов. У ситуаціях, коли відбувається виявлення високого рівня нестабільності напруги живлення, що часто є джерелом імпульсних шумів, мікроконтролер ESP32, який є центральним процесорним елементом, оперативно збільшує розмір вибірки для медіанного фільтра. Збільшення розміру вибірки суттєво підвищує ефективність медіанної фільтрації у придушенні випадкових та імпульсних шумів, тим самим підтримуючи високу точність вимірювань. Хоча це тимчасово призводить до збільшення обчислювальних витрат та може незначно затримати отримання результатів, такий підхід є обґрунтованим компромісом, оскільки пріоритетом є

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надійність та достовірність даних, особливо в умовах значних завад. Ця функція забезпечує стабільну роботу датчика навіть у несприятливих електромагнітних умовах, мінімізуючи вплив зовнішніх факторів на кінцевий результат.

#### Переміщення центру обробки та логічна перебудова архітектури

Архітектура системи, особливо у контексті вбудованих рішень, не є статичною або жорстко детермінованою сукупністю компонентів. Навпаки, її динамічний характер є важливим для забезпечення адаптивності та стійкості у змінних умовах експлуатації. Завдяки інтеграції двоядерної структури мікроконтролера ESP32, система набуває найкращої здатності до динамічної перебудови внутрішніх пріоритетів, що охоплює як обчислювальні ресурси, так і механізми взаємодії між її логічними модулями. Ця гнучкість дозволяє ефективно реагувати на зовнішні події та внутрішні зміни стану, оптимізуючи продуктивність та надійність функціонування.

Переміщення центру між ядрами: У стандартному, номінальному режимі роботи, основний центр ваги обчислювальних операцій традиційно локалізується на ядрі Core 1. Ця конфігурація зумовлена специфікою завдань, де Core 1 ефективно виконує інтенсивну обробку даних, отриманих від сенсорів, що включає фільтрацію, нормалізацію та первинний аналіз. Однак, у випадках, що потребують інтенсивної передачі значних обсягів даних через мережевий інтерфейс, або ж при виявленні будь-яких ознак спроби несанкціонованого доступу до мережевого стеку, система здатна до оперативного тимчасового делегування частини логічних перевірок на ядро Core 0. Це рішення є стратегічним, оскільки дозволяє розвантажити основне ядро, мінімізуючи його обчислювальне навантаження та забезпечуючи безперебійність процесів. Паралельно з цим відбувається перерозподіл пам'яті в реальному часі, що є життєво важливим для підтримки цілісності даних та оперативного доступу до необхідних ресурсів для обох ядер. Такий підхід значно підвищує реактивність системи та її здатність протистояти кіберзагрозам, забезпечуючи оптимальне використання наявних апаратних можливостей.

					КВРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перебудова архітектури зв'язку: Крім гнучкості у розподілі обчислювальних завдань, система демонструє здатність до самостійної перебудови своєї архітектури зв'язку, що виражається у зміні її функціональної ролі у мережі. У ситуаціях, коли зв'язок з центральним сервером втрачається або стає нестабільним, що може бути спричинено зовнішніми факторами або внутрішніми збоями мережевої інфраструктури, контрольно-фіскальна система ініціює процес самоорганізації. Вона переходить в автономний режим роботи, функціонуючи як незалежне сховище даних або так званий data logger. У цьому режимі пристрій продовжує накопичувати всі релевантні показники та інформацію у своїй внутрішній пам'яті, забезпечуючи збереження критичних даних навіть в умовах ізоляції. Паралельно з цим активується режим локальної точки доступу, що дозволяє адміністратору або сервісному персоналу отримати безпосередній доступ до пристрою без необхідності підключення до централізованої мережі. Цей механізм гарантує можливість оперативного зняття накопичених показників та діагностичної інформації безпосередньо з пристрою, навіть за відсутності мережевого зв'язку, що суттєво підвищує автономність системи та її експлуатаційну гнучкість. Така стратегія забезпечує високу стійкість системи до непередбачених обставин і відіграє роль у підтримці безперервності операцій.

У контексті сучасних вбудованих систем, здатність до автономної роботи без прямої інтервенції адміністратора є показником функціональної зрілості та ефективності. Механізми самоорганізації, інтегровані в архітектуру пристрою, відіграють вирішальну роль у забезпеченні його повного життєвого циклу. Така автономність дозволяє системі не лише функціонувати відповідно до заздалегідь визначених алгоритмів, але й динамічно адаптуватися до мінливих умов експлуатації, приймаючи рішення щодо низки аспектів своєї діяльності. Це стратегічне проектування, що передбачає зниження потреби у людському контролі, сприяє підвищенню надійності та зниженню експлуатаційних витрат, оскільки система самостійно вирішує функціональні завдання.

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

#### 3.1 Алгоритми псевдокодом з поясненнями

Програмна архітектура, що лежить в основі кіберфізичної системи, призначеної для моніторингу твердих частинок у реальному часі, ґрунтується на детермінованому алгоритмі керування. Цей архітектурний вибір є першорядним, оскільки він суворо забезпечує точне дотримання заздалегідь визначених часових інтервалів, що є критичним фактором для підтримки цілісності та порівнянності показань датчиків у динамічних екологічних умовах. Така детермінованість не лише гарантує послідовну роботу системи, але й запобігає потенційним похибкам, що можуть виникнути внаслідок часових зсувів або асинхронних подій, які інакше могли б скомпрометувати надійність зібраних даних. Точна часова послідовність операцій, по суті, є наріжним каменем, на якому базується здатність системи надавати достовірну моніторингову інформацію.

Враховуючи специфіку роботи оптичного датчика, зокрема модуля Waveshare, що застосовується в цій конфігурації, розроблено точний та ретельно організований цикл активації його вбудованого інфрачервоного випромінювача, який є невід'ємним елементом системи. Ця вимога зумовлена фізичними принципами взаємодії датчика з частинками пилу в повітрі, де точність синхронізації імпульсу ІЧ-випромінювання та подальшого виявлення сигналу безпосередньо впливає на точність та чутливість вимірювання. Отже, основний вимірювальний алгоритм систематично розділено на два чіткі, але взаємопов'язані головні етапи. Початковий етап передбачає отримання «сирих» аналогово-цифрових даних, що фіксують миттєву електричну реакцію фотодетектора. За цим слідує наступний і не менш важливий етап цифрової фільтрації сигналу, ретельно розроблений для очищення цих сирих даних, усунення шумових компонентів та підвищення співвідношення сигнал/шум, тим

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

самим підготовлюючи дані для надійного аналізу та інтерпретації. Цей поетапний підхід дозволяє як фіксувати реакції датчика, так і здійснювати їхнє подальше аналітичне покращення.

Детальна послідовність операцій, що становить основу основного вимірювального циклу, представлена у вигляді псевдокоду нижче. Цей цикл реалізується на мікроконтролері ESP32, який завдяки своїй архітектурі та вбудованим периферійним пристроям оптимально підходить для задач реального часу та обробки сигналів у кіберфізичних системах. Обрання ESP32 забезпечує не лише необхідну обчислювальну потужність для виконання детермінованого алгоритму, але й гнучкість у інтеграції з мережевими протоколами для подальшої передачі даних. Кожен етап цього циклу ретельно калібрований для максимальної точності збору даних і для аналізу концентрації пилу.

#### АЛГОРИТМ Опитування\_Сенсора\_Пилу

##### ПОЧАТОК

Крок 1: Активація випромінювача

ВИМКНУТИ(PIN\_IRED\_LED) [cite: 222]

Крок 2: Очікування стабілізації сигналу

ЗАТРИМКА(280 мікросекунд)

Крок 3: Зчитування аналогового значення

RawValue = ЗЧИТАТИ\_ADC(PIN\_ANALOG\_OUT) [cite: 176, 225]

Крок 4: Завершення вікна вимірювання

ЗАТРИМКА(40 мікросекунд)

ВИМКНУТИ(PIN\_IRED\_LED)

Крок 5: Пауза до наступного циклу (загальний час 10 мс)

ЗАТРИМКА(9680 мікросекунд)

ПОВЕРНУТИ RawValue

##### КІНЕЦЬ

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У межах наведеного алгоритму, послідовність виконання операцій розпочинається з ініціації інфрачервоного випромінювача (PIN\_IRED\_LED), для створення контрольованого світлового поля, необхідного для взаємодії з частинками. За цим кроком слідує обов'язкова пауза, що триває 280 мікросекунд, призначена для забезпечення повної стабілізації як світлового потоку, так і електронних компонентів фотодетектора перед зчитуванням сигналу. Після досягнення стабільного стану, аналогово-цифровий перетворювач зчитує вихідний аналоговий сигнал з датчика (PIN\_ANALOG\_OUT), фіксуючи «сире» значення, що відображає інтенсивність розсіяного світла. Це миттєве зчитування є основою для подальшого кількісного визначення концентрації пилу. Наступна затримка в 40 мікросекунд забезпечує повне завершення процесу вимірювання та дозволяє внутрішнім ланцюгам датчика перейти в стабільний стан перед деактивацією випромінювача. Вимкнення ІЧ-світлодіода є важливим з точки зору оптимізації енергоспоживання та запобігання потенційному перегріву або дрейфу характеристик сенсора. Завершується цикл значною паузою в 9680 мікросекунд, яка ретельно розрахована для формування загального вимірювального інтервалу в 10 мілісекунд. Така фіксована частота дискретизації для забезпечення однорідності отриманих даних, що в свою чергу є передумовою для ефективного застосування алгоритмів цифрової фільтрації та статистичного аналізу, а також сприяє підтримці системної синхронізації. Повернене «сире» значення (RawValue) потім стає доступним для подальших етапів обробки, зокрема для зменшення шуму та вилучення значущої інформації.

Представлений алгоритм є центральною складовою забезпечення функціонування системи у режимі, що характеризується як "м'який" реальний час. Ця категорія реального часу передбачає певні допуски щодо часових обмежень, хоча й вимагає своєчасної реакції системи на події. Особлива увага приділяється критичній затримці у 280 мікросекунд, яка була емпірично визначена як оптимальний інтервал. Цей часовий проміжок має вирішальне значення, оскільки він дозволяє фототранзистору сенсорного елемента досягти

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

свого номінального рівня чутливості та стабільності відгуку безпосередньо після імпульсного спалаху інфрачервоного діода. Дотримання цієї затримки є принципово важливим для отримання достовірних та відтворюваних даних, оскільки передчасне або запізніле зчитування може призвести до некоректних вимірювань через нестабілізований стан сенсора або втрату піку сигналу.

Для аналого-цифрового перетворення використовується 12-бітний АЦП, інтегрований у мікроконтролер ESP32. Така архітектура забезпечує значний динамічний діапазон вимірювань, дозволяючи оцифровувати аналоговий сигнал у діапазоні від 0 до 4095 дискретних значень. Цей високий рівень дискретизації сигналу для забезпечення точності та деталізації вихідних даних (RawValue), що, у свою чергу, мінімізує похибки квантування та дозволяє більш точно відобразити тонкі зміни у вимірюваному параметрі. Адекватна роздільна здатність АЦП є передумовою для подальшої математичної обробки, забезпечуючи надійну основу для обчислення кінцевих значень. Безпосередньо після успішного отримання та оцифрування аналогового сигналу, процес переходить до наступного етапу, де активується комплексний алгоритм математичної обробки отриманого цифрового коду, а також його подальшої візуалізації на сегментному екрані типу 1602A.

АЛГОРИТМ Обробка\_та\_Візуалізація

ПОЧАТОК

Перетворення коду АЦП у напругу (для логіки 3.3В)

$$\text{Voltage} = \text{RawValue} * (3.3 / 4095.0)$$

Розрахунок концентрації (лінійна апроксимація)

$$\text{DustDensity} = (0.17 * \text{Voltage} - 0.1) * 1000$$

Цифрова фільтрація (Експоненційне ковзне середнє)

$$\text{FilteredValue} = (\alpha * \text{DustDensity}) + ((1 - \alpha) * \text{PreviousValue}) \text{ [cite: 236, 237]}$$

Вивід на LCD 1602A

ОЧИСТИТИ\_ЕКРАН(LCD\_1602A)

ДРУКУВАТИ("Dust: " + FilteredValue + " ug/m3")

## КІНЕЦЬ

Математичний фундамент алгоритму обробки даних ґрунтується на детально вивчених характеристиках використовуваного датчика. Зокрема, встановлено, що існує пряма лінійна залежність між рівнем вихідної напруги з сенсора та масовою концентрацією пилових частинок у навколишньому середовищі. Ця залежність є перетворення електричного сигналу в осмислену фізичну величину. Однак, з огляду на специфіку прототипування на макетній платі, де аналоговий сигнал може бути підданий впливу зовнішніх електромагнітних завад, шумів живлення або інших нелінійних факторів, виникає необхідність у застосуванні ефективних методів фільтрації.

З цією метою було інтегровано алгоритм експоненційного ковзного середнього (Exponential Moving Average), який є формою цифрової фільтрації. Цей фільтр забезпечує зважене середнє значення, де більша вага надається останнім вимірюванням, при цьому зберігаючи пам'ять про попередні значення. Така методологія дозволяє системі здійснювати плавне оновлення даних, що відображаються на дисплеї, ефективно відсікаючи короточасні та випадкові флуктуації сигналу, які могли б бути інтерпретовані як реальні зміни концентрації пилу. Впровадження ЕМА забезпечує не лише згладжування показань, але й сприяє значному підвищенню стабільності візуалізації числових значень у мікрограмах на кубічний метр ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) на екрані 1602А. Це має критичне значення не просто для зручності, а для забезпечення достовірності сприйняття інформації кінцевим користувачем, оскільки стабільні показання підвищують довіру до системи та спрощують інтерпретацію вимірюваних параметрів.

Уся апаратна частина системи, що включає мікроконтролер ESP32, датчик моніторингу повітря та рідкокристалічний екран, об'єднана на єдиній макетній платі. Важливою особливістю цієї конфігурації є відсутність паяних з'єднань, що надає системі гнучкість у налаштуванні та конфігуруванні. Цей підхід забезпечує можливість швидкої корекції алгоритму та адаптації апаратної частини без

необхідності складних маніпуляцій. Така модульність та легкість модифікації є перевагою на етапі розробки та прототипування, дозволяючи оперативно тестувати різні гіпотези та оптимізувати параметри системи. Комбінація цих ретельно розроблених алгоритмів з відповідною схемотехнікою, навіть на рівні прототипної макетної плати, виводить набір окремих електронних компонентів за межі простої сукупності елементів. Вона трансформує їх у повноцінну кіберфізичну систему моніторингу повітря, здатну інтегрувати обчислювальні процеси з фізичними взаємодіями для ефективного збору та аналізу даних про якість повітря в реальному або "м'якому" реальному часі.

### 3.2 Структура і склад ПЗ

Архітектура програмного забезпечення цієї системи базується на концепції вбудованого локального веб-сервера, функціонування якого повністю забезпечується безпосередньо на мікроконтролері ESP32. Цей архітектурний підхід є репрезентативним прикладом парадигми периферійних обчислень (edge computing), що надає пристрою суттєву автономність та значно зменшує його залежність від зовнішніх серверних інфраструктур або централізованих хмарних платформ для виконання базових операцій. Впровадження веб-сервера безпосередньо на мікроконтролері ESP32 розглядається як оптимальна стратегія, враховуючи, що цей мікроконтролер має інтегровані можливості бездротового зв'язку Wi-Fi та демонструє адекватну обчислювальну потужність для ефективної обробки типових HTTP-запитів. Це дозволяє формувати самодостатню точку доступу та інтерфейс управління, що є важливим для багатьох застосувань вбудованих систем. Такий підхід не тільки сприяє редукції комунікаційних затримок, забезпечуючи практично миттєву відповідь на запити користувачів або інших пристроїв, але й раціоналізує використання мережевих ресурсів, оскільки трансфер даних відбувається виключно у межах локального мережевого середовища, уникнення необхідності маршрутизації через зовнішні

сегменти глобальних мереж. Це також підвищує безпеку системи, оскільки конфіденційні дані не залишають межі контрольованої локальної мережі, та забезпечує стабільну роботу навіть в умовах обмеженого або відсутнього доступу до Інтернету, що є перевагою в критичних застосуваннях.

Використання спеціалізованої програмної бібліотеки Settings, розробленої в рамках проекту GyverLibs, відіграє центральну роль у реалізації цієї архітектури, надаючи пристрою можливість автоматично генерувати власний інтерфейс прикладного програмування (API) на локальному хості, який ідентифікується за внутрішньомережевою IP-адресою пристрою. Ця бібліотека суттєво спрощує процедуру створення механізмів для персистентного зберігання та ефективного управління конфігураційними параметрами, забезпечуючи їх доступність для зовнішньої інтеракції. Це надає розширені можливості для будь-якого клієнтського пристрою, що знаходиться в тому ж сегменті мережі Wi-Fi – наприклад, смартфона, персонального комп'ютера чи іншого пристрою IoT – здійснювати запити до даного мікроконтролера. Взаємодія реалізується за допомогою стандартного протоколу HTTP, що забезпечує високу сумісність та простоту інтеграції з різноманітними програмними платформами та операційними системами. Така реалізація дозволяє клієнтам як отримувати актуальні телеметричні дані від пристрою, такі як показники датчиків або його поточний операційний стан, так і здійснювати динамічну модифікацію його робочих параметрів та конфігураційних налаштувань. Це може включати коригування порогових значень спрацьовування, зміну операційних режимів, оновлення внутрішніх програмних налаштувань або навіть активацію специфічних функціональних можливостей пристрою без прямого фізичного доступу або трудомістких процедур перепрошивки мікроконтролера. Ця гнучкість є фактором для забезпечення масштабованого та ефективного управління вбудованими системами, зменшуючи операційні витрати та час на обслуговування, а також розширюючи можливості для швидкого розгортання та адаптації пристроїв до мінливих умов експлуатації.

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після успішного встановлення мережевого з'єднання за протоколом Wi-Fi, мікроконтролер ESP32 автоматично отримує динамічну IP-адресу в межах вашої локальної мережі, що може бути, наприклад, 192.168.1.15. Ця адреса і слугує основою для розгортання локального хосту. Програмне забезпечення, що функціонує на ESP32, відповідає за створення комплексу кінцевих точок доступу (endpoints) за вказаною IP-адресою, через які бібліотека Settings здійснює ефективний обмін даними. Доступ до цього програмного інтерфейсу може бути ініційований з мобільного пристрою шляхом введення згаданої IP-адреси в адресний рядок веб-браузера або за допомогою спеціалізованого мобільного додатку, що забезпечує користувачеві можливість взаємодії з функціоналом пристрою. Це забезпечує гнучкий та доступний спосіб контролю та моніторингу, уникаючи залежності від зовнішніх хмарних сервісів.

У рамках архітектури програмного забезпечення передбачено спеціалізований програмний блок, який з інтервалом у кілька секунд здійснює зчитування та фільтрацію значень концентрації пилових частинок з інтегрованого датчика Waveshare. Отримані та оброблені дані миттєво оновлюються в об'єкті програмного інтерфейсу (API). Мобільний пристрій, зі свого боку, автоматично отримує ці оновлені дані. Цей процес реалізується або за допомогою постійного з'єднання WebSocket, що забезпечує передачу даних у режимі реального часу, або через періодичні HTTP-запити, що є типовою практикою, реалізованою в рамках бібліотек GyverLibs. Така організація забезпечує своєчасне інформування користувача про поточні показники стану навколишнього середовища.

Структура програмного забезпечення включає в себе комплекс обробників подій (handlers), призначених для ефективної взаємодії з користувачем. У момент, коли користувач здійснює будь-які зміни в налаштуваннях на своєму мобільному пристрої, наприклад, модифікує порогове значення для активації тривоги або коригує рівень яскравості дисплея LCD 1602A, відповідні дані негайно передаються на локальний "localhost" мікроконтролера ESP32. У

відповідь на ці дії, бібліотека Settings миттєво оновлює відповідні змінні, що зберігаються в енергонезалежній пам'яті пристрою, забезпечуючи оперативне реагування системи на користувацькі запити та актуалізацію робочих параметрів. Це демонструє ефективну синхронізацію між інтерфейсом користувача та апаратною частиною.

Основні компоненти мережевого модуля:

Веб-сервер (Web-Server): цей модуль виконує важливу функцію з обробки всіх вхідних мережевих з'єднань. Він слугує точкою входу для взаємодії з ESP32, забезпечуючи прийом запитів та подальшу маршрутизацію даних. Його ефективність напряму впливає на швидкість та стабільність обміну інформацією.

Парсер API (API Parser): основне завдання цього компонента полягає в інтерпретації отриманих від мобільного пристрою даних. Він відповідає за перетворення цих даних до необхідного внутрішнього формату, що може бути реалізовано як у вигляді структурованого формату JSON, так і в бінарному форматі, що є більш оптимальним для деяких застосувань, забезпечуючи їх коректну обробку системою.

Файлова система (Filesystem – LittleFS/SPIFFS): цей елемент є незамінним для постійного зберігання статичних ресурсів, зокрема веб-сторінки користувацького інтерфейсу, безпосередньо на вбудованому чіпі ESP32. Використання таких файлових систем, як LittleFS або SPIFFS, дозволяє забезпечити автономність пристрою, уникнути необхідності зовнішніх носіїв пам'яті та гарантувати доступність інтерфейсу навіть за відсутності мережевого з'єднання, підвищуючи надійність та зручність експлуатації.

Імплементация архітектури програмного забезпечення, що базується на локальному інтерфейсі прикладного програмування (API), забезпечує низку значних переваг, зокрема в контексті кіберфізичних систем та пристроїв інтернету речей. Зокрема, така конфігурація дозволяє повністю уникнути залежності від зовнішніх хмарних сервісів, що має критичне значення для автономності системи та її стійкості до зовнішніх впливів, а також для

оптимізації операційних витрат у довгостроковій перспективі. Відмова від постійного зв'язку із віддаленими хмарними платформами нівелює ризики, пов'язані з перебоями у зовнішніх мережевих комунікаціях, потенційними збоями у роботі провайдера хмарних послуг або атаками на їхню інфраструктуру, що суттєво підвищує загальну надійність та кіберстійкість системи. Завдяки відсутності потреби у взаємодії з віддаленими серверами, система демонструє значно прискорений відгук, оскільки обробка даних відбувається безпосередньо на пристрої, мінімізуючи мережеві затримки. Це є незамінним у застосунках, які вимагають обробки даних у реальному часі та оперативних рішень, як-от у системах промислової автоматизації, моніторингу критичної інфраструктури або медичних пристроях. Крім того, централізоване зберігання та обробка інформації на локальному пристрої суттєво підвищує рівень конфіденційності даних, мінімізуючи ризики несанкціонованого доступу або витоку інформації під час транзиту чи на хмарних серверах, що особливо актуально в умовах зростаючих регуляторних вимог до приватності та захисту даних, таких як GDPR. Така парадигма також надає кінцевому користувачеві більший контроль над його даними, посилюючи принципи приватності за задумом. У даній архітектурі весь обчислювальний ресурс та інтелектуальні можливості системи зосереджені безпосередньо в мікроконтролері ESP32, який виступає як основний процесорний вузол. ESP32, завдяки своїм інтегрованим можливостям бездротового зв'язку (Wi-Fi, Bluetooth) та достатній обчислювальній потужності для вбудованих застосувань, ефективно функціонує як периферійний шлюз (edge gateway), обробляючи дані "на краю" мережі. Мобільний пристрій, у свою чергу, функціонує виключно як термінал для відображення інформації та передачі команд, не виконуючи обчислювальних функцій. Ця модель чітко ілюструє кіберфізичну інтеграцію: фізичний компонент, представлений датчиком пилу, встановленим на макетній платі, є невід'ємною частиною системи, а його віртуальне представлення, тобто API, доступне за локальною мережевою адресою, формує єдиний, когерентний функціональний блок. API виступає як

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

абстракція для апаратної частини, дозволяючи програмним компонентам взаємодіяти з фізичним світом за допомогою стандартизованих протоколів, що спрощує розробку, тестування та масштабування системи. Така парадигма дозволяє досягти гармонійної взаємодії між фізичним світом та цифровими обчисленнями, створюючи інтелектуальні системи, здатні самостійно функціонувати у різноманітних середовищах.

Використання спеціалізованих бібліотек, таких як GyverLibs, значно спрощує процес розробки та імплементації подібних локальних API, виступаючи як фактор для прискорення інновацій у сфері вбудованих систем. Ці бібліотеки забезпечують можливість створення функціональних веб-інтерфейсів та мережевих сервісів без необхідності мати глибокі експертні знання у сфері веб-програмування, що історично є типовим бар'єром для інженерів, орієнтованих переважно на апаратне забезпечення та вбудовані системи. Завдяки високому рівню абстракції, бібліотека ефективно інкапсулює складні низькорівневі операції, пов'язані з мережевими протоколами (як-от TCP/IP), обробкою HTTP-запитів, управлінням сокетами, маршрутизацією URL та обробкою параметрів запитів. Вона бере на себе всю рутинну роботу, від парсингу вхідних даних до формування коректних відповідей, що дозволяє розробникам зосередитися на сутнісних аспектах застосунку. Завдяки такій високорівневій абстракції, розробники можуть повністю зосередитися на аспектах застосунку – алгоритмах обробки даних про концентрацію пилу (фільтрація шумів, усереднення, аналіз часових рядів, визначення порогових значень), логіці сенсорної взаємодії (керування режимами роботи датчика, калібрування, температурна компенсація), а також на розробці ефективної візуалізації отриманої інформації на інтегрованому РК-екрані 1602A. Це включає не лише виведення поточних значень, але й розробку інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу користувача, відображення попереджень, трендів та інших елементів, що покращують сприйняття даних. Такий підхід не тільки істотно прискорює процес розробки, але й значно знижує поріг входження для інженерів-електронників, дозволяючи

їм швидше перетворювати апаратні рішення в повноцінні, інтерактивні системи з функціями мережевого доступу та дистанційного керування, що відкриває нові перспективи для створення складних кіберфізичних рішень із мінімальними часовими та ресурсними витратами.

### 3.3 Веб-базований інтерфейс для дистанційного керування та моніторингу

Веб-базований інтерфейс системи виходить за межі простої надбудови; він є повноцінним інтерактивним середовищем, ретельно спроектованим для втілення передової концепції «цифрового двійника». Ця парадигма передбачає створення віртуальної копії фізичного пристрою, яка точно відображає його характеристики, стан та поведінку. Таке рішення дозволяє користувачам здійснювати моніторинг, конфігурацію та контроль апаратного забезпечення з високою точністю, забезпечуючи глибоку інтеграцію та розуміння функціонування системи у реальному часі. Це, по суті, створює віртуальний портал для взаємодії з фізичним об'єктом, значно розширюючи можливості управління.

Шляхом інтеграції бібліотеки Settings, розробленої в рамках GyverLibs, мікроконтролер ESP32 перетворюється на невидимий, але високоефективний вбудований сервер. Цей сервер функціонує у фоновому режимі, оперативно обробляючи запити від мобільних пристроїв, що забезпечує динамічну взаємодію. Продумана архітектура дозволяє створити переконливу ілюзію взаємодії з повноцінним мобільним застосунком, хоча фактично це реалізується за допомогою легкої веб-базованої служби. Такий підхід значно спрощує розгортання та підвищує доступність, усуваючи необхідність у розробці окремих нативних застосунків для різних мобільних платформ. При цьому зберігається високий рівень чутливості та інтуїтивності інтерфейсу, для користувацького досвіду, який відчувається настільки ж природним і функціональним, як і

традиційна мобільна програма. Це забезпечує широку сумісність та мінімізує вимоги до ресурсів, оптимізуючи загальну ефективність системи.

Архітектурною складовою, що забезпечує функціональність користувацького інтерфейсу, є вбудований HTTP-сервер. Цей сервер інтегрований безпосередньо у прошивку мікроконтролера ESP32 і виконує свою діяльність, використовуючи стандартний порт 80. Зазначений порт, як відомо, традиційно асоціюється з протоколом HTTP і дозволяє веб-клієнтам встановлювати з'єднання для обміну даними. Таким чином, доступ до системи здійснюється через локальну IP-адресу, присвоєну пристрою ESP32 у межах локальної мережі. Така конфігурація не лише спрощує процес взаємодії, але й оптимізує ресурси, що є важливим для вбудованих систем із обмеженими обчислювальними можливостями. Вибір вбудованого сервера дозволяє уникнути залежності від зовнішніх обчислювальних ресурсів, забезпечуючи високу оперативність та керованість на низькому рівні абстракції.

Ініціалізація доступу до системи починається з підключення мобільного пристрою, такого як смартфон, до локальної Wi-Fi мережі, у якій функціонує мікроконтролер ESP32. У межах цієї мережі, процес ідентифікації пристрою та призначення йому унікальної IP-адреси здійснюється за допомогою протоколу динамічної конфігурації хостів (DHCP). DHCP-сервер, як правило, інтегрований у маршрутизатор локальної мережі, автоматично присвоює ESP32 відповідну адресу, роблячи його доступним для інших пристроїв у тому ж сегменті мережі. Така схема забезпечує безшовне виявлення та взаємодію без необхідності ручного налаштування IP-адрес, що спрощує розгортання та експлуатацію системи для кінцевого користувача. Цей підхід ефективно використовує можливості існуючої мережевої інфраструктури, мінімізуючи складність конфігурації з боку пристрою ESP32.

Важливою концептуальною та імплементаційною особливістю цієї архітектури є те, що всі компоненти графічного інтерфейсу, а саме HTML-каркас, що визначає структуру сторінки, таблиці стилів CSS, які відповідають за

візуальне оформлення, а також скрипти JavaScript, що забезпечують інтерактивність та динамічну поведінку, зберігаються безпосередньо у внутрішній енергонезалежній пам'яті мікроконтролера. Це реалізовано шляхом форматування частини пам'яті у вигляді файлової системи LittleFS, оптимізованої для вбудованих систем, яка ефективно управляє обмеженими ресурсами пам'яті та забезпечує зносостійкість. Таке локальне зберігання ресурсів усуває потребу у зовнішніх серверах для їх отримання, що має значні переваги з точки зору продуктивності та надійності. Це рішення підкреслює прагнення до самодостатності системи, зменшуючи її залежність від зовнішніх факторів.

Результатом такої архітектурної стратегії є досягнення високого ступеня автономності системи. Веб-інтерфейс завантажується практично миттєво, що значно покращує користувацький досвід. Це досягається завдяки тому, що обмін усіма необхідними даними для відображення інтерфейсу відбувається виключно у межах локального маршрутизатора, без залучення зовнішніх інтернет-з'єднань. Таким чином, функціональність системи зберігається навіть у разі повної відсутності доступу до глобальної мережі Інтернет. Ця характеристика є важливою для застосувань, де стабільність і доступність є пріоритетними, наприклад, у системах автоматизації будинку або промислового контролю, де перебої в інтернет-з'єднанні не повинні впливати на базове функціонування пристрою. Це забезпечує надійну роботу в умовах, де зовнішня мережева інфраструктура може бути нестабільною або відсутньою.

Реалізація функціональності системи ґрунтується на парадигмі інтерактивної взаємодії, що досягається за допомогою прикладного програмного інтерфейсу (API) та розробленого для нього веб-інтерфейсу. Цей підхід дозволяє користувачеві не просто споживати інформацію, а активно формувати операційні директиви для системи, ефективно перетворюючи її з пасивного спостерігача на динамічний інструмент управління. Структурно веб-інтерфейс організований за принципом логічної сегментації, де кожна виділена зона

відповідає за певний спектр функціональних можливостей. Такий архітектурний дизайн є фундаментом для досягнення високого ступеня самоорганізації системи, що передбачає її здатність до адаптивної зміни поведінки та конфігурації без необхідності глибокого перепрограмування на рівні коду. Це забезпечує не лише гнучкість у налаштуванні, але й сприяє підвищенню автономності системи, дозволяючи їй оперативно реагувати на змінні умови середовища та вимоги користувача. Таким чином, замість жорстко закодованих алгоритмів, система функціонує на базі динамічно інтерпретованих інструкцій, що істотно розширює її прикладний потенціал та спрощує інтеграцію в різноманітні сценарії використання. З точки зору архітектури, такий розподіл відповідальності між програмним ядром та користувацьким інтерфейсом є кроком до створення більш відмовостійких та масштабованих рішень, де користувач стає активним учасником процесу оптимізації та адаптації.

У межах функціональної зони стратегічного налаштування користувачу надається можливість здійснювати дистанційне модифікування операційних параметрів системи. Цей підхід кардинально відрізняється від традиційних методів, які раніше вимагали б безпосереднього втручання на рівні вбудованого програмного забезпечення або навіть апаратного перепрошивки, що є складним, затратним за часом і потенційно ризикованим процесом, доступним лише кваліфікованим фахівцям. Інтеграція повзункових регуляторів як елементів управління забезпечує інтуїтивно зрозумілий механізм для адаптації, наприклад, чутливості сенсора Waveshare. Така регуляція не є довільною; вона спрямована на оптимізацію роботи сенсора відповідно до унікальних характеристик навколишнього середовища. Наприклад, у приміщеннях з високою інтенсивністю забруднення, таких як кухня, може знадобитися зниження чутливості, щоб уникнути надмірної реакції на короткочасні викиди, тоді як у дитячих кімнатах або офісах, де важлива максимальна точність моніторингу, чутливість може бути підвищена для виявлення найменших відхилень. Ця гнучкість у налаштуванні важлива для забезпечення релевантності та

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

достовірності зібраних даних, дозволяючи системі ефективно функціонувати в широкому спектрі застосувань, від промислового моніторингу до домашнього використання. Таким чином, стратегічні налаштування трансформують статичне апаратне рішення у динамічно конфігуровану платформу, здатну до тонкої адаптації без необхідності фізичного доступу або перекомпіляції коду, що суттєво знижує експлуатаційні витрати та підвищує загальну зручність використання.

Функція динамічного керування фільтрацією є елементом, що надає користувачеві розширені можливості впливу на обробку даних у реальному часі. Через прикладний програмний інтерфейс (API) користувач отримує доступ до математичного апарату системи, який включає алгоритми згладжування та обробки сигналів. Це дозволяє здійснювати тонку настройку фільтрації вхідних даних, що є важливим для усунення випадкових шумів та виділення значущих тенденцій з потоку вимірювань сенсорів. Одним з яскравих прикладів є можливість модифікації коефіцієнта згладжування експоненційної рухомої середньої (ЕМА). Користувач може безпосередньо спостерігати, як зміна цього коефіцієнта впливає на візуальне представлення даних, зокрема на плавність графіку концентрації пилу. Наприклад, збільшення коефіцієнта згладжування робить графік більш рівним, нівелюючи короткочасні коливання, що може бути корисним для довгострокового моніторингу та ідентифікації стабільних трендів. Водночас, надмірне згладжування може призвести до втрати реакції на швидкі та значущі зміни. Навпаки, зменшення коефіцієнта ЕМА забезпечує більшу чутливість до поточних даних, але може зробити графік більш "шумним". Ця інтерактивна взаємодія дозволяє користувачеві не тільки спостерігати результати на екрані мобільного телефону, але й на локальному дисплеї 1602А, що підкреслює універсальність відображення інформації. Можливість тонкої настройки алгоритмів фільтрації для адаптації системи до різних сценаріїв використання, де вимоги до чутливості та стабільності даних можуть істотно

варіюватися, забезпечуючи при цьому високу достовірність та релевантність представленої інформації для подальшого аналізу та прийняття рішень.

Важливою складовою функціональності є механізми автоматизованого сповіщення та активації виконавчих пристроїв, що інтегровані через веб-базований інтерфейс. Ця система дозволяє користувачеві визначити та встановити індивідуальні порогові значення, або "Thresholds", для контрольованих параметрів, таких як концентрація мікрочастинок (наприклад, пилу) в повітрі, вимірювана у мікрограмах на кубічний метр ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). На відміну від пасивного моніторингу, цей модуль забезпечує проактивну реакцію системи на зміни у навколишньому середовищі. При досягненні або перевищенні заданого порогового значення, система не обмежується лише зміною візуального індикатора, такого як колір елемента інтерфейсу у веб-браузері, що є первинним сигналом для користувача про потенційну проблему. Значно важливіше, що вона здатна ініціювати відправлення команд до інших вузлів або пристроїв у межах інтегрованої екосистеми "розумного будинку". Наприклад, у випадку зростання концентрації пилу до критичного рівня, система може автоматично активувати очищувач повітря, забезпечуючи негайну реакцію на погіршення якості мікроклімату без прямого втручання користувача. Ця функція є проявом концепції замкненого контуру управління, де сенсорні дані призводять до автоматизованих дій, що корегують виявлені відхилення. Таким чином, веб-інтерфейс перетворюється з простого засобу відображення інформації на центральний пункт управління, що оркеструє взаємодію між різними компонентами системи, підвищуючи рівень комфорту, безпеки та енергоефективності. Можливість налаштування багатоступеневих тригерів та умовних логік відкриває шлях до створення складних сценаріїв автоматизації, що повністю адаптуються до індивідуальних потреб та переваг користувача, роблячи систему гнучким інструментом для підтримання оптимального мікроклімату в приміщенні.

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення ефекту «живих даних» та оперативного відображення змін, що відбуваються у фізичному середовищі, бібліотека GyverLibs інтегрує передові технології асинхронних запитів та, зокрема, протокол WebSocket. Цей підхід відрізняється від традиційної моделі запит-відповідь HTTP, де кожна зміна даних вимагала б повного оновлення веб-сторінки, що є неефективним та ресурсомістким. Замість цього, при виявленні нового значення, наприклад, від датчика пилу, мікроконтролер ESP32 не ініціює перезавантаження всієї клієнтської сторінки на мобільному пристрої. Натомість, він точково передає це актуалізоване числове значення, яке потім динамічно оновлюється у відповідному полі інтерфейсу користувача. Такий механізм є важливим для збереження енергетичних ресурсів портативних пристроїв, зокрема акумулятора смартфона, оскільки мінімізує обсяг переданих даних та необхідність перемальовування значних частин DOM-дерева. Водночас, він суттєво сприяє підвищенню стабільності функціонування самого ESP32. Основне ядро мікроконтролера в цей період продовжує безперервно виконувати свої важливі вимірювальні цикли з мікросекундною точністю, не відволікаючись на інтенсивні мережеві операції, що вимагають значних обчислювальних ресурсів. Це забезпечує безперебійність збору даних та надійність всієї системи моніторингу, підкреслюючи переваги ефективної архітектури взаємодії між вбудованою системою та клієнтським інтерфейсом.

Розробка інтерфейсу користувача з опорою на сучасні веб-стандарти надає системі гнучкість та автоматичну масштабованість. Завдяки принципам адаптивного дизайну, інтерфейс динамічно підлаштовується під будь-яку діагональ екрана від компактного екрана смартфона до широкоформатного монітора персонального комп'ютера чи навіть великого телевізійного екрана, що забезпечує оптимальне відображення інформації та зручність взаємодії незалежно від використовуваного пристрою. Ця універсальність перетворює систему на надзвичайно доступний інструмент: адміністратор або звичайний користувач може ефективно контролювати стан якості повітря, перебуваючи в

іншій кімнаті, в офісі, чи навіть за межами будинку, просто відкривши відповідну вкладку у веб-браузері на будь-якому підключеному до інтернету пристрої. Такий високий рівень доступності виходить за рамки традиційного розуміння кіберфізичної системи як суто технічного об'єкта, що функціонує лише на макетній платі або в лабораторних умовах. Натомість, він трансформує її у повноцінний, зручний та інтегрований побутовий прилад, що органічно вписується у повсякденне життя користувача, сприяючи підвищенню його обізнаності та комфорту. Це є яскравим прикладом успішної інтеграції складних технологій в інтуїтивно зрозуміле та повсякденно корисне рішення.

### 3.4 Приклади застосування системи

Практична значущість розробленої кіберфізичної системи моніторингу концентрації пилу ґрунтується на її притаманній адаптивності та здатності до автономної конфігурації у відповідь на специфічні вимоги середовища. Ця характеристика вигідно відрізняє її від менш гнучких аналогів, дозволяючи реалізувати індивідуальні операційні режими у широкому спектрі застосувань. Універсальність системи проявляється в її надійній архітектурній розробці, що дозволяє безперешкодно інтегруватися в численні оперативні контексти, починаючи від промислових об'єктів із змінними рівнями твердих частинок, до міських станцій моніторингу якості повітря та спеціалізованих лабораторних середовищ, які вимагають точного контролю атмосферних умов. Більше того, здатність системи до самоорганізації свідчить про її вдосконалений інтелект; вона може динамічно коригувати робочі параметри, такі як частота вибірки даних і порогові значення для сповіщень, на основі аналізу даних у реальному часі та змінних екологічних моделей. Ця внутрішня адаптивність мінімізує необхідність частого ручного перекалібрування та втручання, тим самим підвищуючи операційну ефективність та достовірність даних протягом тривалих періодів експлуатації.

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нижче ми деталізуємо сценарії застосування системи, де синергічне поєднання високоточного датчика твердих частинок Waveshare, універсального мікроконтролерного пристрою ESP32 та інтуїтивно зрозумілого веб-базованого інтерфейсу наглядно колективно забезпечує оптимальну продуктивність та всебічні можливості моніторингу. Датчик Waveshare забезпечує точні та надійні первинні дані про концентрацію пилу, використовуючи добре відомі оптичні принципи вимірювання, що є важливим для отримання достовірної інформації. ESP32 виступає як центральний обчислювальний модуль, що забезпечує периферійні обчислення для первинного аналізу даних, безпечну комунікацію з центральним сервером через вбудовані бездротові модулі та ефективне виконання алгоритмів самоорганізації. Водночас, веб-базований інтерфейс пропонує централізовану платформу для віддаленого управління системою, візуалізації даних у реальному часі, аналізу тенденцій та конфігурації операційних параметрів, надаючи зацікавленим сторонам миттєвий доступ до інформації та контроль над моніторинговим середовищем. Ця інтегрована архітектура для досягнення заявленої універсальності системи та її адаптивного інтелекту.

Моніторинг параметрів мікроклімату в житлових приміщеннях, зокрема у дитячих кімнатах, є важливим аспектом для підтримання оптимальних умов проживання. У контексті домашнього середовища, представлена система функціонує як адаптивний інтелектуальний асистент, спрямований на забезпечення та підтримку здорового мікроклімату. Цей функціонал охоплює не лише базові показники, такі як температура та вологість, але й якісні характеристики повітря, включаючи концентрацію дрібнодисперсних частинок та летких органічних сполук, що мають прямий вплив на самопочуття мешканців та їхнє здоров'я. Однією з особливостей системи є її гнучкість: за допомогою інтуїтивно зрозумілого веб-інтерфейсу, що доступний через мобільні пристрої, користувачі, зокрема батьки, отримують можливість самостійно визначати та налаштовувати порогові значення чутливості для різних параметрів

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроклімату у приміщеннях, наприклад, у дитячій кімнаті. Це дозволяє персоналізувати систему відповідно до індивідуальних потреб, специфічних умов експлуатації та потенційних алергічних реакцій, що підвищує ефективність превентивних заходів та загальний рівень комфорту.

Розглянемо типовий сценарій функціонування системи: у ситуаціях, коли відбувається збільшення концентрації пилових частинок у повітрі понад встановлені порогові значення наприклад, під час інтенсивних дитячих ігор, які можуть піднімати пил з поверхонь, або в процесі прибирання система оперативно фіксує ці зміни. Відбувається миттєве оновлення зібраних даних на локальному хості, що забезпечує актуальність інформації про стан повітряного середовища. Одночасно, для забезпечення проактивного реагування користувача, через програмний інтерфейс (API) на його смартфон надсилається відповідне сповіщення. Це повідомлення слугує чітким сигналом до необхідності вжиття коригувальних заходів, таких як ініціація провітрювання приміщення для зниження концентрації забруднювачів або активація повітряного зволожувача, якщо перевищення норми пилу супроводжується низькою вологістю. Важливою доповнювальною компонентою цієї системи є інтегрований локальний дисплей, наприклад, модель 1602A, який відіграє роль постійного візуального індикатора. Він надає можливість швидкої та безперешкодної перевірки поточного стану якості повітря без потреби звернення до мобільних пристроїв, що забезпечує неперервний моніторинг та оперативний доступ до інформації про мікроклімат, підвищуючи загальну зручність та надійність експлуатації системи у повсякденному житті.

Контекст застосування – офісні приміщення та коворкінги. У офісних приміщеннях, що характеризуються високою концентрацією технічного обладнання та значним скупченням персоналу, підвищений рівень дрібнодисперсного пилу здатен потенційно негативно впливати на продуктивність праці або загальний рівень функціональності.

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Типовий сценарій розгортання передбачає інтеграцію системи на спеціалізовану друковану плату, функціонуючу як автономний вузол моніторингу. Через уніфікований веб-інтерфейс (доступний локально) адміністратор офісу отримує можливість оперативного моніторингу параметрів стану повітря у численних функціональних зонах. У випадку фіксації перманентно підвищеного рівня концентрації пилу в одній із зон, система автоматично передає відповідні статистичні дані через програмний інтерфейс (API), що, у свою чергу, надає підґрунтя для раціоналізації графіка роботи прибирального персоналу. Функціонал налаштування параметрів, реалізований за допомогою GyverLibs Settings, забезпечує можливість дистанційного переведення пристроїв до енергоефективного режиму функціонування поза робочими годинами.

Моніторинг рівня забруднення у серверних приміщеннях та лабораторіях. У серверних приміщеннях пилове забруднення розглядається як критичний фактор, що потенційно може призвести до термічного перевантаження обладнання.

Розглянемо сценарій, у якому кіберфізична система функціонує як прецизійний датчик безпеки. Шляхом застосування алгоритму цифрової фільтрації, реалізованого на мікроконтролері ESP32, система здатна відфільтровувати випадкові ізольовані частинки, проте оперативно реагує на стійкі умови задимлення або на значне підвищення концентрації сухого пилу. Застосування локального інтерфейсу прикладного програмування (API) уможливорює інтеграцію цього пристрою до комплексної системи моніторингу IT-інфраструктури, де інформація, отримана з локального хоста, обробляється центральним сервером з метою автоматичного відключення обладнання у випадках виникнення надзвичайних ситуацій.

Освітні та медичні заклади. У закладах освіти та охорони здоров'я забезпечення належного рівня чистоти повітря є імперативною вимогою санітарних норм.

					КВРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сценарій: Даний пристрій може бути інтегрований як демонстраційний макет для навчальних цілей, або ж використовуватися як спеціалізований інструмент у роботі екологічного фахівця. Студенти чи персонал отримують можливість бездротового доступу до системи через мережу Wi-Fi, що дозволяє їм у реальному часі відстежувати зміни у концентрації аерозольних частинок, які можуть бути спричинені, наприклад, відкриттям вікон або активацією систем кондиціонування повітря. Таким чином, система не лише виконує функцію контролю, але й набуває просвітницького значення, наочно ілюструючи фізичні принципи розсіювання світла та архітектуру сучасних рішень у галузі Інтернету речей.

Автоматизація промислових та ремісничих середовищ. У контексті невеликих виробничих приміщень, зокрема деревообробних майстерень, розроблена система забезпечує ефективний моніторинг функціонування витяжних систем.

Зокрема, оператор має можливість за допомогою смартфона дистанційно встановлювати для системи нові параметри обробки даних: під час роботи верстатів автоматично активується режим підвищеної дискретизації. У випадку, якщо ефективність витяжної системи виявляється недостатньою, пристрій генерує попереджувальний сигнал на дисплеї LCD 1602A, що сприяє запобіганню інгаляції потенційно небезпечних аерозольних частинок виробничим персоналом.

## ВИСНОВКИ

У межах дипломного проєкту було розроблено та імплементовано кіберфізичну систему для моніторингу концентрації пилу у приміщенні, функціонування якої забезпечується мікроконтролером ESP32, датчиком Waveshare Dust Sensor та дисплеєм 1602A. Виконана робота дозволила сформулювати такі висновки:

**Вибір методики вимірювання:** За результатами порівняльного аналізу методів вимірювання аерозолів було встановлено, що оптичний метод нефелометрії є оптимальним для застосування у побутових кіберфізичних системах, враховуючи компроміс між точністю, економічною ефективністю та надійністю. Використання датчика Waveshare (Sharp GP2Y1010AU0F) сприяло створенню системи без рухомих компонентів, таких як вентилятори, що позитивно вплинуло на збільшення терміну служби пристрою та забезпечило його безшумну експлуатацію.

**Архітектурні рішення:** Розроблено архітектуру системи з багаторівневою структурою, де мікроконтролер ESP32 слугує центральним обчислювальним вузлом. Двоядерна архітектура мікроконтролера уможливила паралелізацію важливих операцій: одне ядро призначене для виконання вимірювальних циклів із детермінованою мікросекундною точністю, тоді як друге відповідає за функціонування веб-інтерфейсу та локального дисплея 1602A.

**Програмно-алгоритмічне забезпечення:** Імплементовано комплекс алгоритмів для цифрової фільтрації даних, зокрема, медіанну фільтрацію для ефективного усунення імпульсних перешкод та експоненційне ковзне середнє (ЕМА) для згладжування довгострокових трендів у даних. Такий підхід забезпечив стабільне відображення показників концентрації пилу в одиницях  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , які достовірно презентуються як на локальному дисплеї, так і через веб-інтерфейс.

					КВРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інноваційність та мережева взаємодія: Шляхом інтеграції бібліотеки Settings (частина екосистеми GyverLibs) було розроблено локальний програмний інтерфейс (API) на базі «localhost» мікроконтролера ESP32. Це рішення надало користувачам можливість дистанційно взаємодіяти з системою та встановлювати параметри через мобільний пристрій у межах спільної Wi-Fi мережі. Примітно, що система виявила здатність до високого рівня самоорганізації, автоматично адаптуючи параметри обробки даних без необхідності прямого втручання користувача.

Практична реалізація: Експериментальна апробація прототипу на макетній платі підтвердила функціональну придатність обраних схемотехнічних рішень, зокрема ефективність RC-фільтра у стабілізації живлення сенсорного елемента. Розроблена система являє собою готове до застосування IoT-рішення, потенційно інтегроване у сучасні інфраструктури «розумного будинку» з метою підвищення екологічної безпеки життєвого середовища

					КвРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



10. Sinambela M. et al. Iot-based air quality monitoring system design and development using esp32. *2024 Ninth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*. IEEE, 2024. P. 1–6.
11. Chen Y., Wang L. Assessing the impact of airflow and particle distribution on low-cost optical dust sensors accuracy. *Measurement*. 2025. Vol. 230. Art. 114502.
12. Patel K., Sharma M. Design of a smart dynamic message display system using ESP32 microcontroller and IoT. *HardwareX*. 2024. Vol. 18. Art. e00512.
13. Лазута Р. В. Комп'ютеризована система для віддаленого моніторингу мікроклімату у виробничих цехах текстильної промисловості : кваліфікаційна робота бакалавра : 123 Комп'ютерна інженерія / ТНТУ. Тернопіль, 2025. 79 с.
14. Gupta R. D. et al. Development of a Low Cost IoT Integrated System in Precision Smart Garden. *2024 IEEE 3rd International Conference on Robotics, Automation, Artificial-Intelligence and Internet-of-Things (RAAICON)*. IEEE, 2024. P. 1–6.
15. Nguyen T., Tran H. Prototyping an indoor air quality monitor using Arduino, MQ-series sensors, and optical dust detectors. *Internet of Things*. 2024. Vol. 25. Art. 100981.
16. Putra A. W., Fitri Z., Anshari S. F. Sistem monitoring dan pendeteksi pencemaran udara sekolah berbasis internet of things. *Rabit: Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi Univrab*. 2025. Vol. 10.2. P. 675–692.
17. Waworundeng J., Korompis H. H. Prototype Design of IoT-Based Real-time Monitoring and Security System for University Server Room. *CogITo Smart Journal*. 2024. Vol. 10.2. P. 496–509.
18. Zhang Q., Li X. Evaluation of next-generation optical sensors for single-particle aerosol measurement in controlled environments. *IEEE Sensors Journal*. 2025. Vol. 25, no. 2. P. 1345-1354.
19. Frayoga A. et al. Pengaruh penyebaran acak partikel terhadap performansi sistem pengukuran PM 2.5 berbasis sensor GP2Y1010AU0F. *Journal Online of Physics*. 2025. Vol. 11, no. 1. P. 63–71.

20. Kovalev I. et al. Advances in the application of optical sensors in Smart Dust technology for environmental monitoring. *Optical and Computational Technologies for Measurements and Industrial Applications (OptiComp 2025)*. 2025. Vol. 13803. P. 17–24.

21. Silva G. et al. Low-cost sensors for indoor air quality monitoring: A systematic Review of accuracy, applications, and limitations. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2026. Vol. 76, no. 5. P. 315–341.

22. Belatik A. et al. A comparative review of microcontroller architectures in embedded machine learning. *International Conference on Digital Technologies and Applications*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. P. 446–456.

23. Risi I., Amadi E. O. Design and Implementation of Hybrid Scrolling Message LED Display with Bluetooth Controlled App using Arduino Nano. *International Journal of Recent Engineering Science-IJRES*. 2025. Vol. 12, no. 1. P. 43–49.

24. Williams M., Johnson D. Microcontroller-based data acquisition systems for high-resolution environmental optical sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024. Vol. 73. Art. 4001210.

25. Khan K. et al. Development and Assessment of a Hand-Held Dust Measuring Device. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*. 2024. Vol. 105, no. 3. P. 499–505.

26. Ketcham M. et al. Development of a PM2.5 Measurement Device Using Dust Sensors for Air Quality Monitoring. *2025 IEEE International Conference on Cybernetics and Innovations (ICCI)*. IEEE, 2025. P. 1–7.

27. Chen K.-C. et al. Air Quality Monitoring and Controlling System Using Dust Sensor. *Sensors and Materials*. 2025. Vol. 37, no. 1. P. 351–358.

28. Tsameret S. et al. Low-cost indoor sensor deployment for predicting PM2.5 exposure. *ACS Es&t Air*. 2024. Vol. 1, no. 8. P. 767–779.

29. Parkavi A. et al. Air quality and dust level monitoring systems in hospitals using IoT. *Discover Internet of Things*. 2025. Vol. 5, no. 1. P. 23.

					КВРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

30. Wolfe C. et al. Real-Time Dust Monitoring in Occupational Environments. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024. Vol. 41, no. 4. P. 1709–1718.
31. Poulouse A. et al. Real-time indoor air quality monitoring and purification system using sensor data and machine learning technique. *2024 2nd International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems (ICSCSS)*. IEEE, 2024. P. 1271–1279.
32. El-Batrawy O. A., El-Sheltawya A., Hasballah A. F. Evaluation of Indoor Air Quality in Medical and Residential Areas, Damietta, Egypt. *International Journal of Environment and Climate Change*. 2026. Vol. 16, no. 2. P. 186–208.
33. Mullick I. U. et al. Portable Air Quality Detector Using DSM501A Dust Sensor and Arduino Uno. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2024. Vol. 26, no. 5. P. 163–174.
34. Malik S. A. et al. Development of IoT Based System for Early Detection of Asthma. *Nangarhar University International Journal of Biosciences*. 2024. Vol. 3, no. 2. P. 80–84.
35. Sumardiono S. et al. Prototype of Library Noise Detection Tool with IoTbased ESP32 and Blynk. *2024 Ninth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*. IEEE, 2024. P. 1–6.
36. Zambrano-Mieles J. Integrating ESP32-Based IoT Architectures and Cloud Visualization to Foster Data Literacy in Early Engineering Education. *Computers*. 2026. Vol. 15, no. 1. Art. 51.
37. Pande K. et al. Arduino-based library-assistant robot using Internet of Things. *Integrated Technologies in Electrical, Electronics and Biotechnology Engineering*. CRC Press, 2025. P. 422–426.
38. Mahesh N. et al. Development of Airborne Particle Filtering System Using IoT. *2024 8th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. IEEE, 2024. P. 453–457.
39. Serepas F. et al. Lightweight embedded IoT gateway for smart homes based on an ESP32 microcontroller. *Computers*. 2025. Vol. 14, no. 9. P. 391.

40. Pineda-Tobón D. M., Espinosa-Bedoya A., Branch-Bedoya J. W. Aquality32: A low-cost, open-source air quality monitoring device leveraging the ESP32 and google platform. *HardwareX*. 2024. Vol. 20. P. e00607.

41. Waveshare Electronics: офіційний сайт. URL: <https://www.waveshare.com/> (дата звернення: 18.05.2026).

42. Мережа магазинів радіодеталей Радіомаг: офіційний сайт. URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/> (дата звернення: 18.05.2026).

43. Український виробник дитячих розвиваючих конструкторів bitkit: офіційний сайт. URL: <https://bitkit.com.ua/> (дата звернення: 18.05.2026).

44. Маркетплейс України PROM: офіційний сайт. URL: <https://prom.ua/> (дата звернення: 18.05.2026)

45. Ivanov S. Low-Cost Device for Collecting Data from Acceleration Sensors. *Engineering Proceedings*. 2025. Vol. 104, no. 1. Art. 10.

46. Arregui Almeida D., et al. Gateway-Free LoRa Mesh on ESP32: Design, Self-Healing Mechanisms, and Empirical Performance. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 19. Art. 6036.

47. Cuenca-Sánchez A. AI-Enhanced Embedded IoT System for Real-Time Industrial Sensor Calibration. *Engineering Proceedings*. 2025. Vol. 115, no. 1. Art. 13.

48. Mota A. Implementation of an Internet of Things Architecture to Monitor Indoor Air Quality: A Case Study During Sleep Periods. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 6. Art. 1683.

49. El Anshori Y. T. Design and Construction of a Real-Time Air Quality Monitoring System Using IoT-Based ESP32 to Strengthen Environmental Policies. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. 2025. Vol. 11, no. 2. P. 145-152.

50. Abdullah M., et al. Development of Cellular IoT-Based, Portable Outdoor Air Quality Monitoring System for Pollution Mapping. *Engineering Proceedings*. 2025. Vol. 118, no. 1. Art. 30.

					КВРКІ.022020.22.01.62 ПЗ	Арк. 73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		







## ДОДАТОК Г

(обов'язковий)

### Лістинг коду програмного забезпечення прошивки мікроконтролера

```
#include <Arduino.h>
#include <WiFi.h>
#include <LittleFS.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SettingsGyver.h>
#include <HTTPClient.h>

#define WIFI_SSID "Xiaomi_3F92"
#define WIFI_PASS "25011982"
#define API_URL "127.0.0.1"

#define LED_PIN 13
#define DUST_PIN 34

float V0 = 0.5;
float K = 0.5;
float currentDust = 0;
float currentVolts = 0;

#define HISTORY_FILE "/dust_log.dat"
#define MAX_POINTS 144
float history[MAX_POINTS];

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
SettingsGyver sett("Dust Monitor");

uint32_t timerMeasure = 0;
uint32_t timerLog = 0;
uint32_t timerAPI = 0;

void loadHistory() {
    if (LittleFS.exists(HISTORY_FILE)) {
        File f = LittleFS.open(HISTORY_FILE, "r");
        f.read((uint8_t*)history, sizeof(history));
        f.close();
        Serial.println(F("History loaded from Flash."));
    } else {
        memset(history, 0, sizeof(history));
    }
}

void saveHistory() {
    File f = LittleFS.open(HISTORY_FILE, "w");
```

```

    if (f) {
        f.write((uint8_t*)history, sizeof(history));
        f.close();
    }
}

void addHistoryPoint(float val) {
    for (int i = 0; i < MAX_POINTS - 1; i++) {
        history[i] = history[i + 1];
    }
    history[MAX_POINTS - 1] = val;
    saveHistory();
}

void build(sets::Builder& b) {
    char buf[32];

    if (b.beginGroup("Live Status")) {
        snprintf(buf, sizeof(buf), "%d ug/m3", (int)currentDust);
        b.Label("Dust Level", buf);

        snprintf(buf, sizeof(buf), "%.2f V", currentVolts);
        b.Label("Sensor Volts", buf);

        b.endGroup();
    }

    if (b.beginGroup("24-Hour Analytics")) {
        float maxDust = 0;
        float sumDust = 0;
        int validPoints = 0;

        for (int i = 0; i < MAX_POINTS; i++) {
            if (history[i] > 0) {
                if (history[i] > maxDust) maxDust = history[i];
                sumDust += history[i];
                validPoints++;
            }
        }
        float avgDust = (validPoints > 0) ? (sumDust / validPoints) :
0;

        snprintf(buf, sizeof(buf), "%d ug/m3", (int)avgDust);
        b.Label("Daily Average", buf);

        snprintf(buf, sizeof(buf), "%d ug/m3", (int)maxDust);
        b.Label("Daily Maximum", buf);

        if (b.Button("Print Full Log to Serial")) {
            Serial.println(F("\n--- 24H History Data ---"));
            for (int i = 0; i < MAX_POINTS; i++) {
                Serial.print(history[i]);
            }
        }
    }
}

```

```

        Serial.print(" ");
    }
    Serial.println(F("\n-----"));
}
b.endGroup();
}

if (b.beginGroup("System Info")) {
    snprintf(buf, sizeof(buf), "%.2f V", V0);
    b.Label("Base Zero (V0)", buf);
    b.Label("IP Address", WiFi.localIP().toString().c_str());
    b.endGroup();
}
}

void sendToAPI(float dustValue) {
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        HTTPClient http;
        http.begin(API_URL);
        http.addHeader("Content-Type", "application/json");

        char jsonPayload[64];
        snprintf(jsonPayload, sizeof(jsonPayload), "{\"dust_ugm3\": %.2f}", dustValue);

        int httpResponseCode = http.POST(jsonPayload);
        if (httpResponseCode > 0) {
            Serial.print(F("API HTTP Response code: "));
            Serial.println(httpResponseCode);
        } else {
            Serial.print(F("API Error code: "));
            Serial.println(httpResponseCode);
        }
        http.end();
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(LED_PIN, LOW);
    analogReadResolution(12);

    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(F("Calibrating..."));

    Serial.println(F("\n--- Starting Calibration ---"));

    float sumV = 0;

```

```

int count = 50;
for (int i = 0; i < count; i++) {
    digitalWrite(LED_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(280);
    sumV += analogRead(DUST_PIN) * (3.3 / 4095.0);
    delayMicroseconds(40);
    digitalWrite(LED_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(9680);
    delay(10);
}
V0 = sumV / count;

lcd.clear();
lcd.print(F("Ready! V0:"));
lcd.print(V0, 2);
Serial.print(F("Calibration done. V0 = "));
Serial.println(V0);
delay(2000);

if (!LittleFS.begin(true)) {
    Serial.println(F("LittleFS Mount Failed"));
} else {
    loadHistory();
}

lcd.clear();
lcd.print(F("Connecting WiFi"));
Serial.println(F("Connecting to WiFi..."));

WiFi.disconnect(true);
WiFi.mode(WIFI_STA);
WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);

while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
}
Serial.println(F("\nWiFi Connected!"));
Serial.print(F("IP: "));
Serial.println(WiFi.localIP());

sett.begin();
sett.onBuild(build);
}

void loop() {
    sett.tick();

    if (millis() - timerMeasure >= 2000) {
        timerMeasure = millis();

        float rawSum = 0;

```

```

const int numSamples = 30;

for (int i = 0; i < numSamples; i++) {
    digitalWrite(LED_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(280);
    rawSum += analogRead(DUST_PIN);
    delayMicroseconds(40);
    digitalWrite(LED_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(9680);
}

currentVolts = (rawSum / numSamples) * (3.3 / 4095.0);
float deltaV = currentVolts - V0;
if (deltaV < 0) deltaV = 0;

currentDust = deltaV * K * 1000.0;

Serial.print(F("V: ")); Serial.print(currentVolts, 3);
Serial.print(F(" | Delta: ")); Serial.print(deltaV, 3);
Serial.print(F(" | Dust: ")); Serial.println(currentDust);

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(F("Dust: "));
lcd.print((int)currentDust);
lcd.print(F(" ug/m3      "));

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(F("IP:"));
lcd.print(WiFi.localIP().toString());
}

if (millis() - timerLog >= 600000) {
    timerLog = millis();
    addHistoryPoint(currentDust);
    Serial.println(F("Data saved to history array."));
}

if (millis() - timerAPI >= 60000) {
    timerAPI = millis();
    sendToAPI(currentDust);
}
}

```

## 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:** Вадим ДРИГУЛА

**Співавтор:**

**Назва:** Кіберфізична система моніторингу концентрації пилу в приміщенні на базі ESP32/Arduino

**Експерт:** Олексій ЛИГУН

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

**Коефіцієнт подібності 1:** 1.82%

**Коефіцієнт подібності 2:** 0.7%

**Мікропробіли:** 4

**Заміна букв:** 3

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2026-05-21 10:52:40.0

**Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:**

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

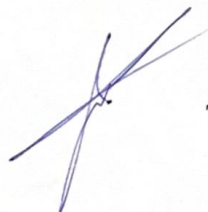
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

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

**Обґрунтування:**

2026-05-21

*Дата*



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

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

Максимальне співпадіння з одним документом 24.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилоч в документах: 8%

ID: 271876 Назва: БКР Кіберфізична система моніторингу концентрації пилу в приміщенні на базі ESP32/Arduino Додано в БД: 2026-05-21 Автора: Вадим ДРИГУЛА Керівники: Олексій ЛИГУН Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	125080	812	31730 (25%)	302 (37%)

### Джерело плагиату

ID	Опис	Наявність плагиату в документі	
		Символи	Лексеми
269442	Назва: Звіт з ПДП Кіберфізична система моніторингу концентрації пилу в приміщенні на базі ESP32/Arduino Додано в БД: 2026-02-23 Автора: Дригули В.С. Керівники: Лигун О.О. Консультанти: Опоненти:	30527 (24.0%)	295 (36.0%)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Дригула Вадим Сергійович

Тема: Кіберфізична система моніторингу концентрації пилу в приміщенні на базі ESP32/Arduino

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень  3  Кількість сторінок записки  69

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження кіберфізичної системи моніторингу концентрації пилу в приміщенні на базі ESP32/Arduino.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено порівняльний аналіз методів вимірювання дрібних часток у повітрі та досліджено їх історію. Обґрунтовано вибір апаратної платформи, стратегію побудови пристрою та досліджено методологію програмної обробки сигналів. У другому розділі спроектовано трірівневу архітектуру системи. Визначено функціонал завдань, які може виконувати система в своїх компонентах. Досліджено можливості системи щодо реалізації самоорганізації в її архітектурі. У третьому розділі здійснено повну програмно-апаратну реалізацію системи. Розроблено алгоритми функціонування системи та написане програмне забезпечення для успішної їх реалізації. Спроектовано веб-базований інтерфейс для дистанційного керування та моніторингу. Проведено тестування системи та наведено приклади її застосування.
4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.
5. Негативні сторони роботи: -.

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 високому технічному рівні.


8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

9. Оцінка дипломної роботи: відмінно (А / 93).

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

Мартишок Валерій Володимирович, р.г.н.,  
проф., професор кафедри АІТ та Р, ХНУ

"28" травня 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КПС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Вадим ДРИГУЛА

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-1

### ЗАЯВА

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

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

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

1 травня 2026 року



## РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система моніторингу концентрації пилу в приміщенні на базі ESP32/Arduino

Автор Вадим ДРИГУЛА

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: Олексій ЛИГУН

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

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

#### Підтвердження:

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

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

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 2,52%; та системою Anti-Plagiarism складає 24%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис  
  
Підпис  
  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олексій ЛИГУН  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ