

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Кіберфізична система автоматизованого контролю умов експонування  
музейних об'єктів

Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

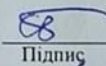
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 022096.22.03.81 ПЗ

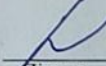
Виконав здобувач IV курсу, група KI2-22-3

  
Підпис

Столярчук Роман

Ініціали, прізвище

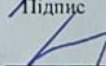
Керівник канд. фіз.-мат. наук, доц.  
Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Тетяна КИСІЛЬ

Ініціали, прізвище

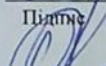
Нормоконтролер канд. фіз.-мат. наук, доц.  
Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Тетяна КИСІЛЬ

Ініціали, прізвище

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

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

дата

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

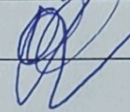
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІС



Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Столярчуку Роману Миколайовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система автоматизованого контролю умов експонування музейних об'єктів

Керівник проекту (роботи) Кисіль Тетяна Миколаївна, к.ф - м.н., доцент.

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) \_\_\_\_\_

Теоретичні основи досліджуваної проблеми

Обґрунтування та вибір програмно-апаратних засобів реалізації кіберфізичної системи

Практична реалізація кіберфізичної системи

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

Архітектура кіберфізичної системи

Візуалізація результатів розробки

Схеми алгоритмів та програм кіберфізичної системи

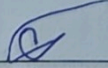
6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

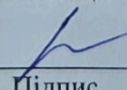
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

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 – Теоретичні основи досліджуваної проблеми	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – Обґрунтування та вибір програмно-апаратних засобів реалізації кіберфізичної системи	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – Практична реалізація кіберфізичної системи	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2026	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач  Роман СТОЛЯРЧУК  
Підпис Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи  Тетяна КИСІЛЬ  
Підпис Імя, ПРІЗВИЩЕ



## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система автоматизованого контролю умов експонування музейних об'єктів».

Автор роботи: Роман СТОЛЯРЧУК.

Керівник роботи: Тетяна КИСІЛЬ.

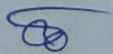
Пояснювальна записка: 69 с., 26 рис., 3 дод., 40 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЯ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МІКРОКЛІМАТ, МІКРОКОНТРОЛЕР, МОНІТОРИНГ, МУЗЕЙНІ ОБ'ЄКТИ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню програмно-апаратної системи моніторингу параметрів комп'ютерного обладнання та навколишнього середовища на базі мікроконтролерної платформи. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до надійності, енергоефективності та безперервності функціонування комп'ютерних систем, серверного обладнання, вбудованих пристроїв і елементів інфокомунікаційної інфраструктури. Своєчасний контроль температури, вологості, енергоспоживання та інших параметрів дає змогу попереджати аварійні ситуації, знижувати ризики відмов і підвищувати ефективність експлуатації технічних засобів.

Метою роботи є проектування, реалізація та тестування апаратно-програмного комплексу для збору, передавання, оброблення й візуалізації даних з датчиків у реальному часі. Для досягнення поставленої мети було виконано аналіз сучасних підходів до побудови систем моніторингу, обрано елементну базу, розроблено структурну та функціональну схеми пристрою, спроектовано програмне забезпечення мікроконтролера і користувацький інтерфейс для перегляду результатів вимірювань.







Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Теоретичні основи досліджуваної проблеми .....	4
1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань .....	4
1.2 Порівняльний аналіз переваг та недоліків існуючих рішень .....	7
1.3 Підходи до вирішення задачі за темою дослідження.....	12
1.4 Висновки до першого розділу.....	17
2 Обґрунтування та вибір апаратно-програмних засобів реалізації кіберфізичної системи .....	19
2.1 Архітектура та апаратні компоненти фізичного рівня системи.....	19
2.2 Аналіз та обґрунтування вибору програмних засобів, середовища моделювання та мережевих протоколів.....	28
2.3 Висновки до другого розділу .....	39
3 Практична реалізація кіберфізичної системи.....	40
3.1 Опис реалізації модулів апаратного та програмного забезпечення програмно-технічного засобу .....	40
3.2 Мережева взаємодія та імплементація протоколу MQTT .....	45
3.3 Розробка веб-інтерфейсу диспетчеризації.....	47
3.4 Комплексне тестування та верифікація роботи кіберфізичної системи .....	51
3.5. Висновки до третього розділу.....	59
Висновки .....	61
Перелік джерел посилань .....	63
Додаток А Архітектура кіберфізичної системи .....	67
Додаток Б Візуалізація результатів розробки .....	68
Додаток В Схеми алгоритмів та програм кіберфізичної системи.....	69

КвРКІ 022096.22.03.81 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата
Виконав		Роман СТОЛЯРЧУК		
Перевір.		Тетяна КИСІЛЬ		
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		
			Кіберфізична система автоматизованого контролю умов експонування музейних об'єктів. Пояснювальна записка	Літера
				у
				2
				69
ХНУ КІ2-22-3				

## ВСТУП

Актуальність теми зумовлена тим, що збереження культурної спадщини вимагає суворого дотримання температурно-вологісного та світлового режимів, оскільки різкі флуктуації мікроклімату призводять до незворотної деградації гігроскопічних експонатів. Більшість вітчизняних музеїв досі використовують застарілі аналогові засоби, які забезпечують лише ретроспективний аналіз і не здатні оперативно реагувати на зміни середовища, а існуючі комерційні цифрові рішення є дороговартісними та архітектурно закритими. Тому розробка кіберфізичної системи на базі Інтернету речей (IoT) та граничних обчислень для проактивного керування середовищем експонування в режимі реального часу є надзвичайно актуальним завданням.

Метою дипломної роботи є розробка та дослідження прототипу кіберфізичної системи автоматизованого контролю умов експонування для забезпечення оптимального мікроклімату. Для досягнення цієї мети необхідно проаналізувати предметну область, обґрунтувати вибір мікроконтролера та прецизійних сенсорів і розробити принципову схему їх підключення

Об'єктом дослідження виступає процес моніторингу та керування параметрами мікроклімату в середовищі експонування. Предметом дослідження є апаратно-програмні засоби, мережеві протоколи та алгоритми автоматичного керування, необхідні для побудови такої кіберфізичної системи. У роботі використано методи системного аналізу, теорії автоматичного керування, процедурного та об'єктно-орієнтованого програмування, а також емпіричні методи для тестування. Практичне значення полягає у створенні недорогої, масштабованої та автономної бази для систем клімат-контролю, готової до впровадження в регіональних музеях, архівах та бібліотеках для модернізації застарілого обладнання.

					КвРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПРОБЛЕМИ

## 1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань

Історично збереження культурної спадщини залежало виключно від архітектурних особливостей будівель. У середньовічних замках та храмах, де товщина кам'яних стін сягала кількох метрів, створювався ефект високої теплової інерції. Такі будівлі працювали як природні буфери, згладжуючи різкі перепади зовнішніх температур та вологості. Проте з настанням епохи індустріалізації та появою централізованого вугільного, а згодом газового опалення у XIX-XX століттях, ситуація кардинально змінилася. Штучне нагрівання повітря взимку без відповідного зволоження призводило до сильного падіння відносної вологості (до 15-20%), що викликало масове розсихання дерев'яних скульптур, меблів та розтріскування живопису. Переломним моментом у свідомості музейної спільноти стала катастрофічна повінь у Флоренції (Італія) в листопаді 1966 року, коли води річки Арно затопили цокольні поверхи галереї Уффіці та бібліотеки. Саме ця подія стимулювала формування нової наукової дисципліни - превентивної консервації, яка перенесла фокус із реставрації вже пошкоджених об'єктів на створення ідеального середовища, що унеможлиблює саму появу пошкоджень.

З точки зору термодинаміки, музейний експонат не є статичним об'єктом. Він перебуває у стані постійного масового та теплового обміну з навколишнім повітрям. Відносна вологість (RH) визначається як відношення парціального тиску водяної пари в повітрі до тиску насиченої пари при тій самій температурі. Відповідно до психрометричної діаграми Мольє здатність повітря утримувати вологу експоненційно зростає з підвищенням температури. Гігроскопічні матеріали (папір, дерево, пергамент) характеризуються наявністю так званої ізотерми сорбції - кривої, що описує залежність рівноважної вологості матеріалу від вологості повітря. При цьому спостерігається явище сорбційного гістерезису: процеси поглинання вологи та її віддачі йдуть різними шляхами. Це означає, що

					КвРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

при постійних різких коливаннях мікроклімату волокна матеріалу зазнають асиметричних мікродеформацій. У структурі полотна олійного живопису це призводить до втоми матеріалу. З часом клейовий проклеї втрачає еластичність, кристалізується і руйнується, що неминуче веде до осипання оригінального авторського живопису.

Сучасне збереження світової культурної спадщини зазнає великих змін, трансформуючись від стратегії пасивного, констатуючого спостереження до проактивного, інтелектуального керування середовищем експонування. Музейний простір, з точки зору системного аналізу, являє собою складну, багатофакторну стохастичну систему, де зміна одного параметра неминуче впливає на інші, а результируючий вплив на експонат часто має кумулятивний та незворотний характер.

#### Фізико-хімічні аспекти деградації музейних об'єктів

Основними агентами руйнування, згідно з класифікацією Канадського інституту консервації (CCI) та міжнародними дослідженнями [1], є некоректний температурно-вологісний режим та неналежне світлове навантаження. Глибина розуміння цих процесів є важливим для проектування ефективної кіберфізичної системи (КФС).

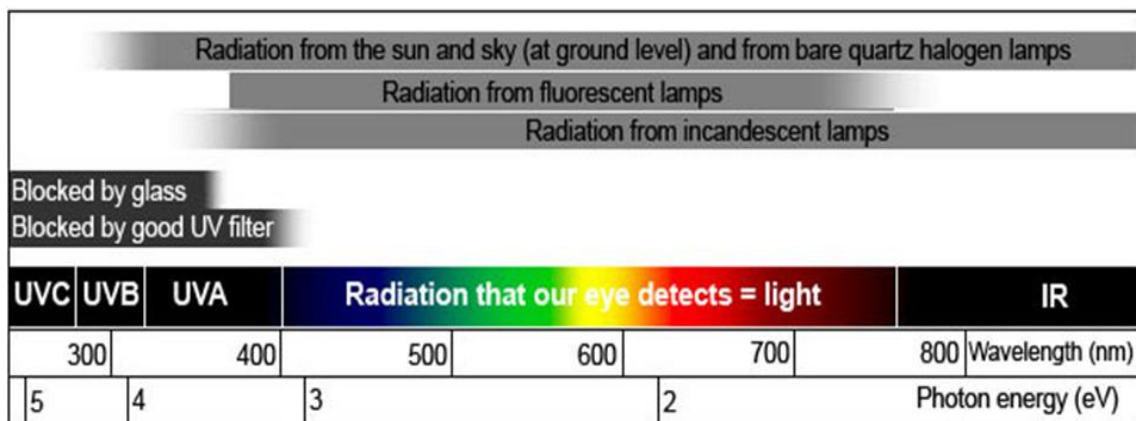


Рисунок 1.1 – Випромінювання, що випускається різними джерелами світла, та діапазони, що блокуються різними УФ-фільтрами.[1]

Проблема вологості та температури. Більшість класичних музейних експонатів - олійний живопис на полотні чи дереві, старовинні меблі, пергаменти, текстиль - складаються з гігроскопічних матеріалів. Ці матеріали мають властивість поглинати вологу з повітря при її надлишку та віддавати при її нестачі, намагаючись досягти рівноважної вологості з навколишнім середовищем.

Найбільшу небезпеку становлять не стільки стабільно високі чи низькі показники, скільки їх різкі коливання. Розглянемо структуру олійного живопису: вона є багатошаровою системою (дерев'яна основа або полотно, клейовий проклей, левкас, фарбовий шар, захисний лак). Кожен із цих шарів має різний коефіцієнт теплового та вологісного розширення. Дерев'яна основа є анізотропною - вона значно сильніше розширюється поперек волокон, ніж уздовж. При різкому підвищенні вологості основа розширюється швидше, ніж менш еластичний шар старого ґрунту та фарби. Це призводить до виникнення внутрішніх механічних напружень зсуву. Коли ці напруження перевищують межу пружності матеріалу, відбувається незворотна деформація: утворюється сітка тріщин, а згодом - відшарування фарбового шару від основи [8].

Проблема світлового навантаження. Світло є каталізатором фотохімічних реакцій деструкції. Пошкодження світлом є виключно кумулятивним процесом: експонування об'єкта при освітленості 100 Люкс протягом 10 годин завдає такої ж шкоди, як і експонування при 1000 Люкс протягом 1 години (закон взаємозамісності Бунзена-Роско). Найбільш руйнівним є ультрафіолетовий (УФ) компонент спектра, який має високу енергію фотонів, достатню для розриву молекулярних зв'язків у органічних пігментах та сполучних речовинах, що призводить до вицвітання фарб та пожовтіння лаків [1].

Для мінімізації зазначених ризиків розроблено міжнародні стандарти, зокрема ISO 11799:2015 «Вимоги до зберігання архівних та бібліотечних матеріалів». Згідно з сучасними рекомендаціями ICOM (Міжнародна рада музеїв), оптимальним вважається підтримання температури в діапазоні 18–22 °С

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та відносної вологості (RH) на рівні 50 %  $\pm$  5 %. Важливим є обмеження добових градієнтів: зміни не повинні перевищувати 2 °C та 5 % RH за 24 години. Для чутливих експонатів рівень освітленості не має перевищувати 50-150 Люкс, з повною відсутністю прямого сонячного світла.

В Україні переважна більшість музейних установ досі використовує застарілі методи контролю. Найпоширенішими є волосяні гігрометри та механічні термогігрографи з паперовими самописцями. Ці прилади потребують регулярного ручного обслуговування (заміни стрічок, калібрування), мають високу похибку вимірювань, до  $\pm$ 15 % RH для старого волосяного гігрометра і, що найголовніше, забезпечують лише ретроспективний аналіз. Вони фіксують порушення режиму вже після того, як воно сталося.

Їхня головна проблема - відсутність оперативного зворотного зв'язку між засобами вимірювання та засобами забезпечення клімату. Наприклад, раптове збільшення потоку відвідувачів під час відкриття виставки може підняти вологість у залі на 10-15% за лічені хвилини через виділення вологи з диханням. Традиційна система лише зафіксує цей пік на папері наступного дня, тоді як кіберфізична система здатна виявити тренд до зростання в перші хвилини та автоматично увімкнути системи примусової вентиляції.

## 1.2 Порівняльний аналіз переваг та недоліків існуючих рішень

Розвиток засобів інструментального контролю в музейній справі пройшов кілька технологічних етапів. Перше покоління пристроїв, що домінувало протягом усього ХХ століття, складалося з механічних аналогових приладів - психрометрів Августа, волосяних гігрометрів та біметалевих термографів. Їхня дія базувалася на фізичних властивостях матеріалів, наприклад, зміні довжини знежиреної людської волосини при поглинанні вологи. Незважаючи на повну енергонезалежність, ці системи мали важливий недолік - вони вимагали щоденної присутності оператора для зняття показників та заведення

					КвРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

годинникового механізму самописця. Друге покоління, кінець 1990-х - початок 2000-х років, почалося з появою цифрових логерів даних. Ці автономні пристрої на базі мікроконтролерів з флеш-пам'яттю дозволили записувати тисячі вимірювань. Однак вони працювали в режимі «чорної скриньки», тому для отримання даних фахівець мав фізично підійти до приладу, підключити його до комп'ютера через інтерфейс RS-232 або USB і завантажити масив інформації. Відсутність онлайн-доступу робила неможливим оперативне запобігання аваріям, наприклад, у випадку поломки кондиціонера вночі. Лише з розвитком концепції Інтернету речей у 2010-х роках почалося впровадження систем третього покоління - бездротових сенсорних мереж Wireless Sensor Networks (WSN). Використання мікроелектромеханічних систем дозволило розмістити чутливий елемент, аналогово-цифровий перетворювач та радіомодуль на одному кремнієвому кристалі розміром кілька міліметрів. Це відкрило шлях до створення непомітних для відвідувачів систем моніторингу, які органічно вписуються в експозиційний простір.

Ринок сучасних систем моніторингу та керування мікрокліматом можна сегментувати на три основні групи: професійні комерційні системи закритого типу, системи на базі енергоефективних мереж далекого радіусу дії (LPWAN) та відкриті дослідницькі платформи на базі IoT-контролерів.

Системи британських компаній Hanwell або німецьких компаній Testo є стандартом для провідних світових музеїв, таких як Лувр або Британський музей. Архітектурно вони будуються на базі високоточних бездротових радіодатчиків, що працюють на пропрієтарних частотах і передають дані на центральну базову станцію.

Серед переваг таких комерційних рішень варто виділити їхню високу метрологічну достовірність. Використовувані датчики проходять обов'язкове заводське калібрування та сертифікуються відповідно до чинних міжнародних стандартів. Це відіграє важливу роль у юридичних та фінансових аспектах музейної діяльності, зокрема під час організації та страхування виїзних виставок,

					КвРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коли страхові компанії вимагають офіційного підтвердження належних умов зберігання експонатів. Крім того, завдяки використанню спеціалізованих радіопротоколів, ці системи відзначаються високою надійністю, завадостійкістю та тривалою автономністю, дозволяючи обладнанню працювати від одного комплекту батарей до п'яти років.

Проте, розглядаючи такі рішення в контексті побудови повноцінної кіберфізичної системи, можна виділити кілька суттєвих недоліків. Насамперед, подібні програмно-апаратні комплекси є повністю закритими продуктами. Користувач не має доступу до відкритого API, що унеможливорює пряме керування сторонніми виконавчими механізмами в режимі реального часу. Відповідно, система залишається орієнтованою виключно на пасивний моніторинг та розсилку тривожних сповіщень через SMS чи електронну пошту, не здатна здійснювати автоматичне регулювання мікроклімату. Додатковим і часто проблемним бар'єром є економічний фактор: вартість повноцінного розгортання такої інфраструктури може сягати десятків тисяч євро, що робить її впровадження практично неможливим для більшості регіональних музеїв України. [20].

Технологія LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) набула популярності в задачах «Розумного міста» та моніторингу історичних будівель. Фізичний рівень LoRa базується на методі модуляції з розширенням спектра. Це дозволяє приймати сигнали з рівнем нижче рівня шуму, забезпечуючи виняткову дальність зв'язку, до 10–15 км на відкритій місцевості, та високу проникаючу здатність. Архітектурно такі мережі зазвичай будуються за топологією «зірка зірок», де бездротові кінцеві вузли транслюють зібрану інформацію до найближчих базових станцій, які вже перенаправляють трафік на центральний сервер через стандартні широкосмугові IP-канали.

					КвРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



(Uplink). Натомість передача керівних команд у зворотному напрямку - від сервера до виконавчого пристрою (Downlink) - є технічно складною, повільною та дуже енергозатратною процедурою. Це суттєво ускладнює реалізацію надійного контуру зворотного зв'язку, необхідного для оперативного керування кліматичним обладнанням. Відкриті платформи на базі Edge Computing (ESP32/STM32). Сучасний науковий підхід, широко представлений у дослідницьких публікаціях IEEE, MDPI Sensors, базується на використанні потужних систем на кристалі, таких як ESP32. Цей підхід реалізує концепцію граничних обчислень (Edge Computing) [4].

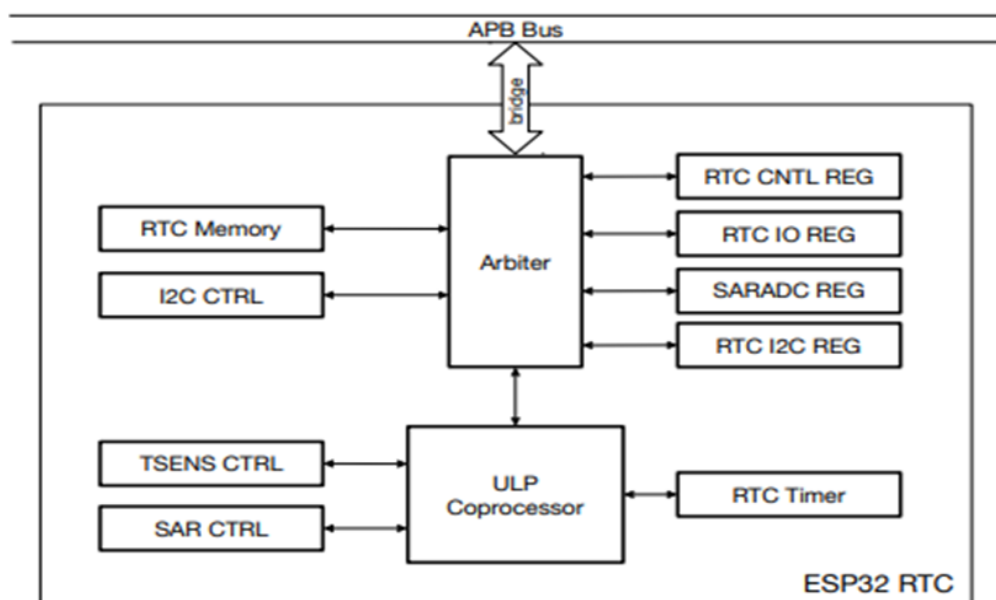


Рисунок 1.3 – Схема співпроцесора ULP[4]

Суть підходу полягає в первинній обробці даних, фільтрації шуму. Також прийняття оперативних рішень щодо керування локальними виконавчими механізмами відбувається безпосередньо на мікроконтролері, “на краю” мережі, близько до фізичного об'єкта. Хмарний сервер використовується лише для глобальної аналітики, візуалізації та довгострокового зберігання даних.

Розглядаючи головні переваги запропонованої кіберфізичної системи в контексті дипломного проєкту, варто виділити кілька ключових аспектів.

Насамперед, архітектура вирізняється високою відмовостійкістю та миттєвою реакцією на збурення: система здатна виконати аварійне закриття жалюзі або увімкнути локальний осушувач за лічені мілісекунди. Важливим є те, що ця базова автоматика гарантовано спрацює навіть у випадку повної втрати мережевого зв'язку із сервером. Також присутня орієнтація на загальноприйняті стандартні протоколи та інтерфейси, такі як Wi-Fi, MQTT та I2C, забезпечує надзвичайну гнучкість розробки. Це дає змогу вільно інтегрувати практично будь-які сучасні цифрові сенсори чи виконавчі механізми, легко масштабуючи та налаштовуючи систему під індивідуальні потреби конкретного музейного приміщення. Не менш вагомою є економічна доцільність розробки. Завдяки використанню відкритих технологій, загальна вартість обраної апаратної компонентної бази виявляється на порядок нижчою порівняно з розгортанням існуючих на ринку пропрієтарних комерційних аналогів.

### 1.3 Підходи до вирішення задачі за темою дослідження

Проектована система базується на трирівневій архітектурі “Сенсорика - Обробка/Комунікація - Візуалізація/Аналітика”, що відповідає класичній моделі кіберфізичних систем.

Апаратний рівень: Вибір та обґрунтування сенсорної бази

Точність роботи всієї системи прямо залежить від якості первинних даних. Використання аналогових датчиків (наприклад, терморезисторів або гігрометрів на основі зміни опору) є недоцільним через необхідність складної схемотехніки для калібрування, температурної компенсації та схильність до дрейфу показників з часом. Оптимальним рішенням є використання інтегрованих цифрових MEMS-сенсорів (мікроелектромеханічних систем), які містять чутливий елемент, АЦП та логіку компенсації в одному корпусі.

Сенсор клімату Bosch BME280. Для вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску обрано сенсор BME280 [3]. Його принцип вимірювання

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вологості базується на ємнісному методі. Сенсор містить полімерний діелектрик, здатний абсорбувати молекули води з повітря. Кількість абсорбованої вологи пропорційна відносній вологості зовнішнього середовища. Зміна вологовмісту полімеру змінює його діелектричну проникність, що, в свою чергу, змінює електричну ємність конденсатора. Вбудований АЦП перетворює цю ємність у цифровий сигнал.

Основні характеристики: Діапазон вимірювання вологості 0–100 % RH з точністю  $\pm 3$  %; діапазон температури  $-40 \dots +85$  °C з точністю  $\pm 1.0$  °C. Час відгуку складає менше 1 секунди, що дозволяє фіксувати швидкі зміни.

Сенсор освітленості Rohm BH1750. Для контролю світлового режиму обрано цифровий люксметр BH1750 [14]. На відміну від дешевих фоторезисторів (LDR), спектральна чутливість яких зміщена в інфрачервону область, BH1750 має вбудований оптичний фільтр, що наближає його характеристику до кривої спектральної чутливості людського ока  $V(\lambda)$  (максимум чутливості в зеленій області спектра  $\sim 550$  нм). Це дозволяє отримувати достовірні дані в стандартизованих одиницях - Люксах (Lux). Сенсор має широкий динамічний діапазон (від 1 до 65535 Люкс) завдяки можливості програмної зміни часу інтеграції сигналу.

Комунікаційний рівень: Протоколи взаємодії

Архітектура 5C у контексті музейних систем. Сучасна теорія кіберфізичних систем базується на так званій архітектурі 5C, яка включає наступні рівні: Connection (З'єднання), Conversion (Перетворення), Cyber (Кібернетичний рівень), Cognition (Пізнання) та Configuration (Конфігурація). У контексті нашого дослідження рівень з'єднання забезпечується мережею Wi-Fi та протоколом MQTT, рівень перетворення реалізується безпосередньо в сенсорах BME280, де фізичні величини перетворюються на цифровий код. Кібернетичний рівень - це сервер бази даних, який агрегує телеметрію. Найцікавішим є рівень конфігурації (Configuration), оскільки саме він замикає контур управління: система самостійно змінює стан виконавчих пристроїв (реле

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вентиляції, жалюзі), впливаючи на фізичний світ на основі даних, оброблених у кібер-просторі.

Апаратні особливості шини I2C. Для розуміння надійності системи варто детальніше розглянути апаратну реалізацію шини I2C. Виходи мікроконтролера та датчиків, підключені до ліній SDA та SCL, мають конфігурацію типу «відкритий колектор» (або відкритий стік для польових транзисторів). Це означає, що пристрій може лише «притискати» лінію до рівня логічного нуля (GND), але не може самостійно встановити на ній рівень логічної одиниці (VCC). Формування логічної одиниці забезпечується зовнішніми підтягуючими резисторами (pull-up resistors), номінал яких (зазвичай 4.7 кОм) розраховується на основі сумарної паразитної ємності шини. Така схема надійно захищає контролер від короткого замикання у випадку, якщо два пристрої одночасно спробують передати дані (механізм арбітражу шини).

Теорія автоматичного керування (ТАК) у мікрокліматі. Класичні системи вентиляції та кондиціонування (HVAC) часто використовують ПД-регулятори (пропорційно-інтегрально-диференціальні). Однак інерційність великих музейних залів робить налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора надзвичайно складним завданням. Процес зміни вологості в приміщенні об'ємом 500 кубічних метрів може тривати годинами. Саме тому в сучасних КФС все частіше відмовляються від жорсткої математичної моделі приміщення на користь емпіричних алгоритмів (включаючи гістерезис та прогнозування на основі ковзного середнього). Алгоритм ковзного середнього (Moving Average) дозволяє мікроконтролеру відкидати короточасні аномалії датчиків і реагувати лише на стійкі тренди, що значно підвищує відмовостійкість системи керування.

Шина I2C (Inter-Integrated Circuit). Взаємодія між мікроконтролером та цифровими сенсорами здійснюється за послідовним синхронним напівдуплексним протоколом I2C. Фізично шина складається лише з двох ліній:

SDA (Serial Data): Лінія для двосторонньої передачі даних.

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

SCL (Serial Clock): Лінія тактування, яку генерує майстер-пристрій (ESP32).

Обидві лінії підтягнуті до живлення (pull-up резистори), утворюючи схему «провідного АБО». Це дозволяє підключати десятки пристроїв на одну шину, де кожен пристрій має свою унікальну 7-бітну адресу. Наприклад, стандартна адреса BME280 - 0x76, а BH1750 - 0x23. Використання I2C значно спрощує схемотехніку та зменшує кількість дротів, що важливо при монтажі в музейних вітринах.

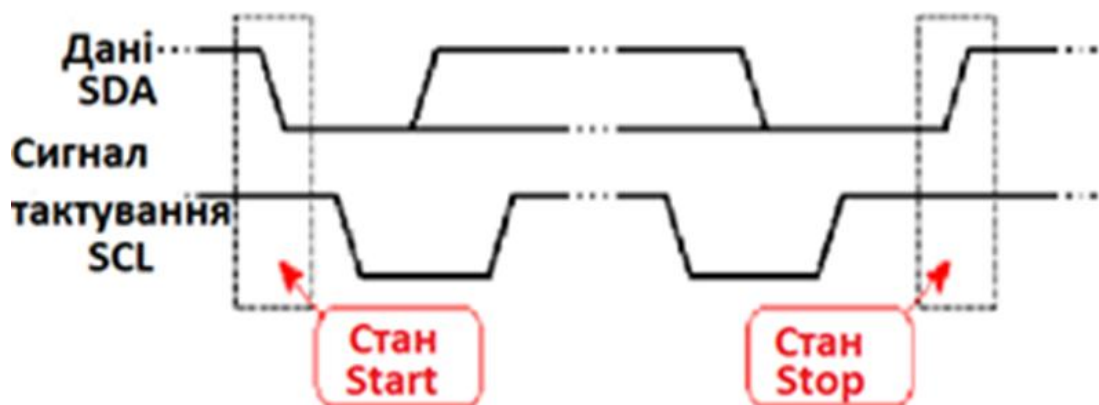


Рисунок 1.4 – Часова діаграма протоколу I2C, що демонструє умови START/STOP та передачу адреси пристрою.[21]

Протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Для передачі даних від контролера до сервера обрано протокол MQTT. Це легкотерміновий мережевий протокол, що працює поверх TCP/IP і спеціально розроблений для IoT-пристроїв з обмеженими ресурсами та нестабільними каналами зв'язку [6]. Він працює за моделлю «Видавець/Підписник» (Publish/Subscribe) через центральний вузол - Брокер. ESP32 виступає в ролі Видавця, публікуючи дані (наприклад, {"temp": 21.5, "hum": 52}) у певний топик (наприклад, museum/hall\_1/sensors). Серверна частина або веб-дашборд виступає Підписником на цей топик і миттєво отримує нові повідомлення.

Переваги над HTTP: MQTT має значно менший заголовок пакета (мінімум 2 байти проти сотень байт у HTTP-запиті), що економить трафік та енергію. Крім того, він підтримує рівні якості обслуговування (QoS), гарантуючи доставку важливих повідомлень навіть при короткочасних обривах Wi-Fi з'єднання.

Рівень керування: Алгоритмічні підходи

Реалізація зворотного зв'язку в КФС вимагає застосування алгоритмів, що запобігають нестабільній роботі виконавчих механізмів. Найпростіший двопозиційний регулятор (on/off) є неефективним. Наприклад, якщо встановити поріг увімкнення осушувача на 55% RH, то при коливаннях вологості навколо цього значення (54.9% - 55.1%) система буде постійно вмикати та вимикати реле. Таке явище називається «тактуванням» (chattering) і призводить до швидкого зносу обладнання та стрибків напруги в мережі. Для вирішення цієї проблеми застосовується алгоритм з гістерезисом. Гістерезис вводить зону нечутливості навколо порогового значення. Наприклад, система налаштовується так: увімкнути осушувач при досягненні верхнього порогу 58% RH, а вимкнути - лише при зниженні до нижнього порогу 52% RH. Різниця в 6% становить петлю гістерезису, що забезпечує стабільну роботу обладнання. Більш просунутим підходом, що розглядається в науковій літературі, є використання нечіткої логіки (Fuzzy Logic) [20]. Вона дозволяє формалізувати експертні знання музейних працівників. Замість чітких порогів «Вологість Висока» / «Вологість Нормальна», вводяться функції належності, де вологість 56% може одночасно належати до терму «Нормальна» з коефіцієнтом 0.7 та до терму «Висока» з коефіцієнтом 0.3. Це дозволяє реалізувати плавне керування, наприклад, змінювати швидкість вентилятора пропорційно ступеню відхилення від норми, а не просто вмикати його на повну потужність.

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

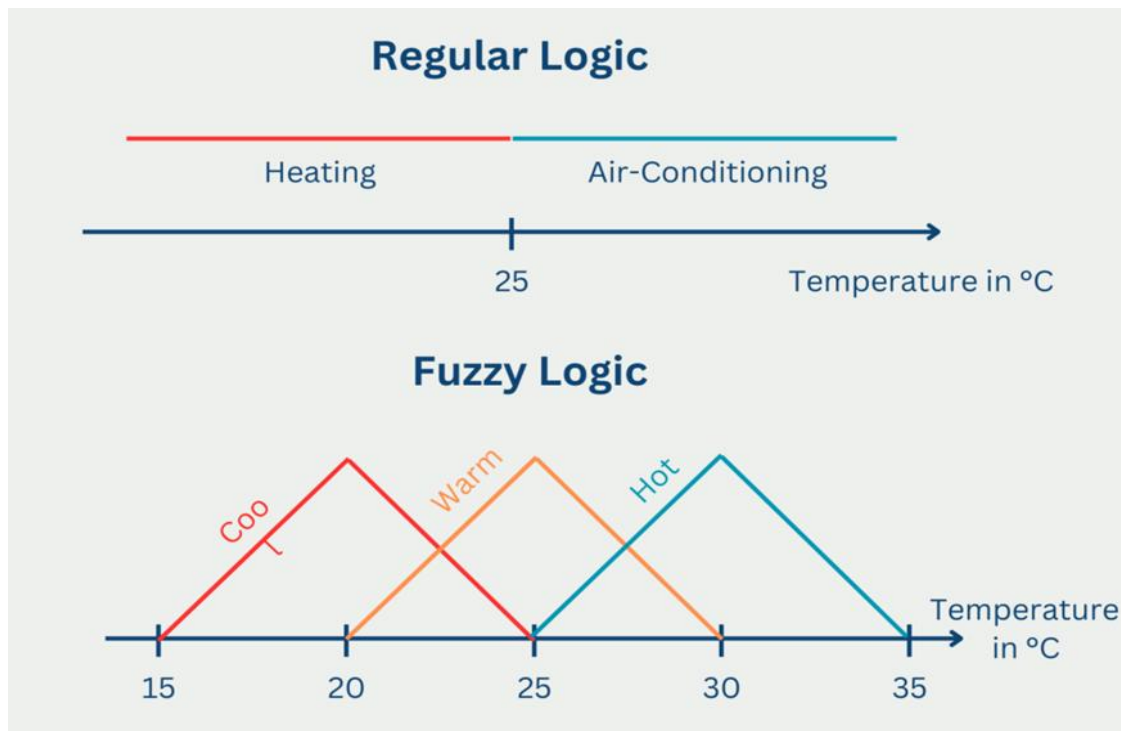


Рисунок 1.5 – Діаграма нечіткої логіки (Fuzzy logic)[20]

#### 1.4 Висновки до першого розділу

На основі проведеного аналізу проблемної області та порівняння існуючих технологічних підходів, метою дипломної роботи є створення прототипу кіберфізичної системи автоматизованого контролю умов експонування, яка поєднує переваги граничних обчислень для оперативного локального реагування та хмарних технологій для глобального моніторингу та аналітики. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс взаємопов'язаних науково-технічних завдань:

Обґрунтування та розробка апаратної платформи: Вибрати енергоефективний мікроконтролер із вбудованими можливостями бездротового зв'язку Wi-Fi/Bluetooth. Розробити принципову схему підключення цифрових сенсорів температури, вологості та освітленості, забезпечивши відповідність електричних рівнів інтерфейсів. Спроектувати вузол керування навантаженням, що включає гальванічно розв'язані релейні модулі для комутації кліматичної техніки (симуляція осушувача/зволожувача) та ШІМ-інтерфейс для

прецизійного керування сервоприводами (симуляція автоматизованих штор або жалюзі).

Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення нижнього рівня: Реалізувати програмні драйвери для взаємодії з сенсорами по протоколу I2C, включаючи ініціалізацію, налаштування режимів вимірювання та зчитування сирих даних. Розробити алгоритми цифрової фільтрації для усунення випадкових шумів вимірювання. Імплементувати логіку локального автоматичного керування з використанням гістерезису для забезпечення стабільної роботи виконавчих механізмів при граничних значеннях параметрів. Реалізувати надійний мережевий стек MQTT-клієнта з функціями автоматичного перепідключення при втраті зв'язку та буферизації повідомлень.

Створення програмного комплексу верхнього рівня: Розгорнути та налаштувати MQTT-брокер для маршрутизації потоків даних. Спроекувати та реалізувати структуру бази даних для ефективного зберігання великих обсягів телеметричної інформації. Розробити інтерактивний веб-інтерфейс (дашборд) для візуалізації поточних показників у зручній для персоналу формі та надання інструментів для перегляду історії вимірювань за обраний період.

Системна інтеграція та тестування: Провести комплексне тестування розробленої системи. Перевірити коректність передачі даних від сенсора до веб-інтерфейсу, виміряти загальну латентність системи. Експериментально перевірити роботу алгоритмів автоматичного керування шляхом симуляції аварійних ситуацій, наприклад різке підвищення вологості або освітленості, та оцінити адекватність реакції виконавчих механізмів.

Виконання цих завдань дозволить отримати повнофункціональний прототип КФС, що демонструє сучасні підходи до збереження культурної спадщини та може бути масштабований для реального застосування в музейних установах.

## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР АПАРАТНО-ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

### 2.1 Архітектура та апаратні компоненти фізичного рівня системи

Вибір центрального обчислювального пристрою є важливим етапом проектування будь-якої кіберфізичної системи. Від архітектури процесорного ядра, обсягу пам'яті та периферії залежить не лише продуктивність системи, але й її енергоефективність, надійність та здатність працювати в режимі реального часу. Для реалізації завдання моніторингу та управління мікрокліматом музейних приміщень було проведено порівняльний аналіз трьох різних класів обчислювальних платформ: класичних 8-бітних мікроконтролерів, високопродуктивних одноплатних мікрокомп'ютерів та 32-бітних мікроконтролерів з нативною підтримкою мережевих протоколів.

Платформи на базі 8-бітних RISC-мікроконтролерів сімейства AVR є найпоширенішим інструментом для створення простих систем автоматизації. Процесорне ядро працює на тактовій частоті 16 МГц, виконуючи більшість інструкцій усього за один такт. Обсяг енергонезалежної пам'яті становить 32 КБ, тоді як оперативної пам'яті (SRAM) доступно лише 2 КБ. Головною перевагою такої архітектури є простота програмування, висока передбачуваність часу виконання коду, а також досить низьке енергоспоживання, яке в активному робочому режимі складає всього близько 15-20 мА. Проте незважаючи на високу надійність цих пристроїв для управління базовою автоматикою, вони мають певні обмеження для систем Інтернету речей. Найбільшим недоліком є повна відсутність вбудованих апаратних модулів для підключення до бездротових мереж, типу Wi-Fi або Bluetooth. Для реалізації стека TCP/IP, протоколу MQTT на базі ATmega328P необхідно використовувати зовнішні мережеві екрани або додаткові модулі, наприклад ESP01), які підключаються по повільній шині UART. Це ускладнює апаратну схему, знижує загальну відмовостійкість системи та перевантажує обмежений обсяг оперативної пам'яті, тому що 2 КБ

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

недостатньо для стабільного парсингу великих JSON-пакетів або утримання довгих SSL-сертифікатів безпеки. Тому використання 8-бітних систем для даного проєкту визнано недоцільним.

Іншим варіантом є одноплатні мікрокомп'ютери, наприклад Raspberry Pi 4 Model B. Вони базуються на потужних SoC (System-on-a-Chip) з архітектурою ARM Cortex-A. Серцем системи виступає 64-бітний чотирьохядерний процесор Broadcom BCM2711 із тактовою частотою 1,5 ГГц. Обсяг оперативної пам'яті стандарту LPDDR4 може становити від 2 до 8 ГБ. Важливою відмінністю пристроїв цього класу є їхня робота під управлінням повноцінних операційних систем на базі ядра Linux, наприклад, Raspberry Pi OS. Такий підхід дає змогу використовувати високорівневі мови програмування, такі як Python, Node.js або Java, вільно розгортати локальні бази даних SQL та навіть запускати брокери MQTT безпосередньо на самому пристрої, без будь-якої необхідності залучати віддалені хмарні сервери. Але попри колосальну обчислювальну потужність, використання Raspberry Pi для низькорівневого моніторингу датчиків та комутації реле це занадто. Наявність операційної системи загального призначення нівелює поняття “жорсткого реального часу”: планувальник завдань Linux може в будь-який момент перервати виконання скрипта опитування датчиків для системних потреб, що призводить до непередбачуваних мілісекундних затримок генерації ШІМ-сигналів. Крім того, мікрокомп'ютери мають високе енергоспоживання, від 600 мА до 3 А. А під навантаженням, потребують активного охолодження та вкрай чутливі до раптового зникнення живлення. У разі аварійного відключення електроенергії в музеї існує високий ризик пошкодження файлової системи на SD-карті, що призведе до повної непрацездатності пристрою після відновлення живлення.

Проміжним та найбільш сучасним рішенням є використання 32-бітних мікроконтролерів, спеціально спроектованих для побудови периферійних вузлів Інтернету речей. Яскравим представником цієї архітектури є чип ESP32 від компанії Espressif Systems.

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Архітектура ESP32 базується на двоядерному 32-бітному процесорі Tensilica Xtensa LX6 із тактовою частотою 240 МГц. Його продуктивність становить близько 600 DMIPS, що є достатнім для складної математичної обробки сигналів. Наявність 520 КБ вбудованої оперативної пам'яті SRAM дозволяє системі маніпулювати мережевими буферами та такими форматами даних, як JSON або XML. Найбільшою апаратною перевагою цієї платформи є розміщення радіочастотних трансиверів Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth на одному кристалі разом із процесором, що усуває проблему апаратного "вузького місця" під час передачі інформації.

На відміну від таких рішень, як Raspberry Pi, ESP32 не обтяжений масивною операційною системою: програмний код виконується безпосередньо на "голому залізі" або під управлінням легкої операційної системи реального часу. Використання середовища FreeRTOS дає змогу гнучко розподіляти задачі, наприклад, прив'язавши опитування датчика DHT22 до одного ядра процесора, а обслуговування Wi-Fi з'єднання до іншого, що повністю унеможливорює їхній конфлікт. Крім того, завантаження мікроконтролера відбувається менш ніж за одну секунду, а сама система не боїться раптових знеструмлень, оскільки програма зберігається у Flash-пам'яті та починає виконуватися після відновлення робочої напруги. Ґрунтуючись на вимогах до кіберфізичної системи музейного мікроклімату - безперервність роботи, прямий вихід у глобальну мережу, швидка реакція на аварійні показники та висока стійкість до збоїв живлення це є оптимальним вибором. Платформа ESP32 забезпечує ідеальний баланс між низькорівневим детермінованим керуванням апаратурою та високими комунікаційними можливостями, залишаючись при цьому економічно вигідним та енергоефективним рішенням.

Фізичний рівень розробленої кіберфізичної системи відіграє основну роль, оскільки саме він відповідає за безпосередню взаємодію з об'єктом управління - мікрокліматом музейного приміщення. Архітектура апаратного забезпечення побудована за модульним принципом, що включає центральний

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обчислювальний вузол, блок сенсорів для збору телеметричних даних про середовище, блок виконавчих механізмів для здійснення коригувального фізичного впливу та локальний інтерфейс користувача. Такий підхід забезпечує високу відмовостійкість системи, простоту її масштабування та зручність технічного обслуговування. Під час вибору компонентної бази враховувалися специфічні вимоги музейної консервації: висока точність вимірювань, надійність роботи в режимі 24/7, енергоефективність та можливість безперервної передачі даних до локальних або хмарних серверів диспетчеризації.

Ядром обчислювальної підсистеми, як вже було сказано, є ESP32 у модифікації DevKit V1 від компанії Espressif Systems. Вибір цієї платформи, як альтернативи класичним 8-бітним рішенням сімейства Arduino і є основою для побудови саме кіберфізичних систем та рішень у сфері Інтернету речей. Основою ESP32 є потужний 32-бітний двоядерний процесор архітектури Tensilica Xtensa LX6, що працює на тактовій частоті від 160 до 240 МГц. Наявність двох незалежних ядер PRO\_CPU та APP\_CPU дозволяє розділяти обчислювальні потоки: одне ядро може бути виділене для підтримання стабільного мережевого з'єднання та криптографічної обробки даних, тоді як інше в реальному часі виконує алгоритми опитування датчиків та керування виконавчими пристроями. Обсяг оперативної пам'яті SRAM становить 520 КБ, а постійної флеш-пам'яті - 4 МБ, що забезпечує достатній простір для зберігання мікропрограми, буферів даних та вбудованих бібліотек.

Головною перевагою ESP32 для розроблюваної системи є інтегрований радіочастотний модуль, який забезпечує апаратну підтримку стандартів Wi-Fi 802.11 b/g/n та Bluetooth v4.2 BR/EDR. Це усуває необхідність використання додаткових зовнішніх мережевих екранів і дозволяє системі взаємодіяти з MQTT-брокером для передачі телеметрії в хмару. Робоча напруга логічних рівнів мікроконтролера становить 3.3 В, що враховувалося під час проектування електричної принципової схеми та узгодження рівнів із периферійними пристроями. Мікроконтролер оснащений багатим набором периферійних

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



з цих елементів надходять на вбудований у корпус датчика 8-бітний мікроконтролер, який виконує аналогово-цифрове перетворення, калібрування даних, на основі заводських коефіцієнтів, зашитих в OTP-пам'ять, та їх упаковку в цифровий пакет. Передача даних до мікроконтролера ESP32 здійснюється за специфічним однопровідним цифровим протоколом. Пакет даних складається з 40 біт інформації: 16 біт відводиться на значення вологості, де 16 біт - на значення температури, а останні 8 біт є контрольною сумою для верифікації цілісності переданих даних, що унеможливорює вплив електромагнітних завад на результати вимірювань.

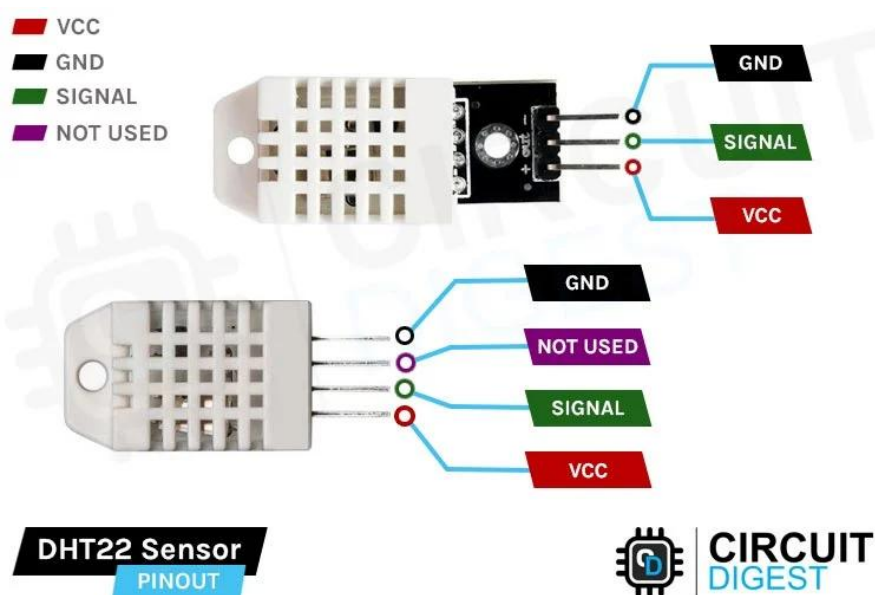


Рисунок 2.2 – Схема підключення сенсору DHT22[23]

Також контроль рівня освітлення є важливим елементом для збереження цілісності експонатів. Прямі сонячні промені або надмірно яскраве штучне освітлення здатні руйнувати молекулярні зв'язки в органічних пігментах, спричиняючи незворотне вицвітання живопису. Для моніторингу світлового потоку в розробленій системі інтегровано аналоговий сенсор на базі фоторезистора LDR.

Фоторезистор - це напівпровідниковий прилад, електричний опір якого змінюється обернено пропорційно інтенсивності падаючого на нього світлового

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

поток. Фізичний принцип дії базується на явищі внутрішнього фотоефекту: під дією фотонів у напівпровідниковому матеріалі, найчастіше використовується сульфід кадмію, генеруються вільні носії заряду, що призводить до різкого зниження опору матеріалу при освітленні. Для узгодження зміни опору фоторезистора з АЦП мікроконтролера застосовується схема дільника напруги. Фоторезистор з'єднується послідовно з фіксованим опорним резистором. Вбудований в ESP32 12-бітний АЦП перетворює цю напругу в цифрове значення від 0 до 4095. За допомогою мікропрограми це значення нормується та масштабується у відсоткову шкалу 0-100%, що дозволяє системі приймати рішення щодо закриття віконних жалюзі при перевищенні встановленого порогу.

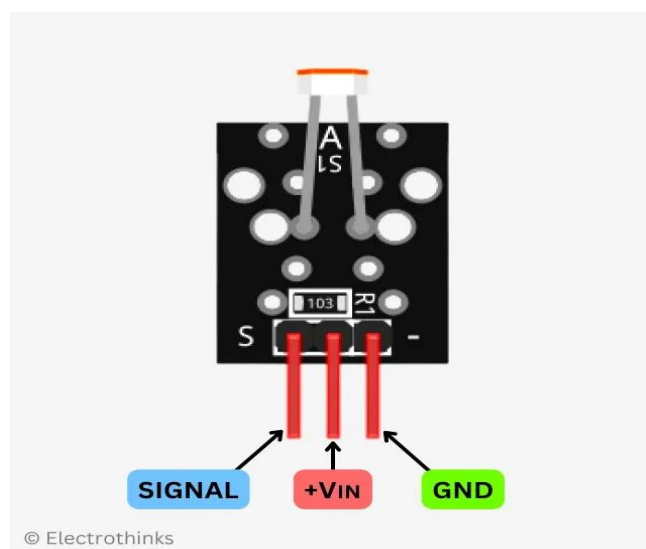


Рисунок 2.3 – Схема підключення аналогового фоторезистора [24]

Незважаючи на наявність хмарного дашборда для віддаленого моніторингу, технічне завдання на розробку кіберфізичної системи передбачає наявність локального засобу візуалізації безпосередньо в музейному залі. Це необхідно для контролю ситуації персоналом музею у разі відсутності підключення до мережі Інтернет. З цією метою в систему інтегровано символічний рідкокристалічний дисплей формату 2004, 20 символів у 4 рядки.

Сам по собі дисплей на базі контролера HD44780 вимагає для керування значної кількості цифрових виводів, від 6 до 10 пінів, що є пустим витрачанням

ресурсів ESP32. Тому дисплей використовується в парі з модулем-перехідником на базі мікросхеми розширювача портів PCF8574. Цей модуль дозволяє перетворити паралельний інтерфейс дисплея на послідовну шину I2C. Використання шини I2C зводить кількість необхідних ліній зв'язку лише до двох: лінії даних SDA та лінії тактування SCL, не враховуючи контактів живлення та землі. Кожен пристрій на шині I2C має власну унікальну шістнадцяткову адресу, для цього модуля дисплея зазвичай це 0x27 або 0x3F, що дозволяє мікроконтролеру адресно надсилати дані на екран. Екран відображає поточні показники температури, відносної вологості, рівня освітленості, а також логічний стан обох виконавчих реле, увімкнено/вимкнено, та статус підключення до брокера MQTT.

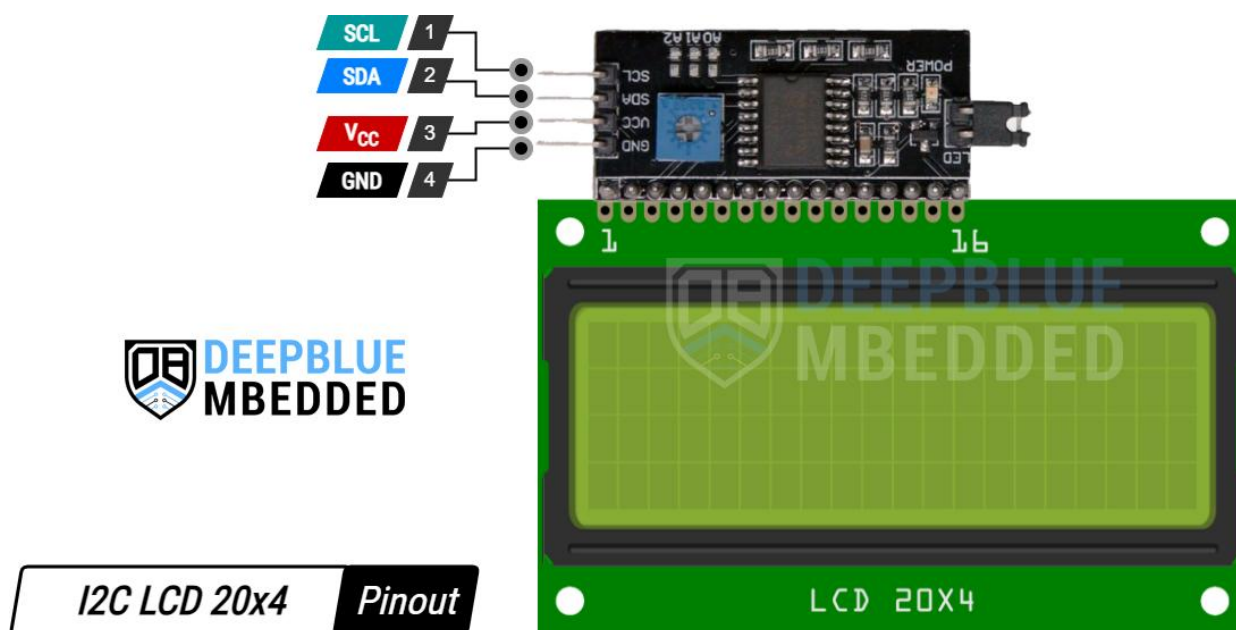


Рисунок 2.4 – Приклад схеми підключення дисплею LCD 2004 [25]

Кіберфізична система відрізняється від звичайної системи моніторингу здатністю здійснювати зворотний вплив на фізичний світ. Для керування кліматичним обладнанням великої потужності, наприклад, осушувачі повітря, зволожувачі, теплові завіси, що живиться від побутової електромережі 220 В, мікроконтролер не може бути використаний безпосередньо через обмеження

своїх струмових характеристик, бо максимальний струм виводу ESP32 становить 40 мА.

Для вирішення цієї проблеми застосовано модулі електромагнітних реле. Реле забезпечує гальванічну розв'язку між низьковольтною керівною частиною та високовольтною силовою частиною. У проєкті задіяно два незалежні канали реле:

1. Канал 1осушувач/Вентиляція: Керується логічним сигналом з мікроконтролера при перевищенні порогу відносної вологості.

2. Канал 2Обігрівач: Активується при фіксації небезпечного падіння температури повітря у приміщенні.

Модуль реле містить вбудований транзисторний ключ та діод, який захищає мікроконтролер від струмів самоіндукції, що виникають у котушці електромагніту реле під час його вимкнення. Для захисту від інсоляції в системі реалізовано автоматичне керування віконними жалюзі за допомогою сервоприводу. Сервопривід - це мотор із вбудованим контролером та потенціометром зворотного зв'язку, що дозволяє точно встановлювати кут повороту вала, від 0 до 180 градусів. Керування сервоприводом здійснюється за допомогою методу широтно-імпульсної модуляції. Мікроконтролер генерує імпульси частотою 50 Гц з періодом 20 мс. Кут повороту вала залежить виключно від тривалості високого рівня імпульсу: імпульс тривалістю 1 мс встановлює вал у крайнє початкове положення, 0 градусів, жалюзі відкриті, імпульс 1.5 мс - у середнє положення, 90 градусів, жалюзі закриті, а 2 мс - у крайнє кінцеве положення 180 градусів. Вбудовані апаратні ШІМ-контролери ESP32 забезпечують високу плавність та точність позиціонування захисних екранів.

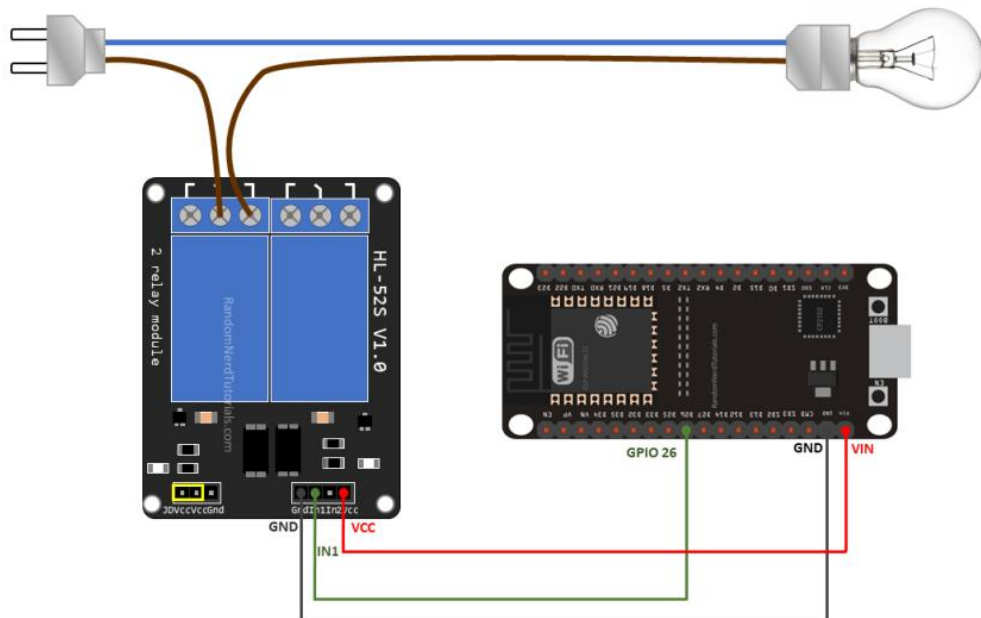


Рисунок 2.5 – Приклад підключення модуля реле[26]

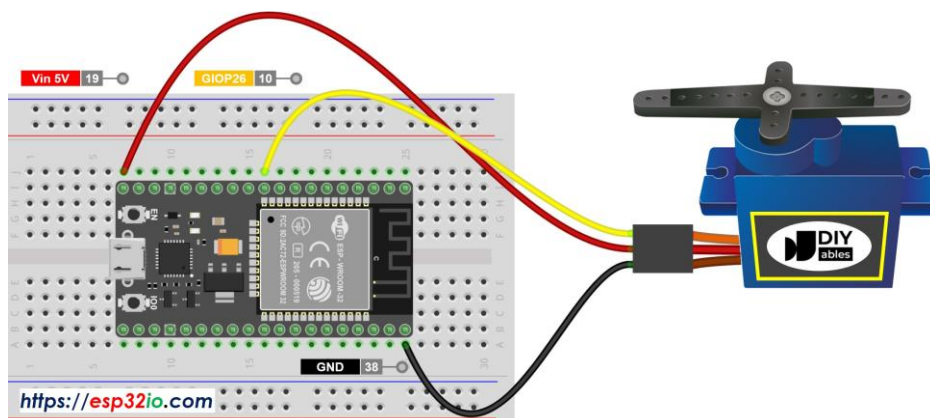


Рисунок 2.6 – Приклад підключення сервоприводу[27]

## 2.2 Аналіз та обґрунтування вибору програмних засобів, середовища моделювання та мережних протоколів

Побудова сучасної кіберфізичної системи не обмежується лише підбором апаратної елементної бази. Значення для стабільності, швидкодії та надійності системи має вибір базового програмного забезпечення, засобів віртуального прототипування, алгоритмічних мов та комунікаційних протоколів. У цьому підрозділі проведено порівняльний аналіз існуючих рішень та обґрунтовано

вибір інструментів, який буде використано для практичної реалізації системи моніторингу мікроклімату музею.

Відповідно до сучасних стандартів системної інженерії, розробка вбудованих пристроїв та систем Інтернету речей (IoT) вимагає етапу створення “цифрового двійника”. Це дозволяє проробити логіку роботи системи, оптимізувати програмний код та перевірити безпеку керування виконавчими механізмами ще до етапу пайки компонентів.

Для вибору оптимального середовища моделювання було проаналізовано три найбільш поширені платформи:

1. Proteus Design Suite (Labcenter Electronics). Це потужна професійна система автоматизованого проектування. Її перевагою є можливість моделювання електричних процесів на рівні окремих радіодеталей та підтримка глибокого відлагодження коду. Однак для розробки IoT-проектів Proteus має певні недоліки. Він вимагає значних обчислювальних ресурсів комп'ютера, має високу вартість ліцензії, а головне - симуляція Wi-Fi для мікроконтролерів сімейства ESP32 в ньому реалізована вкрай складно і потребує встановлення додаткових віртуальних мережевих адаптерів, наприклад, WinPcap, що робить процес тестування хмарної взаємодії нестабільним.

2. Tinkercad Circuits (Autodesk). Хмарна платформа, яка є популярною завдяки інтуїтивно зрозумілому графічному інтерфейсу та простоті використання. Проте її функціонал обмежений базовими 8-бітними мікроконтролерами Arduino Uno. Платформа взагалі не підтримує симуляцію мікроконтролера ESP32 та не має жодних вбудованих інструментів для виходу віртуального пристрою в Інтернет, що робить її абсолютно непридатною для розробки кіберфізичної системи з віддаленою диспетчеризацією.

3. Wokwi Simulator. Спеціалізоване хмарне середовище з відкритим вихідним кодом двигуна симуляції, розроблене спеціально для сучасних IoT-платформ, ESP32, STM32, Raspberry Pi Pico.

Для реалізації даного дипломного проєкту було обрано середовище Wokwi. Цей вибір обґрунтований низкою переваг для розроблюваної кіберфізичної системи. Wokwi виконує потактову симуляцію архітектури процесора Tensilica Xtensa, що дозволяє виконувати скомпільований бінарний код саме так, як він би працював на реальному залізі. Також платформа має вбудований віртуальний шлюз Wokwi-GUEST, який автоматично прокидає Wi-Fi з'єднання віртуального ESP32 до реального Інтернету. Це функція, яка дозволяє віртуальним датчикам надсилати телеметрію на реальні хмарні MQTT-брокери. Також середовище є хмарним, що гарантує збереження проєкту, можливість контролю версій та відсутність вимог до апаратної потужності робочого місця розробника.

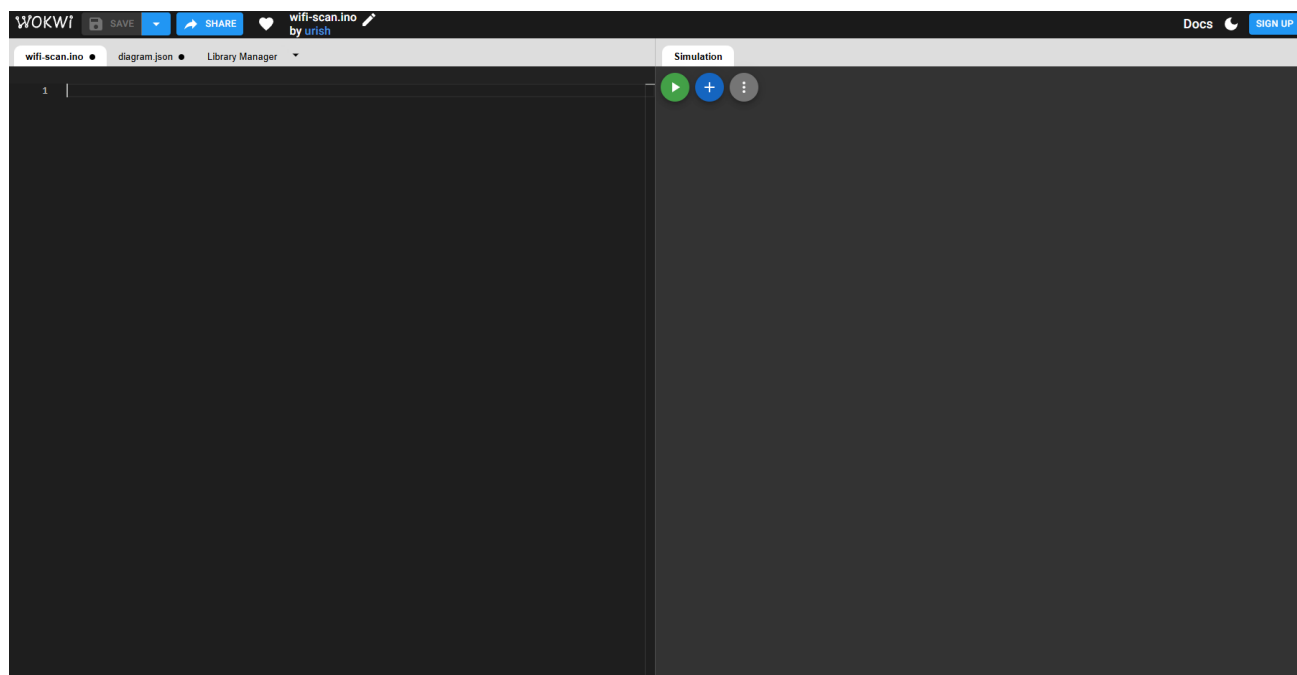


Рисунок 2.7 – Графічний інтерфейс користувача Wokwi [28]

Мікроконтролери ESP32 підтримують розробку програмного забезпечення кількома мовами програмування, серед яких найпопулярнішими є C, C++, MicroPython та Rust. Оскільки система повинна працювати в режимі реального часу без затримок у реакції на зміну мікроклімату, використання інтерпретованих мов, таких як MicroPython, було відхилено. Попри швидкість

написання коду на Python, інтерпретатор споживає великий обсяг оперативної пам'яті мікроконтролера та створює додаткові мілісекундні затримки при виконанні інструкцій. Для розробки мікропрограми було обрано мову C++. Вона дозволяє здійснювати низькорівневий доступ до регістрів пам'яті процесора, забезпечуючи максимальну швидкість, і водночас підтримує об'єктно-орієнтованого програмування (ООП). ООП є важливим для даного проекту, оскільки воно дозволяє інкапсулювати логіку роботи з кожним датчиком температури, світла та мережевим з'єднанням у вигляді окремих програмних об'єктів.

Що стосується набору базових бібліотек, розглядалися офіційний ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) та Arduino Core for ESP32. Хоча ESP-IDF є професійним галузевим стандартом, він має дуже високий поріг входження та надмірно складну архітектуру конфігурації для систем з відносно простою лінійною логікою керування кліматом. Тому вибором є фреймворк Arduino Core.

Його застосування у дипломному проекті дає змогу використовувати стандартизовані функції життєвого циклу програми `setup()` та `loop()`, залучити величезну екосистему перевірених роками відкритих бібліотек, наприклад, `DHT sensor library` для розшифровки однопровідного протоколу датчика температури, `LiquidCrystal_I2C` для керування дисплеєм та `ESP32Servo` для генерації апаратного ШІМ-сигналу потрібної частоти. Також значно скорочується час етапу кодування, оскільки можна зусередитись безпосередньо на логіці кіберфізичної взаємодії, а не на написанні низькорівневих драйверів.

Під час проектування автономних вузлів Інтернету речей особливу увагу слід приділяти питанням енергоспоживання. В активному стані, коли двоядерний процесор мікроконтролера ESP32 та його радіочастотний Wi-Fi трансивер працюють на повну потужність, споживання струму може сягати 240 міліампер. Для пристроїв, що мають постійне підключення до електромережі, такі показники є цілком прийнятними. Проте в умовах реального музейного простору часто виникають ситуації, коли підведення кабелів живлення до кожної

окремої вітрини чи експоната є неможливим через архітектурні обмеження історичної будівлі. У таких випадках обрана апаратна платформа повинна підтримувати гнучкі механізми заощадження енергії для тривалої роботи від портативних джерел.

Вирішенням цієї проблеми є використання вбудованого апаратного режиму глибокого сну, відомого як Deep Sleep. При переході в цей стан мікроконтролер повністю знеструмлює головне обчислювальне ядро, швидко оперативну пам'ять та всі бездротові інтерфейси. Активним залишається лише годинник реального часу та мінімальний набір системних регістрів. Завдяки такому радикальному відключенню периферії, загальне споживання електроенергії падає до надзвичайно низьких значень у 10–15 мікроампер. Годинник реального часу продовжує відраховувати заданий інтервал і в потрібний момент генерує апаратний сигнал, який виводить систему зі сну для виконання наступного блоку інструкцій.

Реалізована в даному проєкті неблокувальна програмна архітектура створює ідеальне підґрунтя для масштабування системи в бік повної автономності. Замість постійного підтримання мережевого з'єднання, логіка роботи сенсорного вузла може бути легко адаптована під періодичний алгоритм. За такого сценарію мікроконтролер прокидається раз на кілька хвилин, швидко ініціює з'єднання з маршрутизатором та брокером HiveMQ, зчитує показання з цифрового датчика та фоторезистора, відправляє сформований пакет телеметрії і миттєво повертається у стан глибокого сну. Подібний оптимізований підхід дозволить жити весь вимірювальний комплекс від одного стандартного літій-іонного акумулятора формату 18650 протягом багатьох місяців, роблячи розроблений пристрій максимально універсальним для розгортання у будь-яких виставкових залах.

Для того, щоб перетворити локальну систему автоматизації на повноцінний вузол Інтернету речей (IoT), необхідно забезпечити надійний канал передачі даних між фізичним пристроєм та віддаленим диспетчером. Класичний

підхід, який базується на використанні архітектури клієнт-сервер через протокол HTTP або архітектуру REST API, має ряд недоліків для вбудованих систем.

По-перше, HTTP є “важким” протоколом: кожен запит містить великі текстові заголовки, обсяг яких часто перевищує обсяг самих корисних даних, наприклад, показника температури у 2 байти. Це призводить до невикористання інтернет-трафіку та енергії мікроконтролера. По-друге, HTTP працює за синхронною моделлю “запит-відповідь”. Мікроконтролеру довелося б тримати відкритим веб-сервер і чекати, поки диспетчер надішле запит на оновлення даних, що створює вразливості в системі безпеки та вимагає наявності статичної IP-адреси в музеї.

Для подолання цих проблем у розроблюваній кіберфізичній системі буде застосовано протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Це спеціалізований, максимально полегшений протокол обміну повідомленнями, який працює поверх стека протоколів TCP/IP. Вибір протоколу MQTT для мережевої маршрутизації ґрунтується на низці його вагомих архітектурних переваг. Насамперед, завдяки спеціальній топології, кінцеві пристрої не спілкуються безпосередньо один з одним, оскільки весь обмін даними координується через центральний сервер - MQTT-брокер. У такій системі мікроконтролер виступає в ролі видавця: він ініціює вихідне з'єднання, яке легко долає будь-які мережеві екрани та системи трансляції адрес, після чого просто відправляє зібрані дані у відповідний інформаційний канал. Диспетчерський веб-інтерфейс підключається до цього ж брокера та автоматично отримує всю необхідну інформацію.

Перевагою є також легка структура протоколу: фіксований заголовок пакета MQTT становить усього 2 байти, що в десятки разів менше порівняно зі стандартними HTTP-запитами. Це дозволяє підтримувати високу частоту відправки телеметрії без ризику перевантаження мережевого модуля платформи ESP32. Додаткову ефективність забезпечує асинхронна природа обміну повідомленнями, завдяки якій процесор мікроконтролера ніколи не блокується в

очікуванні відповіді від клієнта, вільно продовжуючи виконання основного коду програми.

Також одне з найважливіших завдань під час проектування кіберфізичної системи полягає у забезпеченні безперервної та гарантованої доставки інформації між мікроконтролером та сервером. Протокол MQTT вирішує цю проблему за допомогою вбудованого механізму якості обслуговування, відомого як Quality of Service або скорочено QoS. Цей інструмент визначає рівень домовленості між відправником та одержувачем щодо гарантії доставки кожного окремого повідомлення. Залежно від типу інформації, розробник може гнучко налаштовувати ці параметри, ефективно балансує між стовідсотковою надійністю та мінімальним навантаженням на бездротову мережу.

Найпростіший рівень якості обслуговування позначається як QoS 0 і працює за принципом відправлення без підтвердження. У цьому режимі мікроконтролер формує пакет даних і надсилає його брокеру, не очікуючи жодної відповіді. Якщо через тимчасові перешкоди у Wi-Fi мережі або перевантаження маршрутизатора пакет загубиться, він не буде надісланий повторно. Для багатьох інженерних рішень такий підхід здається ризикованим, проте в рамках моніторингу музейного мікроклімату він є цілком виправданим для регулярної передачі телеметрії. Оскільки показники температури, вологості та освітленості оновлюються кожні дві секунди, а сам клімат у великому приміщенні змінюється дуже повільно, втрата одного чи навіть кількох пакетів поспіль ніяк не вплине на загальну точність графіків на дашборді оператора. Використання цього базового рівня для сенсорів дозволяє суттєво зекономити оперативну пам'ять мікроконтролера ESP32 та зменшити загальний обсяг мережевого трафіку.

Зовсім інший підхід необхідний для передачі керівних сигналів до виконавчих механізмів, таких як релейні модулі обігрівача чи сервопривід віконних жалюзі. Для таких відповідальних завдань застосовується вищий рівень QoS 1, який гарантує доставку повідомлення щонайменше один раз. У цьому

випадку, після відправки команди з веб-інтерфейсу, система обов'язково чекає на зворотне цифрове підтвердження від брокера та мікроконтролера. Якщо таке підтвердження не надходить за заздалегідь визначений таймаут, повідомлення автоматично відправляється повторно.

Протокол також підтримує максимальний рівень надійності QoS 2, який гарантує доставку інформації рівно один раз завдяки складному чотирикроковому обміну цифровими квитанціями. Однак цей режим створює найбільше навантаження на радіоканал і вимагає постійного збереження транзакцій у пам'яті пристроїв. Для розробленої системи оптимальним і найбільш раціональним вибором стало архітектурне комбінування. Безперервний потік телеметричних даних від сенсорів транслюється з легковаговим рівнем QoS 0, тоді як усі ініційовані людиною команди з веб-дашборда на зміну стану апаратних модулів обов'язково маркуються рівнем QoS 1. Такий логічний розподіл забезпечує миттєве та гарантоване виконання наказів диспетчера і водночас зберігає високу продуктивність усього програмно-апаратного комплексу.

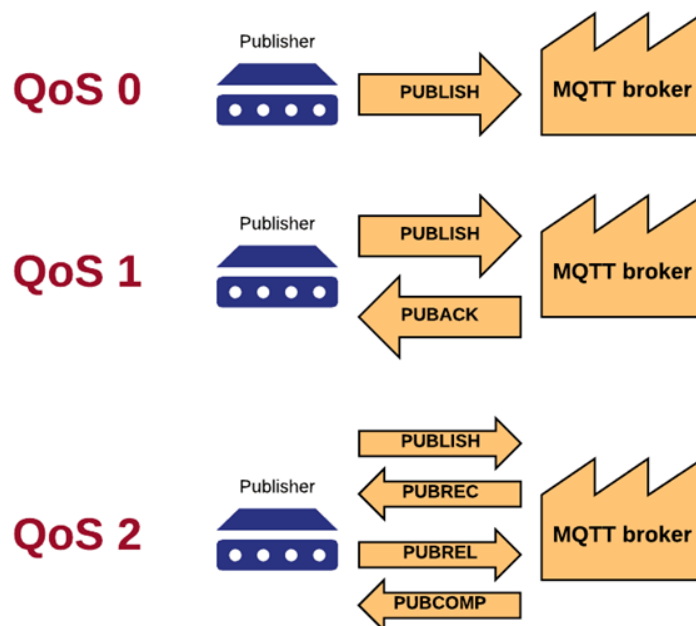


Рисунок 2.8 – Рівні якості обслуговування в MQTT [41]

У якості центрального вузла маршрутизації для прототипування системи було вирішено використати публічний безкоштовний сервер broker.hivemq.com. Цей брокер підтримує передачу даних не лише через стандартний TCP-порт 1883, а й через WebSockets порт 8000, що є необхідним для можливості отримання даних безпосередньо у веб-браузері без використання додаткових серверів. Розглядаючи альтернативні програмні рішення для побудови надійної мережевої інфраструктури, варто звернути увагу на такі потужні брокери, як EMQX та RabbitMQ. Рішення EMQX відрізняється високою здатністю до горизонтального масштабування та створене спеціально для високонавантажених середовищ Інтернету речей, що дозволяє одночасно обслуговувати велику кількість підключених пристроїв із мінімальними затримками. Своєю чергою, RabbitMQ, будучи універсальним маршрутизатором повідомлень, завдяки вбудованим модулям чудово підтримує стандарти MQTT і легко інтегрується у вже існуючі складні IT-системи.

Проте варто зазначити, що використання публічного відкритого сервера є виправданим виключно на етапі прототипування, зневадження коду та тестування базового функціоналу. Оскільки такий ресурс є доступним для всіх користувачів мережі, він не здатен забезпечити конфіденційність телеметрії та захист від несанкціонованого втручання. Будь-яка стороння особа, дізнавшись маску інформаційного топіка, отримає змогу не лише перехопити графіки мікроклімату, але й надіслати хибні команди на виконавчі механізми, порушивши роботу всієї системи.

Саме тому під час розгортання реальної виробничої кіберфізичної системи архітектура обов'язково передбачає перехід на приватний MQTT-брокер. Це може бути локально розгорнутий сервер на базі легковагового програмного забезпечення Eclipse Mosquitto, встановлений на одноплатному комп'ютері безпосередньо в будівлі, або ж надійні хмарні рішення промислового рівня. Такий перехід відкриває доступ до необхідних механізмів управління та безпеки.

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Насамперед впроваджується автентифікація та авторизація, завдяки яким кожен вузол мережі, від мікроконтролера до веб-дашборда, використовує унікальні облікові дані для підключення.

Додатково налаштовуються списки контролю доступу, які дозволяють жорстко розмежувати права пристроїв. Наприклад, вимірювальний модуль матиме дозвіл лише на публікацію зібраних показників, тоді як диспетчерський інтерфейс отримає повний доступ до керування топіками. Вагомим етапом стає шифрування трафіку: замість відкритого порту зв'язку використовується захищений, який інкапсулює пакети у криптографічний протокол TLS/SSL, повністю унеможливаючи перехоплення інформації. Особливої уваги заслуговує інструмент контролю статусу, відомий як функція «останньої волі». Якщо мікроконтролер несподівано втрачає зв'язок через знеструмлення і перестає надсилати службові запити, сервер самостійно формує аварійне повідомлення. Це дає змогу веб-додатку миттєво змінити статус системи на офлайн і своєчасно попередити оператора про втрату контролю над об'єктом.

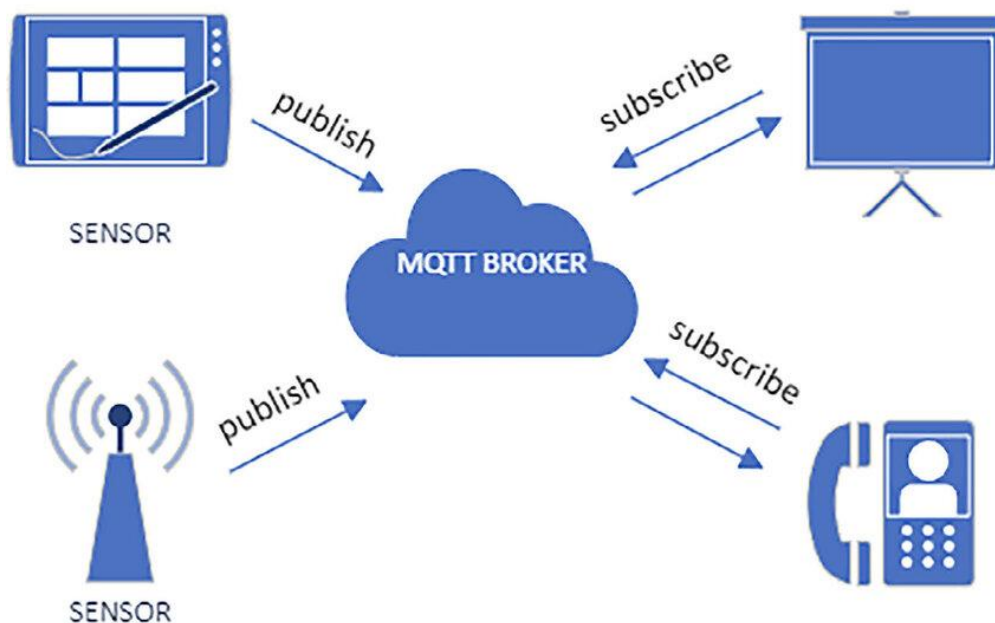


Рисунок 2.9 – Схема архітектури роботи протоколу MQTT [30]

Кінцевим рівнем кіберфізичної системи є інтерфейс взаємодії з людиною-оператором. Оскільки сучасні диспетчерські пункти можуть бути мобільними, розробка специфічного десктопного програмного забезпечення, наприклад, на базі C# WPF або Qt, є економічно та технологічно не вигідною. Найбільш гнучким рішенням є створення кросплатформного веб-дашборда, який може бути відкритий у будь-якому сучасному браузері на будь-якій операційній системі: Windows, macOS, Android.

Для розробки веб-інтерфейсу буде використано стек веб-технологій: HTML5, CSS3 та JavaScript. Відмова від використання важких фреймворків, таких як React або Angular, пояснюється необхідністю створення максимально легкого файлу моніторингу, який не потребує компіляції та розгортання на сервері.

Візуалізація телеметричних даних, тобто графіки зміни температури, вологості та освітлення у часі, є необхідним для аналізу мікроклімату в дипломній роботі. Для цієї мети обрано JavaScript-бібліотеку Chart.js. На відміну від SVG-базованих бібліотек, наприклад, D3.js, які при великій кількості точок перевантажують об'єктну модель документа, Chart.js використовує для малювання технологію HTML5 Canvas. Це забезпечує високу продуктивність рендерингу в 60 кадрів на секунду та плавні анімації навіть при безперервному надходженні нових MQTT-пакетів кожні кілька секунд. Для забезпечення сучасного дизайну панелі керування без написання тисяч рядків кастомного CSS-коду, передбачається використання utility-first фреймворку Tailwind CSS. Він дозволить інтегрувати готові стилістичні класи, такі як тіні, заокруглення, адаптивна сітка, безпосередньо в HTML-розмітку, забезпечуючи коректне відображення дашборда як на великих моніторах у кімнаті охорони музею, так і на мобільних пристроях керівництва. Зв'язок веб-сторінки з MQTT-брокером забезпечуватиметься через JavaScript-клієнт Paho MQTT, який є визнаним індустріальним стандартом для роботи з веб-сокетами.

### 2.3 Висновки до другого розділу

У другому розділі дипломної роботи було проведено аналіз, техніко-економічне та архітектурне обґрунтування вибору апаратно-програмної бази для створення прототипу кіберфізичної системи моніторингу та корекції мікроклімату музейних приміщень.

Як обчислювальне ядро обрано 32-бітний мікроконтролер ESP32 DevKit V1, який завдяки вбудованому Wi-Fi-модулю та двоядерній архітектурі ідеально відповідає концепції IoT. Для збору первинних даних обрано цифровий сенсор температури та вологості DHT22 та аналоговий фоторезистор. Виконавчий рівень для реалізації фізичного впливу на клімат буде побудовано на базі твердотільних/електромагнітних реле та сервоприводу. Локальний контроль забезпечуватиметься дисплеєм LCD 2004 через шину I2C.

З огляду на специфіку IoT-завдань, як інструмент віртуального виконання обрано хмарний симулятор Wokwi. Він забезпечує апаратну симуляцію ядра Xtensa та надає можливість трансляції мережевого трафіку з віртуального пристрою у реальну мережу Інтернет, що є необхідним для тестування систем диспетчеризації без наявності фізичного обладнання. Розробка мікропрограми мовою C++ з використанням екосистеми Arduino Core for ESP32 дозволяє ефективно реалізувати алгоритми керування. Вирішено, що для передачі телеметрії найоптимальнішим є протокол MQTT через публічний брокер HiveMQ. Для забезпечення людино-машинного інтерфейсу вирішено створити кросплатформний веб-дашборд з використанням технологій HTML/JS, візуальної бібліотеки Chart.js та CSS-фреймворку Tailwind, що забезпечить віддалений моніторинг об'єкта в режимі реального часу.

Обраний стек технологій є сучасним, збалансованим та економічно виправданим. Він утворює надійний теоретичний та інструментальний фундамент для переходу до наступного етапу - розробки апаратної схеми та написання програмного коду кіберфізичної системи.

### 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

#### 3.1 Опис реалізації модулів апаратного та програмного забезпечення програмно-технічного засобу

Практичне збирання та перше налаштування системи відбувається у хмарному середовищі Wokwi. Тут варто усвідомлювати, що кожна деталь, яку користувач бачить на екрані, насправді є глибокою математичною моделлю. Такі моделі дуже точно повторюють поведінку справжніх фізичних електронних компонентів, відображаючи їхні електричні властивості, затримки в часі та загальні принципи роботи в електричному колі. Далі буде послідовно розглянуто кожен використаний модуль та описано його роль у розробленому прототипі.

Основою симуляції виступає віртуальна модель плати мікроконтролера ESP32 версії DevKit V1. Середовище Wokwi не просто перевіряє написаний текст програми, а крок за кроком імітує роботу його справжнього процесора. Програма відтворює роботу внутрішньої оперативної пам'яті, регістрів та сигналів переривань рівно так само, як це відбувається у фізичному пристрої на столі інженера. Для проєкту було задіяно звичайні цифрові контакти мікроконтролера, вбудований модуль генерації ШІМ-сигналів та перетворювач аналогових сигналів у цифрові значення. Також ця віртуальна модель підтримує повноцінну роботу з глобальною мережею. Симулятор імітує бездротове підключення по Wi-Fi і дозволяє мікроконтролеру відправляти свої пакети даних через проміжний сервер прямо на справжній віддалений MQTT-брокер в інтернеті.

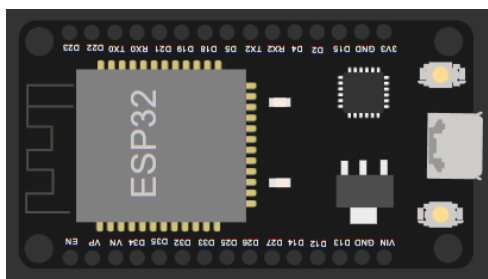


Рисунок 3.1 – Вигляд ESP32 (DevKitV1) у середовищі Wokwi [28]

Датчик вимірювання температури та відносної вологості повітря DHT22 (AM2302) виступає джерелом телеметричної інформації, на основі якої система клімат-контролю приймає рішення щодо своїх подальших дій. Справжній фізичний пристрій DHT22 містить у собі ємнісний елемент для визначення вологості та термістор для зчитування температури. Водночас його віртуальна копія у симуляторі відтворює цю роботу шляхом формування відповідного 40-бітного цифрового пакета даних. Ця інформація передається по однопровідному протоколу 1-Wire щоразу, коли мікроконтролер надсилає до датчика свій запит.

Щоб зробити процес перевірки алгоритмів терморегуляції зручнішим, віртуальний сенсор у середовищі Wokwi оснащений спеціальним інтерактивним інтерфейсом з повзунками. Такий інструмент дає змогу розробнику вручну регулювати показники навколишнього середовища прямо під час виконання програми. У файлі налаштувань `diagram.json` заздалегідь прописано початкові показники температури на рівні 61.7 градусів та вологості на рівні 71.5 відсотків. Такі стартові параметри змушують систему миттєво відпрацьовувати сценарій небезпечної ситуації відразу ж після подачі живлення на плату.

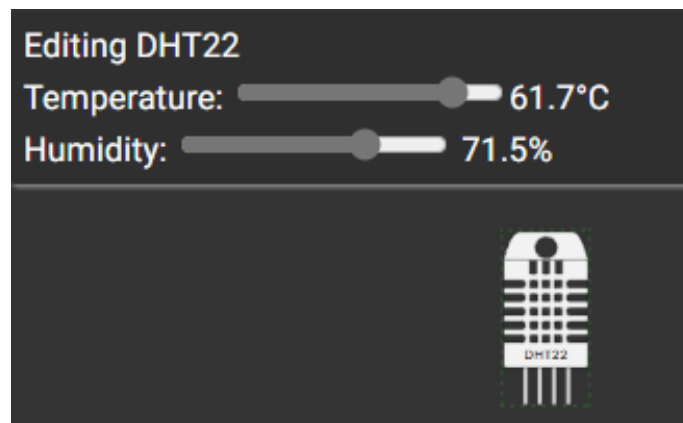


Рисунок 3.2 – Вигляд сенсору DHT22 у середовищі Wokwi та його налаштування [28]

Щоб постійно контролювати рівень освітлення у виставковому залі, у цьому проекті застосовується модель аналогового фоторезистора LDR. Якщо інженер збирає таку схему зі справжніх фізичних деталей, цей світлочутливий

елемент обов'язково потребуватиме підключення додаткового зовнішнього дільника напруги. Це робиться для того, щоб фізична зміна опору датчика під дією променів світла перетворювалася на зрозумілу зміну електричної напруги, яку зможе зафіксувати плата.

Проте віртуальна деталь у середовищі Wokwi є значно зручнішою для етапу розробки, оскільки вона вже містить цей дільник напруги у своїй внутрішній структурі. Під час перевірки роботи програми можна просто взаємодіяти зі спеціальним графічним повзунком, який імітує різну інтенсивність сонячного світла у люксах. У цей самий момент приховані алгоритми симулятора автоматично вираховують правильну еквівалентну напругу та подають її на аналоговий вивід датчика.

Далі мікроконтролер зчитує цей сигнал за допомогою свого 12-бітного перетворювача. Отримані числові значення програмним шляхом переводяться у звичну відсоткову шкалу від нуля до ста відсотків. Саме цей кінцевий відсотковий показник і працює як команда для того, щоб система самостійно прийняла рішення про автоматичне закриття захисних віконних жалюзі.

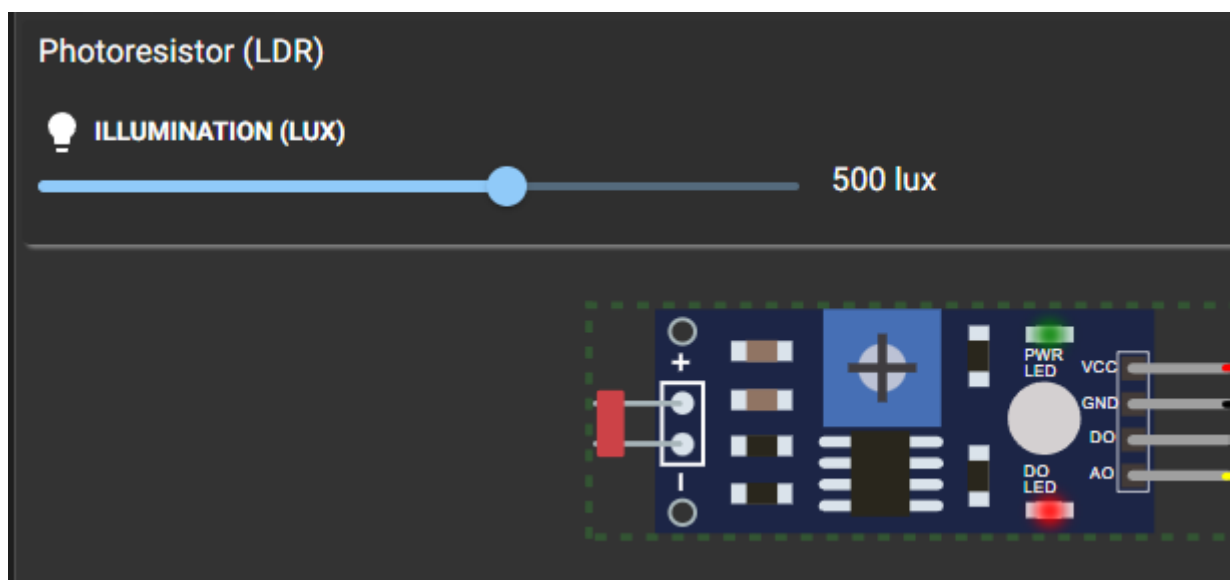


Рисунок 3.3 – Вигляд фоторезистора LDR у середовищі Wokwi та його налаштування [28]

У розробці як електромеханічні виконавчі модулі застосовуються твердотільні та електромагнітні реле. Вони необхідні для того, щоб безпечно керувати потужними приладами, які живляться від звичайної побутової мережі змінного струму з напругою 220 вольт. У цій системі такими приладами виступають осушувач повітря та допоміжний обігрівач, тому було задіяно одразу два окремі релеїні модулі.

Віртуальна копія цього реле у середовищі симуляції Wokwi дуже точно відтворює поведінку справжнього електронного перемикача з надійною ізоляцією струму. Як тільки мікроконтролер подає на керуючий контакт реле звичайний логічний сигнал з напругою 3.3 вольт, внутрішні алгоритми програми одразу імітують фізичне замикання робочих контактів.

Щоб розробнику було зручно візуально спостерігати за правильністю роботи написаного коду, на платі кожного віртуального реле розміщений спеціальний індикаторний світлодіод. Цей індикатор починає світитися саме в той момент, коли плата активує відповідний канал управління. Завдяки такій простій підказці можна миттєво побачити момент подачі команди на ввімкнення кліматичної установки. Це значно полегшує процес розробки, адже тепер не потрібно захищувати схему та підключати до неї додаткові віртуальні вимірювальні прилади на зразок мультиметрів, щоб просто перевірити наявність напруги на виході.

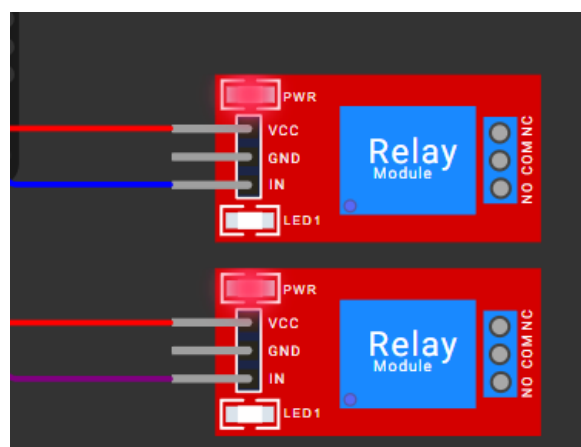


Рисунок 3.4 – Вигляд реле у середовищі Wokwi [28]

Щоб наочно показати роботу автоматичних віконних жалюзі у моєму проєкті, я застосував віртуальну модель сервоприводу. Внутрішні алгоритми цього компонента постійно відслідковують ширину керівного імпульсу, який надходить від мікроконтролера на спеціальний контакт. Відповідно до характеристик отриманого сигналу, симулятор самостійно розраховує потрібне положення та візуально повертає рухому частину мотора на заданий кут.

Програму налаштована таким чином, щоб вона використовувала лише два основні робочі стани. Якщо датчик фіксує рівень навколишнього освітлення нижче п'ятдесяти відсотків, мотор займає позицію нуль градусів, залишаючи віконні жалюзі повністю відкритими. Коли ж сонячне проміння стає надто інтенсивним і цей показник перевищує сімдесят відсотків, система подає команду і миттєво повертає вал на дев'яносто градусів, надійно перекриваючи зайвий світловий потік.

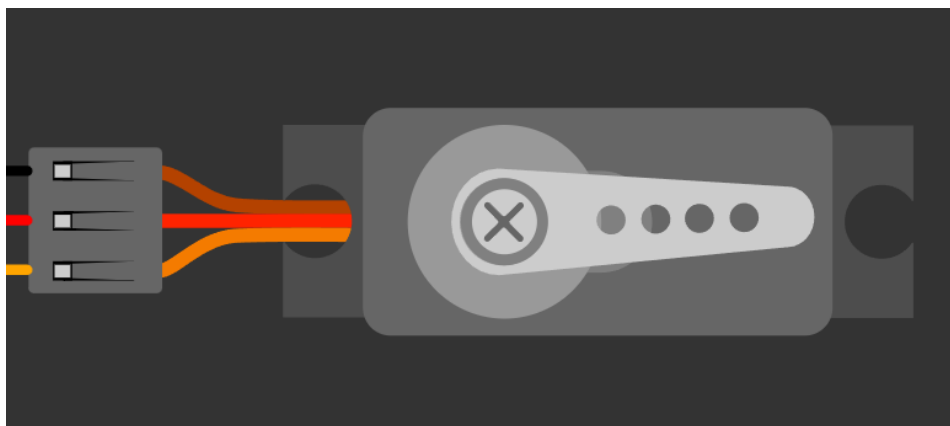


Рисунок 3.5 – Вигляд сервомотору у середовищі Wokwi [28]

Останнім елементом системи виступає символічний рідкокристалічний екран формату двадцять на чотири. Симулятор Wokwi детально відтворює роботу внутрішнього контролера екрана та додаткової мікросхеми розширення. Це дає змогу повноцінно тестувати процес передачі інформації по послідовній шині I2C через відповідні сигнальні контакти. Віртуальна модель максимально точно імітує запис тексту в комірки пам'яті пристрою, виводячи на екран рівно

чотири рядки по двадцять символів у кожному. У розробленому проєкті цей дисплей виконує функцію головного інформаційного табло для персоналу. Він безперервно показує зрозумілі текстові повідомлення про поточні показники мікроклімату, стан кожного виконавчого реле, а також інформує про успішність підключення плати до віддаленого сервера MQTT.

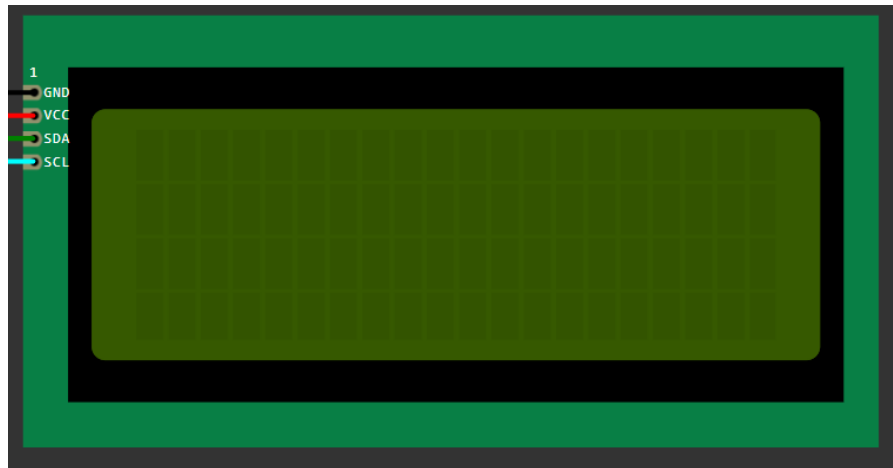


Рисунок 3.6 – Вигляд дисплею LCD2004 у середовищі Wokwi [28]

### 3.2 Мережева взаємодія та імплементація протоколу MQTT

Важливою частиною будь-якої сучасної кіберфізичної системи є її здатність підключатися до глобальної мережі інтернет. У своєму проєкті я запрограмував мікроконтролер ESP32 таким чином, що він не просто керує датчиками і реле на місці, а ще й працює як своєрідний місток. Цей місток безперервно передає зібрані фізичні показники прямо на віддалений хмарний сервер для їх подальшої обробки та виведення на екран.

Оскільки вся інформація передається повітрям через бездротовий модуль Wi-Fi, завжди існує ризик виникнення різних перешкод. Наприклад, можуть випадково втрачатися пакети даних або ж з'єднання з роутером чи віддаленим сервером може на певний час перерватися. Щоб пристрій працював надійно і не зависав у таких ситуаціях, я додав у його програму алгоритм автоматичного відновлення зв'язку. Завдяки цьому плата вміє самостійно розпізнавати обрив

мережі і безперервно намагається перепідключитися до неї стільки разів, скільки необхідно для успішного продовження роботи.

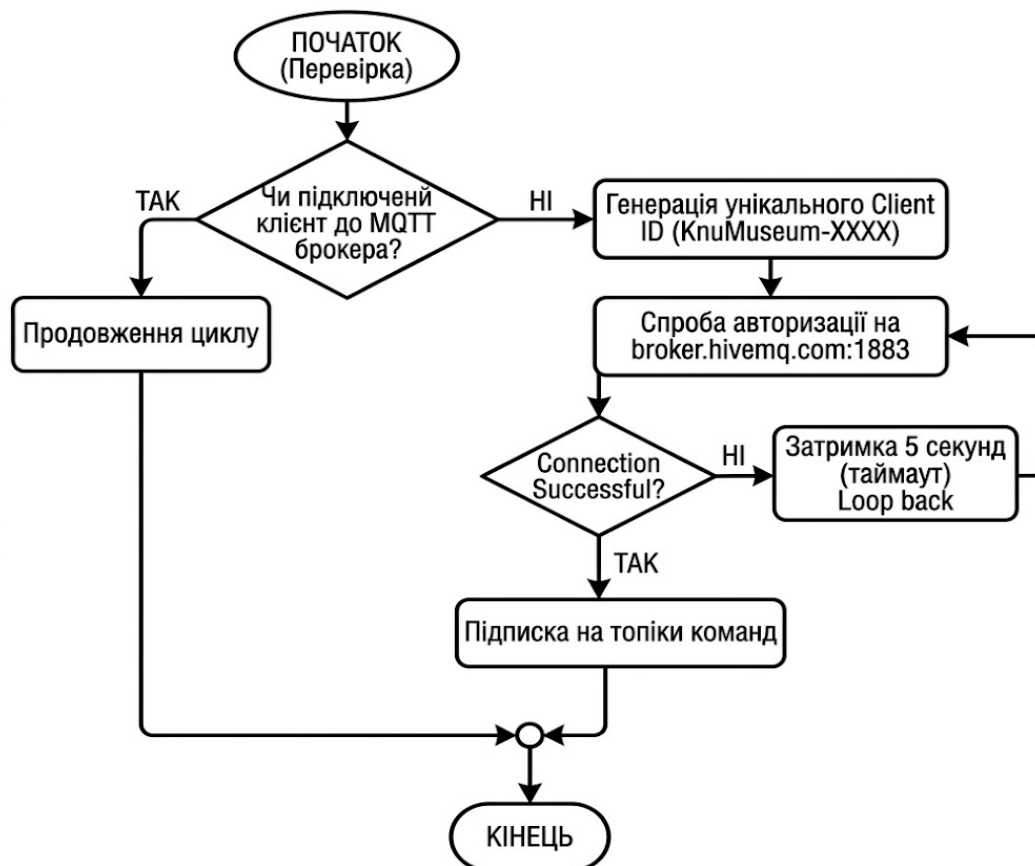


Рисунок 3.7 – Алгоритм відновлення MQTT з'єднання

При використанні загальнодоступних серверів MQTT обов'язковою вимогою є створення унікального імені для підключення кожної плати. Правила цього протоколу влаштовані так, що у випадку появи двох пристроїв з однаковими іменами, сервер примусово відключить першого з них. Щоб уникнути подібних конфліктів, у програмі застосовано механізм створення випадкових символів. Цей згенерований код додається до базової назви пристрою, гарантуючи, що сесія мікроконтролера буде абсолютно унікальною в усій глобальній мережі.

Наступним кроком є підготовка та розподіл пакетів інформації: як тільки плата встановлює стабільний зв'язок, вона починає публікувати зібрані дані.

Особливість обміну повідомленнями через MQTT полягає в тому, що він вимагає обов'язкового перетворення всіх числових вимірів у звичайний текстовий формат перед їхньою відправкою. Щоб зайвий раз не перевантажувати оперативну пам'ять мікроконтролера, процес запрограмовано так, щоб переведення значень температури, вологості та освітленості у текст відбувалося миттєво, безпосередньо в момент виконання команди на відправку.

Кожен тип вимірювань направляється у свій власний інформаційний канал, який називається топіком. Назви цих каналів побудовано у вигляді зручної ієрархії, що дає змогу дуже просто розширювати проєкт у майбутньому, наприклад, під час обладнання нових музейних залів. Відповідно до цієї структури, значення температури передаються за адресою `knu/museum/hall1/temp`, дані про відносну вологість йдуть у канал `knu/museum/hall1/hum`, а поточний рівень світла направляється в `knu/museum/hall1/light`. Для передачі інформації про стан роботи реле осушувача та обігрівача використовуються кінцеві адреси `fan` та `heat`, куди відправляється звичайний нуль або одиниця. Прийнято рішення розбити всі дані по таких окремих спеціалізованих каналах замість того, щоб пакувати їх у один великий блок інформації. Такий метод полегшує зчитування показників на стороні веб-сайту та зменшує кількість зайвої службової інформації під час бездротової передачі.

### 3.3 Розробка веб-інтерфейсу диспетчеризації

Головною метою розробки будь-якої кіберфізичної системи є забезпечення зручного віддаленого керування та легкої взаємодії людини з віддаленими технічними об'єктами. Щоб працівники могли в будь-який момент часу слідкувати за умовами зберігання експонатів, створено спеціальний веб-сайт - інформаційну панель, тобто дашборд. Ця сторінка відкривається на будь-якому пристрої, оскільки вона написана за допомогою сучасних веб-технологій.

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проектуючи архітектуру цього веб-сайту, потрібно було вирішити проблему отримання даних без затримок. Справа в тому, що звичайні інтернет-браузери за замовчуванням не вміють працювати по тому ж каналу зв'язку, який використовує мікроконтролер для передачі своїх MQTT-повідомлень. Тому обмін даними налаштовано через додатковий протокол WebSockets. Для цього я підключив спеціальну програмну бібліотеку, яка працює як перекладач: вона бере стандартні повідомлення від плати і упакує їх у формат, з яким легко працює браузер. Завдяки такому архітектурному рішенням телеметричні дані на екрані диспетчера оновлюються миттєво, і йому не потрібно щоразу вручну оновлювати сторінку, щоб побачити нові показники.

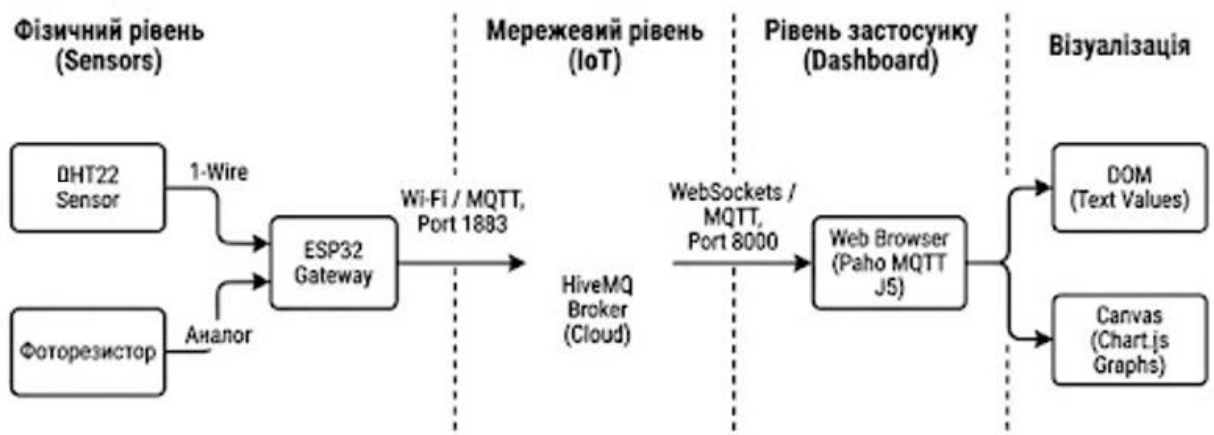


Рисунок 3.8 – Схема архітектури потоків даних для ІОТ системи

Головною частиною програмного коду мого веб-сайту є функція обробки вхідних повідомлень. Вона запускається автоматично кожного разу, коли віддалений сервер надсилає нові дані з датчиків у загальний інформаційний канал мого музейного залу.

Щоб красиво та зрозуміло показувати зміну мікроклімату в часі, використано інструмент для побудови графіків Chart.js. Було налаштовано процес малювання ліній за принципом ковзного вікна. Це означає, що програма пам'ятає та відображає на екрані лише останні тридцять вимірювань. Як тільки

приходить нове, тридцять перше значення температури чи вологості, система миттєво стирає найстаріший показник з пам'яті і додає свіжий у кінець графіка. Завдяки такому підходу створюється приємний ефект лінії, яка безперервно рухається вперед. Це дозволяє не перевантажувати комп'ютер чи телефон диспетчера, гарантуючи, що мій сайт буде працювати швидко і без зависань навіть за умови цілодобово відкритої вкладки.

Розробка клієнтської частини системи базується на використанні класичного стека веб-технологій, що включає мову розмітки гіпертексту HTML5, каскадні таблиці стилів CSS3 та високорівневу мову сценаріїв JavaScript. Такий вибір забезпечує високу швидкість роботи та повну кросплатформеність, дозволяючи диспетчеру відкривати панель керування з будь-якого сучасного пристрою, чи то комп'ютер, чи смартфон, без встановлення додаткового програмного забезпечення. Для побудови графічного інтерфейсу застосовано модульний підхід, де візуальні елементи, такі як картки стану виконавчих механізмів та інформаційні панелі датчиків, динамічно генеруються та оновлюються без перезавантаження сторінки.

Оскільки традиційні веб-браузери з міркувань безпеки не підтримують пряму роботу з мережевими TCP-сокетами, для зв'язку з сервером HiveMQ імплементовано технологію WebSockets. Програмна взаємодія забезпечується за допомогою надійної бібліотеки Eclipse Paho MQTT JavaScript Client. Після початкового завантаження сторінки скрипт ініціює асинхронне з'єднання з брокером через визначений веб-порт та оформлює підписку на головний інформаційний топик музейної зали. Завдяки такій архітектурі встановлюється постійний двосторонній канал зв'язку: браузер перебуває в режимі очікування і миттєво реагує на надходження нових пакетів телеметрії, паралельно маючи змогу відправляти керівні команди від оператора.

Найважливішим етапом роботи веб-додатка є алгоритм парсингу та розподілу вхідних повідомлень. Коли від мікроконтролера надходить новий пакет даних, спеціальний обробник подій перехоплює його, аналізує назву топика

та вилучає корисне навантаження. Отримані текстові значення конвертуються в числові формати, проходять програмну перевірку на валідність, після чого направляються у відповідні гілки логіки відображення. Якщо це показники мікроклімату, вони передаються до об'єкта аналітичної бібліотеки Chart.js, яка плавно перемальовує графіки часових рядів, додаючи нову точку на координатну вісь. Якщо ж надходить оновлений статус виконавчого пристрою, скрипт звертається до об'єктної моделі документа (DOM) та змінює стилі відповідних елементів, наприклад, перефарбовуючи індикатор осушувача в активний колір та запускаючи відповідну анімацію, що робить процес моніторингу максимально наочним та інтуїтивно зрозумілим.

Окрім графіків, додано можливість динамічно змінювати зовнішній вигляд інформаційних карток на сторінці залежно від стану обладнання. Наприклад, коли сервер надсилає сигнал про те, що увімкнувся осушувач повітря, мій програмний код миттєво на це реагує. Він автоматично перефарбовує іконку вентилятора у зелений колір і змушує її обертатися на екрані. Завдяки такій простій, але помітній анімації працівнику музею достатньо лише побіжно глянути на монітор, щоб відразу зрозуміти, яка саме кліматична техніка зараз працює, і йому не потрібно постійно вчитуватися в дрібні цифри чи статуси. Для забезпечення ідеальної візуальної чіткості та економії системних ресурсів клієнтського пристрою, всі графічні активи дашборда, зокрема іконки індикаторів та мнемосхеми, реалізовані у форматі масштабованої векторної графіки (SVG). Завдяки ретельній підготовці та оптимізації цих елементів у спеціалізованих векторних редакторах, вдалося суттєво зменшити обсяг переданих даних. Такий підхід гарантує, що при будь-якому масштабуванні сторінки - чи то на великому диспетчерському моніторі, чи на екрані мобільного телефону - графіка залишатиметься абсолютно різкою і без піксельних артефактів. Водночас плавне відтворення динамічних анімацій, таких як обертання вентилятора, не створюватиме зайвого навантаження на відеопам'ять та процесор навіть слабких пристроїв.

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

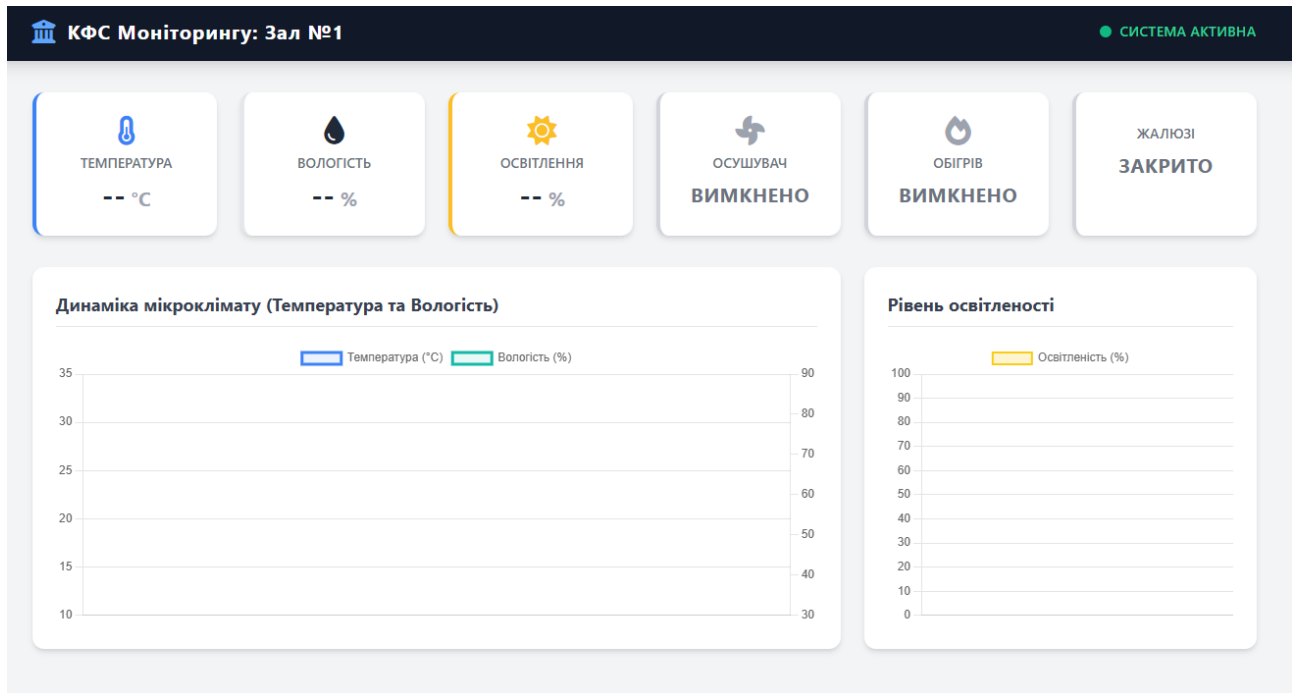


Рисунок 3.9 – Вигляд порожнього веб-дашборду

### 3.4 Комплексне тестування та верифікація роботи кіберфізичної системи

Завершальним етапом розробки програмно-апаратного комплексу стало проведення комплексного симуляційного тестування. Було необхідним перевірити абсолютно всі рівні створеної архітектури: починаючи від фізичного збору даних датчиками і логіки прийняття рішень мікроконтролером, закінчуючи надійністю мережевої маршрутизації та правильністю віддаленої візуалізації на сайті. Для цього я штучно моделював як нормальні, так і різноманітні аварійні мікрокліматичні умови, щоб перевірити, наскільки адекватно система реагує на зовнішні зміни.

Процес тестування розпочинається одразу після запуску симуляції у середовищі Wokwi. Як тільки подається віртуальне живлення на плату ESP32, система переходить до етапу своєї базової конфігурації. У цей момент на рідкокристалічному дисплеї з'являється системне повідомлення про те, що пристрій намагається підключитися до локальної мережі "WiFi Connecting...". Завдяки вбудованому в симулятор віртуальному шлюзу Wokwi-GUEST,

мікроконтролер отримує потрібну IP-адресу. Після успішного підключення до інтернету програма ініціює з'єднання з публічним віддаленим сервером broker.hivemq.com на стандартний порт 1883. Якщо процес авторизації проходить без помилок, це одразу підтверджується появою на четвертому рядку дисплея статусу "MQTT:OK". Саме на цьому етапі розроблена система вважається повністю ініціалізованою і готовою до штатної роботи. У цей момент усі виконавчі реле, які відповідають за осушувач та обігрівач, знаходяться у безпечному вимкненому стані, а сервопривід віконних жалюзі встановлено в початкову нульову позицію.

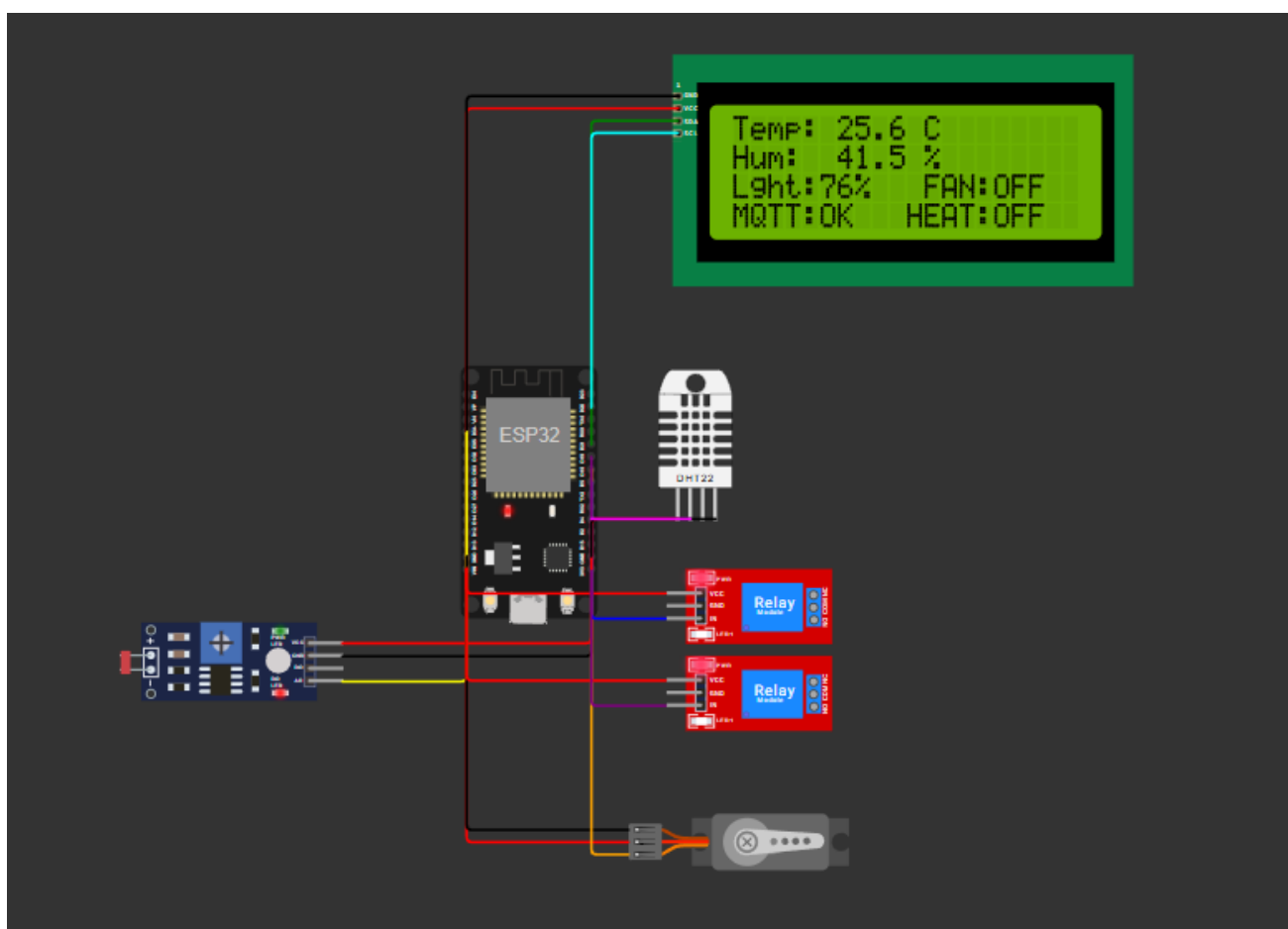


Рисунок 3.10 – Успішна ініціалізація системи та виведення базових параметрів на локальний дисплей [28]

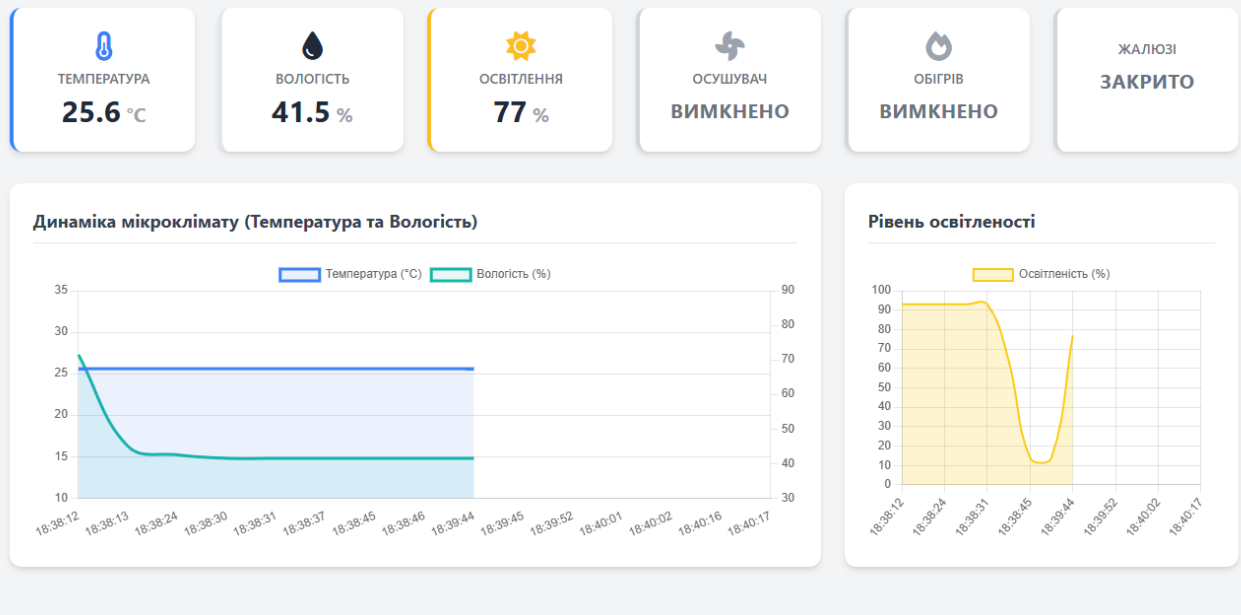


Рисунок 3.11 – Успішне виведення даних на дашборд

Перший тестовий сценарій був спрямований на перевірку того, як створена система впорається з аварійною ситуацією підвищення вологості. Для цього вручну, використовуючи спеціальний повзунок віртуального датчика DHT22 у симуляторі Wokwi, піднято показник відносної вологості з нормальних сорока відсотків до критичної позначки у шістдесят п'ять. Такі дії імітують раптове та небезпечне підвищення вологості у справжньому виставковому залі, що часто трапляється, наприклад, у дощові дні через великий наплив відвідувачів.

Як тільки цей параметр змінено, плата відразу зреагувала. Через дві секунди, під час чергового планового зчитування даних, мікроконтролер отримав нове значення. Програмний алгоритм розпізнав, що цей показник значно перевищив дозволу верхню межу у шістдесят відсотків. Після цього внутрішня змінна стану оновилася, і мікроконтролер подав робочу напругу на свій цифровий контакт D5. У результаті на першому віртуальному модулі реле спалахнув червоний світлодіод. Цей індикатор наочно підтверджує фізичне замикання силових контактів, через які у реальних умовах подається живлення на промисловий осушувач повітря. Одночасно з цим на локальному

рідкокристалічному дисплеї статус вентилятора автоматично змінився з вимкненого на активний.

Паралельно з локальним керуванням обладнанням відбулася реакція і на мережевому рівні. Мікроконтролер одразу сформував свіжі пакети даних і відправив їх через інтернет на віддалений сервер. У спеціалізований інформаційний канал вологості було передано нове числове значення 65.0, а в канал статусу осушувача система опублікувала логічну одиницю. Це гарантує, що диспетчер на своєму веб-сайті побачить як саму причину тривоги, так і факт успішного автоматичного ввімкнення рятувальної кліматичної техніки.

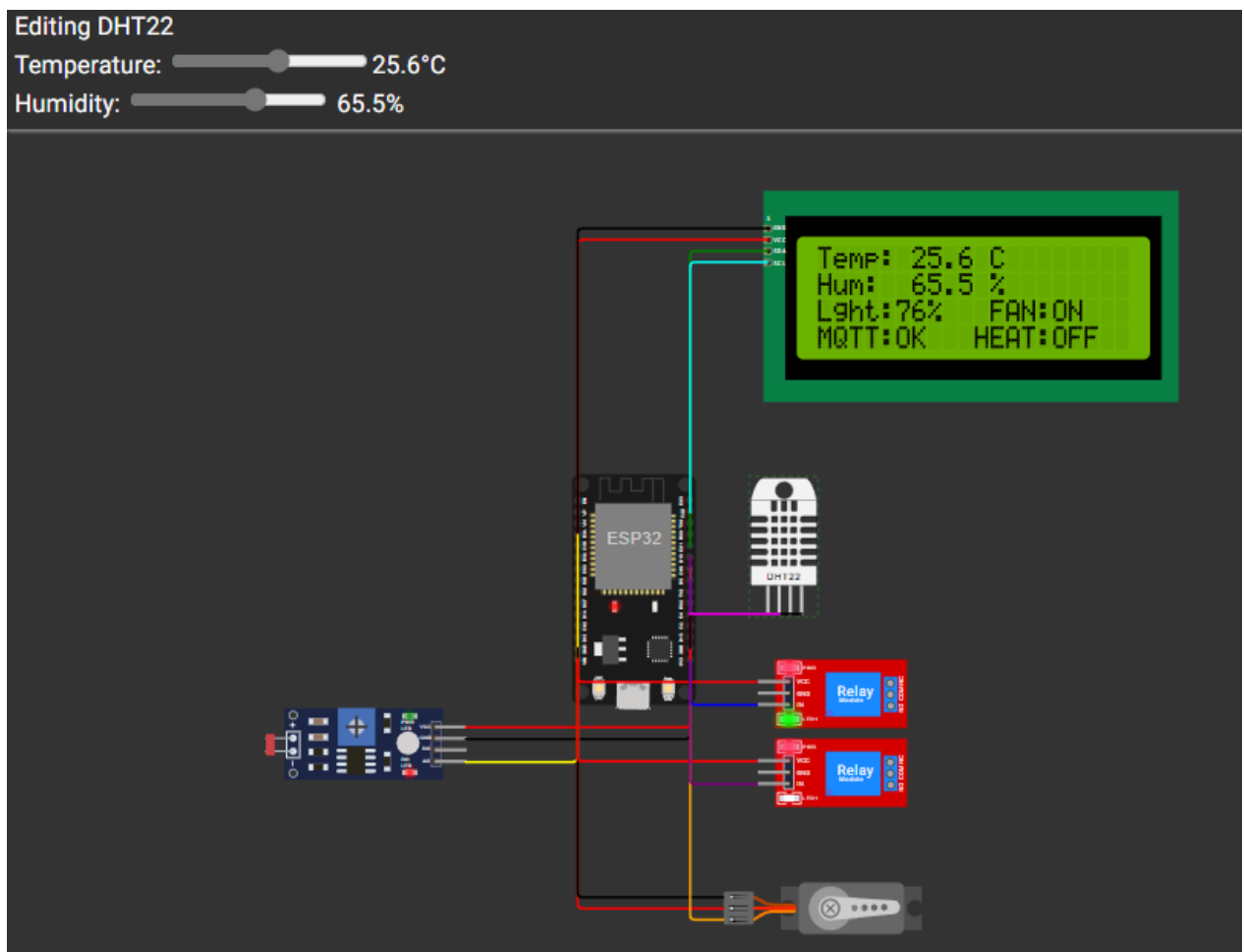


Рисунок 3.12 – Реакція апаратної частини КФС на підвищення рівня відносної вологості [28]

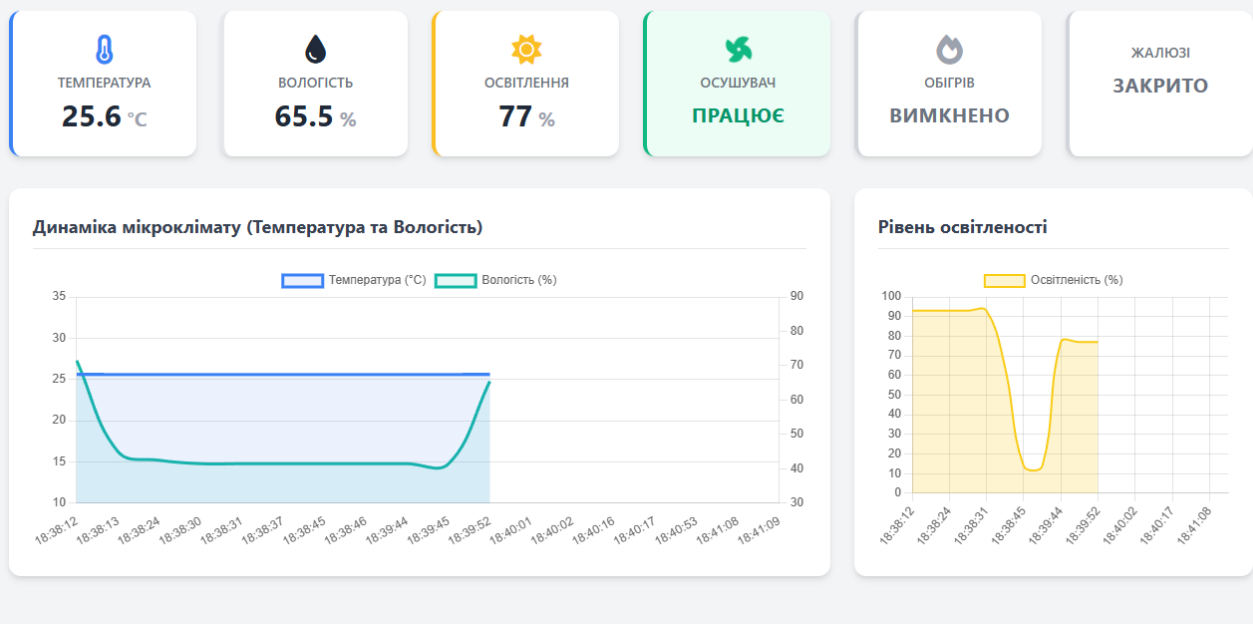


Рисунок 3.13 – Реакція дашборду на підвищення відносної вологості

Другий тестовий сценарій проведено паралельно з іншими процесами, щоб перевірити здатність мікроконтролера успішно виконувати справжнє багатозадачне керування. Для цього повзунок температури на віртуальному датчику опущено до позначки 14.5 градусів, що імітує раптову відмову системи центрального опалення взимку. Разом з тим, різко піднято рівень освітленості на фоторезисторі до 85 відсотків, моделюючи ситуацію, коли на чутливі експонати починає падати яскраве та пряме сонячне проміння.

Алгоритм терморегуляції зафіксував падіння температури нижче допустимої межі у 16 градусів. Програма подала сигнал на цифровий контакт D19, що призвело до фізичного вмикання другого релейного модуля, який відповідає за аварійний обігрівач, а на інформаційному екрані з'явився новий статус про активну роботу теплової установки. Одночасно з цим процесом підсистема контролю інсоляції виявила перевищення світлового порогу у 70 відсотків. Апаратний контролер мікросхеми змінив параметри імпульсу на контакті D18, внаслідок чого вал підключеного сервоприводу здійснив поворот

на дев'яносто градусів. Таким чином віртуальні жалюзі повністю закрилися, перекриваючи доступ руйнівного світла до музейних об'єктів.

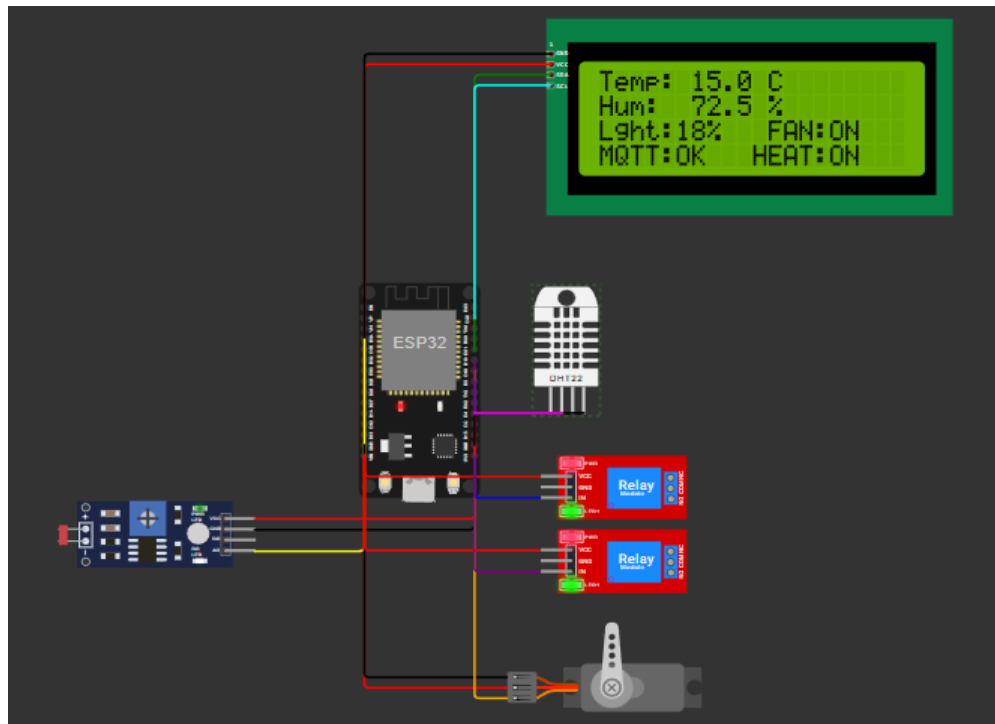


Рисунок 3.14 – Багатоканальне відпрацювання аварійних режимів (робота обігрівача, вентилятора та закриття захисних жалюзі) [28]

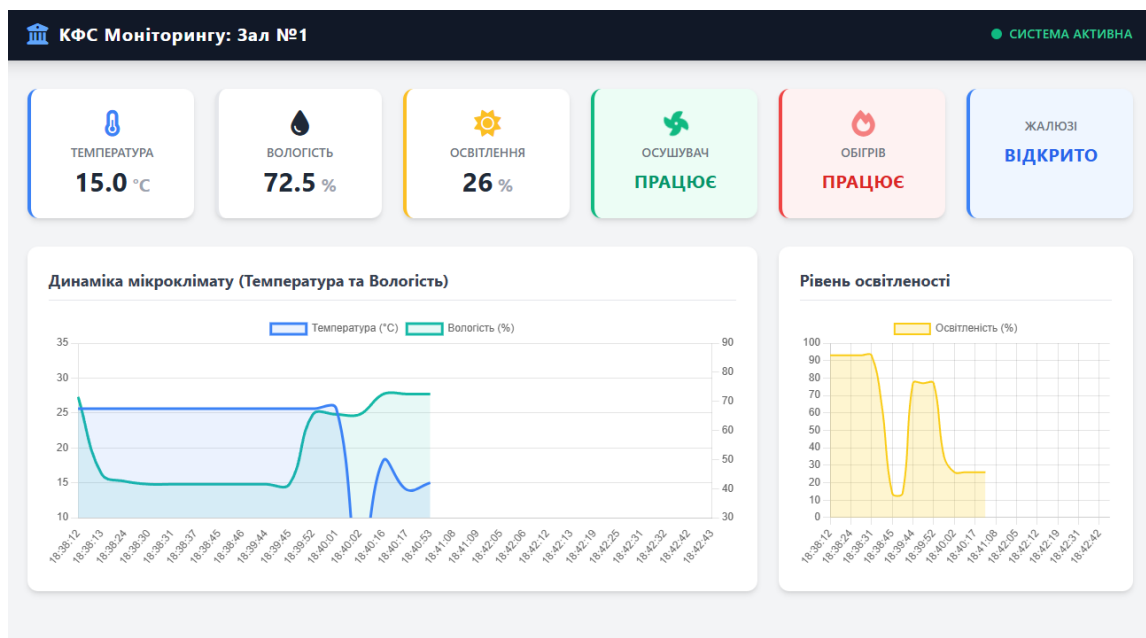


Рисунок 3.15 – Реакція дашборду на багатоканальне відпрацювання аварійних режимів

Щоб остаточно переконатися, що зібрані телеметричні дані успішно залишають межі симулятора Wokwi та коректно потрапляють у глобальну мережу, проведено верифікацію мережевої маршрутизації. Для цього використано незалежний інструмент моніторингу - клієнт HiveMQ Websocket Client. Я підключив його до того ж самого публічного брокера і налаштував підписку на всі інформаційні топіки мого музейного залу, використавши загальну маску knu/museum/hall1/#.

Відкривши вікно моніторингу, було видно, як рівно кожні дві секунди віддалений сервер успішно маршрутизує п'ять окремих повідомлень: актуальні показники температури, вологості, рівня освітленості, а також поточні статуси обох реле. Мінімальна затримка між моментом відправки інформації з віртуальної плати та її миттєвою появою у вікні веб-клієнта стала для мене практичним підтвердженням високої швидкодії протоколу MQTT. Цей етап тестування довів його ідеальну придатність для створення надійних систем диспетчеризації, які мають стабільно працювати в режимі реального часу.

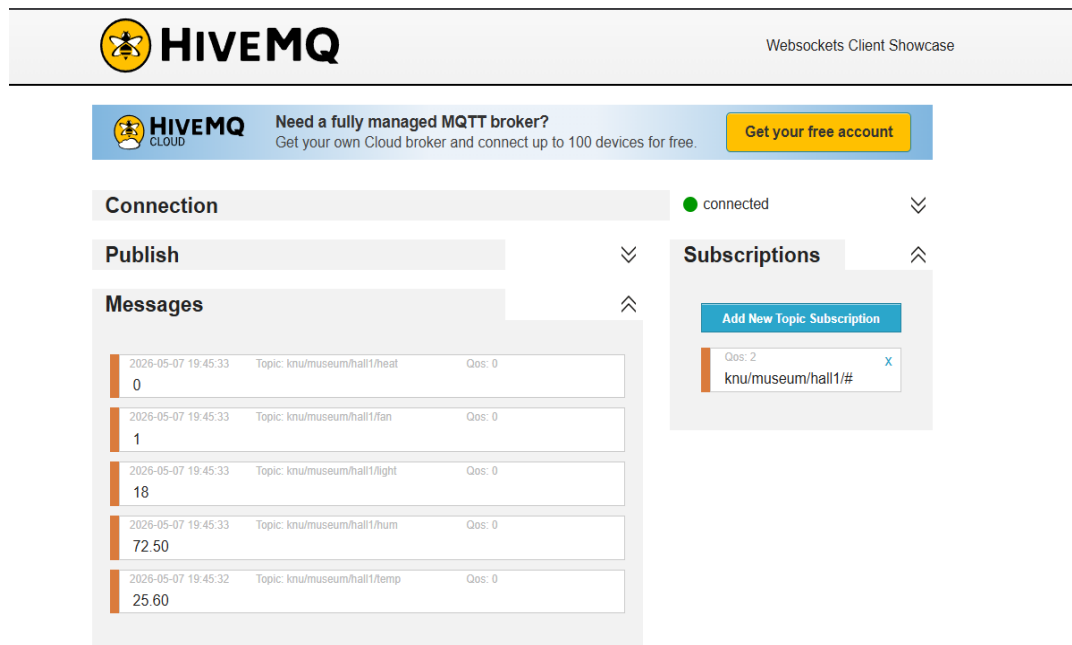


Рисунок 3.16 - Перехоплення та верифікація телеметричних пакетів даних на рівні хмарного MQTT-брокера

Фінальною фазою комплексного тестування стала перевірка працездатності рівня застосунку - користувацького веб-інтерфейсу, створеного для віддаленої диспетчеризації. Для перевірки я відкрив розроблений HTML-файл дашборда у звичайному браузері.

Після завантаження сторінки вбудований JavaScript-клієнт Paho автоматично ініціював з'єднання з віддаленим брокером. Успішність цього підключення візуально підтвердив індикатор у верхньому правому куті екрана, який змінив свій колір з червоного на зелений, сигналізуючи про статус "Система Активна". Відразу після цього почалася візуалізація телеметрії. Я переконався, що всі цифрові показники температури, вологості та освітленості на інформаційних картках оновлюються абсолютно синхронно з даними на локальному дисплеї симулятора Wokwi.

Одночасно з виведенням цифр, на лінійних графіках, побудованих за допомогою бібліотеки Chart.js, почали промальовуватися динамічні криві. Оскільки на попередніх етапах я штучно змодельовав аварійні ситуації, графік вологості тримався у верхній зоні, тоді як крива температури знаходилася внизу. Особливу увагу приділено перевірці скриптів анімації: щойно браузер отримав MQTT-пакети з логічною одиницею у топіках fan та heat, картка осушувача змінила колір на зелений, а іконка вентилятора почала обертатися. Паралельно картка обігрівача стала червоною із пульсуючою іконкою вогню. Ця реакція інтерфейсу показала повну працездатність коду, який відповідає за динамічну зміну об'єктної моделі документа залежно від стану фізичного обладнання.

Останній, але, мабуть, найважливіший етап тестування був присвячений практичному підтвердженню алгоритму гістерезису, який забезпечує "м'яке" керування. Це мало довести інженерну надійність написаного мною програмного коду та коректну роботу логічної "мертвої зони".

Для перевірки цієї функції у середовищі Wokwi повільно опущено повзунок вологості з аварійної позначки у 65% до 59%. Оскільки встановлений верхній поріг увімкнення осушувача становить 60%, логічно було б очікувати

його миттєвого вимкнення. Проте, як зафіксували локальний дисплей та віддалений веб-дашборд, реле продовжило працювати, а індикатор вентилятора залишився в активному стані. Це довело, що програма успішно запам'ятала свій попередній робочий стан. Лише в той момент, коли повзунок перетнув запрограмовану нижню межу, алгоритм розімкнув контакти, згас червоний світлодіод на віртуальному модулі, а іконка вентилятора на диспетчерському веб-сайті стала сірою і припинила обертатися.

Успішне проходження цього тесту підтвердило, що розроблена кіберфізична система здатна здійснювати по-справжньому “м'яке” регулювання клімату. Такий підхід повністю унеможлиблює так зване “брязкання” - часте циклічне вмикання та вимикання обладнання через незначні коливання фізичних показників навколо порогового значення. Застосування цього алгоритму є необхідним, адже воно дозволяє подовжити робочий ресурс дорогої промислової кліматичної техніки і, водночас, гарантує максимально плавне та безпечне середовище для збереження музейних експонатів.

### 3.5. Висновки до третього розділу

У третьому розділі дипломної роботи успішно вирішене комплексне завдання з практичної реалізації, налаштування та тестування прототипу кіберфізичної системи моніторингу і корекції мікроклімату. Перехід від теоретичного обґрунтування до безпосереднього практичного моделювання дозволив наочно підтвердити правильність усіх обраних архітектурних та інженерних рішень. За результатами виконання цієї практичної частини я можу зробити кілька висновків.

У хмарному середовищі Wokwi було спроектовано та зібрано віртуальну електричну принципову схему на базі мікроконтролера ESP32. Проведено коректне розведення ліній зв'язку для цифрових і аналогових сенсорів, а також виконавчих механізмів, створивши модель, яка повністю імітує фізичні процеси

та електричні характеристики реального обладнання. Для цієї плати було написано оптимізоване мікропрограмне забезпечення мовою C++. Завдяки використанню апаратного таймера вдалося реалізувати архітектуру головного циклу, що забезпечило паралельне виконання завдань опитування датчиків та підтримання стабільного мережевого з'єднання.

Важливим досягненням стала імплементація логіки “м'якого” керування. Тестування довели, що наявність “мертвої зони” у п'ять відсотків для вологості та два градуси для температури ефективно запобігає автоколиванням і швидкому зносу кліматичного обладнання. Це гарантує плавне коригування мікроклімату, що є вимогою для збереження чутливих музейних об'єктів.

Налаштувано надійний канал передачі телеметричних даних від мікроконтролера до хмарного брокера HiveMQ за протоколом MQTT. Крім того, розроблено та ретельно протестувано алгоритм автоматичного відновлення з'єднання, який гарантує відмовостійкість моєї системи як повноцінного вузла Інтернету речей. Для зручної і віддаленої взаємодії я створено людино-машинний інтерфейс у вигляді інтерактивного кросплатформного веб-дашборда, використовуючи технології HTML, JavaScript, Chart.js та Tailwind CSS. Цей дашборд успішно підключається до брокера через WebSockets, забезпечуючи візуалізацію даних на лінійних графіках та відображення активності виконавчих реле без будь-якої необхідності перезавантажувати сторінку.

Проведене комплексне симуляційне моделювання аварійних ситуацій, таких як підвищення вологості, падіння температури чи надмірна інсоляція, остаточно підтвердило надійність розробки. Система довела свою здатність функціонувати в автономному режимі, реагувати на збурення та коректно сповіщати диспетчера про поточний стан об'єкта. Таким чином, розроблений та протестований мною програмно-апаратний комплекс є повністю функціональним та становить готову інженерну базу для створення реальної фізичної системи автоматизації мікроклімату в цільових приміщеннях.

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

За результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень у дипломній роботі успішно розроблено, віртуально імплементовано та протестувано прототип кіберфізичної системи моніторингу і автоматичної корекції мікроклімату музейних залів. Створений комплекс використовує сучасні архітектурні підходи Інтернету речей (IoT) та пройшов повний цикл розробки: від початкового обґрунтування концепції до створення повністю функціонального мережевого НМІ-інтерфейсу.

У першому розділі проведено детальний аналіз предметної області та досліджено специфіку впливу таких параметрів середовища, як температура, відносна вологість і рівень інсоляції, на чутливі об'єкти зберігання. Також розглянуто існуючі класичні та автоматизовані методи клімат-контролю і визначено їхні головні архітектурні недоліки. На основі цього дослідження мною було сформовано чіткі технічні вимоги до нової кіберфізичної системи. Зокрема, було обґрунтовано необхідність реалізації логіки “м'якого” апаратного регулювання, забезпечення високої відмовостійкості та обов'язкової наявності віддаленої бездротової диспетчеризації.

У другому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування та здійснено вибір оптимальної апаратно-програмної бази проекту. На основі порівняльного аналізу різних обчислювальних платформ, центральним ядром системи було обрано 32-бітний мікроконтролер ESP32. Окрім цього, теоретично обґрунтовано вибір високоточного сенсора DHT22 та фоторезистора для збору телеметричних даних, а також модулів твердотільних реле і сервоприводу в ролі виконавчих механізмів. У цьому ж розділі доведено доцільність використання хмарного середовища Wokwi для розробки “цифрового двійника”, мови C++ для написання мікропрограмного забезпечення, легковагового протоколу MQTT для мережевої маршрутизації та сучасних веб-технологій для створення кросплатформного клієнтського застосунку.

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У третьому розділі основне зусередження було на практичній реалізації розробленої архітектури. Було здійснено синтез віртуальної електричної схеми з коректним розведенням комунікаційних шин. Розроблено мікропрограмне забезпечення, в якому успішно заблокувальні таймери опитування та алгоритми двопозиційного керування з петлею програмного гістерезису, що ефективно захищає кліматичне обладнання від швидкого зносу. Для зручного керування створено інтерактивний веб-дашборд оператора, який підключається до хмарного брокера через WebSockets і забезпечує динамічну візуалізацію показників мікроклімату. Фінальне комплексне тестування змодельованих аварійних сценаріїв, таких як різке підвищення вологості чи падіння температури, остаточно підтвердило безперебійну роботу системи, адекватність її кібернетичної реакції та високу надійність бездротової передачі даних. Усе це переконливо свідчить про успішне та повне виконання всіх поставлених завдань дипломного проєкту.

					КвРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

- 1 Michalski S. Agent of Deterioration: Light, Ultraviolet and Infrared. 2022. URL: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration/light.html> (дата звернення: 22.02.2026).
- 2 Lucchi E. Review of preventive conservation in museum buildings. *Journal of Cultural Heritage*. 2018. Vol. 29. P. 180–193.
- 3 BME280 Combined humidity and pressure sensor (Datasheet). Bosch Sensortec. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf> (дата звернення: 22.02.2026).
- 4 ESP32 Series Technical Reference Manual. Espressif Systems. URL: [https://documentation.espressif.com/esp32\\_technical\\_reference\\_manual\\_en.pdf](https://documentation.espressif.com/esp32_technical_reference_manual_en.pdf) (дата звернення: 22.02.2026).
- 5 Foti P. [et al.]. Critical exposure time for panel paintings due to change in environmental conditions. *Mechanics of Materials*. 2025. Vol. 202. P. 105234.
- 6 Performance Analysis of MQTT and HTTP for IoT. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10123456> (дата звернення: 22.02.2026).
- 7 Abdalzaher M. S. [et al.]. Quality-focused Internet of Things data management: A survey, perspectives, open issues, and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. 2025.
- 8 Heliotics: Museum Environmental Monitoring Case Studies. Heliotics. URL: <https://www.heliotics.com/iot-in-museum-smart-ambience-monitoring/> (дата звернення: 22.02.2026).
- 9 Hendrawati T. D. [et al.]. Mamdani Fuzzy Logic-Based Room Temperature Monitoring And Control System. *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 2, no. 1. P. 59–70.
- 10 Pratama I. S. P. [et al.]. Temperature and Humidity Control System With Long Range in Mushroom Barn Using Fuzzy Logic. *Jurnal Teknologi Informasi dan Pendidikan*. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 93–102.

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11 Zhang J. [et al.]. Internet of things and extended reality in cultural heritage: A review on reconstruction and restoration, intelligent guided tour, and immersive experiences. *IEEE Internet of Things Journal*. 2025.

12 BH1750 Digital Light Sensor Datasheet. URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf> (дата звернення: 22.02.2026).

13 Borkowski A. S. Low-Cost Internet of Things Solution for Building Information Modeling Level 3B—Monitoring, Analysis and Management. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2024. Vol. 13, no. 2. P. 19.

14 Wang L. [et al.]. Cultural Relics Transportation Monitoring and Management System Based on Internet of Things. *Proceedings of the 2025 2nd International Conference on Big Data and Digital Management*. 2025. P. 881–893.

15 Nizetic S. [et al.]. Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 274. P. 1–32.

16 Smart Building Standards. LoRa Alliance. URL: <https://lora-alliance.org> (дата звернення: 22.02.2026).

17 Chaudhary A. Internet of things (IOT): Research challenges and future applications. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*. 2022.

18 Weather-adaptive fuzzy control of setpoints for energy-efficient HVAC in urban buildings. *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710225005546> (дата звернення: 22.05.2026).

19 Технологія LoRaWAN. Romsat. URL: <https://romsat.ua/news/company/lorawan-technology/> (дата звернення: 22.02.2026).

20 What is Fuzzy logic. Databasecamp. URL: <https://databasecamp.de/en/data/fuzzy-logic-en> (дата звернення: 22.02.2026).

21 Використання сенсорів з інтерфейсом I2C з Raspberry Pi. KPI. URL: <https://mikrotik.kpi.ua/index.php/courses-list/category-python/118-use-of-sensors-with-i2c-interface-from-raspberry-pi-lesson-21-22> (дата звернення: 12.05.2026).

22 Мікроконтролер ESP32: опис та характеристики. *Geekmatic*. URL: <https://geekmatic.in.ua/esp32> (дата звернення: 12.05.2026).

23 Interface DHT22 Sensor Module with Arduino. *Circuit Digest*. URL: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interface-dht22-sensor-module-with-arduino> (дата звернення: 12.05.2026).

24 Photoresistor Module. *Electrothinks*. 2023. URL: <https://www.electrothinks.com/2023/07/photoresistor-module.html> (дата звернення: 12.05.2026).

25 Arduino LCD 20x4 I2C Code Example & Tutorial. *DeepBlueMbedded*. URL: <https://deepbluembedded.com/arduino-lcd-20x4-i2c-code-example-tutorial/> (дата звернення: 12.05.2026).

26 Control Relay Module with ESP32 Web Server. *Random Nerd Tutorials*. URL: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-relay-module-ac-web-server/> (дата звернення: 12.05.2026).

27 ESP32 – Servo Motor Tutorial. *ESP32 I/O*. URL: <https://esp32io.com/tutorials/esp32-servo-motor> (дата звернення: 12.05.2026).

28 Wokwi Simulator Project [Симуляційна модель проекту]. *Wokwi*. URL: <https://wokwi.com/projects/461918489611633665> (дата звернення: 12.05.2026).

29 HiveMQ WebSocket Client. *HiveMQ*. URL: <https://www.hivemq.com/demos/websocket-client/> (дата звернення: 22.05.2026).

30 MQTT protocol operation diagram. *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/figure/MQTT-protocol-operation-diagram\\_fig2\\_385460880](https://www.researchgate.net/figure/MQTT-protocol-operation-diagram_fig2_385460880) (дата звернення: 12.05.2026).

31 Mishra B., Kertesz A. The use of MQTT in M2M and IoT systems: A survey. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 201071–201086.

32 Fette I., Melnikov A. The WebSocket Protocol. *IETF RFC 6455*. 2011. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6455> (дата звернення: 12.05.2026).

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

33 Eclipse Paho JavaScript Client. *Eclipse Foundation*. URL: <https://eclipse.dev/paho/index.php?page=clients/js/index.php> (дата звернення: 12.05.2026).

34 Chart.js Documentation: Simple yet flexible JavaScript charting. *Chart.js*. URL: <https://www.chartjs.org/docs/latest/> (дата звернення: 12.05.2026).

35 Tailwind CSS Documentation. *Tailwind Labs*. URL: <https://tailwindcss.com/docs> (дата звернення: 12.05.2026).

36 ESP32 Simulator Guide. *Wokwi Documentation*. URL: <https://docs.wokwi.com/guides/esp32> (дата звернення: 12.05.2026).

37 HiveMQ Documentation: MQTT Broker. *HiveMQ*. URL: <https://docs.hivemq.com/hivemq/latest/user-guide/index.html> (дата звернення: 12.05.2026).

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

39 Kassab W., Darabkh K. A. A–Z survey of Internet of Things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations. *Journal of Network and Computer Applications*. 2020. Vol. 163. P. 102663.

40 Schito E. [et al.]. Multi-objective optimization of microclimate in museums for preventive conservation, thermal comfort and energy saving. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 224. P. 110250.

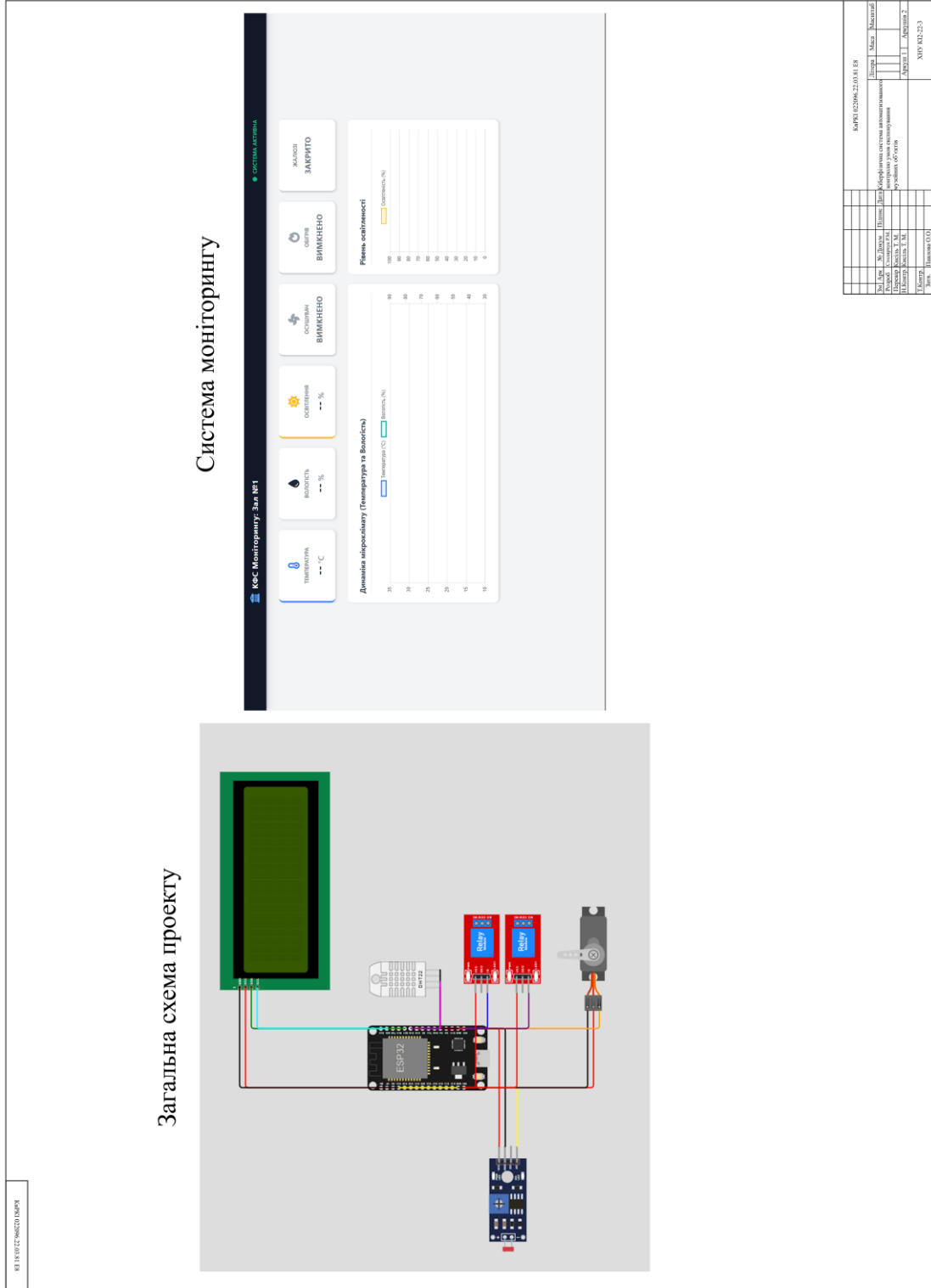
41 Архітектура IoT-рішень. Електронний навчальний портал. URL: <http://edu.asu.in.ua/mod/book/view.php?id=116&chapterid=246> (дата звернення: 23.05.2026).

					КВРКІ 022096.22.03.81 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



# ДОДАТОК Б (обов'язковий)

Копія креслення «Візуалізація результатів розробки»





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

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 11%

ID: 272148 Назва: БКР Кіберфізична система автоматизованого контролю умов експонування музейних об'єктів Додано в БД: 2026-05-25 Автора: Столярчук Роман Керівники: Тетяна КИСІЛЬ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	96503	710	2032 (2%)	24 (3%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

## 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:** Столярчук Роман

**Співавтор:**

**Назва:** Кіберфізична система автоматизованого контролю умов експонування музейних об'єктів

**Експерт:** Тетяна КИСІЛЬ

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

**Коефіцієнт подібності 1:** 2.29%

**Коефіцієнт подібності 2:** 0.23%

**Мікропробіли:** 3

**Заміна букв:** 0

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2026-05-25 11:45:48.0

**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:**

2026-05-25

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

## РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Столярчук Роман Миколайович

Тема: Кіберфізична система автоматизованого контролю умов експонування музейних об'єктів

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень   3   Кількість сторінок записки   59  

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка кіберфізичної системи автоматизованого контролю експонування музейних об'єктів

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 кваліфікаційної роботи проведено дослідження предметної області кіберфізичних систем та технологій Інтернету речей у контексті моніторингу музейного мікроклімату, проаналізовано існуючі комерційні рішення та бездротові стандарти передачі даних, зокрема LoRaWAN та закриті пропрієтарні системи, обґрунтовано доцільність використання стандарту Wi-Fi та протоколу MQTT, а також виконано чітку постановку задачі дослідження. У другому розділі проведено апаратне проектування вузла моніторингу та керування, де обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32 як центрального обчислювального ядра, підібрано сенсорну базу та виконавчі механізми, розроблено логічну та структурну схеми підключення периферії, а також проаналізовано енергоефективність архітектури з використанням режимів Deep Sleep та надійність передачі даних завдяки механізмам якості обслуговування. У третьому розділі виконано програмну реалізацію та тестування розробленої системи: написано вбудоване програмне забезпечення мовою C++ з використанням неблокувальних алгоритмів та логіки м'якого керування, розроблено

диспетчерський веб-дашборд на базі сучасного стека технологій (HTML5, CSS3, JavaScript, WebSockets) з інтеграцією бібліотеки Chart.js для візуалізації, а також проведено імітаційне моделювання та комплексне тестування сценаріїв роботи апаратної частини у віртуальному середовищі Wokwi із залученням брокера HiveMQ.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага аналізу предметної області.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи:

Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

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

8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

9. Оцінка дипломної роботи: добре (В / 86)

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

*К. Б. Н., доц. Корнук Ю. В.*

*доцент кафедри ІТЗ*

*"28" травня* 2026 р.

*[Підпис]* (підпис)

Зав. кафедри КПС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Роман СТОЛЯРЧУК

---

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-3

### 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 Інформаційна система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із оптимізацією планування завдань

Автор Роман СТОЛЯРЧУК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: канд.фіз-мат.наук, доц. Тетяна КИСІЛЬ

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:

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

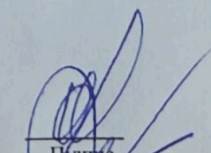
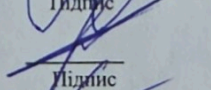
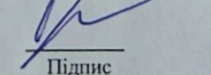
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 2,29%; та системою Anti-Plagiarism складає 1%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис  
  
Підпис  
  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Тетяна КИСІЛЬ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ