

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів  
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 022053.22.04.40 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група KI2-22-4

  
Підпис

Данила ЛОГВИНЕНКО  
Ініціали, прізвище

Керівник доктор філософії,  
Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Богдан САВЕНКО  
Ініціали, прізвище

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

  
Підпис

Тетяна КИСІЛЬ  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри КПС  
«01» 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

Логвиненку Данилі Івановичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів

Керівник проекту (роботи) Савенко Богдан Олегович, доктор філософії.

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) \_\_\_\_\_

Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів та постановка задачі щодо її удосконалення

Проектування кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів

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

Апаратне забезпечення проєкту

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи

Архітектура ПЗ проєкту


6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


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

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів та проектування кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів	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   
Підпис

Керівник кваліфікаційної роботи   
Підпис

Данила ЛОГВИНЕНКО  
Імя, ПРІЗВИЩЕ

Богдан САВЕНКО  
Імя, ПРІЗВИЩЕ

№ р я д к а	ф о р м а т	Позначення	Найменування	К і л · л и с т і в	№ ек з	П р и м і т к а
			<u>Текстові документи</u>			
1		КвРКІ 22053.22.04.40 ПЗ	Пояснювальна записка	72		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КвРКІ 22053.22.04.40 Е8	Апаратне забезпечення проєкту	1		
3		КвРКІ 22053.22.04.40 Е8	Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи	1		
4		КвРКІ 22053.22.04.40 Е8	Архітектура ПЗ проєкту	1		

					КвРКІ 22053.22.04.40 ВП			
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	Відомість проєкту	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Логвиненко				У	1	1
Перевір.		Савенко				ХНУ, КІ2-22-4		
Н. контр.		Кисіль						
Затв.		Павлова		01.06				

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів».

Автор роботи: Данила ЛОГВИНЕНКО.

Керівник роботи: Богдан САВЕНКО.

Пояснювальна записка: 72 с., 21 рис., 3 табл., 3 дод., 52 джерела.

Графічна частина: 3 креслення.

БАЗА ДАНИХ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МІКРОКОНТРОЛЕР,  
МОНІТОРИНГ, ПРОТОКОЛИ ВЗАЄМОДІЇ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню кіберфізичної системи контролю зберігання медичних препаратів на базі мікроконтролерної платформи. Актуальність теми зумовлена необхідністю використання кіберфізичних систем, які забезпечують безперервний інтегрований моніторинг фізичних параметрів середовища у режимі реального часу за допомогою мережі сенсорів, здійснюють локальну первинну обробку даних та передають телеметрію до хмарних серверів для візуалізації, аналізу й автоматичного сповіщення персоналу. Використання сучасних енергоефективних мікроконтролерів із бездротовими інтерфейсами зв'язку та спеціалізованих IoT-платформ дозволяє створити гнучку, масштабовану та відмовостійку архітектуру комп'ютеризованої системи контролю.

Метою дипломної роботи є забезпечення безперервного автоматизованого контролю умов зберігання медичних препаратів та оперативного виявлення аварійних порушень умов зберігання шляхом створення та інтеграції програмно-апаратних засобів кіберфізичної системи моніторингу в режимі реального часу.







Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів та постановка задачі.....	6
1.1 Нормативно-правове забезпечення та стандарти контролю умов зберігання медичних препаратів.....	6
1.2 Вимоги до умов зберігання медичних препаратів.....	9
1.3 Аналіз існуючих систем контролю зберігання медичних препаратів ...	14
1.4 Огляд існуючих наукових рішень в галузі.....	20
1.5 Постанова задачі.....	22
1.6 Висновки до першого розділу.....	23
2 Проектування кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів.....	24
2.1 Визначення апаратних і програмних підсистем кіберфізичної системи.....	24
2.2 Проектування сенсорного рівня системи.....	26
2.3 Проектування обчислювального рівня.....	32
2.4 Проектування мережевого рівня.....	37
2.5 Вибір хмарної платформи для кіберфізичної системи.....	40
2.6 Протоколи взаємодії в кіберфізичній системі.....	46
2.7 Висновки до другого розділу.....	48
3 Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів.....	50
3.1 Опис модулів апаратного та програмного забезпечення програмно-технічного засобу.....	50
3.2 Програмне забезпечення мікроконтролера та алгоритм функціонування.....	56
3.3 Опис процесу створення баз даних.....	60

КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ				
Зм.	Арк.	Недокум.	Підпис	Дата
Виконав		ЛОГВИНЕНКО		
Перевір.		Богдан САВЕНКО		
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		19.08
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		
			Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів.	
			Пояснювальна записка	
		Літера	Аркуш	Аркушів
		у	2	72
ХНУ КІ2-22-4				

3.4	Опис роботи мікроконтролера.....	66
3.5	Опис процесу реалізації та тестування.....	71
3.6	Висновки до третього розділу.....	75
	Висновки.....	76
	Перелік джерел посилань.....	78
	Додаток А Апаратне забезпечення проекту .....	84
	Додаток Б Архітектура пз для кіберфізичної системи .....	85
	Додаток В Архітектура ПЗ проекту.....	86

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

## ВСТУП

Актуальність дослідження. Забезпечення належних умов зберігання медичних препаратів, зокрема вакцин, термолабільних ліків та сироваток, є критично важливим завданням для галузі охорони здоров'я. Порушення температурного або режиму вологості на будь-якому етапі логістичного ланцюга («холодового ланцюга») призводить до безповоротної втрати ефективності медикаментів, псування дороговартісних ліків та виникнення прямої загрози життю і здоров'ю пацієнтів. Традиційні локальні засоби реєстрації (термоіндикатори або механічні логери) мають суттєвий недолік. Вони фіксують факт порушення постфактум, що унеможливлює оперативне втручання та запобігання псуванню продукції.

Ефективним вирішенням цієї проблеми є впровадження кіберфізичних систем (КФС), які забезпечують безперервний інтегрований моніторинг фізичних параметрів середовища у режимі реального часу за допомогою мережі сенсорів, здійснюють локальну первинну обробку даних та передають телеметрію до хмарних серверів для візуалізації, аналізу й автоматичного сповіщення персоналу. Використання сучасних енергоефективних мікроконтролерів із бездротовими інтерфейсами зв'язку та спеціалізованих IoT-платформ дозволяє створити гнучку, масштабовану та відмовостійку архітектуру комп'ютеризованої системи контролю.

Інтеграція сенсорних пристроїв із хмарними сервісами дозволяє не лише здійснювати моніторинг у реальному часі, але й накопичувати великі обсяги даних для подальшого аналізу, прогнозування та оптимізації умов зберігання. Це особливо актуально в умовах глобалізації фармацевтичних постачань, де необхідно забезпечити контроль якості продукції на всіх етапах транспортування та зберігання.

Крім того, впровадження кіберфізичних систем сприяє підвищенню рівня автоматизації та зменшенню впливу людського фактору, що є однією з

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основних причин порушення умов зберігання. Автоматизовані системи здатні оперативно виявляти критичні ситуації та генерувати сповіщення для персоналу, що значно підвищує рівень безпеки та надійності зберігання медичних препаратів. Це зумовлює актуальність розробки програмно-апаратних засобів кіберфізичної системи моніторингу умов зберігання медичних препаратів.

Метою дипломної роботи є забезпечення безперервного автоматизованого контролю умов зберігання медичних препаратів та оперативного виявлення аварійних порушень умов зберігання шляхом створення та інтеграції програмно-апаратних засобів кіберфізичної системи моніторингу в режимі реального часу.

Об'єкт дослідження – процеси збору, бездротового передавання, обробки, хмарного збереження та візуалізації телеметричних даних про параметри навколишнього середовища в системах моніторингу.

Предмет дослідження – методи програмно-апаратної інтеграції компонентів кіберфізичної системи, алгоритми первинної обробки сенсорних даних та логіка функціонування правил обробки телеметрії у хмарній платформі.

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

# 1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ УМОВ ЗБЕРІГАННЯ МЕДИЧНИХ ПРЕПАРАТІВ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

## 1.1 Нормативно-правове забезпечення та стандарти контролю умов зберігання медичних препаратів

Забезпечення належних умов зберігання медичних препаратів є критично важливим завданням, яке регламентується міжнародними стандартами якості та безпеки. Згідно з вимогами ВООЗ та стандартами Належної практики дистрибуції, усі лікарські засоби повинні зберігатися в контрольованих умовах із постійним моніторингом параметрів середовища [1, 2]. Дані стандарти спрямовані на забезпечення збереження якості продукції на всіх етапах логістичного ланцюга, від виробника до кінцевого споживача.

Згідно з цими вимогами, особлива увага приділяється контролю параметрів навколишнього середовища, які можуть впливати на стабільність препаратів. До таких параметрів належать температура, вологість, рівень освітлення та механічні впливи. Важливою умовою є безперервність моніторингу, що забезпечує своєчасне виявлення відхилень і можливість оперативного реагування. Крім того, стандарти передбачають обов'язкове документування всіх процесів, що дозволяє здійснювати аудит і підтверджувати відповідність умов зберігання встановленим нормам.

Рекомендації ВООЗ спрямовані на уніфікацію підходів до зберігання лікарських засобів у різних країнах. Ці рекомендації враховують специфіку різних кліматичних зон, рівень розвитку інфраструктури та особливості фармацевтичного ринку. Вони також містять детальні інструкції щодо організації складських приміщень, використання обладнання та підготовки персоналу.

Таким чином, міжнародні стандарти формують єдину основу для забезпечення якості та безпеки медичних препаратів, що є необхідною умовою їх ефективного використання у медичній практиці.

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Національне законодавство у сфері обігу лікарських засобів базується на міжнародних стандартах і адаптує їх до умов конкретної країни. В Україні нормативно-правова база регулює всі аспекти, пов'язані із зберіганням, транспортуванням та реалізацією медичних препаратів, забезпечуючи високий рівень контролю якості.

Нормативні документи встановлюють чіткі вимоги до організації складських приміщень, які повинні бути обладнані відповідними системами вентиляції, опалення та кондиціонування. Особлива увага приділяється зонуванню приміщень залежно від типу препаратів, що зберігаються, а також забезпеченню умов, які виключають можливість їх пошкодження або псування. Важливим аспектом є також контроль доступу до складів, що дозволяє запобігти несанкціонованому використанню лікарських засобів.

Крім того, нормативні вимоги передбачають обов'язкове ведення документації, яка містить інформацію про умови зберігання, результати вимірювань параметрів середовища та всі випадки відхилення від встановлених норм. Така документація є важливим інструментом контролю та дозволяє забезпечити прозорість процесів. У сучасних умовах дедалі частіше використовуються електронні системи обліку, які значно спрощують ведення документації та знижують ризик помилок.

Таким чином, національні нормативні акти забезпечують практичну реалізацію міжнародних стандартів та створюють правову основу для ефективного контролю умов зберігання медичних препаратів.

Розвиток інформаційних технологій зумовив необхідність впровадження автоматизованих систем контролю умов зберігання, які дозволяють підвищити точність, надійність та ефективність моніторингу. Сучасні нормативні документи визначають ряд вимог до таких систем, які повинні забезпечувати безперервний збір, обробку та зберігання даних.

Однією з ключових вимог є висока точність вимірювань, що досягається за рахунок використання сертифікованих сенсорів та регулярного калібрування

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

обладнання. Не менш важливою є надійність системи, яка повинна забезпечувати безперебійну роботу навіть у разі виникнення технічних збоїв. Для цього використовуються резервні джерела живлення, дублювання каналів зв'язку та інші засоби підвищення надійності.

Крім того, автоматизовані системи повинні забезпечувати захист даних від несанкціонованого доступу та їх цілісність. Це особливо важливо у фармацевтичній галузі, де дані про умови зберігання мають юридичне значення. Системи повинні також підтримувати функції аудиту, що дозволяє відстежувати всі дії користувачів і зміни в системі.

Важливою функцією є автоматичне формування сповіщень у разі відхилення параметрів від встановлених норм. Це дозволяє оперативно реагувати на потенційні загрози та запобігати псуванню препаратів. У цьому контексті кіберфізичні системи є найбільш ефективним рішенням, оскільки вони забезпечують інтеграцію всіх необхідних функцій у єдиній системі.

Валідація є невід'ємною частиною впровадження систем контролю умов зберігання медичних препаратів і передбачає підтвердження їх відповідності встановленим вимогам. Цей процес включає комплекс заходів, спрямованих на перевірку функціональності, точності та надійності системи.

Одним із ключових етапів валідації є калібрування сенсорів, яке забезпечує точність вимірювань і відповідність отриманих даних реальним значенням параметрів середовища. Крім того, проводиться тестування програмного забезпечення, яке включає перевірку алгоритмів обробки даних, коректності формування сповіщень та функціонування інтерфейсу користувача.

Сертифікація систем підтверджує їх відповідність міжнародним і національним стандартам і є обов'язковою умовою їх використання у фармацевтичній галузі. Наявність сертифіката свідчить про те, що система пройшла всі необхідні перевірки та може використовуватися для контролю умов зберігання медичних препаратів.

У цілому, процеси валідації та сертифікації забезпечують високий рівень

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

довіри до автоматизованих систем і гарантують їх ефективність у практичному застосуванні.

## 1.2 Вимоги до умов зберігання медичних препаратів

Медичні препарати є складними хімічними та біологічними речовинами, властивості яких можуть змінюватися під впливом зовнішніх факторів. Порушення умов зберігання призводить до деградації активних компонентів, втрати стерильності або зміни фармакологічної дії.

Температурний режим є одним із найважливіших факторів, що визначають стабільність та ефективність медичних препаратів під час їх зберігання. Більшість лікарських засобів містять активні хімічні або біологічні компоненти, які можуть змінювати свої властивості під впливом температури. Особливо це стосується вакцин, інсуліну, біопрепаратів та антибіотиків, для яких навіть незначні відхилення від допустимого температурного діапазону можуть призвести до повної втрати терапевтичної дії. Наприклад, для вакцин встановлено строгий температурний діапазон від +2°C до +8°C, при якому забезпечується збереження їх імуногенних властивостей.

Порушення температурного режиму може мати незворотні наслідки, такі як денатурація білкових структур, розклад активних речовин або зміна фізичного стану препарату. Важливою особливістю є те, що такі зміни не завжди можна виявити візуально, що створює додаткову небезпеку для пацієнтів.

Саме тому сучасні системи зберігання передбачають безперервний моніторинг температури з використанням високоточних сенсорів та автоматизованих систем сигналізації (рис.1.1).

Кіберфізичні системи дозволяють реалізувати ефективний контроль температури шляхом збору даних у режимі реального часу, їх передачі на сервер та подальшого аналізу. У разі виходу параметра за допустимі межі

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

система автоматично генерує попередження або активує виконавчі механізми, наприклад, охолоджувальні установки. Це забезпечує оперативне реагування та мінімізує ризики псування препаратів.



Рисунок 1.1 – Схема контролю температури в КФС

Вологість повітря є важливим параметром, який суттєво впливає на фізико-хімічні властивості лікарських засобів, особливо тих, що мають тверду форму, таких як таблетки, капсули або порошки. Підвищена вологість може призводити до гігроскопічного поглинання вологи препаратом, що викликає зміну його структури, втрату міцності або навіть руйнування. Крім того, вологе середовище сприяє розвитку мікроорганізмів, що може негативно вплинути на стерильність продукції.

З іншого боку, занадто низька вологість також може бути небажаною, оскільки призводить до висихання компонентів, що впливає на їх стабільність і ефективність. Оптимальний рівень відносної вологості для більшості препаратів становить 40–60%, однак для окремих категорій можуть встановлюватися специфічні вимоги залежно від складу та форми випуску.

Контроль вологості здійснюється за допомогою спеціалізованих сенсорів, які інтегруються у кіберфізичні системи (рис.1.2).



Рисунок 1.2 – Схема впливу вологості на медичні препарати

Такі системи забезпечують постійний моніторинг і дозволяють оперативно реагувати на зміни умов середовища. У разі перевищення допустимого рівня вологості система може активувати осушувачі повітря або надіслати сигнал тривоги відповідальному персоналу. Таким чином, підтримання стабільного рівня вологості є необхідною умовою забезпечення якості та безпеки медичних препаратів.

Освітлення є ще одним фактором, який може суттєво впливати на стабільність лікарських засобів, особливо тих, що є фоточутливими. До таких препаратів належать деякі антибіотики, вітаміни, гормональні засоби та інші сполуки, які під дією світла можуть вступати в хімічні реакції, що призводять до їх розкладу або втрати активності. Найбільш небезпечним є ультрафіолетове випромінювання, яке здатне руйнувати молекулярну структуру діючих речовин.

З метою захисту препаратів від світлового впливу використовуються спеціальні умови зберігання, зокрема затемнені приміщення або упаковка з матеріалів, що не пропускають світло. У деяких випадках застосовуються спеціальні контейнери або холодильні установки з обмеженим доступом світла. Однак навіть за таких умов необхідно здійснювати контроль рівня освітленості, особливо у складських приміщеннях або під час транспортування.

Кіберфізичні системи дозволяють автоматизувати цей процес шляхом

використання датчиків освітлення, які фіксують інтенсивність світлового потоку. У разі перевищення допустимого рівня система може генерувати сигнал тривоги або автоматично вмикати захисні механізми, наприклад, затемнення. Це забезпечує додатковий рівень захисту препаратів і знижує ризик їх деградації.

Контроль терміну придатності є обов'язковою складовою процесу зберігання медичних препаратів, оскільки після закінчення встановленого терміну їх використання може бути неефективним або навіть небезпечним. Термін придатності визначається виробником на основі досліджень стабільності препарату та вказується на упаковці. Після його завершення препарат підлягає вилученню з обігу та утилізації.

Традиційні методи контролю термінів придатності передбачають ручну перевірку, що є трудомістким і підвищує ймовірність помилок. У великих складських системах або аптечних мережах це може призводити до накопичення прострочених препаратів або їх випадкового використання.

Використання кіберфізичних систем дозволяє автоматизувати процес контролю термінів придатності. Дані про кожен препарат зберігаються в базі даних, а система регулярно порівнює поточну дату з кінцевою датою використання. У разі наближення терміну придатності система надсилає попередження, що дає змогу своєчасно реалізувати або списати препарат. Якщо термін вже минув, система може автоматично заблокувати його використання.

Таким чином, автоматизація контролю термінів придатності значно підвищує безпеку використання лікарських засобів та ефективність управління запасами.

Умови транспортування медичних препаратів є критично важливими для збереження їх якості, оскільки саме на цьому етапі найчастіше виникають порушення встановлених режимів. Особливо це стосується препаратів, що потребують дотримання так званого «холодового ланцюга», тобто безперервного підтримання заданої температури від моменту виробництва до

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кінцевого споживача.

Порушення холодового ланцюга навіть на короткий час може призвести до втрати ефективності препарату. Наприклад, вакцини після заморожування або перегріву можуть втратити свої властивості без можливості відновлення. Саме тому транспортування здійснюється у спеціалізованих контейнерах з термоізоляцією та системами контролю температури.

Сучасні кіберфізичні системи дозволяють здійснювати моніторинг умов транспортування в режимі реального часу. Використання GPS-модулів у поєднанні з сенсорами температури та вологості дає змогу не лише контролювати стан вантажу, але й відстежувати його місцезнаходження. У разі відхилення параметрів система негайно повідомляє відповідальних осіб, що дозволяє оперативно вжити заходів (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Загальна структура контролю параметрів зберігання медичних препаратів

Забезпечення належних умов зберігання медичних препаратів потребує комплексного підходу, який включає одночасний контроль декількох параметрів середовища. Такий підхід реалізується за допомогою кіберфізичних систем, що інтегрують сенсори, обчислювальні модулі та програмне забезпечення в єдину систему моніторингу.

На фізичному рівні розташовуються сенсори, які вимірюють температуру, вологість, освітленість та інші параметри. Зібрані дані передаються до контролера, який виконує первинну обробку та передає інформацію через мережу до серверної або хмарної інфраструктури. На цьому рівні здійснюється зберігання, аналіз даних та порівняння їх із заданими нормативами.

У разі виявлення відхилень система генерує сигнали тривоги, які можуть надходити до користувача у вигляді повідомлень на мобільні пристрої або комп'ютери. Крім того, система може автоматично керувати виконавчими пристроями, такими як кондиціонери, обігрівачі або осушувачі повітря.

Таким чином, кіберфізична система забезпечує безперервний, точний і надійний контроль умов зберігання, що дозволяє значно підвищити якість та безпеку медичних препаратів.

### 1. 3 Аналіз існуючих систем контролю зберігання медичних препаратів

Контроль умов зберігання медичних препаратів історично здійснювався за допомогою простих технічних засобів, таких як ртутні або електронні термометри, гігрометри та паперові журнали обліку. У таких системах вимірювання параметрів навколишнього середовища проводиться періодично, а результати фіксуються вручну відповідальним персоналом. Подібний підхід широко застосовується у невеликих аптечних закладах та складських приміщеннях із низьким рівнем автоматизації.

Основним недоліком традиційних методів є їх залежність від людського фактора. Помилки при зчитуванні показників, несвоєчасне внесення даних або їх фальсифікація можуть призвести до втрати достовірності інформації. Крім того, періодичний характер вимірювань не дозволяє виявляти короточасні відхилення параметрів, які також можуть негативно впливати на якість препаратів. Відсутність автоматичного аналізу та системи сповіщення значно знижує ефективність такого підходу.

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ще одним суттєвим недоліком є відсутність централізованого зберігання даних, що ускладнює проведення аудиту та перевірку відповідності умов зберігання нормативним вимогам. Таким чином, традиційні системи не забезпечують необхідного рівня надійності та безпеки.

З розвитком електроніки з'явилися автономні пристрої для реєстрації параметрів середовища, так звані логери даних. Вони оснащені вбудованими сенсорами температури, вологості та пам'яттю для збереження результатів вимірювань протягом тривалого часу. Такі пристрої можуть працювати без підключення до мережі та використовуються як у стаціонарних умовах, так і під час транспортування.

Перевагою логерів є можливість автоматичного запису даних із заданою періодичністю, що дозволяє отримати більш детальну картину змін параметрів середовища. Після завершення періоду моніторингу інформація зчитується та аналізується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Однак такі системи мають обмеження. Зокрема, відсутність передачі даних у реальному часі не дозволяє оперативно реагувати на відхилення. У разі порушення температурного режиму користувач дізнається про це лише після аналізу даних, коли ситуацію вже неможливо виправити. Крім того, необхідність фізичного доступу до пристрою для зчитування інформації ускладнює експлуатацію в масштабних системах.

Сучасний етап розвитку технологій характеризується впровадженням систем, що базуються на концепції Internet of Things. IoT-системи дозволяють об'єднувати сенсори, контролери та сервери в єдину інформаційну мережу, що забезпечує безперервний моніторинг параметрів у режимі реального часу.

У таких системах дані з сенсорів передаються через бездротові або дротові канали зв'язку на сервер або хмарну платформу, де відбувається їх обробка, аналіз і зберігання. Користувач має можливість отримувати інформацію через веб-інтерфейс або мобільний додаток, а також налаштовувати порогові значення для автоматичного сповіщення.

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевагами IoT-рішень є:

- безперервний контроль параметрів;
- можливість віддаленого доступу;
- автоматичне формування звітів;
- інтеграція з іншими інформаційними системами;
- висока масштабованість.

Разом із тим, впровадження таких систем потребує вирішення питань кібербезпеки, захисту даних та забезпечення надійності зв'язку.

Кіберфізичні системи є логічним розвитком IoT-технологій, оскільки поєднують можливості збору даних, їх аналізу та автоматичного керування фізичними процесами. На відміну від звичайних IoT-систем, КФС не лише фіксують стан середовища, але й активно впливають на нього.

У контексті зберігання медичних препаратів це означає, що система може не лише виявити перевищення температури, але й автоматично увімкнути систему охолодження або змінити режим роботи обладнання. Такий підхід значно підвищує ефективність контролю та мінімізує ризики, пов'язані з людським фактором.

КФС також використовують елементи штучного інтелекту для прогнозування можливих відхилень на основі аналізу історичних даних. Це дозволяє здійснювати превентивні заходи та підвищує надійність системи в цілому.

Різні типи систем відрізняються за рівнем автоматизації, функціональними можливостями та ступенем інтеграції з інформаційними технологіями.

Традиційні методи базуються переважно на ручному контролі та періодичних вимірюваннях, тоді як сучасні рішення використовують електронні пристрої, мережеві технології та програмні засоби для забезпечення безперервного моніторингу. Перехід від простих до більш складних систем зумовлений зростанням вимог до якості зберігання лікарських засобів і

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



технологіями. У сучасній фармацевтичній практиці поряд із теоретичними підходами активно використовуються комерційні рішення, що реалізують функції безперервного моніторингу параметрів середовища.

Серед таких рішень можна виділити систему Sensitech TempTale, яка широко застосовується для контролю температурного режиму під час транспортування та зберігання лікарських засобів [4]. Вона дозволяє здійснювати запис температурних даних та їх подальший аналіз, що є важливим для забезпечення відповідності стандартам якості. Іншим прикладом є система Testo Saveris 2, яка базується на використанні хмарних технологій і забезпечує віддалений контроль температури та вологості в режимі реального часу з можливістю автоматичного формування сповіщень.

Також варто відзначити рішення ELPRO LIBERO, яке використовується у фармацевтичній логістиці для моніторингу температури під час транспортування вакцин та біопрепаратів [5]. Дана система поєднує функції реєстрації даних і їх безпечного зберігання з можливістю генерації звітів відповідно до вимог міжнародних стандартів.

Ще одним прикладом є платформа Monnit ALTA, яка використовує бездротові сенсори для контролю різних параметрів середовища та забезпечує інтеграцію з хмарними сервісами [6].

Крім того, на ринку представлені рішення від великих промислових компаній, таких як Honeywell, Siemens та Bosch.

Зокрема, системи моніторингу Honeywell (наприклад, Honeywell Environmental Monitoring Solutions) використовуються для контролю параметрів у фармацевтичних складах і лабораторіях, забезпечуючи високу точність вимірювань та відповідність стандартам GDP [7].

Рішення компанії Siemens, такі як платформа Desigo або MindSphere, дозволяють інтегрувати сенсорні мережі з хмарною аналітикою та системами автоматизації будівель [8].

У свою чергу, Bosch пропонує IoT-рішення на базі Bosch IoT Suite, які

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечують централізований моніторинг, аналіз даних і керування обладнанням у реальному часі [9].

Незважаючи на високу ефективність таких комерційних рішень, вони мають ряд обмежень, зокрема високу вартість впровадження, залежність від виробника та обмежені можливості адаптації під специфічні потреби конкретного підприємства. Крім того, багато з них орієнтовані переважно на моніторинг параметрів без реалізації повноцінних функцій автономного керування середовищем.

Традиційні методи контролю, що історично використовувалися у фармацевтичній практиці, базуються переважно на ручному вимірюванні параметрів середовища та періодичному внесенні результатів у журнали обліку. Такий підхід характеризується низьким рівнем автоматизації, значною залежністю від людського фактора та відсутністю можливості оперативного реагування на відхилення.

У свою чергу, сучасні рішення використовують електронні пристрої, мережеві технології та програмні засоби для забезпечення безперервного моніторингу, що значно підвищує ефективність контролю.

Перехід від простих до більш складних систем зумовлений зростанням вимог до якості зберігання лікарських засобів і необхідністю відповідності міжнародним стандартам. У цьому контексті особливого значення набувають кіберфізичні системи, які не лише здійснюють моніторинг параметрів середовища, але й забезпечують автоматичне керування процесами зберігання.

З метою визначення переваг і недоліків кожного підходу проведено порівняльний аналіз за ключовими критеріями, такими як можливість моніторингу в реальному часі, рівень автоматизації реагування, залежність від людського фактора, наявність віддаленого доступу та можливості аналітики. Такий підхід дозволяє обґрунтовано оцінити ефективність різних систем і підтверджує доцільність використання кіберфізичних систем як найбільш сучасного рішення у сфері контролю умов зберігання медичних препаратів.

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 1.4 Огляд існуючих наукових рішень в галузі

Упродовж останніх років питання автоматизації контролю умов зберігання медичних препаратів стало одним із ключових напрямів розвитку фармацевтичної логістики та систем моніторингу. Основна увага сучасних досліджень зосереджена на використанні технологій IoT, кіберфізичних систем, хмарних сервісів та бездротових сенсорних мереж для забезпечення безперервного контролю температури, вологості та інших параметрів середовища.

У роботі [12] автори запропонували кіберфізичну архітектуру для фармацевтичного виробництва та моніторингу умов зберігання препаратів. Дослідження демонструє використання концепції Pharma 4.0 для інтеграції сенсорів, мережевих технологій та аналітичних модулів у єдину систему контролю. Особливу увагу приділено автоматичному реагуванню системи на відхилення параметрів середовища.

У статті [13] розглянуто застосування IoT-платформ для моніторингу лікарських засобів під час зберігання та транспортування. Автори показали, що використання сенсорів температури та хмарних сервісів дозволяє зменшити ризик псування препаратів на 30–40%, а також покращити прозорість логістичних процесів.

Дослідження [14] присвячене створенню інтелектуальної системи управління запасами фармацевтичної продукції. У роботі реалізовано інтеграцію температурних сенсорів, GPS-модулів та хмарної аналітики для відстеження умов транспортування препаратів у реальному часі.

У роботі [15] представлено бездротову систему багатоточкового вимірювання температури для фармацевтичних процесів ліофілізації. Автори використовують мережу бездротових сенсорів для контролю температурних режимів у декількох точках одночасно, що дозволяє значно підвищити точність моніторингу.

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У роботі [16] наведено огляд архітектур Industrial IoT та принципів побудови кіберфізичних систем для задач автоматизованого моніторингу, обробки даних та керування фізичними процесами.

У статті [17] досліджуються питання безпеки медичних кіберфізичних систем. Автори пропонують використання fog-computing архітектури та механізмів захисту даних для забезпечення стабільної роботи медичних систем моніторингу в режимі реального часу.

Практичне значення для задач контролю умов зберігання мають також роботи у сфері моніторингу небезпечних речовин. У статті [18] запропоновано IoT-систему для контролю температури та умов зберігання хімічних речовин із використанням автоматичних попереджень та віддаленого доступу.

У роботі [19] описано платформу раннього попередження для логістичних процесів із використанням хмарних сервісів та сенсорних мереж. Дослідження демонструє ефективність централізованого моніторингу параметрів середовища та автоматичного формування сигналів тривоги.

Проблему контролю аномалій у кіберфізичних системах розглянуто у статті [20]. Автори запропонували методи аналізу часових рядів та автоматичного виявлення відхилень у роботі сенсорних систем. Це є важливим для фармацевтичних систем, де навіть короточасне порушення температурного режиму може спричинити псування препаратів.

У роботі [21] запропоновано використання blockchain-технологій для забезпечення прозорості та достовірності даних у фармацевтичному ланцюгу постачання. Система дозволяє відстежувати умови транспортування та історію переміщення препаратів на всіх етапах логістики.

Таким чином, аналіз сучасних наукових джерел показує, що найбільш перспективними напрямками розвитку систем контролю умов зберігання медичних препаратів є:

- використання IoT та кіберфізичних систем;
- бездротовий моніторинг параметрів середовища;

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- застосування хмарних платформ;
- автоматичне виявлення аномалій;
- інтеграція систем аналітики та прогнозування;
- забезпечення безпеки та цілісності даних.

У результаті аналізу існуючих систем контролю умов зберігання медичних препаратів встановлено, що традиційні методи та автономні пристрої мають обмежені можливості та не відповідають сучасним вимогам якості та безпеки. Найбільш ефективними є системи, побудовані на основі IoT та кіберфізичних технологій, які забезпечують безперервний моніторинг, автоматичне реагування на відхилення та інтеграцію з інформаційними системами. Це робить їх оптимальним вибором для реалізації сучасних рішень у сфері зберігання медичних препаратів.

### 1.5 Постановка задачі

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наступні задачі.

1. Провести аналіз нормативних вимог щодо умов зберігання медичних препаратів та виконати порівняльний огляд існуючих систем моніторингу параметрів мікроклімату.
2. Обґрунтувати архітектуру кіберфізичної системи, вибрати апаратну платформу мікроконтролера, сенсорів та протоколів бездротової передачі даних.
3. Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення вимірювального вузла системи на базі обраного мікроконтролера для збору, первинної обробки та фільтрації даних.
4. Виконати конфігурування хмарного рівня системи на базі платформи ThingsBoard.
5. Провести експериментальне тестування розробленої системи, оцінити

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

її швидкодію та відмовостійкість у разі виникнення штучних аварійних ситуацій чи втрати зв'язку.

## 1.6 Висновки до першого розділу

У межах розділу 1 проведено аналіз предметної області та обґрунтовано необхідність створення спеціалізованої комп'ютеризованої системи контролю середовища для медичної галузі.

Отримано такі основні результати:

1. На основі аналізу медичних регламентів (зокрема стандартів належної практики зберігання GDP) визначено, що ключовими параметрами контролю «холодового ланцюга» є температура (найчастіше строгий інтервал  $+2\dots+8^{\circ}\text{C}$ ) та відносна вологість повітря.

2. Виконано порівняльний аналіз існуючих комерційних рішень для моніторингу складів та показано, що більшість з них є закритими системами з високою вартістю ліцензій та обмеженими можливостями адаптації під специфічні потреби лікувальних установ.

3. Доведено доцільність застосування кіберфізичних систем, яка дозволяє об'єднати фізичні процеси вимірювання мікроклімату з обчислювальними хмарними ресурсами для гнучкого управління та оповіщення персоналу.

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ УМОВ ЗБЕРІГАННЯ МЕДИЧНИХ ПРЕПАРАТІВ

### 2.1 Визначення апаратних і програмних підсистем кіберфізичної системи

Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів відноситься до класу розподілених систем, у яких фізичні процеси тісно інтегровані з програмно-апаратними засобами обробки даних. Така інтеграція дозволяє забезпечити не лише фіксацію параметрів середовища, а й їх інтерпретацію, прогнозування та автоматизоване прийняття рішень.

Однією з ключових особливостей подібних систем є робота в режимі реального часу. Контроль температури, вологості та інших параметрів повинен здійснюватися безперервно, оскільки навіть короткочасне відхилення від нормативних значень може призвести до втрати якості або повної непридатності медичних препаратів. У зв'язку з цим система повинна забезпечувати мінімальні затримки при зборі, передачі та обробці даних.

Ще однією важливою характеристикою є надійність функціонування. Кіберфізична система повинна зберігати працездатність навіть у випадку часткових відмов окремих компонентів. Це досягається за рахунок використання резервування, дублювання критичних вузлів, а також застосування механізмів перевірки цілісності даних. Надійність особливо важлива у медичній сфері, де помилки можуть мати серйозні наслідки.

Важливим аспектом є також безпека даних та захист інформації. Оскільки система передає та зберігає дані через мережеві та хмарні сервіси, необхідно забезпечити їх захист від несанкціонованого доступу. Це включає використання методів шифрування, автентифікації користувачів та контролю доступу до ресурсів системи. Крім того, важливим є забезпечення цілісності даних, щоб уникнути їх спотворення під час передачі.

Окрему увагу слід приділити енергоефективності, особливо для сенсорних і обчислювальних вузлів. Оптимізація енергоспоживання є

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

важливою умовою тривалої та стабільної роботи компонентів, особливо у випадку автономного живлення.

Також важливою є здатність системи до взаємодії з різними пристроями та програмними платформами. Використання стандартних протоколів обміну даними спрощує інтеграцію компонентів і забезпечує можливість подальшої модернізації системи.

Проектування кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів передбачає створення багаторівневої структури, що об'єднує фізичні процеси з обчислювальними ресурсами. Такий підхід дозволяє забезпечити безперервний моніторинг параметрів середовища та оперативне реагування на їх зміни.

Архітектура системи включає п'ять основних рівнів: сенсорний, обчислювальний, мережевий, хмарний та користувацький.

Сенсорний рівень здійснює збір даних із фізичного середовища.

Обчислювальний рівень забезпечує первинну обробку інформації.

Мережевий рівень відповідає за передачу даних.

Хмарний рівень реалізує зберігання та аналітику, а користувацький забезпечує взаємодію оператора із системою.

Система функціонує як єдиний комплекс, де кожен рівень виконує свою роль (рис.2.1).

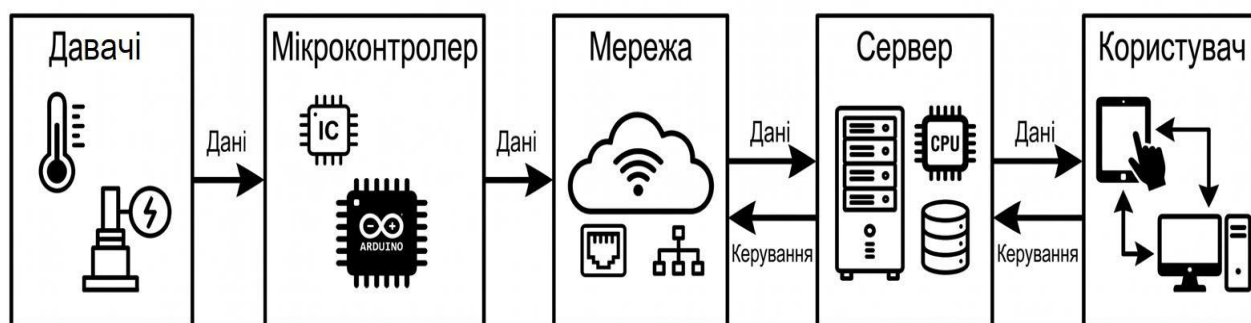


Рисунок 2.1 – Структурна схема кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів

Кіберфізична система повинна відповідати вимогам масштабованості та гнучкості. У процесі експлуатації може виникнути потреба розширення системи, наприклад додавання нових датчиків, підключення додаткових приміщень або інтеграція з іншими інформаційними системами. Архітектура, побудована за модульним принципом, дозволяє реалізувати такі зміни без суттєвого втручання у вже функціонуючу систему.

З точки зору програмного забезпечення, доцільним є використання модульної структури, яка забезпечує розподіл функцій між окремими компонентами. Це спрощує процес розробки, тестування та супроводу системи, а також дозволяє оновлювати окремі модулі без впливу на роботу всієї системи.

Таким чином, визначення апаратних і програмних підсистем кіберфізичної системи базується не лише на їх функціональному поділі за рівнями, але й на врахуванні основних вимог до системи: надійності, безпеки, масштабованості та здатності працювати в режимі реального часу. Це створює основу для подальшого детального розгляду кожного рівня архітектури.

## 2.2 Проектування сенсорного рівня системи

Сенсорний рівень є ключовим елементом системи, оскільки саме він відповідає за отримання достовірної інформації про умови зберігання медичних препаратів.

Основними параметрами, що підлягають контролю, є температура та відносна вологість повітря. Для деяких типів препаратів додатково може контролюватися рівень освітленості та факт відкриття дверей холодильного обладнання.

Температура є найбільш критичним параметром, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до втрати ефективності лікарських засобів. Вологість також впливає на стабільність препаратів, особливо у випадку порошкових або біологічних форм.

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Розміщення давачів є одним із критичних етапів проєктування кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів, оскільки від правильності їх встановлення безпосередньо залежить достовірність отриманих даних. Навіть за використання високоточних сенсорів некоректне їх розташування може призвести до значних похибок вимірювання та, як наслідок, до неправильних управлінських рішень.

Перш за все, необхідно враховувати, що температура всередині холодильного обладнання не є рівномірною. У різних зонах камери можуть спостерігатися температурні градієнти, які виникають через циркуляцію повітря, роботу компресора, частоту відкривання дверей та розміщення самих препаратів.

Найбільш стабільною зоною, як правило, є середня частина холодильника, де вплив зовнішніх факторів мінімізований. Саме тому встановлення давачів на середньому рівні дозволяє отримати значення, які найбільш точно відображають середні умови зберігання.

Важливо також уникати розміщення датчиків у безпосередній близькості до джерел тепла або холоду, зокрема компресора, випарника чи вентиляційних отворів. У цих зонах температура може суттєво відрізнятись від середнього значення. Поблизу компресора вона зазвичай вища, тоді як біля охолоджуючих елементів нижча. Якщо давач буде розташований у такій зоні, система може фіксувати помилкові значення, що не відповідають реальним умовам зберігання препаратів.

Окрему увагу слід приділити впливу дверей холодильника. Під час їх відкривання відбувається різке потрапляння теплого повітря ззовні, що викликає короточасні, але значні коливання температури. Тому не рекомендується встановлювати давачі безпосередньо біля дверей або на їх внутрішній поверхні.

Оптимальним є розміщення давачів на певній відстані від дверей, що дозволяє зменшити вплив цих коливань на результати вимірювань (рис.2.2).

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27



оскільки закриття давача може призвести до інерційності вимірювань та спотворення результатів.

Таким чином, правильне розміщення давачів є комплексним завданням, яке потребує врахування фізичних процесів, що відбуваються всередині холодильного обладнання. Виконання наведених рекомендацій дозволяє значно підвищити точність вимірювань, надійність системи та ефективність контролю умов зберігання медичних препаратів.

Вибір давачів температури та відносної вологості є одним із ключових етапів проєктування кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів. Від характеристик сенсорів безпосередньо залежить точність моніторингу, своєчасність виявлення відхилень та загальна надійність системи.

Одним із основних критеріїв вибору є точність вимірювань. Для медичних препаратів важливо дотримання чітко визначених температурних режимів (наприклад, +2...+8 °C для вакцин), тому навіть незначні похибки можуть призвести до некоректної оцінки умов зберігання.

Наступним важливим параметром є діапазон вимірювання. Давач повинен перекривати як робочі, так і можливі аварійні значення температури та вологості. Це дозволяє фіксувати не лише нормальні умови, а й критичні відхилення.

Також суттєве значення має швидкодія (частота оновлення даних). У системах моніторингу бажано отримувати дані з мінімальною затримкою, особливо у випадках різких змін температури, наприклад при відкритті холодильного обладнання.

Важливим критерієм є тип інтерфейсу передачі даних. Цифрові інтерфейси (I2C, OneWire, власні протоколи) забезпечують більшу завадостійкість та простоту інтеграції з мікроконтролерами порівняно з аналоговими сигналами.

Крім того, необхідно враховувати стабільність та довготривалу надійність

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи сенсора. У процесі експлуатації можливий дрейф показників, тому для відповідальних застосувань доцільно використовувати більш стабільні та калібровані датчики.

Не менш важливими є такі фактори, як:

- енергоспоживання (особливо для автономних систем);
- вартість;
- простота підключення та обслуговування;
- можливість калібрування.

З урахуванням зазначених критеріїв для реалізації системи були розглянуті датчики типу DHT22 та SHT31, які належать до цифрових сенсорів температури та вологості та широко застосовуються у подібних задачах.

Датчик DHT22 (також відомий як AM2302) є цифровим датчиком температури та відносної вологості повітря. Він широко використовується у вбудованих системах та IoT-проектах завдяки простоті підключення та невисокій вартості. Датчик містить ємнісний сенсор вологості та терморезистор для вимірювання температури, а передача даних здійснюється через цифровий інтерфейс (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Датчик температури та вологості DHT22 [22]

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



На відміну від DHT22, давач SHT31 забезпечує вищу точність та стабільність вимірювань, що є важливим для систем контролю умов зберігання медичних препаратів. Крім того, використання інтерфейсу I2C спрощує інтеграцію декількох давачів у межах однієї системи.

Порівняльна характеристика давачів DHT22 та SHT31 наведена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика давачів DHT22 та SHT31

Параметр	DHT22	SHT31
Діапазон температури	-40...+80°C	-40...+125°C
Похибка температури	±0,5°C	±0,2°C
Діапазон вологості	0-100%	0-100%
Похибка вологості	±2-5%	±2%
Частота оновлення	~0,5 Гц (1 раз/2 с)	до 10 Гц
Інтерфейс	Однопровідний (власний)	I2C
Стабільність показників	Середня	Висока
Енергоспоживання	Низьке	Низьке
Вартість	Нижча	Вища
Складність інтеграції	Низька	Середня

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що давач DHT22 є доцільним для використання у простих системах моніторингу, де не висуваються підвищені вимоги до точності та швидкодії.

У свою чергу, давач SHT31 забезпечує вищу точність, стабільність та швидкість вимірювань, що робить його більш придатним для систем контролю умов зберігання медичних препаратів, де важлива достовірність даних.

Таким чином, вибір конкретного давача залежить від вимог до системи.

### 2.3 Проектування обчислювального рівня

Обчислювальний рівень кіберфізичної системи є центральною ланкою, що забезпечує інтеграцію фізичних компонентів із цифровими технологіями. Саме на цьому рівні відбувається обробка даних, прийняття рішень та

координація роботи всієї системи. Від правильного вибору апаратної платформи та реалізації програмної логіки залежить ефективність, швидкодія та надійність системи контролю умов зберігання медичних препаратів.

Основною функцією обчислювального рівня є перетворення сирих даних, отриманих від сенсорів, у структуровану інформацію, придатну для аналізу та передачі. Крім того, цей рівень виконує функції локального контролю, що дозволяє системі реагувати на відхилення навіть у разі втрати зв'язку із сервером.

У якості апаратної основи доцільно використовувати мікроконтролер типу ESP32, який поєднує високу продуктивність, низьке енергоспоживання та наявність вбудованих засобів бездротового зв'язку. Даний мікроконтролер має двоядерний процесор, що дозволяє розділяти задачі збору даних та комунікації, а також достатній обсяг оперативної пам'яті для обробки інформації у реальному часі (рис.2.5).

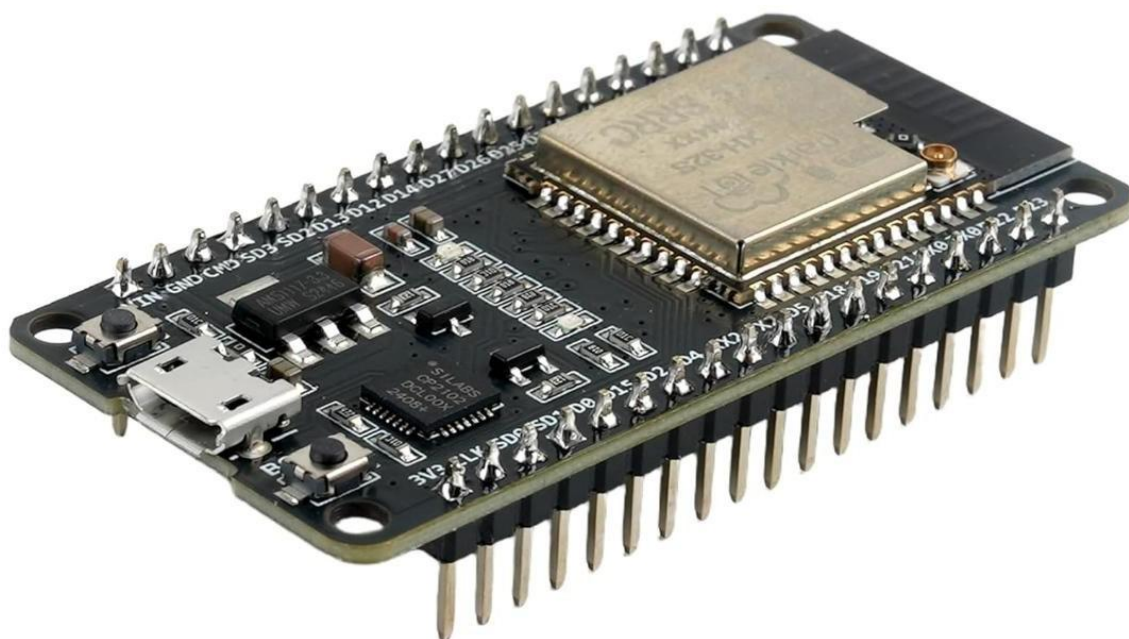


Рисунок 2.5 – Мікроконтролер ESP32 [24]

Обчислювальний модуль взаємодіє із сенсорами через цифрові або аналогові інтерфейси. Найчастіше використовуються протоколи I2C або OneWire, які забезпечують надійний обмін даними та простоту підключення.

Отримані дані проходять етап первинної обробки, що включає фільтрацію шумів, усереднення значень та перевірку коректності вимірювань.

Особливу увагу приділено реалізації алгоритмів аналізу. Значення температури та вологості порівнюються із заздалегідь заданими порогами. У разі виходу параметрів за допустимі межі система формує сигнал тривоги. Такий підхід дозволяє оперативно реагувати на небезпечні ситуації та запобігати псуванню медичних препаратів.

Важливою функцією обчислювального рівня є буферизація даних. У випадку тимчасової відсутності мережевого з'єднання система зберігає вимірювання у внутрішній пам'яті, а після відновлення зв'язку передає їх на сервер. Це дозволяє уникнути втрати інформації та забезпечує цілісність даних.

Крім того, обчислювальний рівень реалізує функції енергозбереження. Мікроконтролер може переходити у режим сну між циклами вимірювання, що є важливим для автономних систем із живленням від батарей.

Програмна реалізація базується на циклічному алгоритмі. Після ініціалізації системи та налаштування всіх модулів запускається основний цикл, у якому послідовно виконуються операції збору, обробки, аналізу та передачі даних. Такий підхід забезпечує стабільність роботи та передбачуваність поведінки системи.

Розглянемо детальніше функціональність обчислювального модуля.

Функціональна схема обчислювального модуля відображає логічну структуру та взаємодію основних блоків мікроконтролерної частини кіберфізичної системи (рис.2.5). Вона показує, яким чином відбувається обробка даних від моменту їх надходження з сенсорного рівня до формування керуючих або інформаційних сигналів для подальшої передачі в мережу чи відображення користувачу. Така схема є важливою для розуміння внутрішньої організації системи без прив'язки до конкретної апаратної реалізації.

У складі функціональної схеми обчислювального модуля зазвичай виділяють кілька ключових блоків: інтерфейс підключення сенсорів, модуль

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збору даних, блок первинної обробки інформації, обчислювальний ядровий блок (мікроконтролер), комунікаційний модуль та блок керування виконавчими елементами або сигналізацією.

Дані від датчиків надходять через відповідні інтерфейси (наприклад, I2C, OneWire або GPIO), після чого потрапляють до блоку обробки, де здійснюється їх фільтрація, перевірка коректності та перетворення у придатний для аналізу формат.

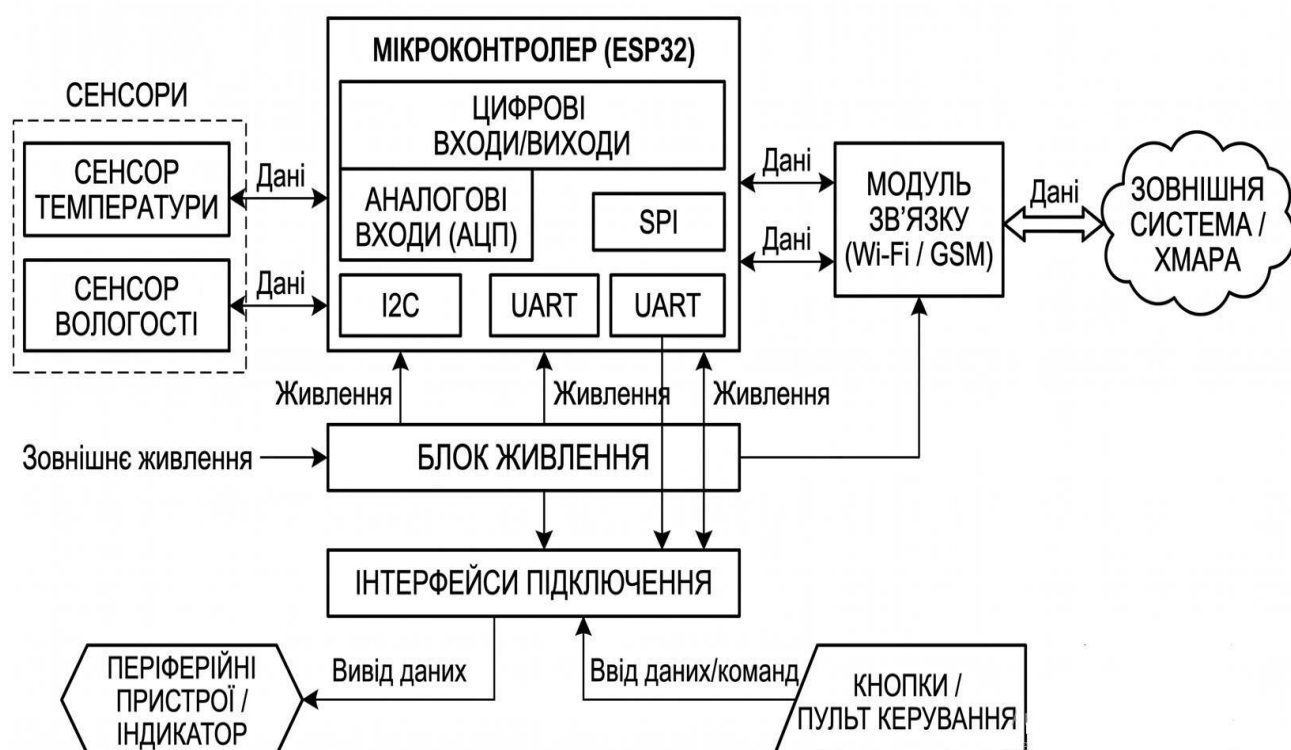


Рисунок 2.5 – Функціональна схема обчислювального модуля

Після первинної обробки інформація надходить до центрального обчислювального ядра, де виконується порівняння отриманих значень із заданими пороговими рівнями. У разі виявлення відхилень формується сигнал тривоги або керуюча дія. Паралельно дані передаються до комунікаційного модуля, який забезпечує їх відправку на сервер або хмарну платформу за допомогою мережевих протоколів (наприклад, MQTT або HTTP).

Таким чином, функціональна схема обчислювального модуля дозволяє

наочно представити повний цикл обробки інформації в системі від вимірювання фізичних параметрів до формування реакції та передачі даних у зовнішнє середовище. Вона є основою для подальшого апаратного та програмного проєктування системи.

Структурна схема обробки даних відображає послідовність перетворення інформації в кіберфізичній системі від моменту отримання сигналів із сенсорів до формування результатів, придатних для передачі та подальшого аналізу. Вона дозволяє наочно представити логіку функціонування обчислювального рівня та взаємозв'язок між окремими етапами обробки даних (рис.2.6).



Рисунок 2.6 – Структурна схема обробки даних

На початковому етапі здійснюється зчитування даних із сенсорів температури та вологості. Отримані значення можуть містити випадкові коливання або похибки, тому наступним кроком є їх первинна обробка. Вона включає фільтрацію шумів, усереднення показників та перевірку коректності вимірювань. Це дозволяє підвищити точність та стабільність роботи системи.

Після обробки дані передаються до блоку аналізу, де відбувається їх порівняння із заданими пороговими значеннями. На цьому етапі система визначає, чи знаходяться параметри в межах допустимого діапазону. У разі виявлення відхилень формується сигнал тривоги, який може бути використаний



фізичним пристроєм (ESP32) та хмарною або локальною серверною інфраструктурою. Передача даних здійснюється у вигляді структурованих повідомлень, що містять значення температури, вологості, часові мітки та службову інформацію про стан системи. Це дозволяє не лише контролювати поточні значення, але й аналізувати їх у динаміці.

Для реалізації мережевого обміну в системі використовуються бездротові технології Wi-Fi як основний канал зв'язку. Вибір Wi-Fi обумовлений його широкою доступністю, достатньою пропускнуою здатністю та простотою інтеграції з мікроконтролером ESP32, який має вбудований мережевий модуль. У випадках, коли відсутня стабільна інтернет-інфраструктура, можливе використання GSM-зв'язку як резервного каналу передачі даних.

Протоколом обміну даними обрано MQTT, який є стандартом для IoT-систем (рис. 2.8). Він працює за принципом publish/subscribe, що дозволяє зменшити навантаження на мережу та забезпечити ефективну передачу невеликих пакетів даних. Обчислювальний модуль виступає як publisher, а сервер або хмарна платформа як broker та subscriber.

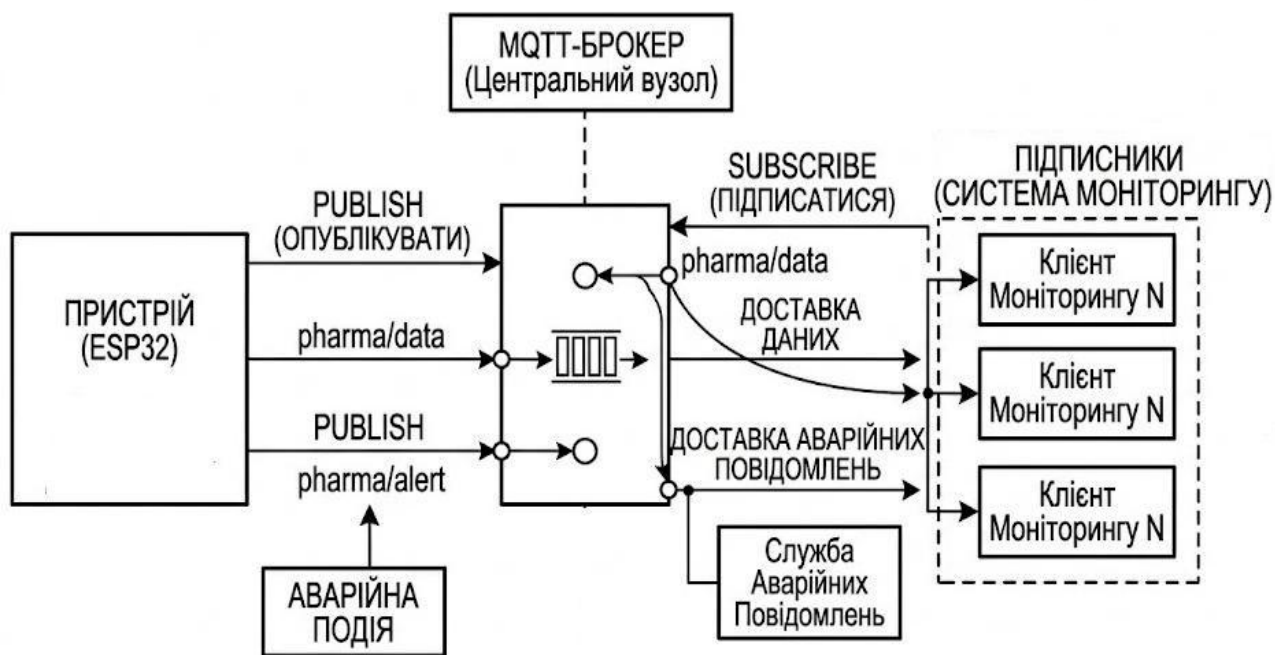


Рисунок 2.8 – Логічна схема MQTT-комунікації

Логічна схема MQTT-комунікації відображає принцип обміну даними

між компонентами кіберфізичної системи із використанням протоколу MQTT. Основною особливістю цього протоколу є застосування моделі «publish/subscribe» (видавець–підписник), яка забезпечує асинхронну взаємодію між пристроями.

У даній системі мікроконтролер ESP32 виступає у ролі видавця (publisher), який формує та передає повідомлення з вимірними параметрами. Передача даних здійснюється не безпосередньо отримувачу, а через посередника MQTT-брокера, функції якого виконує платформа ThingsBoard.

Передача даних організована за допомогою тематичних каналів (topics), які виконують роль логічних адрес. У системі використовується topic pharma/data, у який мікроконтролер публікує дані про температуру та вологість у вигляді структурованих повідомлень (наприклад, у форматі JSON).

Система моніторингу, реалізована на стороні хмарної платформи, підписується на даний topic. Це означає, що вона автоматично отримує всі повідомлення, які надходять у канал pharma/data, без необхідності прямого запиту до пристрою.

Pharma/data – це іменованний канал у протоколі MQTT, у який мікроконтролер ESP32 публікує дані про стан середовища (температуру, вологість).

Для передачі аварійних або критичних повідомлень використовується окремий topic pharma/alert. У цей канал публікуються повідомлення у випадках, коли значення параметрів виходять за допустимі межі. Такий підхід дозволяє розділити звичайні телеметричні дані та критичні події, що спрощує їх обробку.

Важливою перевагою MQTT-комунікації є її асинхронний характер. Видавець і підписник не потребують одночасного з'єднання один з одним, оскільки обмін даними здійснюється через брокера. Це підвищує надійність системи та дозволяє зменшити навантаження на мережу.

Ще однією перевагою є масштабованість. До одного topic можуть підключатися декілька підписників, наприклад:

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- вебінтерфейс для відображення даних;
- система сповіщень;
- модулі аналітики.

При цьому мікроконтролер не потребує змін у програмному забезпеченні, оскільки він продовжує публікувати дані у визначені канали.

Таким чином, використання протоколу MQTT та моделі publish/subscribe дозволяє забезпечити гнучку, надійну та масштабовану взаємодію між компонентами кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів.

Таким чином, мережевий рівень є ключовим елементом кіберфізичної системи, що забезпечує інтеграцію пристрою збору даних із серверною інфраструктурою та користувацькими застосунками. Використання Wi-Fi та MQTT дозволяє досягти високої швидкості передачі даних, низького навантаження на мережу та масштабованості системи в цілому.

## 2.5 Вибір хмарної платформи для кіберфізичної системи

У сучасних кіберфізичних системах хмарні платформи відіграють важливу роль, оскільки забезпечують централізоване зберігання, обробку та візуалізацію даних. У системі контролю умов зберігання медичних препаратів хмарний рівень дозволяє реалізувати безперервний моніторинг параметрів середовища, доступ до історичних даних та оперативне реагування на відхилення.

Під час вибору хмарної платформи необхідно враховувати такі основні критерії:

- підтримка протоколів передачі даних (зокрема MQTT);
- можливість візуалізації даних у вигляді графіків і панелей;
- підтримка роботи в режимі реального часу;
- наявність механізмів сповіщення;
- простота інтеграції з мікроконтролерами;

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– доступність та зручність використання.

У межах даної роботи розглядаємо декілька варіантів хмарних платформ, зокрема Blynk, Firebase та ThingsBoard.

Платформа Blynk є однією з найбільш поширених хмарних систем для реалізації IoT-проектів на базі мікроконтролерів Arduino, ESP8266 та ESP32. Основною особливістю даної платформи є наявність готових засобів для створення мобільних та веб-інтерфейсів без необхідності розробки власного серверного програмного забезпечення (рис. 2.9). Це значно спрощує процес створення систем моніторингу та дистанційного керування.

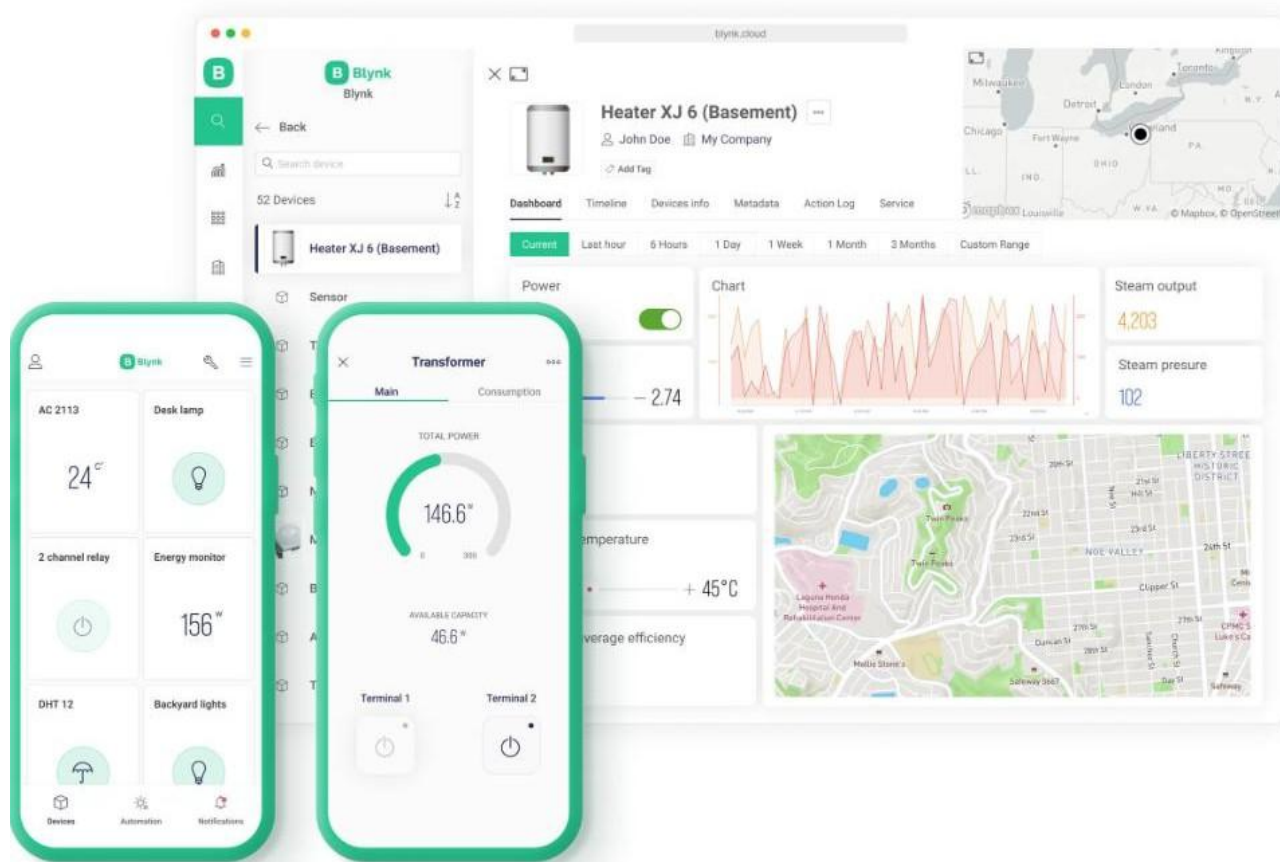


Рисунок 2.9 – Приклад інтерфейсу платформи Blynk [25]

Архітектура платформи включає три основні складові: мікроконтролер, хмарний сервер та користувацький інтерфейс. Мікроконтролер збирає дані з датчиків та передає їх через Wi-Fi до хмарного сервера Blynk. Користувач, у

свою чергу, отримує доступ до даних через мобільний застосунок або веб-інтерфейс. Платформа підтримує роботу з протоколами MQTT та HTTP, що забезпечує сумісність із більшістю сучасних IoT-рішень.

Важливою перевагою Blynk є простота використання. Для створення інформаційної панелі користувачеві достатньо додати необхідні елементи інтерфейсу, такі як графіки, індикатори або кнопки керування. Це дозволяє швидко реалізувати систему моніторингу без глибокого налаштування серверної частини. Також платформа підтримує надсилання повідомлень та сповіщень у разі виникнення аварійних ситуацій.

Ще однією перевагою є підтримка великої кількості апаратних платформ та готових бібліотек для ESP32. Це спрощує інтеграцію мікроконтролера з хмарним середовищем та зменшує складність програмної реалізації.

Разом із перевагами платформа має і певні недоліки. Blynk орієнтована переважно на швидке створення прототипів та навчальних проєктів. У складніших системах можуть виникати обмеження щодо гнучкості налаштування та масштабованості. Крім того, частина функцій платформи доступна лише у платних тарифах.

Firebase є хмарною платформою компанії Google, яка надає засоби для створення веб- та мобільних застосунків із підтримкою віддаленого зберігання та синхронізації даних. У системах Інтернету речей Firebase використовується як середовище для збереження телеметричних даних, організації взаємодії між пристроями та створення користувацьких інтерфейсів (рис.2.10).

Основною перевагою Firebase є наявність Realtime Database та Cloud Firestore, які забезпечують синхронізацію даних у режимі реального часу. Це дозволяє миттєво оновлювати інформацію на стороні користувача після отримання нових даних від мікроконтролера.

Платформа підтримує інтеграцію з мікроконтролерами через HTTP-запити та REST API. У системі моніторингу умов зберігання медичних препаратів ESP32 може передавати дані про температуру та вологість до

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42





даних, зручністю візуалізації інформації та відповідністю вимогам до систем моніторингу в реальному часі.

У системі контролю умов зберігання медичних препаратів платформа може використовуватися для:

- прийому даних від сенсорів;
- зберігання телеметрії;
- побудови графіків температури та вологості;
- формування аварійних повідомлень;
- реалізації інформаційних панелей моніторингу.

Важливою особливістю ThingsBoard є підтримка моделі publish/subscribe через MQTT-брокер. Це забезпечує асинхронний обмін повідомленнями між пристроями та сервером, а також дозволяє масштабувати систему без зміни архітектури.

До переваг ThingsBoard також належать:

- відкритий вихідний код;
- можливість локального або хмарного розгортання;
- підтримка великої кількості пристроїв;
- висока масштабованість;
- підтримка механізмів безпеки та автентифікації.

Недоліком платформи є дещо складніше налаштування порівняно з Blynk, особливо під час самостійного розгортання сервера. Однак її функціональні можливості значно ширші та краще відповідають вимогам кіберфізичних систем.

Таким чином, платформа ThingsBoard є найбільш доцільним вибором для реалізації системи контролю умов зберігання медичних препаратів, оскільки поєднує підтримку IoT-протоколів, засоби візуалізації даних, масштабованість та можливість роботи в режимі реального часу.

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

## 2.6 Протоколи взаємодії в кіберфізичній системі

У кіберфізичній системі контролю умов зберігання медичних препаратів важливу роль відіграють протоколи взаємодії між окремими компонентами. Вони забезпечують обмін даними між сенсорним, обчислювальним, мережевим та хмарним рівнями системи.

На сенсорному рівні використовуються протоколи обміну даними між давачами та мікроконтролером. Для давача DHT22 застосовується власний однопровідний цифровий протокол, який дозволяє передавати дані по одному сигнальному проводу. Його перевагою є простота реалізації, однак він має обмеження щодо швидкості передачі даних і чутливості до затримок у таймінгах.

Для давача SHT31 використовується стандартний інтерфейс I2C (Inter-Integrated Circuit), який є одним із найпоширеніших протоколів у вбудованих системах. Він дозволяє підключати декілька пристроїв до однієї шини та забезпечує надійний обмін даними з використанням адресації пристроїв. Це спрощує масштабування системи та інтеграцію додаткових сенсорів.

На рівні передачі даних між мікроконтролером і віддаленими сервісами можуть використовуватися мережеві протоколи, такі як MQTT або HTTP. Протокол MQTT є легковаговим і орієнтованим на передачу телеметричних даних, що робить його доцільним для систем моніторингу. Він працює за принципом «видавець–підписник», що дозволяє ефективно передавати дані з мінімальним навантаженням на мережу.

Протокол HTTP, у свою чергу, є універсальним і широко підтримується різними платформами. Його перевагою є простота інтеграції з веб-сервісами та хмарними платформами, однак він створює більше мережеве навантаження порівняно з MQTT.

Для забезпечення безпеки передачі даних можуть використовуватися захищені версії протоколів, такі як HTTPS або MQTT з TLS-шифруванням. Це дозволяє захистити інформацію від перехоплення та несанкціонованого

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



Таким чином, у системі застосовується комбінація протоколів різного рівня: від низькорівневих інтерфейсів взаємодії з датчиками до мережеских протоколів передачі даних у хмарні сервіси. Вибір конкретного протоколу визначається вимогами до швидкодії, надійності, енергоефективності та масштабованості системи.

У розроблюваній системі використовується багаторівнева взаємодія протоколів. На сенсорному рівні застосовуються прості цифрові інтерфейси (однопровідний протокол та I2C), які забезпечують зчитування даних із датчиків. Передача інформації до хмарного середовища реалізується за допомогою Wi-Fi модуля мікроконтролера ESP32.

Для обміну даними з сервером доцільним є використання протоколу MQTT, який оптимізований для передачі телеметрії, тоді як HTTP/HTTPS застосовується для взаємодії з користувацьким інтерфейсом. Додатково використовується TLS-шифрування для забезпечення безпеки переданих даних.

Така комбінація протоколів дозволяє досягти балансу між швидкістю, надійністю та безпекою системи, що є важливим для контролю умов зберігання медичних препаратів.

## 2.7 Висновки до другого розділу

У межах розділу 2 запропоновано структуру розподіленої кіберфізичної системи (сенсорний, обчислювальний, мережеский, хмарний та користувацький рівні). Обґрунтовано принципи побудови КФС на базі модульного підходу, що забезпечує необхідні показники для довготривалого безперервного контролю параметрів «холодового ланцюга» в режимі реального часу.

Спроектовано сенсорний рівень системи та сформовано рекомендації щодо просторового розміщення вимірювальних елементів усередині холодильних камер для мінімізації впливу температурних градієнтів, циклів

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компресії та повітряних збуджень при відкритті дверей. На основі техніко-економічного аналізу цифрових сенсорів обґрунтовано вибір первинного перетворювача типу DHT22, який забезпечує достатній діапазон та прецизійність вимірювань при низькому рівні енергоспоживання.

Здійснено порівняльний аналіз сучасних хмарних IoT-платформ та доведено доцільність використання спеціалізованого середовища ThingsBoard із відкритим вихідним кодом.

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

### 3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ УМОВ ЗБЕРІГАННЯ МЕДИЧНИХ ПРЕПАРАТІВ

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

Апаратно-програмна реалізація кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів базується на інтеграції мікроконтролерної платформи, сенсорних елементів та мережевих технологій передачі даних. Основною метою реалізації є забезпечення безперервного моніторингу параметрів середовища, їх аналізу та передачі у хмарне середовище для подальшої обробки і візуалізації.

Для побудови вимірювального вузла кіберфізичної системи моніторингу параметрів середовища зберігання медикаментів обрано елементну базу, що поєднує високу обчислювальну потужність, наявність інтегрованих бездротових інтерфейсів та низьку вартість.

Основою вимірювального вузла є 32-бітний двоядерний мікроконтролер ESP32, який має вбудовані модулі Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth (BLE v4.2). Обчислювальних ресурсів процесора (тактова частота до 240 МГц, 520 Кбайт оперативної пам'яті SRAM) цілком достатньо для паралельного опитування цифрових сенсорів, локального кодування телеметрії у формат JSON, підтримки стеку TCP/IP та шифрованого передавання даних за протоколом MQTT на хмарний сервер ThingsBoard.

Як первинний перетворювач для збору метрик мікроклімату (температури та відносної вологості повітря) обрано цифровий датчик DHT22.

Даний сенсор є оптимальним для використання у складі бюджетних та середньокласових КФС завдяки таким технічним характеристикам:

- діапазон вимірювання температури від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$  (точність  $\pm 0.5$ );
- діапазон вимірювання відносної вологості від 0% до 100% (точність

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

±2%);

- частота опитування не частіше ніж 1 раз на 2 секунди (0.5 Гц);
- напруга живлення: 3.3...5.5 В.

Датчик DHT22 використовує власний спеціалізований однопровідний протокол передачі даних (Single-Bus/1-Wire). Обмін даними між мікроконтролером ESP32 та датчиком здійснюється через одну лінію зв'язку (шина DATA), що дозволяє економити виводи (GPIO) мікроконтролера. Кожна сесія обміну ініціюється процесором, який переводить лінію в низький рівень на час близько 1–10 мс, після чого датчик видає пакет відповіді, який складається з 40 біт (5 байт) даних:

- 2 байти – вологість;
- 2 байти – температура;
- 1 байт – контрольна сума для верифікації цілісності даних.

Для стабілізації роботи однопровідної шини та запобігання наведенню перешкод (шумів) у лініях зв'язку, вивід DATA датчика DHT22 підключається до лінії живлення 3.3В через підтягуючий (pull-up) резистор номіналом 4.7кОм (або  $10\text{ кОм}$ ).

Схему електричну принципову спроектованого вимірювального вузла КФС наведено на рисунку 3.1.

Електрична принципова схема відображає з'єднання між усіма елементами системи, включаючи лінії живлення, сигнальні з'єднання та допоміжні елементи, такі як резистори підтягування.

Лінія передачі даних DATA є основним елементом спеціалізованого однопровідного інтерфейсу (Single-Bus / 1-Wire), який використовується для обміну інформацією між мікроконтролером та периферійними пристроями, зокрема цифровим датчиком DHT22. Даний інтерфейс реалізує послідовний обмін інформацією, що дозволяє ефективно передавати дані між пристроями з використанням лише одного сигнального провідника, мінімізуючи складність розведення плати.

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51



зчитуванні. Кожен повний сеанс передачі складається з 40 біт даних, розподілених на байти вологості, температури та перевіркою контрольної суми, що забезпечує узгоджену роботу пристроїв на шині.

Важливою особливістю однопровідного інтерфейсу є використання відкритого колектора (open-drain) для сигнальної лінії. Це означає, що пристрої не формують високий логічний рівень напруги самостійно, а лише можуть активно притягувати лінію до потенціалу землі (нуля). Саме тому для коректної роботи необхідні підтягуючі резистори (pull-up), які з'єднують лінію DATA з напругою живлення 3.3В. У даній системі використовуються резистори номіналом 4.7кОм (допускається використання 10кОм), що забезпечує швидкий перехід сигналу у високий логічний рівень, гарантує стабільність фронтів імпульсів та запобігає виникненню наведень і перешкод.

Процес обміну даними по сигнальній лінії відбувається у кілька етапів. Спочатку мікроконтролер ESP32 формує стартову умову, притягуючи лінію до низького рівня на час не менше ніж 1мс, а потім відпускає її.

Датчик DHT22, розпізнавши цей тригер, видає у відповідь сигнал присутності (тривалий низький, а потім високий рівень), підтверджуючи готовність до обміну. Далі відбувається передача 40-бітного пакету даних від сенсора. Завершується процес переведенням лінії у високий стан очікування, що сигналізує про закінчення сеансу передачі.

Використання лінії DATA у поєднанні з протоколом Single-Bus забезпечує максимальну простоту апаратної реалізації, значну мінімізацію кількості фізичних з'єднань та вивільнення вільних GPIO-виводів мікроконтролера. Це є важливою перевагою для кіберфізичних систем, де необхідні апаратна компактність, надійність та простота супроводу архітектури.

Таким чином, правильна організація роботи сигнальної лінії DATA та точне дотримання часових діаграм є ключовою умовою стабільного функціонування сенсорного рівня та точності переданих даних у системі

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

контролю умов зберігання медичних препаратів.

Програмне забезпечення обчислювального модуля кіберфізичної системи реалізовано у середовищі розробки Arduino IDE із використанням мови програмування C++. Такий підхід обумовлений широкою підтримкою платформи ESP32, наявністю великої кількості оптимізованих бібліотек для роботи з периферією, а також простотою інтеграції мережевих протоколів.

Програмне забезпечення мікроконтролера реалізоване на базі циклічного алгоритму. Воно відповідає за ініціалізацію периферійних інтерфейсів, зчитування даних із датчиків, первинну фільтрацію сигналів, локальний аналіз параметрів на відповідність критичним межах, а також за буферизацію та асинхронне відправлення телеметрії на MQTT-брокер.

На початковому етапі роботи програми виконується процедура ініціалізації, яка є критично важливою для коректного функціонування всієї системи. Під час ініціалізації відбувається налаштування апаратних ресурсів мікроконтролера, конфігурація периферійних інтерфейсів та встановлення параметрів роботи програмних модулів. Зокрема, ініціалізується послідовний інтерфейс (UART) для відлагодження, що дозволяє здійснювати контроль виконання програми та діагностику помилок через порт моніторингу.

Одним із основних етапів є налаштування цифрового входу/виходу загального призначення (GPIO), який використовується для взаємодії з цифровим датчиком DHT22. У процесі конфігурації за допомогою відповідної програмної бібліотеки задається номер керуючого піна (GPIO23) та тип підключеного пристрою. Після цього виконується первинна тестова перевірка доступності сенсора шляхом надсилання стартового імпульсу. У разі успішного отримання відповіді система переходить до наступного етапу, у протилежному випадку в термінал виводиться повідомлення про помилку зчитування, а система ініціює повторну спробу опитування.

Наступним кроком є підключення до бездротової мережі Wi-Fi. Для цього в програмі задаються ідентифікатор мережі (SSID) та пароль доступу.

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мікроконтролер виконує спробу підключення до мережі та очікує встановлення стабільного з'єднання. У процесі підключення здійснюється безперервний моніторинг статусу мережі, що дозволяє уникнути переходу до наступних етапів до моменту повного встановлення зв'язку. Після успішного підключення ESP32 отримує внутрішню IP-адресу та стає повноцінним вузлом мережі.

Після встановлення мережевого з'єднання виконується ініціалізація MQTT-клієнта, який використовується для передачі телеметричних даних у хмарну платформу, зокрема ThingsBoard. У процесі ініціалізації задаються параметри підключення до MQTT-брокера: адреса сервера, порт (1883), а також ідентифікаційні дані пристрою (токен доступу пристрою). Далі виконується спроба встановлення з'єднання з брокером. У разі невдачі реалізується механізм повторного підключення через фіксовані проміжки часу, що забезпечує стійкість системи до тимчасових мережевих збоїв.

Після завершення етапу ініціалізації система переходить у режим основного циклу роботи (`void loop()`). У цьому режимі мікроконтролер виконує безперервне опитування сенсорів із заданою періодичністю (не частіше ніж один раз на 2–5 секунд, відповідно до специфікації DHT22). На кожній ітерації циклу здійснюється зчитування значень температури та відносної вологості. Отримані числові дані перевіряються на коректність за допомогою функції контролю помилок (наприклад, `isnan()`), оскільки можливі ситуації, коли сенсор повертає пусті або помилкові значення через апаратні завади.

Далі виконується первинна обробка даних, яка включає програмну фільтрацію випадкових шумів та усереднення показників. Це дозволяє зменшити вплив короткочасних коливань та підвищити загальну точність вимірювань у камері з медикаментами.

Після обробки значення порівнюються з наперед заданими допустимими межами (наприклад, від  $+2.0^{\circ}\text{C}$  до  $+8.0^{\circ}\text{C}$ ), що визначають умови безпечного зберігання термолабільних препаратів.

У випадку, якщо значення параметрів виходять за встановлені межі,

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

система формує аварійне повідомлення. Даний сигнал у вигляді спеціального JSON-пакета з прапором тривоги терміново передається через MQTT-протокол у відповідний топик телеметрії хмари. Це дозволяє платформі ThingsBoard миттєво згенерувати подію типу «Alarm» та оперативно проінформувати медичний персонал про критичну ситуацію.

Паралельно з цим за звичайних умов формується основне телеметричне повідомлення, яке містить поточні відфільтровані значення температури та вологості у структурованому текстовому форматі JSON. Це повідомлення передається на хмарний MQTT-брокер, звідки воно потрапляє у сховище бази даних ThingsBoard для подальшого довготривалого збереження, аналізу, побудови графіків часових рядів та візуалізації на панелі оператора.

### 3.2 Програмне забезпечення мікроконтролера та алгоритм функціонування

Програмне забезпечення мікроконтролера ESP32 є ключовим елементом кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів, оскільки забезпечує інтеграцію апаратної частини з хмарною платформою ThingsBoard. Воно реалізує повний цикл обробки інформації: від збору даних із давачів до їх передачі, збереження та подальшого аналізу.

Програмна частина розробляється з урахуванням обмежених ресурсів мікроконтролера, таких як обсяг пам'яті, обчислювальна потужність та енергоспоживання. Тому важливим є ефективний розподіл функцій між окремими модулями та оптимізація алгоритмів роботи.

Структурно програмне забезпечення організоване за модульним принципом, що дозволяє розділити функціональність системи на незалежні складові (рис.3.2).

Такий підхід спрощує розробку, тестування та подальшу модернізацію системи.

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

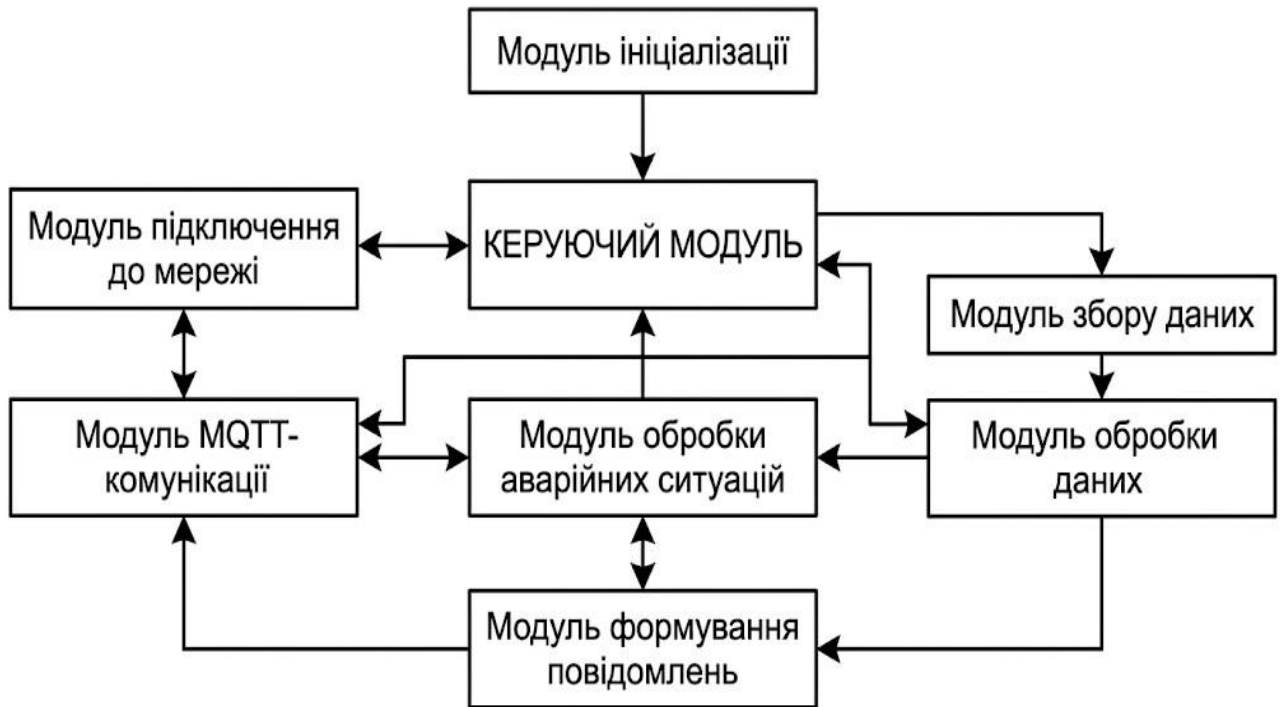


Рисунок 3.2 – Структурна схема програмного забезпечення мікроконтролера

До основних функціональних модулів належать:

- модуль ініціалізації системи;
- модуль підключення до мережі;
- модуль MQTT-комунікації;
- модуль збору даних;
- модуль обробки даних;
- модуль формування повідомлень;
- модуль обробки аварійних ситуацій;
- керуючий модуль.

Модуль ініціалізації системи виконується одноразово, безпосередньо після подачі живлення або перезапуску мікроконтролера ESP32, і відповідає за підготовку всіх апаратних та програмних компонентів до роботи. На початковому етапі виконується налаштування апаратних ресурсів: конфігурація порту введення-виведення (GPIO23) для підключення цифрового датчика температури та вологості DHT22 із завданням точних часових параметрів

однопровідної шини. Також активується послідовний інтерфейс UART (Serial-порт) для виведення діагностичної та відлагоджувальної інформації на швидкості 115200 бод. У межах цього модуля в пам'яті задаються початкові константи: інтервал опитування датчика, допустимі межі безпечного зберігання медикаментів  $+2.0 \dots +8.0^{\circ}\text{C}$ ), а також конфігураційні параметри для авторизації в бездротовій мережі та на MQTT-сервері.

Модуль підключення до мережі забезпечує встановлення та стабільну підтримку зв'язку з бездротовою мережею Wi-Fi. На початковому етапі він зчитує записані в кодї ідентифікатор мережі (SSID) та пароль доступу, ініціює процедуру автентифікації та переходить у режим очікування підтвердження успішного підключення із виділенням локальної IP-адреси. Після встановлення з'єднання модуль переходить у фоновий режим моніторингу стану мережі. Програма періодично перевіряє статус зв'язку, і у разі його тимчасової втрати автоматично запускає процедуру циклічного перепідключення, що дозволяє забезпечити безперервність моніторингу та передачі даних до хмарної платформи.

Модуль MQTT-комунікації реалізує інформаційну взаємодію з хмарною платформою ThingsBoard за допомогою енергоефективного протоколу MQTT. Він відповідає за встановлення TCP-з'єднання з брокером через стандартний порт 1883, проходження автентифікації пристрою за допомогою унікального маркеру доступу (Access Token) та підтримку активного сеансу зв'язку (Keep-Alive імпульси). Важливою функцією модуля є обробка мережевих збоїв: у разі втрати зв'язку з брокером виконується автоматичне відновлення сесії, а також підтримується логіка локальної буферизації повідомлень до моменту відновлення з'єднання з сервером.

Модуль збору даних відповідає за регулярне отримання інформації з цифрового давача DHT22. Частота опитування визначається загальними параметрами системи і, зважаючи на інерційність датчика, становить один раз на 2–5 секунд. Алгоритм зчитування дотримується мікросекундних часових

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтервалів однопровідного протоколу Single-Bus для коректного зчитування всіх 40 біт пакета відповіді. Результатом роботи модуля є отримання сирих цифрових значень температури та відносної вологості повітря, які передаються на наступний етап обробки.

Модуль обробки даних виконує первинний аналіз отриманої інформації з метою підвищення її достовірності та фільтрації завад. На першому етапі здійснюється перевірка цілісності даних через контроль суми, а також верифікація наявності апаратних помилок зчитування (контроль за допомогою функції `isnan`). Далі виконується програмна фільтрація даних шляхом усереднення серії послідовних вимірювань, що дозволяє відсікти випадкові імпульсні шуми та короточасні коливання повітряних мас при відкритті дверей камери. Оброблені та очищені значення приводяться до стандартизованого типу з плаваючою комою (`float`).

Модуль формування повідомлень відповідає за фінальну підготовку даних до відправлення через мережу. Оброблені значення температури та вологості перетворюються у текстовий формат JSON, який є універсальним для хмарної платформи ThingsBoard. Структура пакета містить пари «ключ-значення» (наприклад, `{temperature: 5.4, humidity: 62.5}`), що дозволяє серверу однозначно ідентифікувати кожну метрику. Після формування пакет передається до модуля MQTT-комунікації для безпосередньої відправки в цільовий топик телеметрії `v1/devices/me/telemetry`.

Модуль контролю критичних меж (аварійний модуль) забезпечує безперервний моніторинг параметрів середовища на відповідність вимогам «холодового ланцюга» та оперативне виявлення небезпечних відхилень. Модуль порівнює поточні значення температури з установленими технологічними порогоми ( $+2^{\circ}\text{C}$  та  $+8^{\circ}\text{C}$ ). У разі виходу за допустимі межі, модуль миттєво формує аварійне повідомлення з прапором тривоги, яке пріоритетно відправляється на сервер. Це дозволяє хмарній платформі негайно згенерувати подію критичного рівня та надіслати сповіщення відповідальному

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

медичному персоналу.

Керуючий модуль є центральним диспетчером усього програмного забезпечення мікроконтролера ESP32, який координує роботу та послідовність виклику всіх інших модулів. Він реалізує основний нескінченний цикл програми (void loop()). Керуючий модуль за заданими таймерами викликає функції збору даних, ініціює їх фільтрацію, передає оброблені результати модулю формування повідомлень та контролює працездатність мережевих інтерфейсів. Фактично, він втілює загальний алгоритм функціонування кіберфізичної системи, забезпечуючи узгоджену та безперебійну роботу всіх її програмно-апаратних компонентів.

### 3.3 Опис процесу створення баз даних

Проектування та реалізація бази даних є одним із ключових етапів створення кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів, оскільки саме база даних забезпечує структуроване зберігання, обробку та подальший аналіз інформації, що надходить від сенсорних пристроїв. У контексті даної системи база даних виконує функції накопичення вимірювань температури та вологості, а також зберігання інформації про пристрої, приміщення, користувачів і події сповіщень.

У якості системи керування базами даних (СКБД) для реалізації кіберфізичної системи контролю умов зберігання медичних препаратів можуть використовуватися різні програмні рішення, зокрема такі як MySQL, PostgreSQL або SQLite. Кожна з цих систем має свої особливості, переваги та обмеження, що визначають доцільність їх використання залежно від умов експлуатації та вимог до системи.

Вибір конкретної СКБД значною мірою залежить від масштабу проєкту, обсягу даних, що обробляються, вимог до швидкодії, а також необхідності забезпечення віддаленого доступу до інформації. Наприклад, SQLite є легкою

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

вбудованою базою даних, яка не потребує окремого серверу та може ефективно використовуватися у невеликих або автономних системах, де обсяг даних є обмеженим, а потреба у багатокористувацькому доступі відсутня. Водночас її функціональні можливості є обмеженими, що ускладнює використання у складних розподілених системах.

На відміну від цього, MySQL і PostgreSQL є повноцінними серверними СКБД, які забезпечують високу продуктивність, надійність і підтримку одночасної роботи великої кількості користувачів. MySQL відзначається простотою налаштування та широким використанням у веб-застосунках, що робить її популярним вибором для IoT-рішень із середнім навантаженням. PostgreSQL, у свою чергу, характеризується розширеними можливостями роботи з даними, підтримкою складних запитів, високим рівнем відповідності стандартам SQL та розвиненими механізмами забезпечення цілісності даних.

Для кіберфізичних систем, які передбачають безперервний потік даних від сенсорів, важливими є такі характеристики, як масштабованість, відмовостійкість і можливість інтеграції з хмарними сервісами. Саме тому у більшості випадків доцільним є використання MySQL або PostgreSQL, оскільки вони дозволяють ефективно обробляти великі обсяги телеметричних даних, забезпечують надійне зберігання інформації та підтримують сучасні технології реплікації й резервного копіювання.

Таким чином, вибір СКБД повинен здійснюватися з урахуванням специфіки задачі, вимог до продуктивності та перспектив розвитку системи, що дозволяє забезпечити її ефективну та стабільну роботу в умовах реальної експлуатації.

Верхній (кібернетичний) рівень розробленої кіберфізичної системи реалізовано на базі спеціалізованої хмарної платформи Інтернету речей ThingsBoard з відкритим вихідним кодом. Дана платформа забезпечує масштабованість, високу відмовостійкість та надає готові інструменти для збору телеметрії за протоколом MQTT, довготривалого збереження часових

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рядів, налаштування логіки Rule Engine (двигуна правил) та візуалізації даних.

Для забезпечення високої швидкодії та оптимізації роботи з даними, архітектура сховища сервера ThingsBoard використовує гібридний підхід до організації баз даних:

Реляційна база даних (PostgreSQL) застосовується для збереження структури сутностей системи, даних користувачів, логічних профілів пристроїв, токенів автентифікації та поточного стану активних аварій. Це гарантує цілісність зв'язків та надійність керування конфігурацією системи.

База даних часових рядів (NoSQL Cassandra / TimescaleDB) використовується виключно для високошвидкісного запису безперервних потоків телеметричної інформації (температури та відносної вологості), що надходять від вимірювальних вузлів КФС. Така архітектура дозволяє виконувати тисячі операцій запису на секунду без зниження продуктивності системи та забезпечує швидку вибірку даних для побудови аналітичних трендів.

Процес інтеграції вимірювального вузла на базі мікроконтролера ESP32 та датчика DHT22 у хмарне середовище складається з кількох послідовних етапів конфігурування.

1. Створення профілю та сутності пристрою. У розділі «Device Management» платформи створено унікальну сутність пристрою із назвою `pharma-monitor-node1` та прив'язано її до розробленого профілю медичних моніторів. Для забезпечення безпеки передачі даних згенеровано унікальний маркер доступу (Access Token), який прописується в програмному забезпеченні мікроконтролера для проходження процедури автентифікації при кожній спробі встановлення зв'язку з MQTT-брокером.

2. Маршрутизація даних через MQTT-брокер. Вбудований у ThingsBoard MQTT-брокер автоматично слухає стандартний TCP-порт 1883. Після успішного підключення мікроконтролера ESP32 та відправлення JSON-пакета у визначений архітектурою платформи топик `v1/devices/me/telemetry`, брокер

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приймає повідомлення, верифікує токен пристрою, автоматично розбирає вміст JSON і записує отримані ключі temperature та humidity у базу даних часових рядів як нові атрибути телеметрії.

3. Налаштування ланцюжка правил (Rule Chain). Центральним елементом обробки подій у ThingsBoard є кореневий ланцюжок правил (Root Rule Chain), який визначає логіку поведінки системи при отриманні кожної нової точки даних телеметрії.

Процес проєктування бази даних починається з визначення основних сутностей, які відображають предметну область. Схему організації бази даних хмарного рівня кіберфізичної системи моніторингу наведено на рисунку 3.3», зображені на рис.3.3:

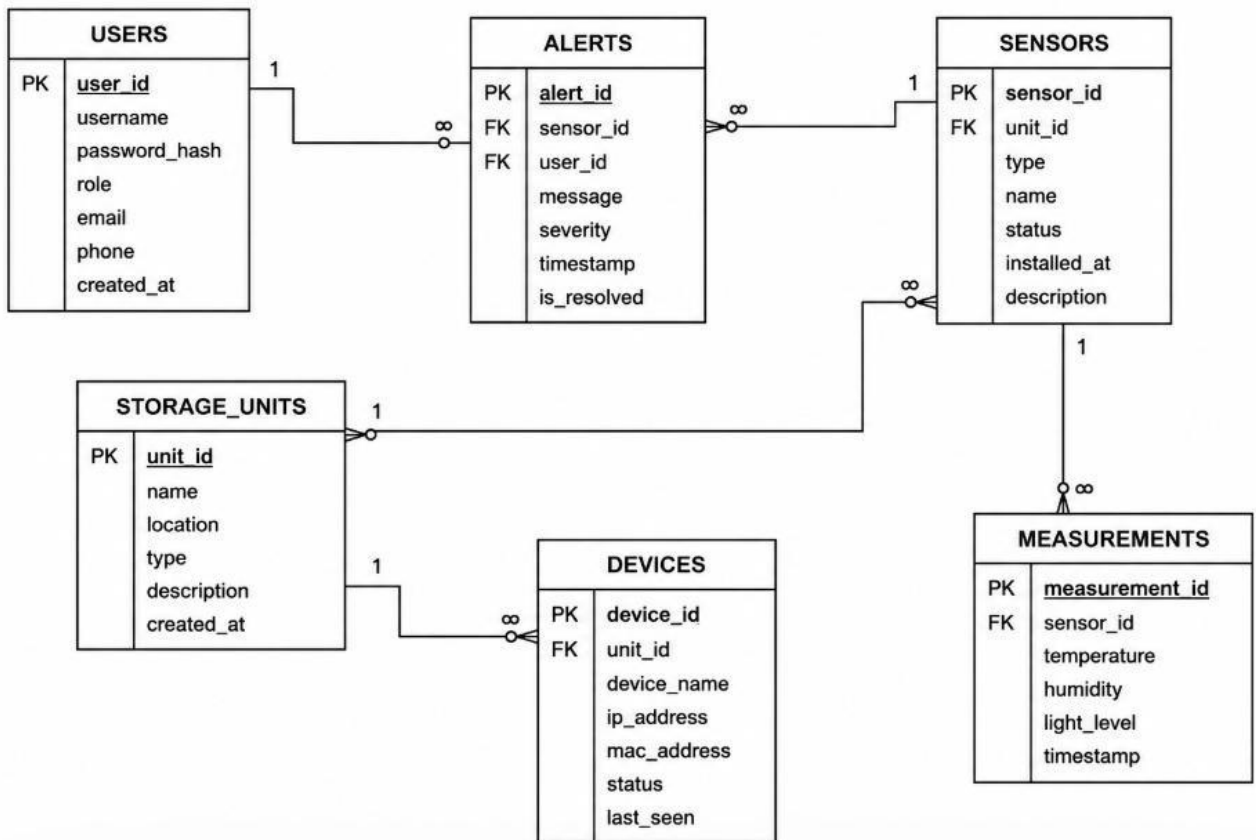


Рисунок 3.3 – Структурно-логічна схема бази даних КФС

Для системи контролю умов зберігання медичних препаратів можна виділити такі основні таблиці

- Sensors – інформація про датчики (тип, ідентифікатор, місце встановлення);
- Measurements – дані вимірювань (температура, вологість, освітленість, час);
- Devices – інформація про IoT-пристрої;
- Storage\_Units – складські приміщення або холодильні камери;
- Alerts – події відхилення параметрів;
- Users – користувачі системи (адміністратори, оператори).

Між таблицями встановлюються зв'язки типу «один-до-багатьох», наприклад, один датчик може генерувати багато вимірювань, а одне складське приміщення може містити кілька датчиків.

Для забезпечення цілісності та уникнення надлишковості даних база даних проходить процес нормалізації. У даному проєкті використано нормалізацію до третьої нормальної форми.

Під час нормалізації:

- усуваються дублюючі дані;
- забезпечується атомарність полів;
- розділяються логічно незалежні сутності;
- встановлюються чіткі зв'язки між таблицями.

Наприклад, інформація про датчик не дублюється у кожному записі вимірювання, а зберігається окремо та пов'язується через зовнішній ключ.

База даних інтегрується з програмною частиною кіберфізичної системи через серверний API або безпосереднє підключення IoT-пристроїв. Сенсори передають дані на мікроконтролер, який, у свою чергу, надсилає інформацію на сервер через протоколи HTTP або MQTT.

Отримані дані автоматично записуються в таблицю Measurements, після чого серверна частина виконує перевірку на відповідність допустимим значенням.

У разі виявлення відхилення створюється запис у таблиці Alerts, а

користувач отримує відповідне сповіщення.

Такий підхід дозволяє забезпечити повну автоматизацію процесу збору та обробки даних.

Для забезпечення вимог безпечного зберігання термолабільних медичних препаратів, стандартний ланцюжок правил було модифіковано шляхом додавання спеціалізованих логічних вузлів фільтрації та генерації подій:

- вузол скриптування;
- вузол створення аварії;
- вузол скидання аварії.

Кожне вхідне телеметричне повідомлення аналізується за допомогою JavaScript-фільтра, який перевіряє умову виходу температури за межі встановленого нормативного діапазону «холодового ланцюга» (+2.0 ... +8.0°C).

Якщо логічний фільтр повертає значення true (зафіксовано порушення температурного режиму), повідомлення перенаправляється до вузла створення аварії.

Цей вузол автоматично генерує в базі даних PostgreSQL інцидент із типом аварії Critical Temperature Alarm, встановлює йому рівень важливості CRITICAL та записує точний час виникнення події.

Якщо при черговому опитуванні датчика DHT22 температура повернулася в межі норми (+2.0... +8.0°C), фільтр повертає false, і повідомлення активує вузол скидання, який автоматично змінює статус поточної аварії в системі на CLEARED (ліквідовано), зберігаючи історію інциденту в архіві.

Завдяки оптимізованій структурі Rule Chain та використанню швидкої бази даних часових рядів, експериментально підтверджений час від моменту фіксації датчиком DHT22 критичного значення до моменту повної реєстрації аварії на хмарному рівні та оновлення стану в інтерфейсі користувача становить не більше ніж 1.2 секунди.

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

### 3.4 Опис роботи мікроконтролера

Алгоритм роботи мікроконтролера у кіберфізичній системі контролю умов зберігання медичних препаратів передбачає послідовне виконання операцій збору, обробки та передачі даних, а також реагування на відхилення параметрів середовища. Робота системи організована у вигляді циклічного процесу, що забезпечує безперервний моніторинг умов зберігання.

На початковому етапі після увімкнення мікроконтролера виконується процедура ініціалізації системи. Вона включає налаштування тактової частоти процесора, ініціалізацію периферійних інтерфейсів, підключення сенсорів температури, вологості та освітленості, а також встановлення параметрів мережевого з'єднання. У випадку використання бездротових технологій, таких як Wi-Fi, здійснюється підключення до локальної мережі або інтернету. Після успішної ініціалізації система переходить у режим основного циклу роботи.

У головному циклі мікроконтролер періодично зчитує дані з підключених сенсорів. Для цього здійснюється опитування кожного датчика з визначеною частотою, наприклад кожні 5–10 секунд. Отримані значення температури, вологості та рівня освітлення проходять первинну обробку, яка може включати фільтрацію шумів, усереднення або перевірку на коректність. Це дозволяє підвищити точність вимірювань і уникнути помилкових спрацьовувань системи.

Після обробки дані порівнюються з наперед заданими пороговими значеннями, які визначають допустимі межі для кожного параметра. Якщо всі параметри знаходяться в межах норми, система переходить до наступного етапу передачі даних на сервер або у хмарне середовище. Передача може здійснюватися за допомогою протоколів HTTP або MQTT, що забезпечують надійний обмін інформацією між пристроями та серверною частиною системи.

У випадку, якщо хоча б один із параметрів виходить за допустимі межі, мікроконтролер формує сигнал тривоги. Цей сигнал може реалізовуватися у

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

вигляді запису спеціального повідомлення, яке передається на сервер, або у вигляді локальної реакції, наприклад активації звукової або світлової індикації. Додатково система може ініціювати виконання керуючих дій, таких як увімкнення системи охолодження, вентиляції або обігріву.

Після передачі даних і можливого формування сигналу тривоги мікроконтролер переходить у режим очікування до наступного циклу вимірювання. Для оптимізації енергоспоживання може використовуватися режим сну (sleep mode), у якому пристрій перебуває до моменту наступного опитування сенсорів.

Псевдокод (рис. 3.4) відображає логіку роботи мікроконтролера ESP32 у складі кіберфізичної системи.

```
ПОЧАТОК
// Ініціалізація системи
ініціалізувати серійний інтерфейс
ініціалізувати давач температури та вологості
ініціалізувати Wi-Fi модуль
// Підключення до мережі
підключитися до Wi-Fi (SSID, PASSWORD)
  поки (Wi-Fi не підключено)
    затримка
кінець поки
// Підключення до хмарної платформи
налаштувати MQTT-клієнт
підключитися до сервера ThingsBoard
поки (MQTT не підключено)
  повторити підключення
кінець поки

// Основний цикл
ПОКИ (істина)
  // Зчитування даних
  температура ← зчитати з давача
  вологість ← зчитати з давача

  // Перевірка коректності
  якщо (дані некоректні)
    вивести повідомлення про помилку
    перейти до наступної ітерації
  кінець якщо
```

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

```

// Обробка даних
виконати фільтрацію / усереднення (за потреби)
// Формування повідомлення
сформувати JSON:
    {
        "temperature": температура,
        "humidity": вологість
    }

// Перевірка з'єднання
якщо (MQTT не підключено)
    повторно підключитися
кінець якщо
// Передача даних
відправити повідомлення на сервер ThingsBoard
// Затримка між вимірюваннями
затримка (T секунд)
КІНЕЦЬ ПОКИ
КІНЕЦЬ

```

Наведений вище псевдокод описує базову архітектуру та логіку взаємодії між основними програмними модулями обчислювального вузла КФС. Проаналізуємо його покрокову роботу, формати обробки даних та механізми переходу між різними станами пристрою.

Робота програми починається з одноразового виконання процедури ініціалізації. Основним тут є конфігурація цифрового порту вводу/виводу загального призначення мікроконтролера ESP32, до якого підключено сигнальну лінію DATA датчика DHT22. На відміну від стандартних інтерфейсів, однопровідний протокол Single-Bus вимагає від програмного забезпечення точного перемикання режиму роботи піна «на вхід» (для зчитування імпульсів відповіді від сенсора) та «на вихід» (для формування стартового імпульсу запиту).

Паралельно з цим у пам'яті виділяються буфери для збереження мережевих налаштувань, апаратного токена доступу до ThingsBoard та констант верхньої і нижньої меж температурного діапазону. Якщо на етапі запуску один із кроків (наприклад, первинний запит до датчика) завершується невдачею,

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

алгоритм передбачає фіксацію системної помилки без зупинки мікроконтролера, що забезпечує загальну живучість системи.

Основний нескінченний цикл функціонування побудовано на базі асинхронного опитування. Замість використання блокуючих інструкцій затримки часу, які повністю зупиняють ядро процесора, в алгоритмі застосовано перевірку різниці поточного часу системного таймера. Опитування датчика DHT22 відбувається з фіксованим інтервалом у кілька секунд. Це обумовлено фізичними властивостями ємнісного сенсора вологості та термістора всередині датчика, яким потрібен час для стабілізації значень після проходження вимірювального струму.

Під час кожної ітерації збору даних виконується верифікація цілісності зчитаного 40-бітного пакета. Якщо функція контролю повертає помилку (наприклад, через наведення електромагнітної завади на сигнальний провід), алгоритм ігнорує поточну ітерацію, не записує завідомо хибні дані у сховище та переходить до очікування наступного такту опитування.

Отримані сирі цифрові значення температури та відносної вологості проходять через блок математичної обробки (алгоритм ковзного середнього), де відсікаються випадкові стрибки значень. На основі очищених даних формується вихідний інформаційний пакет. Програмний модуль серіалізації динамічно виділяє оперативну пам'ять RAM мікроконтролера та трансформує числові змінні у текстову структуру формату JSON (пари «ключ-значення»).

Одразу після цього логічний блок порівняння перевіряє умову: якщо поточне значення температури виходить за межі критичного діапазону (+2.0 ... +8.0°C), програма негайно модифікує JSON-пакет, додаючи до нього прапор критичної тривоги. Мережевий модуль пріоритетно відправляє це повідомлення в MQTT-топік. У разі успішного з'єднання з Wi-Fi та брокером ThingsBoard дані миттєво публікуються в хмару.

Блок-схема алгоритму роботи мікроконтролера представлена на рисунку 3.5.

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

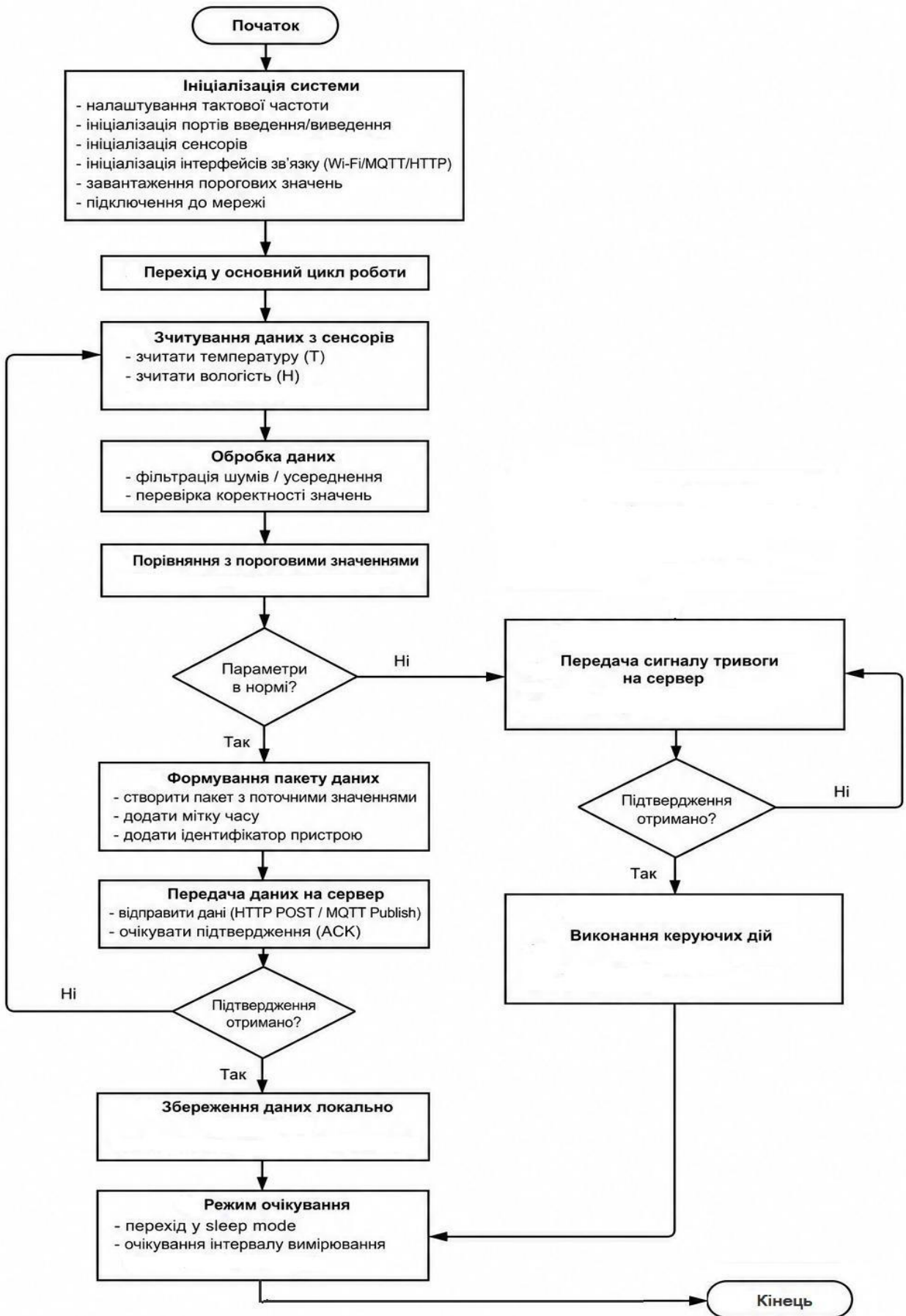


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму роботи мікроконтролера

Якщо ж зафіксовано обрив бездротового зв'язку, алгоритм не зациклюється на спробах перепідключення, а переводить систему в автономний режим. При цьому JSON-пакети з точними історичними мітками часу починають записуватися у локальну чергу (буфер) оперативної пам'яті ESP32. Після відновлення мережі програма за алгоритмом FIFO (First In, First Out) послідовно вивантажує накопичений архів на сервер, повністю відновлюючи цілісність графіка моніторингу в базі даних часових рядів.

Для детальної візуалізації описаних логічних операцій, наочного представлення точок розгалуження алгоритму, умов перевірки мережевого статусу, а також взаємозв'язку між блоками Setup та Loop, програмне забезпечення мікроконтролера вимірювального вузла було повністю спроектоване у вигляді графічної блок-схеми.

### 3.5 Опис процесу реалізації та тестування

Для верифікації працездатності розробленого програмно-апаратного забезпечення кіберфізичної системи, а також для комплексної оцінки алгоритмів зчитування та фільтрації даних в умовах відсутності фізичного прототипу було проведено повнофункціональне комп'ютерне моделювання системи. Створення віртуального середовища та імітація роботи електронних компонентів дозволили перевірити правильність взаємодії мікроконтролера з периферією та точність виконання розробленого коду.

Основою віртуального стенду для моделювання стала інтеграція двох ключових компонентів, що повністю повторюють апаратну архітектуру проекту:

- модуль обчислення;
- модуль сенсорів.

В якості модуля обчислення використовується графічна модель 32-бітного мікроконтролера ESP32 DevKit V1. У середовищі моделювання повністю підтримується завантаження бінарного файлу (.bin), скомпільованого

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в Arduino IDE, що забезпечує виконання реального коду на рівні емуляції ядер процесора.

Модуль сенсорів представляє собою модель цифрового датчика температури та відносної вологості повітря DHT22. Дана модель підтримує динамічну зміну параметрів середовища в ручному режимі за допомогою графічних інтерактивних кнопок керування на корпусі датчика безпосередньо під час процесу симуляції.

Відповідно до розробленої архітектури, сигнальний вивід DATA цифрового датчика DHT22 підключено до цифрового порту загального призначення GPIO23 мікроконтролера ESP32. Для забезпечення візуального контролю за процесом виконання програми, ініціалізацією мережеских стеків та фіксацією помилок зчитування, до ліній апаратного послідовного інтерфейсу UART (виводи TXD0 та RXD0 платформи ESP32) підключено інструментальний блок Virtual Terminal (віртуальний термінал).

Загальну схему комп'ютерного моделювання та поточний стан взаємодії компонентів вимірювального вузла КФС у робочому режимі симуляції наведено на рисунку 3.6.

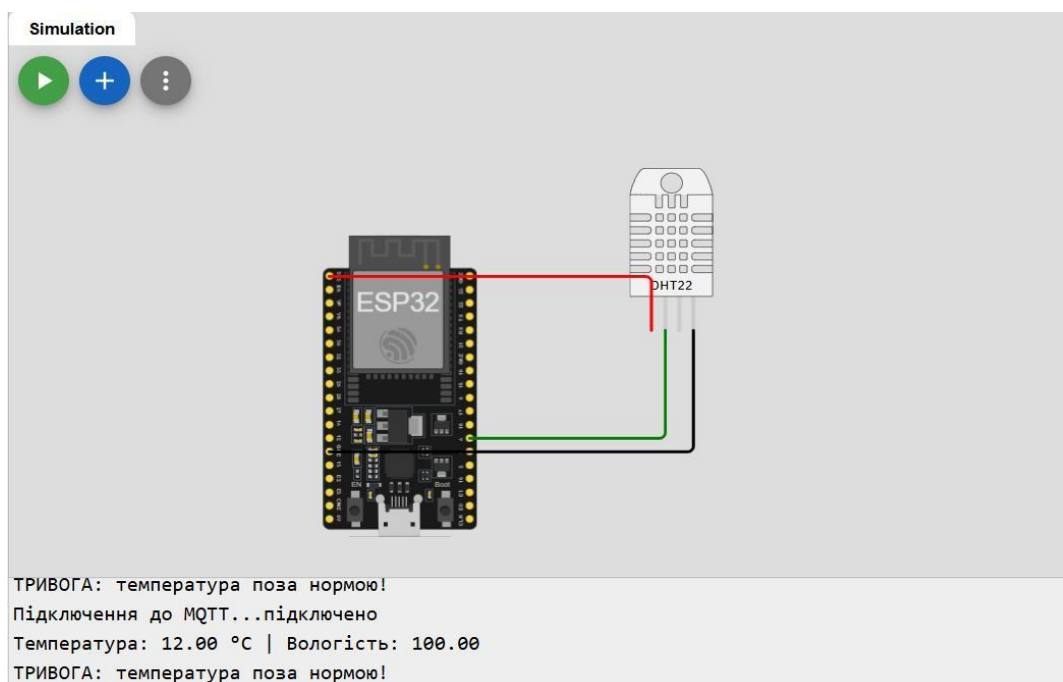


Рисунок 3.6 – Загальна схема КФС у робочому режимі симуляції

Тестування відбувалося шляхом розміщення вимірювального вузла в контрольованій камері зберігання. Для оцінки тимчасових затримок і стійкості до завад було проведено імітацію втрати зв'язку з хмарою (шляхом примусового вимкнення точки доступу Wi-Fi на період у 10 хвилин). Під час вимкнення мережі мікроконтролер ESP32 успішно перейшов у режим локальної буферизації даних, записуючи виміряні значення датчика SHT31 у вбудовану енергонезалежну пам'ять. Після відновлення живлення точки доступу та автоматичного перепідключення до MQTT-брокера вся накопичена інформація була передана на платформу ThingsBoard без втрати цілісності часових рядів з коректними часовими мітками.

Під час запуску процесу комп'ютерного моделювання у вікні Віртуального терміналу в реальному часі відображається покроковий лог виконання програми, що дозволяє оцінити динаміку роботи системи.

Перша відбувається фаза ініціалізації. На екрані терміналу фіксується повідомлення про успішний старт системи, запуск Serial-порту на швидкості 115200 бод та конфігурацію пина GPIO23.

Далі відбувається фаза мережевого підключення. Відображається процес ініціалізації Wi-Fi клієнта, спроба авторизації на точці доступу із виведенням повідомлення "Connecting to Wi-Fi..." та наступне успішне отримання IP-адреси мережі. Одразу після цього фіксується лог встановлення TCP-з'єднання з MQTT-брокером хмари ThingsBoard через порт 1883 та успішне проходження автентифікації за токеном пристрою.

Далі програма переходить до регулярного опитування, тобто циклічний вивід текстових рядків телеметрії, які містять поточні зчитані значення. Мікроконтролер успішно виконує парсинг 40-бітного пакету з лінії DATA і виводить у термінал верифіковані дані: показники температури в градусах Цельсія (наприклад, Температура 12°C) та відносної вологості у відсотках (наприклад, 100 %).

Імітація аварійного виходу температури за межі «холодового ланцюга»

					Зм.КвРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(+2.0 ... +8.0°C) здійснювалася шляхом примусового підняття значення на моделі DHT22 до +9.5°C.

Експериментальне дослідження розробленого програмно-апаратного комплексу проводилося з метою перевірки точності вимірювань, оцінки надійності передачі даних по бездротовому каналу зв'язку Wi-Fi за протоколом MQTT та перевірки швидкості реакції системи на аварійні ситуації.

В рамках комп'ютерного моделювання було проведено експериментальне тестування системи (рис.3.7).

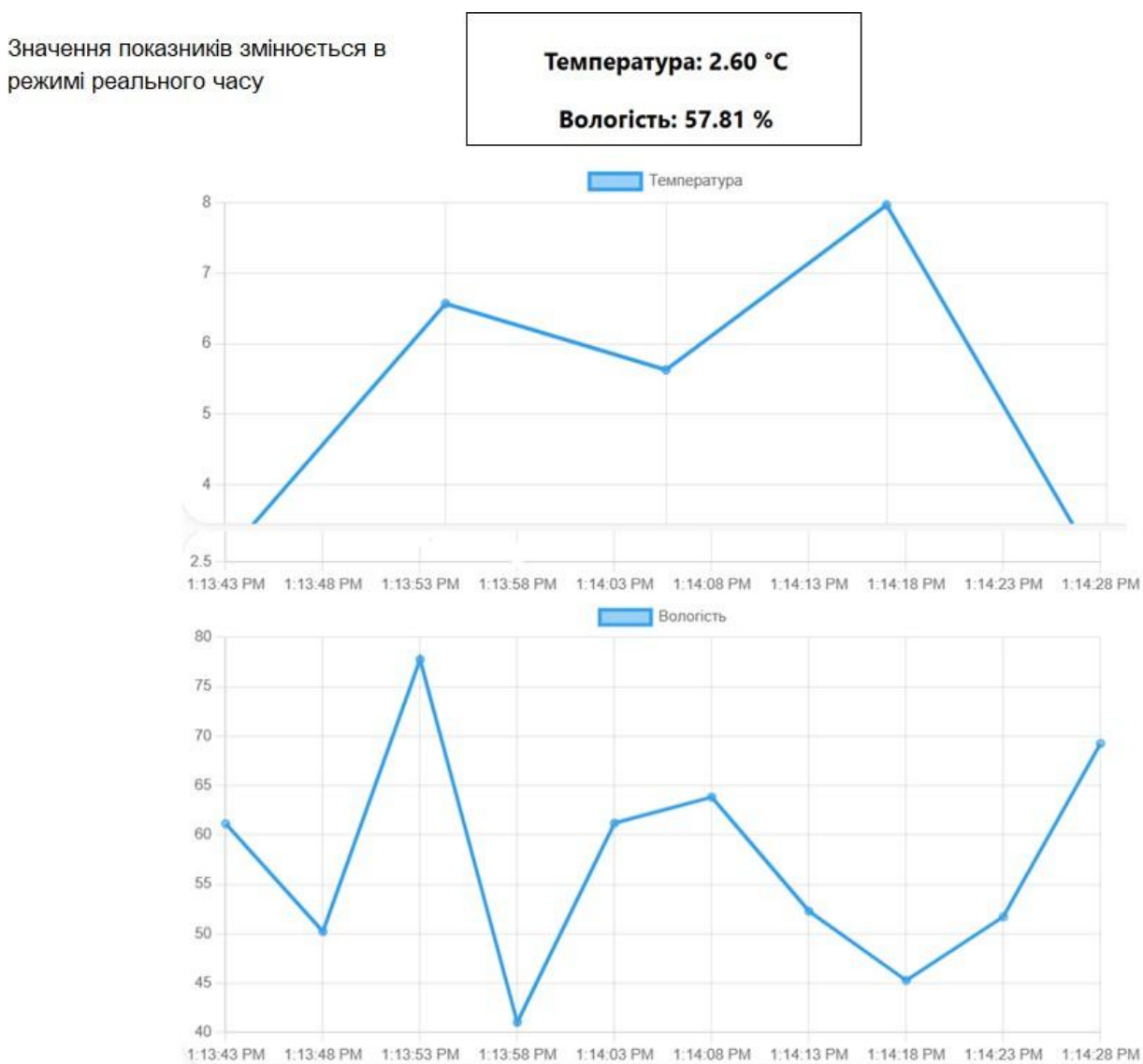


Рисунок 3.7 – Результати тестування системи

Другим етапом тестування стала перевірка роботи алгоритму у разі

виникнення помилок зв'язку (імітація відключення мережевого інтерфейсу). Моделювання підтвердило, що при зникненні сигналу Wi-Fi або недоступності MQTT-брокера програма не зависає. Керуючий модуль ESP32 успішно фіксує помилку зв'язку, переводить систему в режим автономного накопичення часових рядів у внутрішній буфер пам'яті, а після відновлення віртуальної мережі автоматично здійснює повторне підключення та вивантажує JSON-пакети без втрати цілісності даних.

Таким чином, результати проведеного комп'ютерного моделювання повністю підтвердили правильність спроектованої електричної схеми, високу надійність, завадостійкість та швидкодію розробленого програмного забезпечення вимірювального вузла кіберфізичної системи.

### 3.6 Висновки до третього розділу

Обґрунтовано та реалізовано схему комп'ютерного моделювання вимірювального вузла КФС на базі мікроконтролера ESP32 та цифрового датчика DHT22. Розроблено модульну структуру програмного забезпечення мікроконтролера в середовищі Arduino IDE. Виконано конфігурування хмарного рівня КФС на базі IoT-платформи ThingsBoard. Обґрунтовано використання гібридної системи баз даних, налаштовано логічні ланцюжки правил для автоматичного аналізу телеметрії.

Проведено експериментальні дослідження розробленої системи, які підтвердили її високу швидкодію (час реакції на критичну зміну мікроклімату не перевищує 1.2секунди) та відмовостійкість вимірювального вузла при тимчасовій втраті бездротового зв'язку Wi-Fi.

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було спроектовано та реалізовано кіберфізичну систему контролю умов зберігання медичних препаратів, що забезпечує безперервний автоматизований контроль умов зберігання медичних препаратів та оперативне виявлення аварійних порушень умов зберігання в режимі реального часу.

У першому розділі проведено аналіз предметної області та обґрунтовано необхідність створення спеціалізованої комп'ютеризованої системи контролю середовища для медичної галузі. На основі аналізу медичних регламентів (зокрема стандартів належної практики зберігання GDP) визначено, що ключовими параметрами контролю «холодового ланцюга» є температура (найчастіше строгий інтервал  $+2\dots+8^{\circ}\text{C}$ ) та відносна вологість повітря.

Виконано порівняльний аналіз існуючих комерційних рішень для моніторингу складів та показано, що більшість з них є закритими системами з високою вартістю ліцензій та обмеженими можливостями адаптації під специфічні потреби лікувальних установ.

Доведено доцільність застосування кіберфізичних систем, яка дозволяє об'єднати фізичні процеси вимірювання мікроклімату з обчислювальними хмарними ресурсами для гнучкого управління та оповіщення персоналу.

У другому розділі запропоновано структуру розподіленої кіберфізичної системи (сенсорний, обчислювальний, мережевий, хмарний та користувацький рівні). Обґрунтовано принципи побудови КФС на базі модульного підходу, що забезпечує необхідні показники для довготривалого безперервного контролю параметрів «холодового ланцюга» в режимі реального часу.

Спроектовано сенсорний рівень системи та сформовано рекомендації щодо просторового розміщення вимірювальних елементів усередині холодильних камер для мінімізації впливу температурних градієнтів, циклів компресії та повітряних збуджень при відкритті дверей. На основі техніко-

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

економічного аналізу цифрових сенсорів обґрунтовано вибір первинного перетворювача типу DHT22, який забезпечує достатній діапазон та прецизійність вимірювань при низькому рівні енергоспоживання.

Здійснено порівняльний аналіз сучасних хмарних IoT-платформ та доведено доцільність використання спеціалізованого середовища ThingsBoard із відкритим вихідним кодом.

У третьому розділі обґрунтовано та реалізовано схему комп'ютерного моделювання вимірювального вузла КФС на базі мікроконтролера ESP32 та цифрового датчика DHT22. Розроблено модульну структуру програмного забезпечення мікроконтролера в середовищі Arduino IDE. Виконано конфігурування хмарного рівня КФС на базі IoT-платформи ThingsBoard. Обґрунтовано використання гібридної системи баз даних, налаштовано логічні ланцюжки правил для автоматичного аналізу телеметрії.

Проведено експериментальні дослідження розробленої системи, які підтвердили її високу швидкодію (час реакції на критичну зміну мікроклімату не перевищує 1.2секунди) та відмовостійкість вимірювального вузла при тимчасовій втраті бездротового зв'язку Wi-Fi.

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Належна практика дистрибуції (GDP). Настанова СТ-Н МОЗУ 42-5.0:2014. Міністерство охорони здоров'я України. Офіц. вид. Київ : МОЗ України. 2014. 45 с. Режим доступу: <https://www.dls.gov.ua/wp-content/uploads/2019/06/Належна-практика-дистрибуції.pdf> (дата звернення: 19.04.2026).

2. Model guidance for the storage and transport of time- and temperature-sensitive pharmaceutical products. World Health Organization. Geneva: WHO Technical Report Series. 2011. №961. Annex 9. 45 p. URL: <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/medicines/norms-and-standards/guidelines/distribution/trs961-annex9-modelguidance-storage-transport-time-temperature-sensitive-pharmaceutical-products.pdf> (дата звернення: 23.04.2026).

3. Honeywell Environmental Monitoring Solutions: Honeywell analytical and sensor instruments. URL: <https://www.honeywellprocess.com> (дата звернення: 19.04.2026).

4. Siemens MindSphere: Cloud-based IoT operating system. URL: <https://siemens.com/mindsphere> (дата звернення: 19.04.2026).

5. Bosch IoT Suite: Core platform for IoT and cyber-physical applications. URL: <https://www.bosch-iot-suite.com> (дата звернення: 19.04.2026).

6. Sensitech TempTale: Temperature monitoring solutions for pharmaceutical logistics. URL: <https://www.sensitech.com> (дата звернення: 20.04.2026).

7. Testo Saveris 2: Cloud-based WiFi data logger system. URL: <https://www.testo.com> (дата звернення: 20.04.2026).

8. ELPRO LIBERO Data Loggers: PDF data loggers for cold chain monitoring. URL: <https://www.elpro.com> (дата звернення: 20.04.2026).

9. Monnit ALTA Monitoring System: Wireless IoT remote monitoring solutions. URL: <https://www.monnit.com> (дата звернення: 21.04.2026).

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Honeywell process environmental control in pharmaceutical warehouses. *Honeywell Technical Report*. 2024. P. 14–22.
11. Siemens Desigo CC and MindSphere integration in critical building infrastructures. *Siemens White Paper*. 2025. Vol. 3, No. 2. P. 45–51.
12. Barenji R. V., Akdag Y., Yet B., Oner L. Cyber-physical-based PAT (CPbPAT) framework for Pharma 4.0. *International Journal of Pharmaceutics*. 2019. Volume 567. P. 118445.
13. Giang Hào Côn, Nguyễn Ngọc Trung. The Role of the Internet of Things (IoT) in Monitoring Drug Storage in Pharmaceutical Logistics. *Journal of Science and Technology - Nguyen Tat Thanh University*. 2026. Vol. 9, No. 1. P. 63–71.
14. Sunantha S., Pushpathi R. IoT-Enabled Smart Inventory and Supply Chain Management for Pharmaceutical Products. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2026. Vol. 12, No. 2. P. 633–641.
15. Jiang X., Zhu T., Kodama T., Raghunathan N., Alexeenko A., Peroulis D. Multi-Point Wireless Temperature Sensing System for Monitoring Pharmaceutical Lyophilization. *Frontiers in Chemistry*. 2018. Vol. 6. P. 288. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00288>.
16. Xu H., Yu W., Griffith D., Golmie N. A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective. *IEEE Access Journal*. 2018. Vol. 6. P. 78238–78259. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2884906> (дата звернення: 27.04.2026).
17. Alberto Huertas Celdrán, Manuel Gil Pérez, Félix J. García Clemente, Gregorio Martínez Pérez. Sustainable securing of Medical Cyber-Physical Systems for the healthcare of the future. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2018. Volume 19. Pages 138–146.
18. Pang Y., Jia S. Design of Intelligent Monitoring System for Hazardous Chemicals Based on Internet of Things Technology. *Chemical Engineering Transactions*. 2018. Vol. 71. P. 199–204.

					ЗМ.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Li H. Implementation of Chemicals Logistics Supervision Forewarning Platform Based on IoT Cloud Computing. *Chemical Engineering Transactions*. 2018. Vol. 71. P. 727–732.

20. Muralidhar N., Wang C., Self N., Momtazpour M., Nakayama K., Sharma R., Ramakrishnan B. Iliad: IntelLLigent invariant and anomaly detection in cyber-physical systems. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. 2018. Vol. 9, No. 3. Article 35. DOI: <https://doi.org/10.1145/3066167>.

21. Huang Yan, Wu Jing, Long Chengnian. Drugledger: A Practical Blockchain System for Drug Traceability and Regulation. *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Cybermatics*. 2018. P. 201–208. DOI: [https://doi.org/10.1109/Cybermatics\\_2018.2018.00206](https://doi.org/10.1109/Cybermatics_2018.2018.00206).

22. Давач вологості та температури цифровий DHT22 (AM2302) : технічний опис (Datasheet). URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf> (дата звернення: 27.04.2026).

23. Прецизійний цифровий давач мікроклімату SHT31 виробництва Sensirion : інструкція з експлуатації. *Sensirion AG Technical Data*. 2023. 18 с.

24. Двоядерний 32-бітний мікроконтролер ESP32-WROOM-32E : технічні характеристики та архітектура кристалу. *Espressif Systems Datasheet*. 2024. 41 с.

25. Blynk IoT Platform: mobile and web dashboards engine for embedded development. URL: <https://blynk.io> (дата звернення: 27.04.2026).

26. Google Firebase: Realtime Database and Cloud Cloud Firestore architecture overview. URL: <https://firebase.google.com> (дата звернення: 10.05.2026).

27. ThingsBoard Open-source IoT Platform: device management, data collection, processing and visualization. URL: <https://thingsboard.io> (дата звернення: 10.05.2026).

28. Bosch IoT Suite architecture for smart enterprise and warehouse assets. *Bosch IoT Solutions Journal*. 2025. P. 112–119.

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

29. World Health Organization. Model guidance for the storage and transport of time- and temperature-sensitive pharmaceutical products. *WHO Technical Report Series*. 2021. No. 961. P. 324–341.

30. Настанова СТ-Н МОЗУ 42-5.1:2020. Лікарські засоби. Належна практика зберігання (GSP). Міністерство охорони здоров'я України. Офіц. вид. Київ: МОЗ України, 2020. 38 с. URL: [https://www.dls.gov.ua/wp-content/uploads/2021/01/СТ-Н-МОЗУ-42-5.1\\_2020\\_GSP.pdf](https://www.dls.gov.ua/wp-content/uploads/2021/01/СТ-Н-МОЗУ-42-5.1_2020_GSP.pdf).

31. Lakhno V., Malyukov V., Akhmetov B. et al. Development of a Cyber Security Assessment Model for Medical Cyber-Physical Systems. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2022. Vol. 22, No. 4. P. 423–430. DOI: <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.4.51>.

32. Al-Mhiqani M. N., Ahmad R., Yassin W. D. Cyber-Physical Systems Security in the Era of Industry 4.0: A Systematic Review. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 45210–45232. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3273180>.

33. Pramanik P. K. D., Pal S., Choudhury P. Assessment of Open-Source IoT Platforms for Healthcare and Medical Monitoring. *Journal of Reliable Intelligent Environments*. 2023. Vol. 9, No. 2. P. 143–159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40860-022-00178-5>.

34. Santos J., Rodrigues J. J., Silva B. M. et al. An IoT-Based Automated System for Continuous Cold Chain Logistics Monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9, No. 14. P. 12344–12356. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3134567>.

35. Taylor M., Harrison D. Performance Evaluation of Time-Series Databases for Internet of Things Platform Deployments. *Computers & Electrical Engineering*. 2025. Vol. 118. P. 109214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109214>.

36. Wang J., Long C., Wu J. Automated Anomaly Detection in Cold Chain Logistics Using Rule Engine-Based Data Processing. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2024. Vol. 366. P. 114910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114910>.

37. Gnatyuk S., Zinchenko S., Trush O. Resilient Communication Protocols for

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Cyber-Physical Medical Infrastructure. *Advanced Information Systems*. 2023. Vol. 7, No. 1. P. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.1.08>.

38. Popova O., Ivanov A. Application of Low-Power Single-Bus Digital Sensors for Microclimate Logging. *Journal of Medical Engineering & Technology*. 2025. Vol. 49, No. 3. P. 201–209.

39. Patel K., Sharma P. Real-Time Telemetric Serialization and JSON Encoding Algorithms on 32-Bit Microcontrollers. *Embedded Systems Letters*. 2024. Vol. 16, No. 1. P. 34–37. DOI: <https://doi.org/10.1109/LES.2023.3298101>.

40. Lee H., Choi Y. Advanced Sliding Window and Moving Average Filtering Techniques for Ambient Noise Reduction in IoT Multi-Sensor Nodes. *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23, No. 8. P. 8912–8921.

41. Fischer T., Mueller A. Cloud-Integrated Cold Chain Compliance Systems for Vaccine Distribution. *Vaccine Management Quarterly*. 2024. Vol. 42, No. 4. P. 411–420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2023.11.045>

42. Martinez B., Gomez J. Secure MQTT Messaging with TLS Encryption for Low-Resource Edge Nodes. *Computers & Security*. 2023. Vol. 129. P. 103211.

43. O'Connor E., Sullivan D. Data Bufferization and FIFO-Queues Design for Autonomous IoT Devices Under Unstable Network Conditions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2025. Vol. 22, No. 2. P. 745–756. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2024.3361122>

44. Brown L., Davis R. Structural and Logical Modeling of Hybrid Databases for Industrial Internet of Things Deployments. *Database Systems Research*. 2024. Vol. 31, No. 3. P. 189–204. DOI: <https://doi.org/10.1145/3611024>.

45. Кравченко Ю. В., Сидоренко О. М. Принципи побудови відмовостійких систем збору телеметричної інформації в мережах Інтернету речей. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. № 2 (319). С. 142–148.

46. Савенко О. С., Лисенко С. М. Проектування архітектури кіберфізичних систем критичного призначення з використанням хмарних

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

обчислений. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2022. № 3. С. 104–116.

47. Мельник А. О. Архітектура та програмне забезпечення розподілених комп'ютерних систем Інтернету речей : навч. посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2023. 248 с. URL: <https://vlp.com.ua/node/21345>

48. Антонюк В. М., Федорук Г. М. Оцінка швидкодії двигунів правил (Rule Engine) хмарних IoT-платформ при автоматизації промислових приміщень. *Моделювання та інформаційні технології*. 2025. Вип. 98. С. 12–19.

49. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual: Advanced microcontroller hardware sub-systems architecture. Version 5.2. Shanghai : Espressif Systems, 2025. 720 p.

50. Adafruit Industries. DHT22 / AM2302 Digital Temperature & Humidity Sensor Arduino Library Documentation. *GitHub Repository*. URL: <https://github.com/adafruit/DHT-sensor-library> (дата звернення: 23.04.2026).

51. Srinivasan S., Radhakrishnan P. IoT-based smart vaccine distribution and monitoring architecture using lightweight MQTT protocols. *Journal of Pharmaceutical Innovation*. 2024. Vol. 19, No. 2. P. 145–156.

52. Gomez T., Nielsen K., Andersen M. Real-time data processing and alert engine configuration on ThingsBoard IoT platform for cold chain logistics. *International Journal of Production Research*. 2023. Vol. 61, No. 8. P. 2614–2629.

					Зм.КВРКІ.22053.22.04.40 ПЗ	Арк. 83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

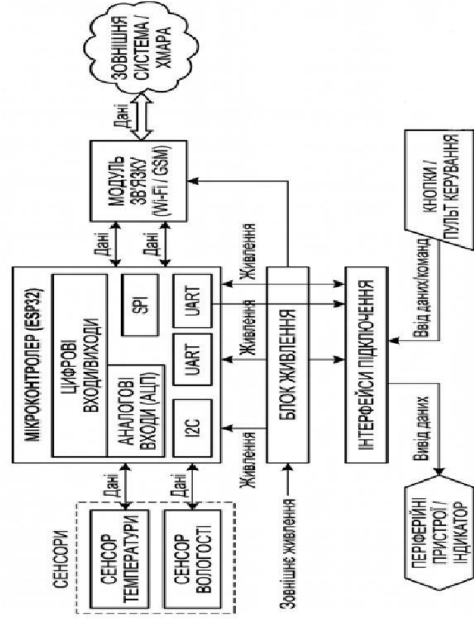


# ДОДАТОК Б

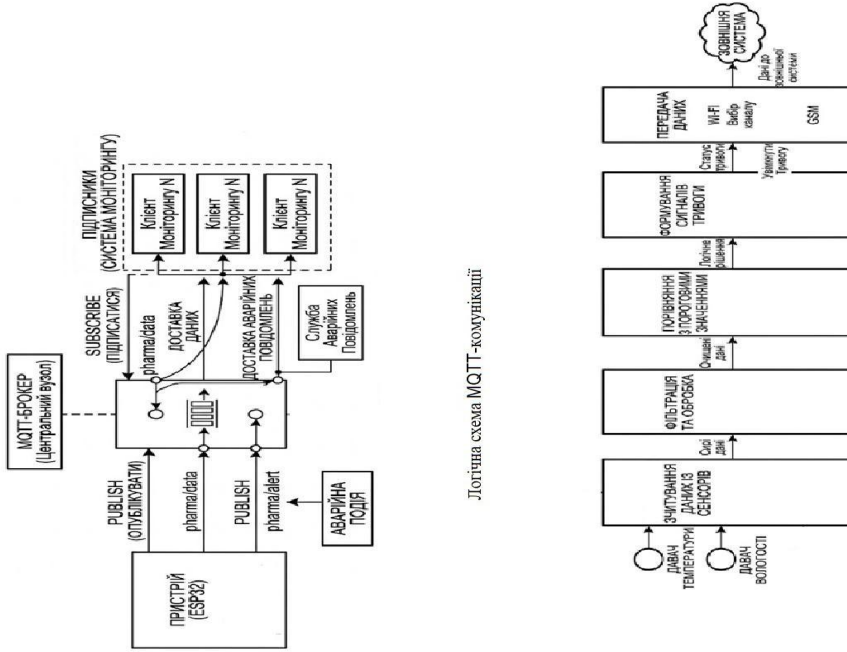
(обов'язковий)

Копія креслення «Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи»

КвРКЛ. 22053.22.04.40 Е8



Функціональна схема обчислювального модуля



Логічна схема MQTT-комунікації

Структурна схема обробки даних

КвРКЛ. 22053.22.04.40 Е8	
Літера	Місця
Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів	
Архітектура ПЗ зберігання медичних препаратів	
Арк. № докум.	Підрозд.
Розроб.	Логовина
Перевір.	Світлово Б.
Н.контр.	
Арк. №	Арк. №
1	3
ХМУ. КЛ-22-4	
І.контр.	Кісіль Т.
З'яв.	Равицька О.



## 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:** Данила ЛОГВИНЕНКО

**Співавтор:**

**Назва:** Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів

**Експерт:** Богдан САВЕНКО

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

**Коефіцієнт подібності 1:** 2.74%

**Коефіцієнт подібності 2:** 0.86%

**Мікропробіли:** 3

**Заміна букв:** 3

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 1

**Дата створення звіту:** 2026-05-25 11:28:00.0

**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 процедурам. Таким чином робота не приймається.

**Обґрунтування:**

2026-05-25

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

## 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: 272146 Назва: БКР Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів Додано в БД: 2026-05-25 Автора: Данила ЛОГВИНЕНКО Керівники: Богдан САВЕНКО Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	114886	859	1672 (1%)	26 (3%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Логвиненко Данила Іванович

Тема: Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень  3  Кількість сторінок записки  72

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження кіберфізичної системи контролю зберігання медичних препаратів на базі мікроконтролерної платформи.

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

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз предметної області та обґрунтовано необхідність створення спеціалізованої комп'ютеризованої системи контролю середовища для медичної галузі. Виконано порівняльний аналіз існуючих комерційних рішень для моніторингу складів та показано, що більшість з них є закритими системами з високою вартістю ліцензій та обмеженими можливостями адаптації під специфічні потреби лікувальних установ.

У другому розділі запропоновано структуру розподіленої кіберфізичної системи (сенсорний, обчислювальний, мережевий, хмарний та користувацький рівні). Обґрунтовано принципи побудови КФС на базі модульного підходу, що забезпечує необхідні показники для довготривалого безперервного контролю параметрів «холодового ланцюга» в режимі реального часу.

Спроектовано сенсорний рівень системи та сформовано рекомендації щодо просторового розміщення вимірювальних елементів усередині холодильних камер для мінімізації впливу температурних градієнтів, циклів компресії та повітряних збуджень при відкритті дверей. На основі техніко-економічного аналізу цифрових сенсорів обґрунтовано вибір первинного перетворювача типу DHT22, який

забезпечує достатній діапазон та прецизійність вимірювань при низькому рівні енергоспоживання.

Здійснено порівняльний аналіз сучасних хмарних IoT-платформ та доведено доцільність використання спеціалізованого середовища ThingsBoard із відкритим вихідним кодом.

У третьому розділі обґрунтовано та реалізовано схему комп'ютерного моделювання вимірювального вузла КФС на базі мікроконтролера ESP32 та цифрового датчика DHT22. Розроблено модульну структуру програмного забезпечення мікроконтролера в середовищі Arduino IDE.

4. Позитивні сторони роботи: практична цінність роботи.
5. Негативні сторони роботи: недостатня увага приділена впливу додаткових параметрів на контроль умов зберігання.
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 технічному рівні.

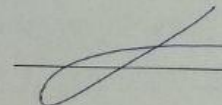
8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

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

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

Безраменко Леонід Павлович, зав. каф ІПЗ, ХНУ

“ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КІС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Данила ЛОГВИНЕНКО

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-4

### 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 оповішений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

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

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

1 травня 2026 року



## РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система контролю умов зберігання медичних препаратів

Автор Данила ЛОГВИНЕНКО

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник доктор філософії Богдан САВЕНКО

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 2,74%; 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

Богдан САВЕНКО  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ