

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система моніторингу температурного режиму холодильного обладнання  
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

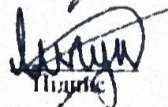
Шифр КвРКІ 022098.22.03.57 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група КІ2-22-3

  
Підпис

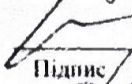
Дмитро ТАЩУК  
Ініціали, прізвище

Керівник асистент  
Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Олексій ЛИГУН  
Ініціали, прізвище

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

  
Підпис

Тетяна КИСІЛЬ  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри КІС

  
Підпис

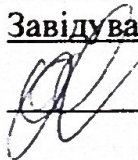
Ольга ПАВЛОВА  
Ініціали, прізвище

«01» червня 2026 р.

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

Ташуку Дмитру Богдановичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система моніторингу температурного режиму холодильного обладнання

Керівник проекту (роботи) Лигун Олексій Олегович, асистент

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 03.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Теоретичні основи досліджуваної проблеми

Проектування програмно-технічного засобу

Програмно-апаратна реалізація та тестування програмно-технічного засобу

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

Схема структурна та принципова кіберфізичної системи

Інтерфейс кіберфізичної системи

Фізичний прототип кіберфізичної системи

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проєктування кіберфізичної системи моніторингу температурного режиму холодильного обладнання	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – проєктування системи моніторингу температурного режиму холодильного обладнання	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

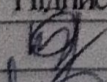
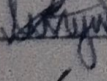
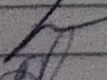
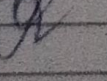
Дмитро ТАЩУК  
Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис

Олексій ЛИГУН  
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 022098.22.03.57 ПЗ	Пояснювальна записка	66		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КВРКІ 022098.22.03.57 Е1	Схема структурна та принципова кіберфізичної системи	1		
3		КВРКІ 022098.22.03.57 Е2	Інтерфейс кіберфізичної системи	1		
4		КВРКІ 022098.22.03.57 Е3	Фізичний прототип кіберфізичної системи	1		

					КВРКІ 022098.22.03.57 ВП					
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	Відомість проекту		Літера	Аркуш	Аркушів	
Розробив		Ташук					У	1	1	
Перевір.		Лигун					ХНУ, КІ2-22-3			
Н. контр.		Кисіль								
Затв.		Павлова		01.06						

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система моніторингу температурного режиму холодильного обладнання».

Автор роботи: Дмитро ТАЩУК.

Керівник роботи: Олексій ЛИГУН.

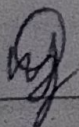
Пояснювальна записка: 66 с., 23 рис., 2 табл., 3 дод., 41 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

АРХІТЕКТУРА, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ,  
ХОЛОДИЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню кіберфізичної системи моніторингу температурного режиму холодильного обладнання на базі мікроконтролерної платформи. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до зберігання продукції, необхідністю суворого дотримання температурних норм у різних галузях, а також потребою у безперервному контролі холодильних установок. Своєчасний моніторинг показників температури та стану дверей дає змогу мінімізувати ризики фінансових втрат через псування продукції і автоматизувати процеси експлуатації технічних засобів.

Метою роботи є проектування, апаратна реалізація та тестування кіберфізичного комплексу для збору, бездротового передавання, хмарного оброблення й візуалізації телеметричних даних у реальному часі. Для досягнення поставленої мети було виконано аналіз сучасних методів побудови IoT-систем моніторингу, обрано оптимальну елементну базу, розроблено структурну і принципову електричну схеми апаратного прототипу. Спроектовано мікропрограмне забезпечення з функцією дистанційного конфігурування меж та налаштовано кросплатформний інтерфейс у хмарному середовищі для перегляду результатів вимірювань, аналізу графіків і отримання тривожних сповіщень.



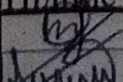
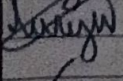


Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Теоретичні основи досліджуваної проблеми .....	5
1.1 Аналіз предметної області і виявлення наявних проблем і завдань .....	5
1.2 Порівняльний аналіз переваг та недоліків існуючих рішень .....	9
1.3 Підходи до вирішення задачі за темою дослідження .....	15
1.4 Постановка задачі.....	17
2 Проєктування програмно-технічного засобу .....	19
2.1 Аналіз та вибір засобів реалізації системи .....	19
2.1.1 Аналіз та вибір апаратної платформи обробки даних.....	19
2.1.2 Вибір сенсорної бази та засобів контролю .....	25
2.1.3 Аналіз програмного середовища та хмарних рішень.....	29
2.2 Проєктування взаємодії апаратних та програмних компонентів.....	32
2.2.1 Принципи підключення сенсорів та локальної індикації .....	33
2.2.2 Організація мережевого зв'язку та передачі даних.....	36
2.3 Узагальнена структурна схема програмно-технічного засобу .....	39
2.4 Висновки до другого розділу .....	42
3 Програмно-апаратна реалізація та тестування програмно-технічного засобу .....	44
3.1 Розробка принципової електричної схеми та віртуальне моделювання.....	44
3.1.1 Проєктування принципової електричної схеми пристрою .....	44
3.1.2 Розробка віртуального прототипу .....	47
3.2 Апаратна реалізація та фізичне конструювання .....	49
3.3 Програмна реалізація кіберфізичної системи та інтеграція з хмарним середовищем .....	54
3.4 Тестування програмно-апаратного комплексу .....	59
3.5 Висновки до третього розділу .....	63

КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ				
Зм.	Арк.	Молокун.	Підпис	Дата
Виконав		Дмитро ТАЩУК		
Перевір.		Олексій ЛИГУН		
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		
Кіберфізична система моніторингу температурного режиму холодильного обладнання.			Літера	Арк.вс
Пояснювальна записка			у	Арк.вс
				2
				72
ХНУ КІ2-22-3				

Висновки .....	65
Перелік джерел посилань .....	68
Додаток А Копія креслення «Схема структурна та принципова кіберфізичної системи» .....	73
Додаток Б Копія креслення «Інтерфейс кіберфізичної системи» .....	74
Додаток В Копія креслення «Фізичний прототип кіберфізичної системи»....	75

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Сучасний розвиток кіберфізичних систем відкриває принципово нові можливості для автоматизації промислових та комерційних процесів. Подібні технології охоплюють дедалі ширший спектр галузей, суттєво підвищуючи ефективність виробництва та якість управління технологічними процесами. Завдяки інтеграції фізичного середовища з цифровими обчислювальними компонентами стає можливим як часткове, так і повне виключення людини з циклу контролю над важливими параметрами.

Безперервне відстеження температурного режиму холодильного обладнання, миттєве реагування на відхилення від заданих значень та можливість дистанційного контролю – усе це є не просто зручністю, а нагальною виробничою необхідністю для підприємств харчової промисловості, фармацевтики та роздрібною торгівлі. Особливої уваги заслуговує здатність таких систем формувати архів показників роботи обладнання: накопичені дані дозволяють виявляти тенденції до несправностей ще до їх фактичного виникнення, що суттєво знижує ризик псування продукції та непередбачуваних фінансових втрат [1].

З огляду на зазначене, розроблення автоматизованих рішень для моніторингу холодильного обладнання на базі кіберфізичних систем є актуальним напрямом як у науковому, так і в практичному вимірі. У рамках дипломного проекту було поставлено завдання створити кіберфізичну систему моніторингу температурного режиму холодильного обладнання, що забезпечує збір, передачу та візуалізацію температурних даних із функцією автоматичного сповіщення оператора в разі виникнення критичних відхилень від норми.

					КвРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПРОБЛЕМИ

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

Збереження харчових продуктів, медичних препаратів та інших температурочутливих матеріалів є одним із ключових завдань сучасної торгівлі, харчової промисловості, фармацевтики та логістики. Основним інструментом забезпечення необхідних умов зберігання слугує холодильне обладнання, яке підтримує задані температурні параметри протягом усього терміну зберігання продукції. Проте сам факт наявності холодильного обладнання не гарантує стабільного дотримання потрібного температурного режиму – відповідальним і технічно складним завданням є саме постійний контроль над ним.

Холодильне обладнання охоплює широкий спектр пристроїв: від побутових холодильників і морозильних камер до промислових холодних кімнат, фармацевтичних холодильників та охолоджувальних вітрин у торгових залах. Залежно від призначення, до такого обладнання висуваються різні вимоги щодо температурного діапазону. Наприклад, для зберігання медичних імунобіологічних препаратів (МІБП) регламентованими є діапазони  $+2^{\circ}\text{C} \dots +8^{\circ}\text{C}$  та  $-20^{\circ}\text{C} (\pm 10^{\circ}\text{C})$ , тоді як конструкція стандартних холодильних камер для харчових продуктів передбачає підтримку температури від  $0^{\circ}$  до  $+10^{\circ}\text{C}$ . Такі вимоги регулюються нормативними документами та санітарними правилами, контроль виконання яких покладається на відповідні структури та на самих власників обладнання [10].

Традиційний підхід до контролю температурного режиму холодильного обладнання передбачає регулярний ручний огляд: в рамках виробничого контролю огляд щоденно відбувається всередині холодильних камер, холодильників, охолоджуваних вітрин і будь-якого іншого холодильного обладнання, а для вимірювань застосовуються термометри та психрометри, встановлені на видних місцях. Однак такий підхід має суттєві недоліки: він є нерегулярним за своєю природою, повністю залежить від уважності та

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кваліфікації персоналу і не забезпечує безперервного відстеження параметрів. У проміжках між плановими перевітками можуть виникати критичні відхилення температури, які залишаються непоміченими аж до наступного огляду.

Особливо гостро ця проблема проявляється у нічний час, у вихідні дні або під час перебоїв з електропостачанням. Відключення електроенергії – реальна загроза для підприємств будь-якого масштабу. При недотриманні температурних режимів зберігання харчові продукти можуть стати небезпечними для споживання, тому будь-яке несвоєчасно виявлене порушення може призвести до значних матеріальних збитків та санітарних ризиків.

Акуальність проблеми контролю температури визначається тим, у яких сферах застосовується холодильне обладнання. Усі категорії швидкопсувної продукції, від замороженого м'яса до охолодженої молочної продукції, вимагають суворого температурного контролю, оскільки порушення призводять до псування продукту і санітарних ризиків. У фармацевтичній галузі ситуація ще більш серйозна: більшість ліків і вакцин чутливі до температурних коливань, а виробники зобов'язані стежити за дотриманням температурного режиму відповідно до міжнародних вимог GDP і GSP.

З точки зору мікробіологічних процесів, підвищення температури навіть на кілька градусів вище норми може кардинально прискорити розмноження патогенних мікроорганізмів у харчових продуктах. Під дією мікроорганізмів, а також унаслідок біохімічних процесів, що відбуваються в продуктах, їхня якість може погіршуватися. При температурі повітря нижче 0°C життєдіяльність мікроорганізмів уповільнюється і біохімічні процеси протікають повільніше. Таким чином, точне та безперервне дотримання температурних меж є не просто організаційною вимогою, а реальним захистом здоров'я кінцевого споживача.

Аналіз ринку показує, що традиційні рішення для контролю температури холодильного обладнання можна поділити на кілька категорій: механічні термометри та термографи, електронні реєстратори температури (логери), а

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також більш сучасні автоматизовані системи диспетчеризації. Кожна з цих категорій має власний набір переваг та обмежень.

Механічні термометри є найпростішим і найдоступнішим рішенням, однак вони фіксують температуру лише в момент зчитування і не забезпечують ні архівування, ні автоматичного сповіщення. Електронні логери роблять крок уперед – вони зберігають дані з заданою періодичністю, проте, як правило, потребують фізичного підключення до комп'ютера для зчитування інформації і не підтримують оповіщення в режимі реального часу. Реєстратор температури – електронний прилад для вимірювання показників температури, який безперервно зчитує дані та зберігає їх в пам'яті із заданою періодичністю. Такий підхід обмежує оперативність реагування на нештатні ситуації.

Більш просунутими є системи диспетчеризації, які оснащуються спеціальними датчиками, з'єднаними між собою мережею вузлів у точці диспетчеризації, якими володіють різні інфраструктурні установки, і дозволяють керувати обладнанням дистанційно. Проте подібні рішення, як правило, розраховані на великі торгові комплекси чи розподілені холодіві ланцюги і є достатньо дорогими та складними у впровадженні для малого та середнього бізнесу.

Сучасна концепція кіберфізичних систем пропонує принципово новий підхід до вирішення описаних проблем. Кіберфізична система поєднує фізичні пристрої – датчики, виконавчі механізми, обладнання – з цифровою обчислювальною складовою, забезпечуючи двосторонній обмін даними між фізичним і кіберпростором. У контексті моніторингу холодильного обладнання це означає, що датчики температури, встановлені безпосередньо в зоні зберігання продукції, безперервно передають дані на центральний обчислювальний вузол, який аналізує отримані значення, зберігає їх в архіві та генерує сповіщення у разі виходу параметрів за допустимі межі.

Вся система віддаленого моніторингу складається з трьох елементів: датчики температури, розташовані безпосередньо на контрольованих ділянках,

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

які збирають дані і передають їх на центральний сервер; сервер, що збирає, зберігає, обробляє і в разі потреби видає сповіщення, якщо температура певного датчика виходить за встановлену межу; сповіщення з сервера, що надходять на комп'ютер, телефон або спеціальний пульт [16].

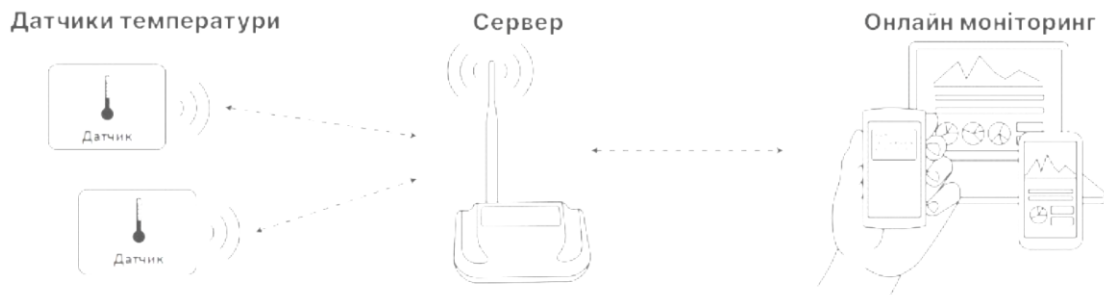


Рисунок 1.1 – Схема системи віддаленого моніторингу [2]

Такий підхід дозволяє суттєво підвищити надійність і своєчасність реагування порівняно з традиційними методами. Автоматизована система відстежує температури цілодобово і позбавляє необхідності задіювати додатковий персонал виключно для функцій контролю. Крім того, накопичений архів температурних даних відкриває можливість для аналізу тенденцій у роботі обладнання: виявлення поступового погіршення теплоізоляції, неефективності компресора або інших несправностей ще до того, як вони призведуть до аварійної ситуації [1].

На основі проведеного аналізу предметної області можна сформулювати основні проблеми, що потребують вирішення:

По-перше, відсутність безперервного автоматизованого моніторингу температурного режиму на більшості об'єктів малого та середнього бізнесу, де традиційно покладаються на ручний контроль або прості реєстратори без функцій онлайн-сповіщення.

По-друге, відсутність системи оперативного оповіщення відповідального персоналу у разі виникнення критичних відхилень від норми – особливо в позаробочий час.

По-третє, відсутність зручного інтерфейсу для перегляду поточних показників та архіву температурних даних, який би забезпечував прозорий та документований контроль над режимом зберігання.

По-четверте, складність та висока вартість існуючих промислових рішень, що унеможлиблює їх широке впровадження на невеликих об'єктах.

Виходячи з цього, основним завданням даної кваліфікаційної роботи є розробка кіберфізичної системи моніторингу температурного режиму холодильного обладнання, яка забезпечуватиме безперервний збір температурних даних з датчиків, їх передачу та збереження, візуалізацію поточних і архівних показників, а також автоматичне сповіщення оператора у разі виходу температури за встановлені допустимі межі. Система має бути економічно доступною, технічно надійною та придатною для застосування на різних об'єктах незалежно від їхнього масштабу.

## 1.2 Порівняльний аналіз переваг та недоліків існуючих рішень

На сьогоднішній день на ринку представлено широкий спектр рішень для моніторингу температурного режиму холодильного обладнання – від простих механічних термометрів до складних промислових систем диспетчерського управління. Кожен клас рішень має свій набір характеристик, що визначають сферу його доцільного застосування. Для обґрунтування архітектури розроблюваної кіберфізичної системи необхідно провести порівняльний аналіз існуючих підходів, виявивши їхні ключові переваги та обмеження.

Найпростішим і найдоступнішим класом засобів контролю температури є механічні та аналогові термометри. Їх використання не потребує жодної інфраструктури, налаштування або технічного обслуговування, крім регулярної

					КвРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перевірки показань. Саме тому такі прилади традиційно встановлюються на холодильному обладнанні у малому бізнесі, закладах харчування та побутовому секторі.

Проте механічні засоби мають принципову ваду – вони є пасивними інструментами спостереження. Показання такого термометра фіксуються виключно в момент безпосереднього огляду персоналом, а будь-які відхилення між плановими перевірками залишаються непоміченими. Система не здатна сформувати архів показників, подати сигнал тривоги або автоматично повідомити відповідальну особу. При нічних перебоях у електропостачанні або несправності компресора в неробочий час реагування відбудеться лише наступного дня, коли псування продукції може бути вже незворотнім. Крім того, відсутність документованої архівної інформації унеможливорює перевірку дотримання температурних норм під час аудиту або інспекції.



Рисунок 1.2 – Механічний термометр [3]

Наступним щаблем еволюції засобів контролю температури є електронні реєстратори даних – логери. Це компактні автономні пристрої, що безперервно зчитують показання вбудованого або зовнішнього датчика та зберігають їх у внутрішній пам'яті з визначеною користувачем частотою. Логери широко застосовуються у фармацевтичній галузі, харчовій промисловості та

транспортній логістиці для документування умов зберігання та перевезення чутливих вантажів.

До переваг логерів належать компактність, автономність живлення (деякі моделі здатні працювати до кількох місяців без заміни батарей), довготривале зберігання даних в енергонезалежній пам'яті, а також сумісність із міжнародними стандартами якості, зокрема HACCP, ISO 22000 та вимогами GDP. Більшість моделей мають USB-інтерфейс для передачі накопичених даних на комп'ютер із подальшим формуванням звітів.

Водночас класичні логери мають суттєве обмеження – відсутність передачі даних у режимі реального часу. Оператор може отримати інформацію про відхилення від норми лише після фізичного підключення пристрою до комп'ютера, тобто вже після факту порушення. Це означає, що логери є ефективним інструментом для постфактум-аналізу та документування, але не забезпечують оперативного реагування на нештатні ситуації. Деякі сучасні моделі оснащуються модулями Bluetooth або Wi-Fi для передачі даних, однак таке рішення зазвичай суттєво підвищує вартість пристрою та залишає питання централізованого управління кількома логерами невирішеним.



Рисунок 1.3 – Реєстратор даних [4]

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окремою категорією є бездротові системи реєстрації, зокрема на базі протоколу ZigBee. Датчики в таких мережах здатні працювати автономно тривалий час при низькому енергоспоживанні й забезпечують безпечну передачу даних на відстань до 100 метрів. Перевагою є висока енергоефективність та гарантована безпека передачі, однак такі системи потребують спеціалізованого координатора мережі та відповідної інфраструктури [5].

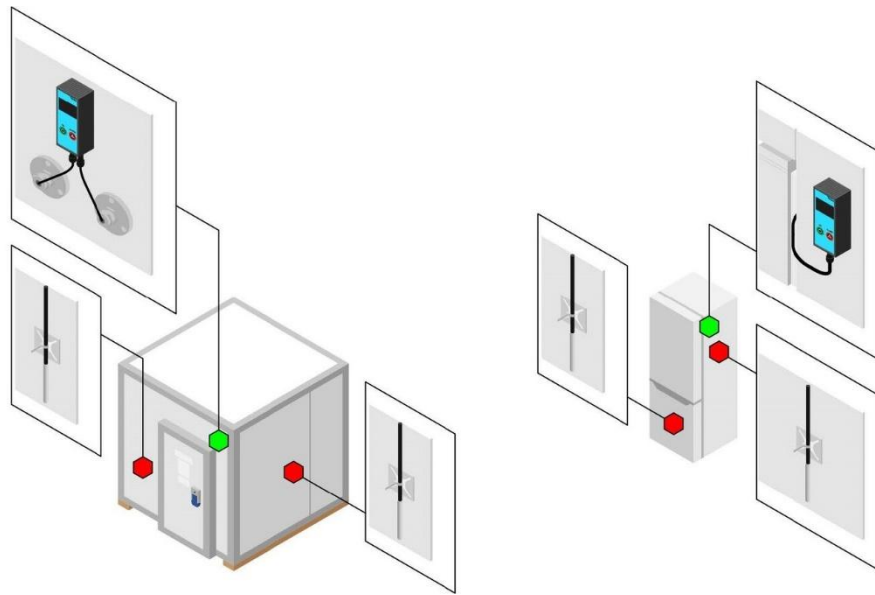


Рисунок 1.4 – Системи температурного моніторингу на базі протоколу ZigBee [6]

На значно вищому рівні складності та функціональності знаходяться промислові системи диспетчерського управління і збору даних – SCADA. Такі системи забезпечують централізований моніторинг і управління технологічними процесами в режимі реального часу, підтримують зберігання архіву показників, формування звітності, налаштування порогових значень і автоматичне сповіщення операторів. Найбільш поширені комерційні рішення цього класу представлені продуктами Siemens, Honeywell, Rockwell Automation, Emerson, Wonderware та інших великих виробників.

У контексті моніторингу холодильного обладнання SCADA-рішення є найбільш функціонально повними: вони підтримують підключення великої кількості датчиків, забезпечують наочну візуалізацію процесів через НМІ-



меншими витратами, ніж у традиційних промислових рішеннях. Сучасні мікроконтролери серії ESP32 поєднують у собі підтримку Wi-Fi та Bluetooth, достатню обчислювальну потужність для локальної обробки даних, широкі можливості підключення периферії та низьку вартість, що робить їх популярним рішенням як у прикладних дослідженнях, так і в комерційних продуктах.

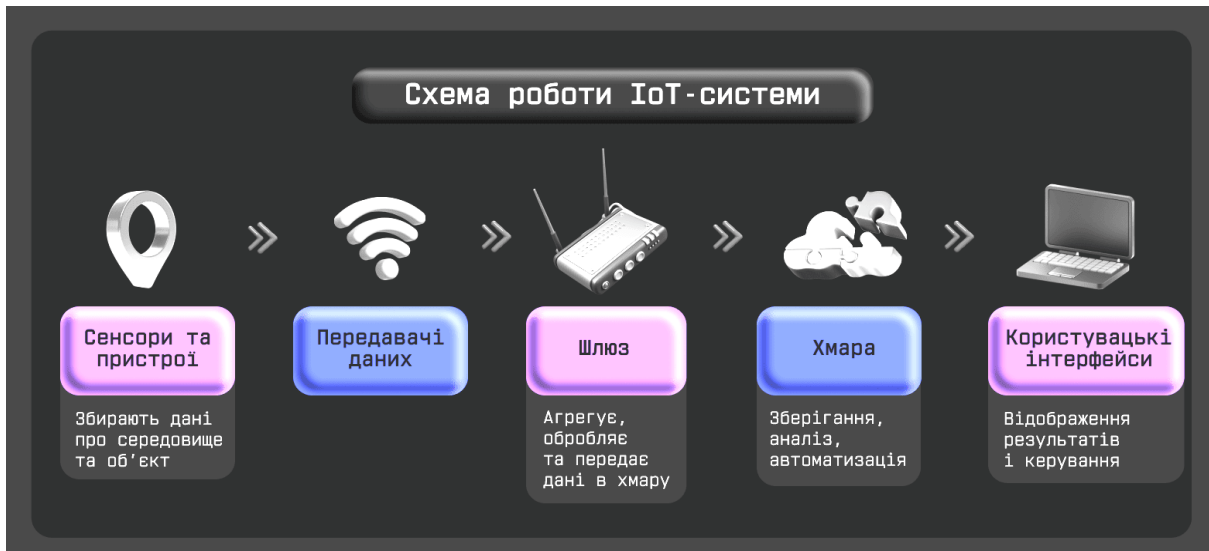


Рисунок 1.6 – Схема роботи IoT-системи [11]

Типова IoT-архітектура системи моніторингу температури будується за принципом трирівневої структури: рівень збору даних (датчики і мікроконтролер), рівень передачі та обробки (локальний або хмарний сервер, MQTT-брокер), і рівень відображення та сповіщення (веб-інтерфейс, мобільний застосунок, повідомлення у Telegram тощо). Такий підхід забезпечує безперервний моніторинг у режимі реального часу, автоматичне сповіщення при виході показників за межі допустимого діапазону, збереження архіву даних та доступ до них з будь-якої точки через мережу Інтернет [11].

Головними перевагами IoT-орієнтованих кіберфізичних систем є відносно низька вартість апаратних компонентів, відкритість та гнучкість архітектури, легкість масштабування (додавання нових датчиків і точок контролю), підтримка хмарних сервісів і мобільних платформ. Водночас такі системи мають власні недоліки. По-перше, відкрите підключення до мережі Інтернет потенційно

розширює поверхню кіберзагроз, що потребує застосування механізмів захисту. По-друге, безперебійна робота залежить від стабільності мережевого з'єднання – при втраті зв'язку необхідно передбачити локальне буферування даних. По-третє, самостійно розроблені системи можуть поступатися комерційним за рівнем технічної підтримки та сертифікації.

Зведений порівняльний аналіз розглянутих класів рішень дозволяє зробити ряд висновків. Механічні термометри є найпростішими і найдешевшими, але повністю позбавлені функцій автоматизованого збору та передачі даних. Електронні логери забезпечують документування, проте, як правило, не підтримують оперативного сповіщення в режимі реального часу без додаткової інфраструктури. Промислові SCADA-системи є найбільш функціональними, але надмірно дорогими та складними для застосування на об'єктах малого і середнього масштабу. IoT-рішення на базі кіберфізичних систем займають нішу між логерами і SCADA, поєднуючи доступність, безперервний онлайн-моніторинг і гнучкість налаштування, що робить їх найбільш відповідними для широкого кола практичних застосувань.

Виходячи з цього аналізу, для задачі розробки системи моніторингу температурного режиму холодильного обладнання найбільш обґрунтованим є підхід на базі кіберфізичної системи з використанням доступних IoT-компонентів, що забезпечить безперервний збір даних, їх передачу у режимі реального часу, формування архіву та автоматичне оповіщення оператора при виникненні відхилень.

### 1.3 Підходи до вирішення задачі за темою дослідження

На основі проведеного аналізу предметної області та порівняння існуючих рішень можна визначити кілька принципових підходів до побудови системи моніторингу температурного режиму холодильного обладнання. Вибір

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конкретного підходу визначається балансом між функціональними вимогами, вартістю реалізації та надійністю кінцевого рішення.

### 1. Підхід на основі хмарних IoT-платформ

Перший підхід передбачає використання готових хмарних IoT-платформ – таких як AWS IoT, Google Cloud IoT або Microsoft Azure IoT Hub. У цьому випадку мікроконтролер збирає дані з датчиків і передає їх безпосередньо на хмарний сервіс, який забезпечує зберігання, обробку та візуалізацію даних. Хмарні платформи надають готову інфраструктуру, механізми автентифікації пристроїв, масштабованість та вбудовані інструменти для побудови дашбордів і налаштування сповіщень [15].

Перевагами цього підходу є висока надійність, відсутність необхідності підтримувати власний сервер та широкі можливості для масштабування. Водночас він має деякі недоліки: залежність від стороннього постачальника хмарних послуг а також потреба у постійному стабільному підключенні до мережі Інтернет.

### 2. Підхід на основі локального сервера

Другий підхід передбачає побудову повністю автономної системи, де всі компоненти – збір даних, їх обробка, зберігання та відображення – розгорнуті локально, без залежності від зовнішніх хмарних сервісів. Роль серверного вузла виконує одноплатний комп'ютер або виділений сервер, на якому розгорнуто базу даних та веб-застосунок для відображення показників. Мікроконтролер передає дані на локальний сервер за протоколом MQTT або HTTP.

Такий підхід забезпечує повний контроль над даними, незалежність від інтернет-з'єднання у частині основної функціональності та відсутність щомісячних витрат на хмарні сервіси. Його застосовують зокрема тоді, коли важлива конфіденційність зібраних даних або коли на об'єкті не гарантовано стабільне підключення до Інтернету. Основним обмеженням є потреба самостійно забезпечувати надійність, резервне копіювання та технічне обслуговування серверної частини.

### 3. Підхід на основі тривірневої IoT-архітектури

Третій підхід є синтезом двох попередніх і являє собою тривірневу архітектуру, що вважається найбільш збалансованим рішенням для задач подібного класу. Перший рівень – периферійний – включає датчики температури та мікроконтролер, що здійснює первинний збір і локальну обробку даних. Другий рівень – серверний – реалізує прийом, збереження та аналіз даних, формування подій і сповіщень. Третій рівень – клієнтський – забезпечує відображення поточних і архівних показників через веб-інтерфейс або мобільний застосунок [14].

Для передачі даних між рівнями найбільш поширеним є протокол MQTT, що відрізняється легковагістю, низьким енергоспоживанням і надійністю доставки повідомлень навіть за нестабільного каналу зв'язку. Такий підхід дозволяє гнучко комбінувати локальне та хмарне зберігання, забезпечує масштабованість і при цьому не прив'язує систему жорстко до жодного конкретного постачальника послуг [13].

Обраний основний підхід на основі хмарних IoT платформ для розробки кіберфізичної системи моніторингу температурного режиму холодильного обладнання в рамках даної кваліфікаційної роботи, оскільки він повністю відповідає сформульованим вимогам, а також ідеально підходить для проектування в межах дипломного проєкту.

#### 1.4 Постановка задачі

На основі проведеного аналізу предметної області, виявлених проблем та розглянутих підходів до їх вирішення можна сформулювати конкретну задачу даної кваліфікаційної роботи.

Метою роботи є проектування та розробка кіберфізичної системи моніторингу температурного режиму холодильного обладнання, яка забезпечує безперервний автоматизований контроль температурних показників, їх

зберігання та відображення, а також своєчасне оповіщення користувача у разі виникнення відхилень від заданих норм.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати вимоги до температурного режиму зберігання продукції та визначити допустимі діапазони значень для різних типів холодильного обладнання;
- обрати та обґрунтувати апаратну платформу системи, зокрема мікроконтролер і датчики температури, що відповідають вимогам точності, надійності та економічної доцільності;
- розробити програмне забезпечення мікроконтролерного вузла для збору даних з датчиків та їх передачі на серверну частину системи;
- реалізувати частину системи, що забезпечує прийом, збереження та обробку температурних даних;
- реалізувати відображення поточних показників температури та перегляду даних;
- реалізувати механізм автоматичного сповіщення оператора при виході температурних показників за встановлені допустимі межі;
- провести тестування розробленої системи та оцінити її відповідність поставленим вимогам.

Розроблювана система повинна відповідати таким основним вимогам: безперервність збору даних у режимі реального часу, надійність передачі показників навіть за нестабільного мережевого з'єднання, зручність інтерфейсу для кінцевого користувача.

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ

На етапі проєктування кіберфізичної системи моніторингу потрібно визначити оптимальну архітектуру, яка забезпечить надійний збір даних, їх обробку та передачу в режимі реального часу. Основна задача даного розділу полягає у виборі апаратних та програмних засобів, які дозволять реалізувати функціональні вимоги до системи за умов раціонального використання ресурсів та зручності експлуатації.

### 2.1 Аналіз та вибір засобів реалізації системи

Для побудови ефективного прототипу системи моніторингу температурного режиму холодильного обладнання необхідно провести порівняльний аналіз наявних технічних рішень та вибрати ті, що найкраще відповідають концепції IoT

#### 2.1.1 Аналіз та вибір апаратної платформи обробки даних

Основою будь-якої кіберфізичної системи є обчислювальне ядро – мікроконтролерна платформа. У контексті розробки системи моніторингу холодильного обладнання ця платформа виконує роль інтелектуального шлюзу (IoT-gateway), який повинен забезпечувати безперебійний збір даних із сенсорної периферії, їх первинну обробку, прийняття локальних рішень та підтримання стабільного зв'язку з віддаленою хмарною інфраструктурою [16].

З огляду на специфіку роботи системи в режимі реального часу, до апаратної платформи висувається низка концептуальних вимог:

– наявність достатньої обчислювальної потужності для паралельної обробки сенсорних даних та мережевих протоколів;

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- апаратна підтримка стека протоколів TCP/IP та бездротових технологій (Wi-Fi) для інтеграції в Інтернет речей;
- достатній обсяг оперативної та постійної пам'яті для роботи зі складними IoT-бібліотеками та криптографічними сертифікатами;
- апаратна сумісність із промисловими стандартами напруги (бажано 5В) для прямого керування периферійними пристроями без додаткових логічних перетворювачів.

Для пошуку оптимального рішення було проведено порівняльний аналіз трьох найбільш поширених архітектур мікроконтролерів, які сьогодні застосовуються при проєктуванні IoT-систем.

1. Класична 8-бітна архітектура (на прикладі плат серії Arduino UNO R3). Платформи на базі мікроконтролерів сімейства AVR (наприклад, ATmega328P) є загальновизнаним стандартом для створення базових електронних прототипів. Їхньою головною перевагою є простота, 5-вольтова логіка та величезна база готових програмних рішень. Проте для побудови сучасної кіберфізичної системи ця архітектура має серйозні обмеження:

- відсутність інтегрованих мережевих інтерфейсів: мікроконтролер не має вбудованого Wi-Fi, що вимагає підключення зовнішніх модулів. Це концептуально ускладнює систему та знижує загальну надійність каналу передачі даних;
- обмеженість ресурсів: обсяг оперативної пам'яті (лише 2 КБ) є недостатнім для формування великих пакетів даних та встановлення захищених мережевих з'єднань, які вимагаються сучасними хмарними сервісами;
- низька обчислювальна потужність: тактова частота ядра (16 МГц) та 8-бітна архітектура суттєво ускладнюють, а подекуди унеможливають швидку обробку сучасних криптографічних протоколів безпеки, які є обов'язковим стандартом для авторизації та захищеного обміну даними з IoT-серверами.

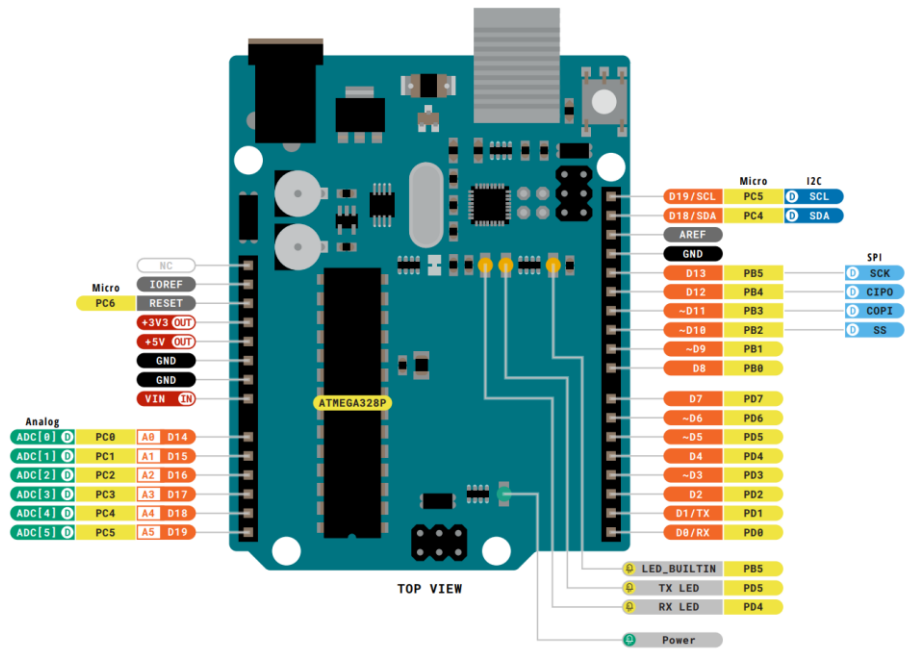


Рисунок 2.1 – Arduino Uno R3 [28]

2. Архітектура "System-on-a-Chip" (SoC) сімейства ESP. Мікроконтролери ESP8266 та ESP32 від компанії Espressif розроблялися спеціально для сегмента Інтернету речей. Їхньою ключовою особливістю є інтеграція потужного процесора та радіомодуля Wi-Fi на одному кристалі [19].

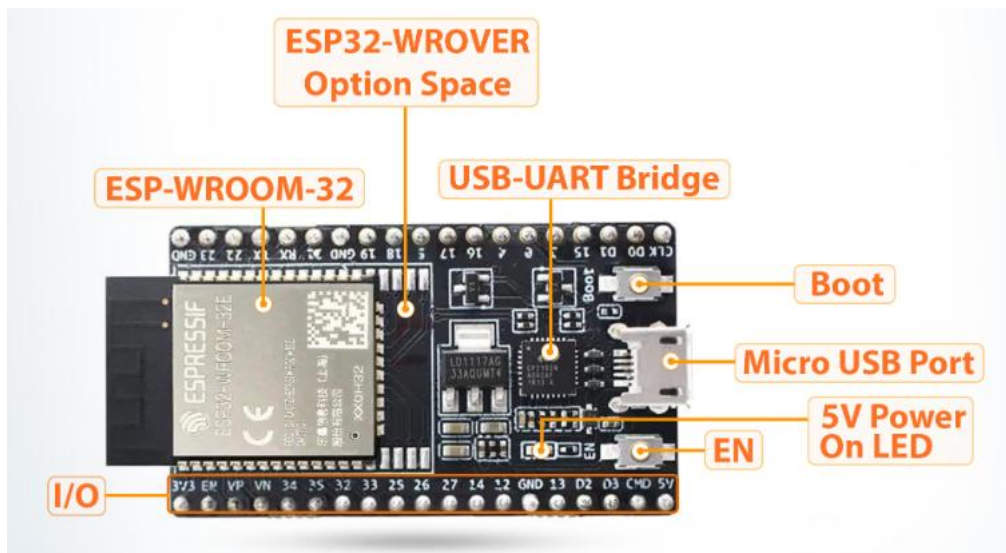


Рисунок 2.2 – ESP32 [29]

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ESP8266 пропонує базовий функціонал для підключення до мережі, але має обмежену кількість контактів вводу/виводу (GPIO) та лише один аналого-цифровий перетворювач, що звужує можливості масштабування системи. Крім того, одноядерна архітектура вимагає обережного написання коду, щоб опитування датчиків не блокувало фонові процеси роботи Wi-Fi [21].

ESP32 вирішує ці проблеми завдяки двоядерній архітектурі та високій тактовій частоті. Однак обидва чипи працюють на логічному рівні 3.3В. Це означає, що при проєктуванні системи та підключенні стандартної 5-вольтової периферії (наприклад, класичних LCD-дисплеїв або певних типів промислових реле) необхідно ускладнювати архітектуру додатковими перетворювачами рівнів сигналів [24].

3. Комбінована двочипова архітектура (на прикладі Arduino UNO R4 WiFi). Новітнім підходом у проєктуванні IoT-платформ є розділення завдань між двома незалежними процесорами, розташованими на одній платі. Яскравим представником цієї концепції є плата Arduino UNO R4 WiFi.

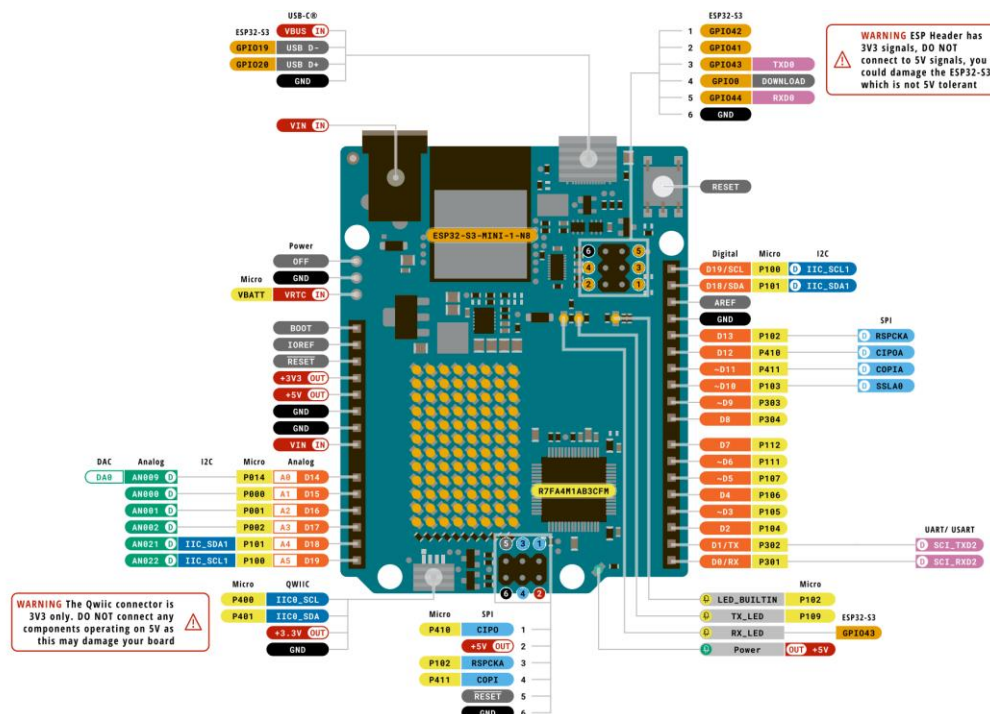


Рисунок 2.3 – Arduino Uno R4 [30]

Її архітектура побудована на взаємодії двох обчислювальних ядер:

Основний мікроконтролер керування: 32-бітний мікроконтролер Renesas RA4M1 (архітектура Arm Cortex-M4F). Він відповідає виключно за опитування датчиків, виконання логіки прийняття рішень та керування локальною індикацією. Наявність модуля обчислень з плаваючою комою (FPU) підвищує точність обробки температурних показників.

Мережевий співпроцесор: Окремий модуль на базі ESP32-S3, який виконує функцію мережевого моста. Він бере на себе всю ресурсомістку роботу з підтримки Wi-Fi з'єднання, шифрування трафіку та комунікації з хмарою.

Для візуалізації результатів аналізу основні архітектурні характеристики платформ зведено у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Аналіз основних характеристик платформ

Характеристика	Arduino UNO R3 (ATmega328P)	NodeMCU v3 (ESP8266)	ESP32-WROOM-32	Arduino UNO R4 WiFi (RA4M1 + ESP32)
Розрядність (Архітектура)	8-bit AVR	32-bit Tensilica L106	32-bit Xtensa LX6 (Двоядерний)	32-bit Arm Cortex-M4F
Тактова частота	16 МГц	80 - 160 МГц	160 - 240 МГц	48 МГц (основний)
Оперативна пам'ять (SRAM)	2 КБ	50 КБ (доступно)	520 КБ	32 КБ
Постійна пам'ять (Flash)	32 КБ	4 МБ	4 МБ	256 КБ
Вбудований Wi-Fi або BT	Відсутній	Тільки Wi-Fi	Wi-Fi + Bluetooth	Wi-Fi + Bluetooth

Кінець таблиці 2.1

Робоча напруга логіки	5 В	3.3 В	3.3 В	5 В
Апаратна підтримка I2C	1 шина	Програмна (1 шина)	2 шини	1 шина (з розширенням)

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що використання класичних 8-бітних рішень без вбудованих мережевих інтерфейсів є морально застарілим підходом для розробки кіберфізичних систем. Рішення на базі чистого ESP8266 мають суттєві обмеження щодо периферії та напруги логіки [20].

Таким чином, для реалізації програмно-технічного засобу моніторингу температурного режиму холодильного обладнання було обрано платформу Arduino UNO R4 WiFi. Її вибір обґрунтовується такими ключовими факторами:

- повна апаратна готовність до реалізації IoT-рішень "з коробки" без необхідності проектування додаткових ланцюгів живлення для зовнішніх мережевих модулів;
- 5-вольтова логіка, що робить її сумісною з абсолютною більшістю виконавчих механізмів (реле, клапани) та класичних дисплеїв (LCD 1602), які застосовуються в промисловості, без використання конвертерів логічних рівнів;
- висока продуктивність завдяки ядру Arm Cortex-M4, що забезпечує стабільну роботу локальної логіки тривоги навіть у випадку тимчасової втрати з'єднання з віддаленим сервером;
- наявність потужної екосистеми та офіційної підтримки середовищем розробки, що мінімізує час на низькорівневе програмування та дозволяє зосередитись на проектуванні алгоритмів контролю температури та стану дверей.

## 2.1.2 Вибір сенсорної бази та засобів контролю

Невід'ємною та важливою складовою будь-якої кіберфізичної системи, яка безпосередньо взаємодіє з реальним фізичним середовищем, є її сенсорна периферія. Якість, точність, стійкість до завад та швидкість отримання первинних даних від датчиків безпосередньо впливають на адекватність роботи програмних алгоритмів керування та своєчасність генерації тривожних сповіщень [18]. У контексті проєктування системи моніторингу холодильного обладнання базовими параметрами, що підлягають безперервному апаратному контролю, є:

1. Поточна температура внутрішнього простору холодильної камери. Відхилення цього показника від жорстко заданих технологічних норм навіть на відносно короткий проміжок часу неминуче призводить до псування продукції та порушення санітарних норм зберігання [22].

2. Фізичний стан дверцят (відкрито/закрито). Несвоєчасно закриті двері є першопрчиною порушення термодинамічного балансу системи, швидкого утворення шару конденсату та інею на випарниках, а також спричиняють необґрунтовані перевитрати електричної енергії компресорною установкою.

Для вимірювання температури розглядалося використання аналогових та цифрових сенсорів. Використання аналогових датчиків (наприклад, термісторів) робить лінію передачі даних вразливою до електромагнітного випромінення від компресорів холодильника. Тому було прийнято рішення використовувати виключно цифрові інтегральні сенсори. Вибір конкретного типу цифрового датчика є ключовим етапом проєктування, оскільки від його метрологічних характеристик безпосередньо залежить надійність функціонування всієї кіберфізичної системи та достовірність зібраної телеметрії [17].

На етапі ескізного проєктування проводилося порівняння двох популярних мікроелектронних модулів: датчика базового рівня DHT11 та високоточного напівпромислового сенсора SHT31-D.

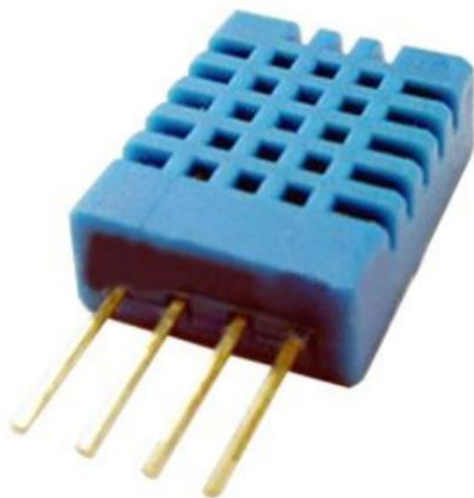


Рисунок 2.4 – Датчик температури DHT11 [31]

Аналіз паспортних характеристик датчика DHT11 виявив низку суттєвих недоліків, які унеможливають його використання у спеціалізованих системах моніторингу [12]:

- низька точність вимірювань. Абсолютна похибка датчика становить близько  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , що є абсолютно неприпустимим для холодильного обладнання, де температурний коридор безпечного зберігання часто обмежений інтервалом у 3–4 градуси;
- висока теплова інерційність. Через використання застарілого полімерного резистивного елемента датчик занадто повільно реагує на різкі зміни мікроклімату, що затримує генерацію сповіщень;
- специфічний протокол зв'язку. Використання нестандартного однопровідного протоколу робить систему чутливою до часових затримок у програмному коді.

На противагу цьому, вибір було зроблено на користь передового інтегрального рішення – сенсора SHT31-D. Цей вибір обґрунтовується наступними технологічними перевагами, а саме високою точністю завдяки технології CMOSens (мікроелектронний модуль поєднує на одному кремнієвому кристалі чутливий елемент, підсилювач сигналу та швидкодіючий аналого-цифровий перетворювач [33]). Це забезпечує виняткову точність вимірювання з

гарантованою похибкою не більше  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ), довгостроковою стабільністю (наявність енергонезалежної пам'яті для зберігання заводських калібрувальних коефіцієнтів гарантує стабільну роботу датчика роками без необхідності періодичного метрологічного обслуговування), промисловим стандартом передачі даних (використання двопровідної цифрової шини I2C значно спрощує розведення електричної схеми пристрою, мінімізує кількість провідників та підвищує стійкість сигналу до електромагнітних завад), можливістю масштабування (завдяки вбудованій системі апаратної адресації пристроїв на шині I2C, до однієї лінії можна підключити кілька датчиків для організації багатозонного моніторингу великої холодильної вітрини) [24].



Рисунок 2.5 – Датчик температури SHT3x-D [32]

Другим важливим аспектом апаратного моніторингу є вибір датчика стану дверей. Для вирішення цього завдання в інженерній практиці застосовуються різні підходи, проте більшість із них мають серйозні вразливості при роботі в холодильнику:

- оптичні інфрачервоні бар'єри схильні до хибних спрацьовувань через неминуче запотівання інфрачервоних лінз та утворення інею у вологому середовищі;

– механічні кінцеві вимикачі мають відкриті рухомі частини та пружинні механізми, які піддаються швидкому фізичному зношенню, замерзанню конденсату на штоках та корозії контактів.

Враховуючи агресивні умови експлуатації, оптимальним інженерним рішенням було визнано використання герметичного магнітокерованого контакту (геркона МКА-14103) у парі з неодимовим магнітом. Використання геркона забезпечує системі такі експлуатаційні переваги [35]:

– абсолютна герметичність. Контакти знаходяться у запаяній скляній колбі в середовищі інертного газу, що повністю виключає їх окислення чи обмерзання у вологому середовищі холодильної камери;

– безконтактний принцип дії. Замикання кола відбувається виключно під впливом зовнішнього магнітного поля, що гарантує повну відсутність механічного тертя деталей та подовжує ресурс роботи сенсора до мільйонів циклів спрацьовування;

– енергоефективність. Датчик має нульове енергоспоживання у статичному режимі очікування, що є важливим показником для автономних IoT-систем;

– миттєва апаратна реакція. Зміна логічного рівня на цифровому вході мікроконтролера відбувається за долі мілісекунди після відкриття дверей, що дозволяє системі миттєво генерувати пріоритетний сигнал тривоги.

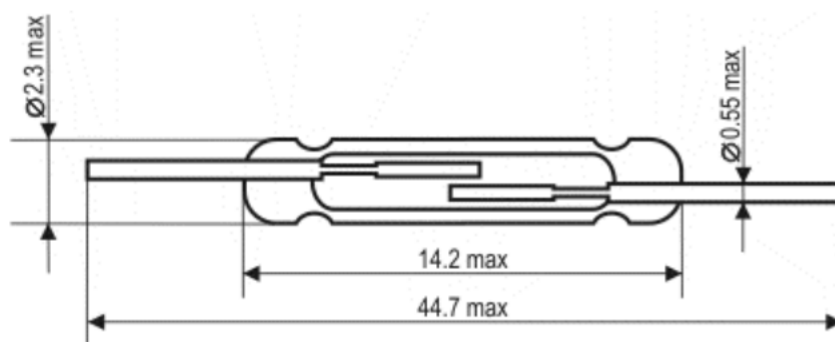


Рисунок 2.6 – Геркон МКА-14103 [35]

Таким чином, комбінація високоточного цифрового датчика температури SHT31-D та безконтактного магнітокерованого геркона утворює надійну, довговічну та стійку до зовнішніх завад сенсорну базу, яка повністю відповідає технічним вимогам до розроблюваної кіберфізичної системи моніторингу.

### 2.1.3 Аналіз програмного середовища та хмарних рішень

Кіберфізична система є складним симбіозом апаратних засобів та програмного забезпечення. Якщо апаратна частина, що складається з мікроконтролера та сенсорної мережі, формує фізичний рівень системи, призначений для збору первинних даних та керування периферією, то програмна частина відповідає за інтелектуальну обробку цієї інформації, реалізацію математичних алгоритмів управління та організацію мережевої взаємодії. При проектуванні багаторівневої IoT-системи моніторингу холодильного обладнання програмне забезпечення логічно і концептуально поділяється на два незалежні, але тісно взаємопов'язані рівні: мікропрограмне забезпечення (прошивка) локального контролера та віддалена хмарна інфраструктура, яка включає серверну частину та користувацький людино-машинний інтерфейс [40].

Для розробки, компіляції та завантаження мікропрограмного коду в мікроконтролер Arduino UNO R4 WiFi було обрано офіційне інтегроване середовище розробки Arduino IDE. Цей інструментарій є світовим стандартом у сфері інженерного прототипування завдяки своїй відкритості та колосальній екосистемі. Крім того, він непомітно для користувача використовує потужний компілятор, який автоматично трансліює написаний вихідний код у високоефективний машинний код, специфічний для 32-бітної архітектури. Це гарантує максимальну швидкодію алгоритмів моніторингу. Наявність розгалуженої бази готових бібліотек дозволяє миттєво інтегрувати підтримку шини I2C для датчика температури SHT31-D та управління вбудованим мережевим співпроцесором плати.

Найбільшим інженерним викликом при розробці систем класу "Інтернет речей" є організація надійного, безпечного та безперервного зв'язку між локальним пристроєм та віддаленим клієнтом. Класичний підхід передбачає створення власної ІТ-інфраструктури: розгортання бекенд-додатку на орендованому сервері, налаштування бази даних часових рядів для телеметрії та розробку власного клієнтського додатка. Такий шлях вимагає глибоких знань у веброботці та мережевому адмініструванні, що є економічно та часово недоцільним для етапу створення програмно-технічного прототипу [39]. Додатковою проблемою стає необхідність постійного моніторингу працездатності сервера, забезпечення криптографічного захисту каналів зв'язку від кібератак та несанкціонованого доступу, а також постійна адаптація мобільного програмного забезпечення під нові версії операційних систем (Android, iOS). Тому оптимальним рішенням є використання готових IoT-платформ [26].

Для визначення найкращої платформи було проведено порівняльний аналіз трьох популярних на ринку рішень: ThingSpeak, Arduino IoT Cloud та Blynk. Платформа ThingSpeak орієнтована переважно на науковий збір даних та їх математичну обробку за допомогою інтегрованого інструментарію MATLAB. Вона чудово підходить для побудови складних аналітичних графіків, проте має дуже обмежені можливості для створення інтерактивних мобільних додатків і повільно реагує на керівні команди через використання важкого протоколу HTTP/REST. Arduino IoT Cloud є фірмовим рішенням, яке забезпечує глибоку інтеграцію з платами однойменного сімейства, проте її інтерфейс створення мобільних панелей керування є менш гнучким, а безкоштовний тариф накладає жорсткі обмеження на частоту відправки даних. Платформа Blynk, у свою чергу, фокусується саме на швидкому створенні користувацьких додатків (HMI) за принципом конструктора "drag-and-drop", використовуючи легкий та швидкий протокол на базі TCP для мінімізації мережевих затримок.

Результати порівняльного аналізу наведено у таблиці 2.2.

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – порівняльний аналіз хмарних IoT сервісів

Критерій порівняння	ThingSpeak	Arduino IoT Cloud	Blynk (IoT)
Основне призначення	Збір даних, аналітика, побудова графіків	Універсальний моніторинг, екосистема Arduino	Швидке створення мобільних та веб-додатків
Базовий протокол зв'язку	HTTP, REST API (повільний обмін)	MQTT (швидкий обмін)	Власний TCP, MQTT (мінімальні затримки)
Конструктор мобільного НМІ	Відсутній (лише вебінтерфейс)	Базовий набір віджетів	Розширений візуальний редактор (iOS/Android)
Складність інтеграції	Середня (потребує ручного формування запитів)	Низька (автоматична генерація коду)	Низька (використання готової бібліотеки)
Доцільність для прототипу	Низька (відсутність зручного керування)	Середня (обмеження базового тарифу)	Висока (ідеальний баланс функцій та простоти)

На основі проведеного аналізу, для побудови хмарної інфраструктури розроблюваної системи було обрано платформу Blynk. Ця система являє собою комплексну архітектуру, яка бере на себе всі завдання з маршрутизації даних, криптографічного захисту та візуалізації. Архітектурно обрана платформа складається з наступних взаємодіючих рівнів:

- Blynk.Cloud: Центральний високоступний хмарний сервер. Він приймає захищені пакети даних від мікроконтролера, зберігає їх у власну базу даних та миттєво ретранслює на авторизовані пристрої користувача;

– Blynk Library: Спеціалізована програмна бібліотека, що інтегрується в мікропрограму Arduino. Її найважливішою особливістю є використання неблокуючих алгоритмів (вбудованих таймерів). Це гарантує, що робота центрального процесора не зупиняється під час очікування відповіді від мережі Wi-Fi, дозволяючи системі миттєво реагувати на відкриття дверей холодильника навіть при нестабільному інтернет-з'єднанні;

– Blynk.App / Web Dashboard: Мобільний додаток та вебпанель, які надають інструментарій для створення людино-машинного інтерфейсу. Розробник має змогу розміщувати графіки температури, індикатори стану дверей та повзунки налаштувань без жодного рядка коду для мобільних операційних систем [37].

Фундаментальним концептуальним рішенням у межах організації зв'язку між мікроконтролером та хмарою Blynk є використання абстракції віртуальних пінів (Virtual Pins / Datastreams). На відміну від фізичних контактів на платі Arduino, до яких підключається реальна периферія, віртуальні піни існують виключно у програмному просторі як логічні канали зв'язку. Через телеметричні віртуальні канали поточні показники датчика температури та стан геркона постійно транслюються у хмару для візуалізації. Водночас, через керуючі віртуальні канали користувач може дистанційно змінювати технологічні межі (наприклад, допустиму максимальну температуру) за допомогою повзунків у додатку. Ці нові значення миттєво надсилаються на плату, де мікроконтролер автоматично оновлює свої змінні, адаптуючи логіку контролю холодильного обладнання в режимі реального часу.

## 2.2 Проектування взаємодії апаратних та програмних компонентів

На етапі проектування взаємодії апаратних та програмних компонентів формується логічна модель того, як саме центральний мікроконтролер буде збирати інформацію з навколишнього середовища та керувати системою

сповіщень. Оскільки холодильне обладнання зазвичай експлуатується в умовах підвищеної вологості та сильних електромагнітних завад (від роботи потужних компресорів), головне завдання цього етапу – обрати максимально надійні способи обміну сигналами. Усі інтерфейси зв'язку між платою Arduino, сенсорами та екраном повинні бути спроектовані так, щоб виключити можливість спотворення інформації або хибного спрацьовування тривоги [25].

### 2.2.1 Принципи підключення сенсорів та локальної індикації

Для зручності проектування логіки взаємодії компонентів системи можна розділити на три основні блоки: отримання даних про температуру, відстеження стану дверей та управління локальними екранами й індикаторами.

Отримання актуальної інформації про мікроклімат усередині холодильної камери здійснюється за допомогою цифрового модуля SHT31-D. Для його зв'язку з мікроконтролером обрано стандартну послідовну шину I2C. Цей вибір є важливим, оскільки передача аналогового сигналу по довгих проводах від холодильника до плати керування неминуче призвела б до появи похибок через електромагнітні наведення. Натомість інтерфейс I2C передає дані виключно у вигляді цифрових пакетів (нулів та одиниць) [41].

Цей протокол працює за строгим принципом «головний-підпорядкований»:

Роль головного пристрою у системі завжди виконує мікроконтролер Arduino. Саме він керує процесом зв'язку, задає частоту передачі та вирішує, коли потрібно отримати нові дані.

Роль підпорядкованого пристрою відведена датчику температури. Він постійно перебуває в режимі очікування і починає вимірювання лише після того, як отримає пряму команду від мікроконтролера.

Фізична взаємодія між ними відбувається за допомогою всього двох інформаційних ліній. Перша лінія (SCL) використовується мікроконтролером

для тактування – вона задає ритм, з яким будуть передаватися дані, щоб обидва пристрої працювали абсолютно синхронно. Друга лінія (SDA) слугує безпосередньо для двосторонньої передачі даних. Принцип обміну виглядає наступним чином: мікроконтролер надсилає в лінію унікальну електронну адресу датчика і команду "виміряти". Датчик проводить оцифрування температури і відправляє готовий результат назад. Додатковою перевагою цієї шини є те, що в майбутньому до цих самих двох ліній можна підключити додаткові датчики (наприклад, для іншого відсіку холодильника), просто звертаючись до них за іншою адресою [26].

Для контролю за тим, чи зачинені двері холодильного обладнання, застосовується магнітний геркон. З точки зору електроніки, він працює як звичайний механічний перемикач: контакти замикаються, коли двері зачинені (магніт поруч), і розмикаються, коли двері відчиняються. Цей компонент підключається до стандартного цифрового порту мікроконтролера.

При проєктуванні цього підключення необхідно врахувати важливу фізичну особливість роботи мікроконтролерів. Коли двері відчинені і контакти геркона розірвані, цифровий вхід плати не з'єднаний ні з джерелом живлення, ні з "землею". У мікроелектроніці такий стан називають "плаваючим потенціалом". Залишений у повітрі контакт починає працювати як антена, вловлюючи радіохвилі та електромагнітні перешкоди з навколишнього середовища. Це призводить до того, що мікроконтролер починає хаотично і швидкоплинно реєструвати то відчинені, то зачинені двері [21].

Щоб повністю усунути цю проблему програмним шляхом, відповідний цифровий порт налаштовується в спеціальний режим входу з внутрішнім підтягуванням (INPUT\_PULLUP). Це означає, що мікроконтролер використовує свій внутрішній мікроскопічний резистор, щоб примусово підключити цей вхід до напруги живлення. Завдяки цьому логіка стає ідеально стабільною і передбачуваною:

Коли двері відчинені (контакт розірвано), струм іде через внутрішній резистор, і мікроконтролер впевнено зчитує логічну "1".

Коли двері зачинені (контакт замкнуто на землю), струм іде найлегшим шляхом, і мікроконтролер впевнено зчитує логічний "0".

Додатково в програмному коді проєктується логіка "антибрязкоту" (Debounce). Оскільки металеві контакти геркона в момент закриття можуть на мілісекунди пружинити і відскакувати один від одного, алгоритм не реагує на першу ж зміну сигналу. Він вичікує коротку паузу, і лише якщо сигнал стабілізувався, система визнає, що двері дійсно зачинені [39].

Локальна індикація є важливою частиною системи. Хоча система має зв'язок з мобільним додатком, технічний персонал, кухарі на кухні чи звичайний користувач повинні мати змогу миттєво оцінити стан холодильника безпосередньо біля нього. Локальна панель індикації складається з двох сигнальних світлодіодів та текстового рідкокристалічного дисплея формату 1602. Усі ці елементи керуються цифровими портами мікроконтролера, які налаштовуються в режим виводу сигналів (OUTPUT) [36].

Для оптимізації роботи плати, взаємодія з LCD-дисплеєм проєктується у спеціальному 4-бітному режимі. За стандартом, для виводу однієї літери на екран потрібно передати 8 біт інформації по восьми окремих проводах. Однак у 4-бітному режимі мікроконтролер розбиває інформацію навпіл і передає її по черзі. Цей підхід дозволяє зекономити чотири контакти на платі Arduino, які залишаються вільними для потенційного підключення звукової сигналізації або реле компресора.

Для того щоб індикація була інтуїтивно зрозумілою для персоналу, програмна логіка працює за принципом машини станів. Вона безперервно аналізує показники датчиків і перемикає систему в один із трьох можливих режимів:

– штатний стан (Норма): Температура знаходиться в межах дозволеного технологічного коридору, двері холодильника зачинені. На екрані постійно

оновлюється поточна температура, а для підтвердження справності системи світиться зелений світлодіод;

– стан температурної аномалії: Якщо алгоритм помічає, що температура опустилася нижче мінімальної або піднялася вище максимальної межі, він блокує зелений світлодіод і активує червоний. На екрані дисплея з'являється блимаюче текстове попередження про порушення режиму. Це дозволяє персоналу вчасно помітити проблему з охолодженням;

– стан порушення герметичності: Цей стан має найвищий програмний пріоритет. Якщо геркон фіксує відкриття дверей, алгоритм негайно ігнорує поточні показники температури, вмикає аварійний червоний сигнал і виводить на екран напис про відчинені двері. Такий жорсткий пріоритет обрано через те, що довго відчинені двері призводять до намерзання льоду на випарнику холодильника, що є прямою причиною подальшої поломки обладнання.

## 2.2.2 Організація мережевого зв'язку та передачі даних

Перехід від простого локального термометра до повноцінної кіберфізичної системи (IoT) вимагає організації надійного бездротового зв'язку між платою мікроконтролера та віддаленим хмарним сервером. Головне завдання цього етапу проектування – забезпечити таку логіку роботи програми, при якій система зможе безперервно відправляти дані на смартфон користувача, отримувати від нього команди налаштування, і при цьому не зависати у випадку нестабільного інтернет-з'єднання [39].

Для розв'язання цих завдань логіка мережевої взаємодії проектується з урахуванням кількох фундаментальних принципів програмування IoT-пристроїв.

### 1. Апаратний розподіл мережевих завдань

Підключення мікроконтролера до сучасної мережі Wi-Fi з використанням криптографічного шифрування (наприклад, протоколу WPA2) вимагає значних

обчислювальних ресурсів. Якби центральний процесор самостійно займався і розрахунком температури, і шифруванням мережевих пакетів, це неминуче призвело б до затримок у реакції на відкриття дверей холодильника.

Щоб уникнути цього, архітектура плати Arduino UNO R4 WiFi використовує апаратний розподіл завдань. Плата оснащена двома мікросхемами: основним процесором (який ми програмуємо) та додатковим співпроцесором (ESP32-S3), який виконує виключно роль мережевого модема. Програмна взаємодія між ними налаштовується таким чином: основний алгоритм лише формує короткий пакет даних (наприклад, "Температура = 5°C") і миттєво передає його модему. Після цього основний процесор одразу повертається до опитування датчиків, а всю важку роботу з підключення до роутера, обробки паролів та передачі даних у хмару модем виконує у фоновому режимі, не перешкоджаючи роботі локальної системи тривоги [21].

## 2. Відмова від блокуючих функцій та використання програмних таймерів

Однією з найпоширеніших помилок при проєктуванні програмного забезпечення для мікроконтролерів є використання функції безумовної затримки (наприклад, `delay()`). Ця функція фізично призупиняє виконання будь-яких команд процесором на заданий час. Якщо в коді вказати затримку в одну секунду між вимірюваннями температури, процесор буквально "засне" на цю секунду.

Для пристроїв, підключених до Інтернету речей, використання таких блокуючих операцій є фатальною помилкою. Хмарний сервер платформи Blynk постійно перевіряє, чи знаходиться пристрій у мережі. Якщо сервер надішле такий перевірючий запит саме в ту секунду, коли процесор "спить", плата не зможе відповісти. Хмара сприйме це як обрив зв'язку і примусово відключить пристрій [37].

Щоб вирішити цю проблему, у проєкті реалізовано концепцію асинхронного програмування за допомогою програмних таймерів (наприклад, бібліотеки `BlynkTimer`). Програмна логіка будується інакше: процесор ніколи не зупиняється. Він працює в безперервному циклі. Паралельно він дивиться на

внутрішній "секундомір". Як тільки таймер сигналізує, що пройшла рівно одна секунда, алгоритм миттєво зчитує температуру, відправляє її в мережу і продовжує свій нескінченний цикл. Цей підхід гарантує блискавичну реакцію системи на будь-які фізичні події при ідеально стабільному інтернет-з'єднанні.

### 3. Маршрутизація даних через віртуальні канали (Datastreams)

Для організації обміну інформацією між фізичним мікроконтролером у холодильнику та додатком на смартфоні користувача застосовується технологія "віртуальних пінів". На відміну від реальних контактів на платі, до яких припаяні дроти, віртуальні піни – це логічні цифрові труби (канали), по яких дані передаються через хмарний сервер.

Цей механізм проєктується для двох зустрічних потоків інформації:

- висхідний потік (Від холодильника до додатка): Це канали телеметрії.

Програмний код налаштовується так, що кожні кілька секунд виміряне значення температури записується у віртуальний канал №0 (V0), а текстовий статус геркона ("Відчинено" або "Зачинено") – у канал №1 (V1). Хмарний сервер автоматично перехоплює ці дані, зберігає їх в архів і малює графіки на екрані смартфона;

- низхідний потік (Від додатка до холодильника): Це канали керування.

Щоб система була гнучкою, користувач не повинен перепрограмовувати плату кожного разу, коли потрібно змінити температурні норми для різних типів продуктів (наприклад, м'яса чи овочів). У мобільному додатку створюються повзунки (слайдери) для налаштування мінімальної та максимальної температури, які прив'язуються до каналів V2 та V3. Коли користувач рухає повзунок на телефоні, нове значення миттєво прилітає по віртуальному каналу в мікроконтролер. Спеціальна функція-перехоплювач у коді (наприклад, BLYNK\_WRITE) відразу зберігає цю нову межу в оперативну пам'ять плати, і алгоритм починає використовувати її для генерації тривоги.

4. Контроль цілісності з'єднання (Heartbeat) Оскільки холодильне обладнання зберігає цінні продукти, персонал має бути впевнений, що система

моніторингу працює. Якщо в приміщенні зникне світло або зламається Wi-Fi роутер, мікроконтролер не зможе відправити сигнал тривоги.

Щоб запобігти прихованим збоям, мережева взаємодія використовує механізм "серцебиття" (Keep-Alive або Heartbeat). Бібліотека Vlynk у фоновому режимі кожні кілька секунд відправляє на хмарний сервер крихітні порожні пакети – "пінги". Якщо сервер протягом певного часу (наприклад, 15 секунд) не отримує жодного такого пакету, він розуміє, що обладнання знеструмлене або втратило зв'язок. У цьому випадку хмара автоматично генерує Push-сповіщення на смартфон відповідального працівника: "Пристрій офлайн". Така архітектура забезпечує замкнений цикл контролю, де система не лише стежить за холодильником, а й контролює власну працездатність [37].

### 2.3 Узагальнена структурна схема програмно-технічного засобу

Після детального аналізу компонентної бази та визначення низькорівневих протоколів взаємодії, наступним кроком є синтез узагальненої архітектури кіберфізичної системи.

Узагальнену структурну схему комплексу можна представити як сукупність чотирьох глобальних макроблоків, кожен з яких виконує суворо визначену функцію в загальному технологічному процесі.

1. Об'єкт моніторингу (Фізичне середовище). Першим і базовим елементом структурної схеми є сам об'єкт контролю – холодильне обладнання (камера або вітрина). З точки зору кіберфізичної системи, холодильник є генератором фізичних станів. Він характеризується внутрішнім термодинамічним мікрокліматом (температурою повітряного середовища) та механічним станом огорожувальних конструкцій (дверей). Важливою структурною особливістю є те, що об'єкт моніторингу має металевий корпус та шар теплоізоляції, які виступають фізичним бар'єром між внутрішньою зоною вимірювання та зовнішнім середовищем, де розташовується обчислювальна електроніка.

2. Апаратна підсистема збору та локального керування. Цей макроблок монтується безпосередньо на корпусі холодильного обладнання. Його завдання – забезпечити інтерфейс між фізичним об'єктом та цифровим світом. У процесі проектування ця підсистема декомпозується на наступні функціональні модулі:

- сенсорний модуль: Фізично розділений на дві частини. Вимірювальний зонд датчика температури SHT31-D заводитьися всередину холодильної камери, тоді як магнітний геркон монтується на зовнішній частині дверцят. Модуль виконує виключно функцію перетворення фізичних величин в електричні сигнали;

- обчислювальний модуль (Ядро): Побудований на базі мікроконтролера Arduino UNO R4. Він монтується в окремому корпусі зовні холодильника (щоб уникнути впливу конденсату та екранування радіосигналу металевими стінками). Ядро відповідає за агрегацію даних від сенсорів та управління іншими локальними модулями;

- модуль підсистеми живлення: Дуже важливий елемент структурної схеми, який часто оминають увагою. Для забезпечення цілодобової автономної роботи використовується зовнішній імпульсний блок живлення (9В, 1.33А), який перетворює нестабільну мережеву напругу 220В змінного струму у безпечну стабілізовану напругу постійного струму для живлення мікроконтролера та всієї підключеної периферії;

- модуль локальної індикації: Складається з символного дисплея та світлодіодів. Цей модуль структурно орієнтований на миттєвий візуальний зріз поточного стану обладнання без необхідності доступу до керуючих терміналів.

3. Комунікаційне середовище зв'язку. Цей макроблок виконує функцію транзитного транспортного коридору. До його складу входять апаратні засоби (вбудований модуль ESP32-S3 на платі контролера та локальний маршрутизатор) і мережева інфраструктура інтернет-провайдера. Структурно цей блок не обробляє дані і не зберігає їх, його єдина роль – прозоре перенесення

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зашифрованих пакетів телеметрії від обчислювального модуля до віддалених серверів, і зворотнє перенесення керівних команд.

4. Хмарно-орієнтована підсистема аналітики. Четвертий макроблок не має жорсткої географічної прив'язки і базується на серверах платформи Vlynk та пристроях кінцевих користувачів. Він відповідає за глобальне накопичення даних та управління системою на вищому адміністративному рівні.

– сервер баз даних та правил: Хмарний вузол, який відповідає за архівацію отриманих температурних рядів та контроль активності апаратної підсистеми (моніторинг її присутності в мережі);

– робоче місце користувача: Мобільний додаток або веб-дашборд, який виконує роль людино-машинного інтерфейсу (НМІ). Структурно цей вузол орієнтований на користувача. Він дозволяє візуалізувати графіки та містить блок формування керівних впливів (зміна температурних порогів), які потім каскадно спускаються через мережу до обчислювального модуля.



Рисунок 2.7 – Узагальнена структурна схема програмно-технічного засобу

Запропонована структурна організація з чітким виділенням об'єкта контролю, локальної апаратної частини, транзитної мережі та хмарної аналітики робить систему максимально стійкою до відмов. Розподіл зон відповідальності гарантує, що вихід з ладу одного макроблоку (наприклад, втрата доступу до

хмарного сервера) не призведе до колапсу базових функцій системи, таких як локальне виявлення відчинених дверей та інформування персоналу за допомогою модуля індикації.

## 2.4 Висновки до другого розділу

На основі системного аналізу предметної області та висунутих технічних вимог було здійснено обґрунтований вибір апаратно-програмної бази та розроблено загальну архітектуру кіберфізичної системи, що дозволило перейти від теоретичної постановки задачі до конкретних інженерних рішень.

За результатами порівняльного аналізу мікроконтролерних платформ було доведено, що використання класичних 8-бітних архітектур є неефективним для сучасних IoT-завдань. Оптимальним рішенням визнано використання платформи Arduino UNO R4 WiFi, комбінована архітектура якої забезпечує апаратний розподіл завдань: основний процесор Cortex-M4 гарантує високу швидкість обробки телеметрії, а інтегрований співпроцесор ESP32-S3 бере на себе підтримку криптографічно захищеного мережевого зв'язку без навантаження на локальну логіку тривоги.

Формування сенсорної мережі системи було побудовано на принципі відмови від аналогових датчиків на користь стійких до завад цифрових рішень. Обґрунтовано використання високоточного модуля SHT31-D, що працює по шині I2C, для вимірювання температури, та магнітокерowanego герметичного контакту (геркона) для безконтактного і довговічного контролю стану дверей. Локальна індикація спроектована на базі символічного дисплея.

У частині програмного забезпечення було вирішено відмовитися від розробки власної серверної інфраструктури на користь інтеграції з глобальною IoT-платформою Blynk. Такий підхід дозволив використати готові механізми маршрутизації даних через віртуальні канали та забезпечити створення кросплатформеного мобільного людино-машинного інтерфейсу. Важливим

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

етапом проєктування стала розробка концепції неблокуючого мікропрограмного забезпечення на базі вбудованих таймерів. Це архітектурне рішення гарантує миттєву реакцію системи на критичні події (відкриття дверей або перегрів) при одночасному підтриманні стабільного фонового з'єднання з хмарним сервером.

На фінальному етапі проєктування було синтезовано узагальнену структурну схему комплексу, яка концептуально розділила систему на чотири макроблоки: об'єкт фізичного моніторингу, апаратну підсистему збору даних та локального керування, транзитне комунікаційне середовище та віддалену хмарно-орієнтовану підсистему аналітики. Такий модульний поділ підвищує загальну відмовостійкість розробки.

Таким чином, усі зафіксовані у даному розділі проєктні рішення формують надійний, масштабований та науково обґрунтований фундамент, який повністю відповідає концепції Інтернету речей і дозволяє перейти до етапу безпосередньої фізичної та програмної реалізації прототипу.

					КвРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ

#### 3.1 Розробка принципової електричної схеми та віртуальне моделювання

Реалізація будь-якого сучасного апаратно-програмного комплексу вимагає попереднього етапу проєктування, що дозволяє мінімізувати ризики пошкодження електронних компонентів та оптимізувати архітектуру пристрою до початку фізичної збірки. Для розробки програмно-технічного засобу моніторингу температурного режиму було обрано двоетапний підхід, який включає проєктування принципової електричної схеми в САД-середовищі та її подальшу логічну верифікацію у віртуальному симуляторі.

##### 3.1.1 Проєктування принципової електричної схеми пристрою

Для створення принципової електричної схеми пристрою було використано хмарне середовище автоматизованого проєктування електроніки (EDA) – EasyEDA. Цей інструмент забезпечує доступ до широкої бази стандартизованих електронних компонентів та дозволяє генерувати технічну документацію високої якості. З метою уникнення хаотичного перетину провідників та забезпечення високої читабельності схеми, було застосовано модульний підхід із використанням системи мережевих міток (NetLabels) та глобальних портів живлення. Текстові блоки, підписи номіналів та маркери виводів були ретельно відцентровані та вирівняні, що відповідає вимогам до оформлення технічної документації.

Основою спроектованої схеми виступає мікроконтролерна плата Arduino UNO R4 WiFi. Підсистема живлення реалізована через роз'єм типу DC Jack для підключення зовнішнього адаптера напругою 9 В. Ця напруга подається безпосередньо на вхідний тракт VIN мікроконтролера, де за допомогою вбудованого стабілізатора генерується опорна напруга 5 В для безпечного

живлення всієї периферії. У схемі використано глобальні порти VCC та GND, що дозволило локально жити кожен підключений модуль без потреби проведення довгих магістральних ліній через усе робоче поле креслення.

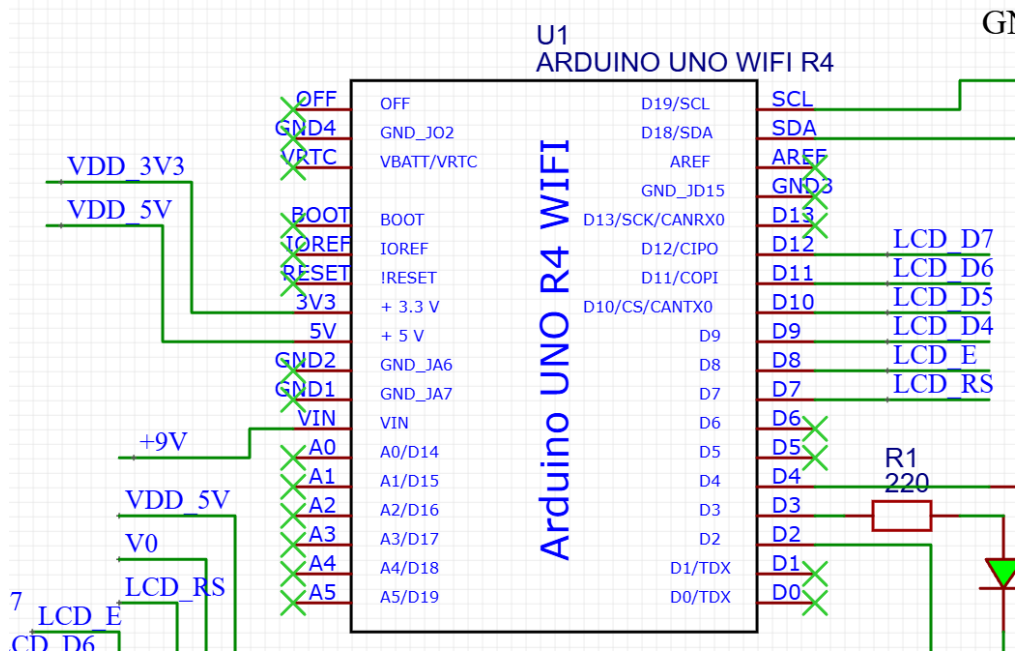


Рисунок 3.1 – Підключення мікроконтролерної плати Arduino Uno R4 WIFI

До апаратної шини I2C підключено цифровий датчик температури SHT31-D, сигнальні лінії якого (SDA та SCL) з'єднані з відповідними контактами мікроконтролера. Датчик стану дверей, реалізований на базі магнітного геркона МКА-14103, підключено до цифрового входу D2 та загальної шини GND. Оскільки у програмному коді для цього виводу активується внутрішній підтягувальний резистор (режим INPUT\_PULLUP), зовнішній резистор на схемі відсутній. Водночас паралельно контактам геркона інтегровано керамічний конденсатор ємністю 0.1мкФ, який відіграє роль апаратного RC-фільтра для придушення ефекту «брязкоту контактів» під час механічного замикання чи розмикання. При розробці фізичного прототипу буде використовуватись готовий модуль з герконом і власною обв'язкою, що значно спрощує роботу з датчиком дверей та забирає необхідність використання підтягувального резистора і фільтруючого конденсатора.

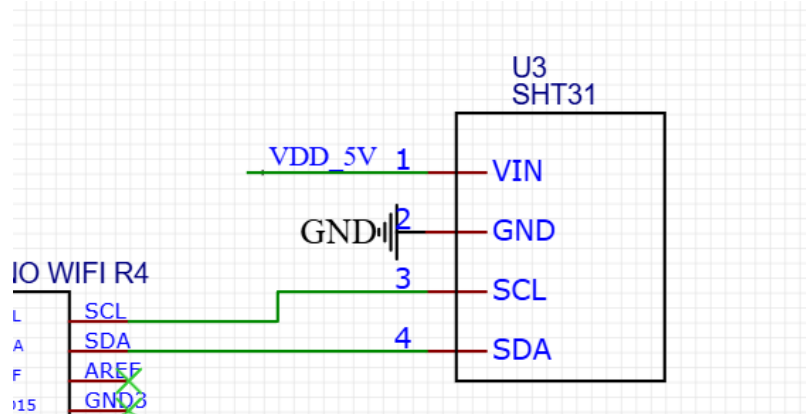


Рисунок 3.2 – Підключення температурного датчика SHT31-D

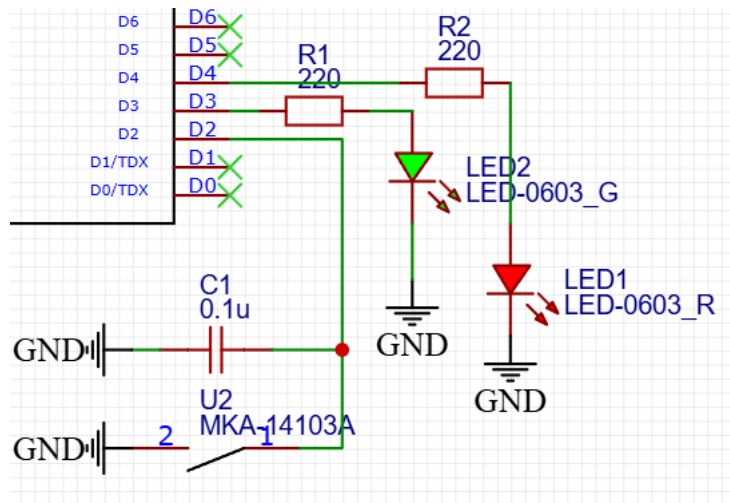


Рисунок 3.3 – Підключення магнітного геркона та світлодіодів

Для індикації станів системи рідкокристалічний дисплей LCD 1602 підключено у 4-бітному режимі з використанням мережевих міток, що дозволило оптимізувати використання портів введення-виведення мікроконтролера. Його апаратна обв'язка включає потенціометр номіналом 10 кОм для плавного регулювання контрастності та струмообмежувальні резистори номіналом 220 Ом для безпечної роботи підсвітки екрана і сигнальних світлодіодів [36]. Важливим етапом проектування стала підготовка до автоматичної перевірки електричних правил. Для проходження цієї перевірки та уникнення хибних попереджень програми, на всі невикористані виводи мікроконтролера було встановлено маркери «No Connect», що підтверджує логічну та фізичну завершеність схеми.

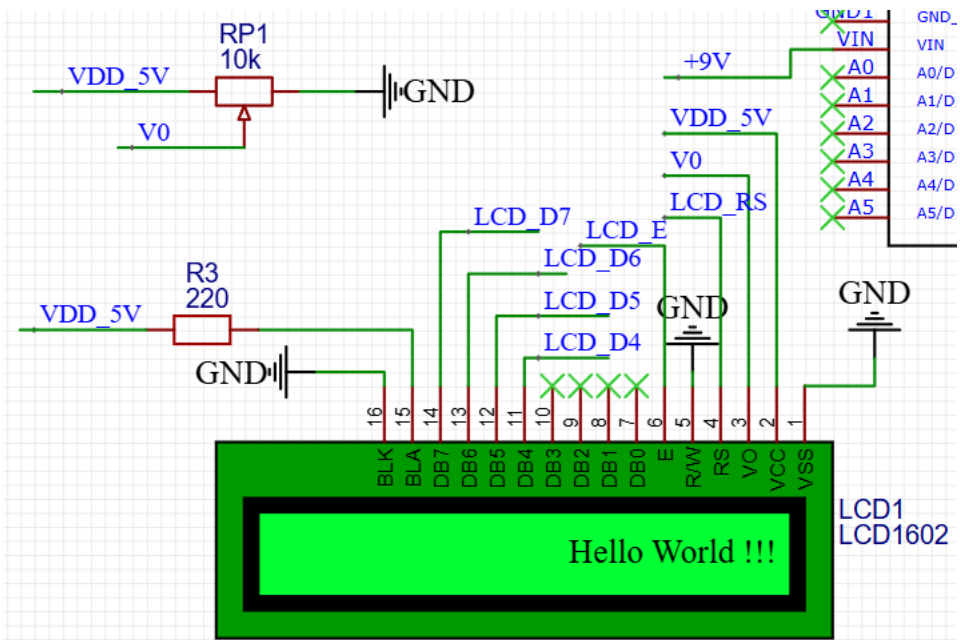


Рисунок 3.4 – Підключення дисплея LCD 1602

Результатом виконаної роботи стала готова принципова електрична схема пристрою (додаток А), що відповідає всім поставленим вимогам в ході дипломного проектування та забезпечує безпечне та правильне підключення всіх необхідних компонентів.

### 3.1.2 Розробка віртуального прототипу

Наступним кроком після створення принципової електричної схеми стала розробка віртуального прототипу пристрою. Цей етап є важливим, оскільки фізичне конструювання електронних пристроїв завжди пов'язане з високими ризиками пошкодження дорогих компонентів через потенційні помилки у трасуванні, переполісовку живлення або короткі замикання. Для попередньої валідації апаратно-програмної архітектури було обрано сучасний хмарний симулятор електронних схем Wokwi. Дана платформа відрізняється високою точністю емуляції поведінки мікроконтролерів на рівні тактів процесора, а також дозволяє моделювати фізичні процеси протікання струму в режимі реального часу без потреби встановлення локального програмного забезпечення [23].

Процес побудови віртуального прототипу розпочався з розміщення на робочому полі симулятора віртуальної безпечної макетної плати. Це дозволило наочно спланувати фізичне розміщення компонентів та проаналізувати логіку паралельних і послідовних з'єднань, що максимально наблизило віртуальну модель до майбутнього фізичного пристрою. Усі магістралі живлення були розведені вздовж бокових рейок макетної плати. Для забезпечення високої читабельності віртуальної збірки було застосовано суворе кольорове маркування провідників: провідники живлення 5 В позначалися червоним кольором, лінії заземлення – чорним, а сигнальні лінії дисплея та датчиків – зеленим кольорами. Такий підхід дозволив легко візуально контролювати правильність підключень та уникнути конфліктів між лініями VCC та GND під час маршрутизації [23].

Особливістю віртуального моделювання у середовищі Wokwi є необхідність адаптації деяких специфічних апаратних компонентів до можливостей бібліотеки симулятора. Оскільки хмарні симулятори часто не мають у своєму арсеналі специфічних вузькопрофільних модулів, під час розробки прототипу було замінено їх на логічні аналоги, що дозволить просимулювати роботу прототипа. Зокрема, цифровий I2C-датчик температури SHT31-D був тимчасово замінений на базовий аналоговий потенціометр. Потенціометр було підключено до аналогового входу мікроконтролера (A0), що дозволило генерувати змінну напругу від 0 до 5 В. У спеціально адаптованому для симуляції тестовому коді значення аналого-цифрового перетворювача (від 0 до 1023) масштабувалися у визначений температурний діапазон (наприклад, від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ ). Завдяки цьому інженерному рішенню з'явилася можливість плавно змінювати «температуру» за допомогою віртуального повзунка прямо під час симуляції, детально відстежуючи реакцію програмних алгоритмів на перетин встановлених порогових значень (мінімуму та максимуму).

Аналогічний підхід логічної заміни був застосований і для датчика відкриття дверей. Оскільки магнітний геркон реагує на наближення фізичного магнітного поля, що неможливо відтворити у веб-браузері, його було замінено

на стандартний віртуальний повзунковий перемикач. Електрична суть роботи геркона полягає у механічному замиканні або розмиканні контактів, що абсолютно ідентично логіці роботи звичайного перемикача. Віртуальний тумблер було підключено між цифровим піном D8 та лінією заземлення, зі збереженням програмної підтяжки INPUT\_PULLUP. Перемикання тумблера в симуляторі ідеально імітувало розрив контакту при відкритті дверей холодильної камери [23].

Запуск симуляції у середовищі Wokwi дозволив провести комплексне налагодження системи. У режимі реального часу було верифіковано коректність ініціалізації LCD дисплея у 4-бітному режимі та відсутність графічних артефактів при оновленні тексту. Шляхом маніпуляцій з віртуальними потенціометром та перемикачем було підтверджено безперебійну роботу логіки кінцевого автомата: мікроконтролер миттєво реєстрував зміну логічних рівнів, що супроводжувалося відповідною фізичною індикацією (перемиканням віртуальних зеленого та червоного світлодіодів) та виведенням попереджень про вихід температури за межі норми або про відкриття дверей. Цей етап повністю довів життєздатність розробленої принципової схеми та обраних алгоритмів керування.

Зображення віртуального прототипу наведено в додатку А

### 3.2 Апаратна реалізація та фізичне конструювання

Після успішної верифікації архітектури пристрою та логіки його роботи у віртуальному середовищі моделювання, наступним логічним етапом розробки стала апаратна реалізація програмно-технічного засобу. Фізичне конструювання прототипу передбачає перенесення затвердженої принципової та монтажної схем на реальну елементну базу. Метою цього етапу є створення функціонально придатного зразка системи моніторингу, готового до проведення натурних випробувань, розробки та завантаження мікропрограмного забезпечення. Для

забезпечення максимальної гнучкості процесу розробки, можливості швидкої заміни компонентів та проведення ітеративних тестувань без ризику термічного пошкодження деталей, монтаж було виконано на базі стандартизованої безпечної макетної плати.

Використання безпечної макетної плати обумовило специфіку маршрутизації провідників та загальну топологію прототипу. Внутрішня структура макетної плати складається з системи металевих пружинних контактів, які формують логічні вузли. Довгі бокові контактні групи, об'єднані горизонтально, були виділені виключно для організації магістралей живлення. Центральне поле, поділене ізоляційною канавкою на дві незалежні зони з вертикально об'єднаними групами по п'ять контактів у кожній, використовувалося для розміщення електронних компонентів та комутації сигнальних ліній. Такий підхід дозволив реалізувати як послідовні з'єднання (для встановлення струмообмежувальних резисторів), так і паралельні підключення периферійних модулів до спільних шин живлення, забезпечуючи високу надійність електричних контактів та унеможливаючи випадкові короткі замикання між протилежними рядами виводів мікросхем.

Особливу увагу під час конструювання було приділено організації підсистеми живлення, оскільки стабільність напруги є необхідною умовою для коректної роботи цифрових датчиків та мікроконтролерного ядра. У розробленому прототипі плата Arduino UNO R4 WiFi виконує роль не лише головного обчислювального центру, але й основного перетворювача та вузла розподілу енергії. Первинне джерело енергії – зовнішній мережевий адаптер змінного струму, що видає постійну напругу 9 В, підключається безпосередньо до коаксіального роз'єму (DC Jack) на платі мікроконтролера. Вбудований лінійний стабілізатор напруги Arduino приймає ці 9 В і перетворює їх на стабільну опорну напругу 5 В. Саме ця знижена, безпечна напруга виводиться з контактів 5V та GND мікроконтролера і магістральними провідниками подається на червону та синю бокові рейки безпечної макетної плати. Така деревоподібна

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

топология гарантує, що всі чутливі периферійні модулі (датчик температури, дисплей) захищені від прямого впливу високої напруги первинного джерела живлення.

Інтеграція підсистеми збору даних розпочалася з монтажу модуля цифрового датчика температури SHT31-D. Оскільки для прототипування було обрано готовий модуль, а не базову мікросхему, його підключення було значно спрощено завдяки наявності інтегрованої апаратної обв'язки (зокрема, підтягувальних резисторів на лініях зв'язку та конденсаторів фільтрації живлення). Модуль має 6 виводів, які були розміщені у незалежних контактних рядах центрального поля макетної плати. Виводи живлення VIN та GND були з'єднані короткими перемичками з відповідними магістральними рейками 5 В та заземлення. Інформаційні шини передачі даних SCL (лінія тактування) та SDA (лінія даних) були підключені довгими сигнальними провідниками до апаратних виводів I2C-інтерфейсу, розташованих у верхній колодці плати Arduino. Для мінімізації впливу електромагнітних завад на цифрову передачу даних провідники шини I2C були прокладені максимально коротким шляхом, уникаючи перетину з силовими лініями. Пін AD, що відповідає за призначення адреси модуля в системі, було підключено до GND, це забезпечує встановлення адреси 0x44 для доступу до даних. Для встановлення адреси 0x45 цей пін підключається до 5В. Шостий вивід, AL(alert), можна залишити не підключеним, якщо нема потреби у використанні спеціальних сигналів.

Наступним етапом стала реалізація вузла контролю стану дверей холодильної камери на базі магнітного геркона. Враховуючи механічну природу цього датчика, необхідною вимогою було забезпечення стабільного зчитування його станів без хибних спрацювань. За наявності звичайного геркону, один контакт геркона підключався б до цифрового порту D2 мікроконтролера, а інший – безпосередньо комутовався б на магістраль заземлення (GND), а для уникнення апаратного конфлікту та забезпечення чітких логічних рівнів, порт D2 програмно переводиться у режим входу з активацією внутрішнього підтягувального

резистора що утримує на ньому високий логічний рівень (5 В) у розімкнутому стані. Але ми використовуємо модуль з герконом, який має свою об'язку та піни VIN, GND та D0. Перші два ми підключаємо безпосередньо до живлення та землі, а останній – відповідно до цифрового порту D2. Додатково, для апаратного придушення високочастотного шуму та ефекту «брязкоту контактів» під час механічного замикання, на модулі забезпечено певні рішення, що дозволяє максимально спростити підключення.

Комутація підсистеми візуальної індикації станів (світлодіодів) здійснювалася з дотриманням правил обмеження струму. Було використано зелений світлодіод для індикації штатного режиму роботи та червоний – для сигналізації про аварійні стани. Аноди світлодіодів були підключені до цифрових виводів D3 та D4 відповідно через струмообмежувальні резистори номіналом 220 Ом. Цей номінал був обраний з розрахунку падіння напруги на напівпровідниковому кристалі та забезпечення оптимального робочого струму на рівні близько 15 мА, що гарантує достатню яскравість світіння без ризику деградації кристала або перевантаження портів мікроконтролера. Катоди обох світлодіодів були об'єднані та підключені до спільної магістралі заземлення.

Найбільш комплексним етапом фізичної збірки стало підключення символьного рідкокристалічного дисплея LCD 1602. Через велику кількість контактів (16 виводів), дисплей був змонтований на окремій макетній платі для економії робочого простору. Підключення здійснювалося за оптимізованою 4-бітною схемою, яка дозволяє заощадити чотири інформаційні порти мікроконтролера. Контакти живлення логіки дисплея VDD та VSS були виведені на магістралі 5 В та GND. Вивід RW (Read/Write) також був жорстко заземлений, оскільки система працює виключно в режимі запису даних на екран. Для забезпечення можливості апаратного регулювання контрастності матриці, до виводу V0 було підключено рухомий контакт підстроювального потенціометра номіналом 10 кОм, крайні виводи якого зафіксовані на лініях живлення та заземлення.

					КвРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Управління дисплеєм реалізовано через два контрольні порти: RS (Register Select) підключено до цифрового виводу D7, а лінію синхронізації E (Enable) – до виводу D8. Чотири старші біти шини даних дисплея (D4, D5, D6, D7) комутовані на виводи D9, D10, D11 та D12 мікроконтролера відповідно. Виводи молодших бітів залишені непідключеними. Окремим ланцюгом організовано живлення LED-підсвітки екрана: анод підсвітки (пін A) підключено до шини 5 В через резистор номіналом 220 Ом, що запобігає термічному руйнуванню внутрішніх світлодіодів дисплея, а катод (пін K) з'єднано з магістраллю GND.

Важливим аспектом конструювання, що суттєво підвищує зручність подальшого обслуговування прототипу, стало дотримання суворих правил кабельного менеджменту та кольорового кодування провідників. Усі з'єднання були виконані за допомогою жорстких перемичок відповідної довжини, що щільно прилягають до поверхні плати, уникаючи утворення хаотичних петель. Червоні провідники використовувалися виключно для ліній позитивного потенціалу напруги, сині та чорні – для заземлення. Це не лише забезпечило естетичний, інженерно правильний вигляд зібраного комплексу, але й значно спростило процес апаратного налагодження.

Перед першим поданням напруги на зібраний апаратний комплекс було проведено обов'язкову процедуру передпускового тестування. За допомогою цифрового мультиметра у режимі прозвонки ланцюгів було перевірено відсутність короткого замикання між магістралями живлення 5 В та GND. Також було проведено візуальну інспекцію полярності підключення світлодіодів та контактів живлення мікросхем. Перший запуск прототипу здійснювався від обмеженого за струмом джерела – USB-порту персонального комп'ютера, що забезпечило додатковий рівень безпеки завдяки вбудованому захисту комп'ютера від перевантажень. Успішна ініціалізація екрана та поява на ньому темних матричних символів після налаштування контрастності підтвердила повну працездатність апаратної частини, завершивши етап фізичного конструювання та підготувавши систему до завантаження керуючого



з апаратурою. Для забезпечення комунікації з датчиком температури SHT31-D по шині I2C була підключена стандартна бібліотека Wire.h та спеціалізована Adafruit\_SHT31.h. Робота з рідкокристалічним дисплеєм реалізована за допомогою бібліотеки LiquidCrystal.h. Оскільки пристрій функціонує як вузол Інтернету речей, закономірною стала інтеграція мережевого стека: бібліотеки WiFiS3.h для роботи з вбудованим Wi-Fi модулем мікроконтролера та BlynkSimpleWifi.h для інкапсуляції протоколів обміну даними з хмарною платформою. На початковому етапі коду також відбувається глобальне оголошення констант, ідентифікаторів пінів та створення об'єктів для роботи з периферією.

Одним із найважливіших архітектурних рішень при написанні програмного коду стала відмова від використання стандартної функції затримки delay(). Використання блокуючих затримок у мережевих IoT-пристроях є неприпустимим, оскільки це призводить до зупинки виконання основного циклу мікроконтролера, втрати пакетів даних та неминучого розірвання з'єднання з хмарним сервером. Замість цього було реалізовано концепцію неблокуючого виконання на базі програмного таймера BlynkTimer. Цей таймер дозволяє асинхронно викликати функцію опитування датчиків та оновлення логіки з чітко заданим інтервалом (у даному випадку – кожні 2000 мілісекунд), залишаючи основний цикл процесора вільним для обробки мережевих запитів.

Блок ініціалізації системи, що виконується одноразово при подачі живлення у функції setup(), відповідає за конфігурацію апаратних портів введення-виведення. Піни світлодіодів переведено у режим виходу (OUTPUT), а пін геркона – у режим звичайного входу (INPUT), оскільки використаний апаратний модуль магнітного датчика вже містить потрібний підтягувальний резистор. Важливим кроком ініціалізації є запуск датчика температури з жорстко заданою I2C-адресою 0x44, що відповідає фізичному стану його апаратного виводу AD, підключеного до загальної шини заземлення. Після успішної ініціалізації локальної периферії мікроконтролер виконує спробу авторизації у

локальній мережі Wi-Fi та встановлення захищеного TCP-з'єднання з сервером Blynk, про що оператору виводиться відповідне повідомлення на екран дисплея.

Основна бізнес-логіка системи інкапсульована в окремій функції обробки, яка періодично викликається таймером. Її виконання розділено на кілька послідовних етапів. На першому етапі відбувається збір сирих даних: зчитування поточного значення температури з реєстра датчика SHT31-D та перевірка логічного рівня на цифровому піні, до якого підключено модуль геркона. Наявність високого логічного рівня свідчить про розрив магнітного поля, тобто про відкриття дверей камери.

На другому етапі зібрані дані проходять через блок аналізу, де порівнюються з динамічними граничними значеннями. Алгоритм використовує логічне «АБО» для формування єдиного статусу тривоги: якщо поточна температура перевищує верхню встановлену межу, або падає нижче мінімально допустимої межі, або фіксується факт відкритих дверей – система генерує сигнал тривоги.

На третьому етапі статус системи перетворюється на фізичну індикацію: відбувається відповідне перемикання зеленого та червоного сигнальних світлодіодів, а також викликається допоміжна функція оновлення інтерфейсу на дисплеї LCD 1602. Функція оновлення екрана використовує алгоритм пріоритетності виводу статусних повідомлень, гарантуючи, що у разі виникнення критичної ситуації (наприклад, відкриття дверей) користувач негайно побачить відповідне текстове попередження, яке перекриє стандартне повідомлення про нормальну роботу.

Розширення функціональних можливостей розробленого пристрою до рівня повноцінного вузла Інтернету речей реалізовано шляхом його глибокої інтеграції з хмарною платформою Blynk IoT. Дана платформа виступає центральною ланкою зв'язку між апаратним прототипом і кінцевим користувачем. Завдяки використанню бібліотеки BlynkSimpleWifi.h, мікроконтролер встановлює захищене TCP/IP з'єднання з віддаленим сервером,

ініціюючи безперервний двосторонній обмін телеметричною інформацією та керуючими командами у режимі реального часу.

Відправка зібраних даних здійснюється наприкінці кожної ітерації системного таймера. За допомогою вбудованого поліморфного методу `Blynk.virtualWrite()` мікроконтролер передає на сервер масив даних: поточне значення температури, бінарний стан дверей та сформоване текстове повідомлення про загальний статус системи. Відмінною рисою створеного програмно-технічного засобу є впровадження концепції дистанційного керування параметрами. Для реалізації цієї функції у глобальній області видимості програмного коду прописані макроси-перехоплювачі `BLYNK_WRITE()`. Вони виконують роль своєрідних програмних переривань, які асинхронно ініціюються сервером щоразу, коли користувач змінює налаштування меж температури через інтерфейс. Це дозволяє системі динамічно перезаписувати локальні змінні `MIN_TEMP` та `MAX_TEMP` «на льоту», без необхідності зупинки моніторингу чи перепрошивки мікроконтролера. Крім того, застосовано метод `BLYNK_CONNECTED()`, який при кожному новому встановленні зв'язку (наприклад, після знеструмлення) автоматично завантажує з хмари останні збережені налаштування, гарантуючи високу відмовостійкість системи.

Для логічного впорядкування інформаційних потоків між апаратною частиною та хмарним сервером було застосовано рівень апаратної абстракції у вигляді віртуальних каналів зв'язку (`Datastreams`). Віртуальні піни повністю відв'язані від фізичних контактів мікроконтролера. Розподіл цих каналів у розробленій системі має наступний вигляд:

– `V0` (Поточна температура): канал передачі даних із рухомою комою (`Double`), використовується для трансляції показників із датчика `SHT31-D` у режимі реального часу з роздільною здатністю до десятих часток градуса;

– V1 (Текстовий статус): символний канал (String), призначений для динамічного виводу системних повідомлень для оператора (наприклад, «Status: Normal» або «ALARM: Door Open»);

– V2 та V3 (Температурні межі): керуючі канали (Double), що забезпечують прийом нових значень від користувача для дистанційного налаштування мінімально та максимально допустимих порогів температури відповідно;

– V4 (Стан дверей): цілочисельний канал (Integer), змінна якого приймає дискретні значення 0 (зачинено) або 1 (відчинено), виділений спеціально для побудови математично точного аналітичного графіка розгерметизації холодильної камери.

Завершальним етапом програмно-апаратної реалізації стало конструювання інтерфесу в спеціальному середовищі Blynk. Інтерфейс спроектовано за принципом кросплатформного дашборду, архітектура якого автоматично синхронізується між веб-версією та мобільним додатком. При розробці інтерфесу були застосовані базові принципи UI/UX-дизайну: найважливіша інформація розміщена у верхній зоні видимості, а елементи керування захищені від випадкових натискань. Візуальний простір інтерфесу поділено на три ключові функціональні блоки:

– блок миттєвого моніторингу: включає віджет візуальної радіальної шкали (Gauge) для наочного, інтуїтивно зрозумілого відображення поточної температури в заданих межах, а також велике текстове поле (Value Display) для трансляції пріоритетного системного статусу. Це дозволяє оператору за частку секунди оцінити загальний стан підконтрольного об'єкта;

– блок історичної аналітики: реалізований за допомогою багатоканального графіка (Chart). На єдину часову вісь одночасно накладено плавну криву зміни температури та ступінчастий (бінарний) графік відкриття дверей. Таке рішення забезпечує глибоку інформативність, дозволяючи користувачу візуально простежити пряму кореляцію між частотою/тривалістю

розгерметизації камери та швидкістю порушення заданого температурного режиму;

– блок керування конфігурацією: містить два інтерактивні елементи точного вводу числових значень (Numeric Input/Step). Вони надають авторизованому персоналу можливість оперативно, з точністю до десятих часток градуса, коригувати дозволений температурний коридор відповідно до технічних умов зберігання конкретних видів продукції без фізичного доступу до апаратного блоку.

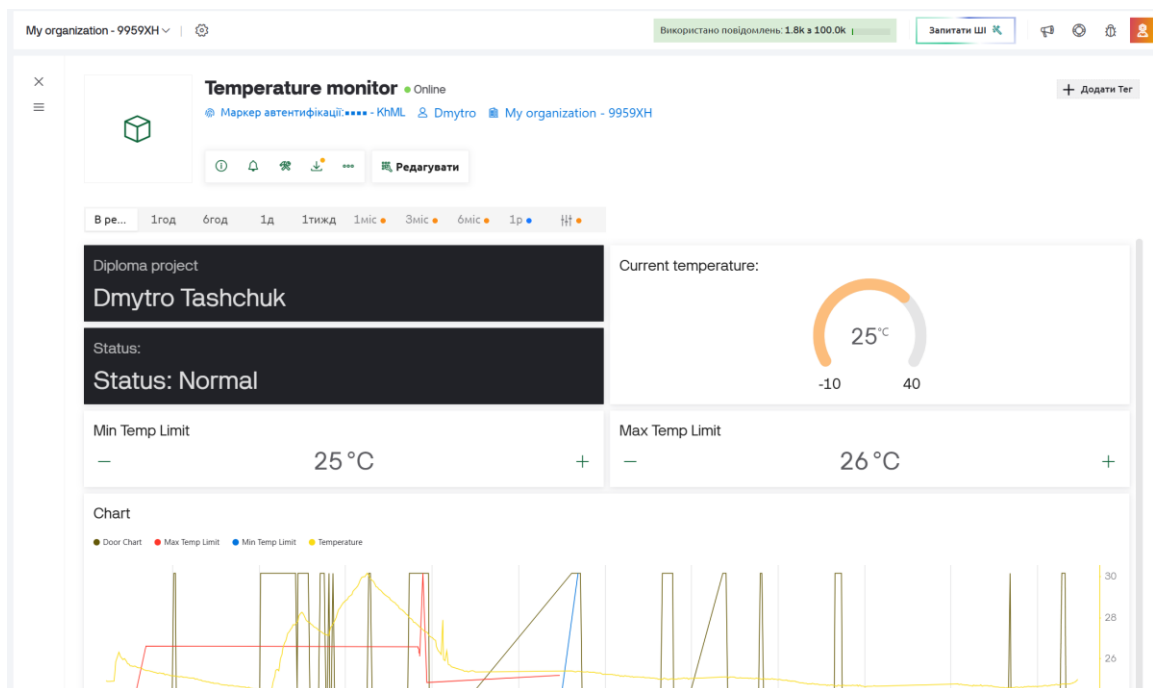


Рисунок 3.6 – Веб-дашборд Blynk

Інтерфейс веб-дашборду та мобільного дашборду наведено в Додатку Б.

### 3.4 Тестування програмно-апаратного комплексу

Після завершення етапів апаратного конструювання та програмної інтеграції було проведено комплексне тестування розробленого програмно-технічного засобу. Головною метою етапу випробувань стала верифікація







Результати проведених випробувань підтвердили повну працездатність спроектованого програмно-технічного засобу. Система продемонструвала абсолютну стійкість до хибних спрацювань та високу швидкість реакції на зміну контрольованих параметрів. Okремо варто відзначити бездоганну роботу модуля бездротового зв'язку: двостороння синхронізація даних між мікроконтролером Arduino UNO R4 WiFi та сервером Blynk відбувалася без втрат пакетів та помітних мережесвих затримок. Розроблений комплекс повністю відповідає технічному завданню.

### 3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі дипломної роботи було успішно реалізовано повний цикл створення програмно-технічного засобу для моніторингу температурного режиму та контролю стану дверей холодильного обладнання. Процес розробки охопив усі ключові етапи інженерного проектування: від створення віртуального концепту до конструювання та тестування фізичного IoT-пристрою.

На етапі попереднього проектування було розроблено принципову електричну схему в CAD-середовищі EasyEDA та створено віртуальний прототип у симуляторі Wokwi. Апаратна реалізація прототипу базується на сучасній платформі Arduino UNO R4 WiFi. Завдяки використанню високоточного цифрового датчика температури SHT31-D, апаратно-стабілізованого модуля магнітного геркона та символного дисплея LCD 1602, вдалося створити надійний комплекс збору та локального відображення даних.

Програмна складова комплексу реалізована мовою C++ з дотриманням парадигми неблокуючого програмування. Відмова від стандартних затримок на користь програмних таймерів забезпечила безперебійну роботу мікроконтролера у багатозадачному режимі. Ключовим досягненням стала глибока інтеграція пристрою з хмарною платформою Blynk IoT. Дашборд забезпечив можливість дистанційного моніторингу телеметрії, аналізу графіків відчинення дверей і

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

функцію динамічного керування межами температурного коридору без необхідності перепрошивки мікроконтролера.

Проведене комплексне тестування чотирьох базових станів системи підтвердило абсолютну працездатність створеного прототипу. Розроблений програмно-апаратний засіб повністю відповідає вимогам технічного завдання.

					КвРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

## ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було розроблено та впроваджено функціонально завершений програмно-технічний комплекс для віддаленого моніторингу параметрів мікроклімату та контролю розгерметизації холодильного обладнання. Вирішено актуальне науково-практичне завдання зі створення надійного, стійкого до збоїв вузла Інтернету речей, здатного в режимі реального часу збирати телеметричні дані, аналізувати їх та здійснювати двосторонній обмін інформацією з хмарним сервером. Для реалізації поставленої мети застосовано комплексний підхід, що поєднує сучасні методи схемотехнічного проектування, мікропроцесорного програмування мовою C++ та використання хмарних платформ.

У першому розділі проведено аналіз предметної області, існуючих систем контролю мікроклімату та вимог до сучасних IoT-пристроїв, що допомогло сформулювати вимоги та завдання заданої кіберфізичної системи та вибрати елементну базу для проектування фізичного прототипу.

У другому розділі було обґрунтовано вибір елементної бази для апаратної частини проєкту. В якості головного обчислювального ядра обрано мікроконтролер Arduino UNO R4 WiFi, який має відповідні апаратні ресурси та вбудований мережевий стек для роботи з хмарними технологіями. Для забезпечення високої точності вимірювань обрано цифровий датчик SHT31-D, а для детектування фізичного стану об'єкта – магнітний датчик та систему візуальної світлодіодної сигналізації.

У третьому розділі проведено схемотехнічне проектування апаратного комплексу, розробку його структурної та принципової електричної схем, а також попереднє віртуальне моделювання у симуляторах. Виконано фізичне конструювання прототипу. Важливим етапом стала оптимізація сенсорної підсистеми: замість базового геркона було імплементовано триконтактний модуль магнітного датчика. Наявність вбудованого апаратного компаратора на

					КвРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модулі дозволила повністю усунути ефект «брязкоту контактів», забезпечивши мікроконтролер чистим та стабільним цифровим сигналом без необхідності застосування складних програмних фільтрів. Також організовано локальний інтерфейс на базі символьного дисплея LCD 1602.

В процесі було здійснено програмну реалізацію логіки роботи мікроконтролера та глибоку інтеграцію пристрою з хмарним середовищем Blynk IoT. Програмний код побудовано на базі асинхронних таймерів, що гарантує безперебійне TCP-з'єднання. Розроблено та налаштовано кросплатформний мобільний і веб-інтерфейс, який повністю відповідає визначеним структурним вимогам: дашборд містить віджети для відображення поточного статусу та температури, аналітичні блоки з графіками зміни температури і відкривання дверей на єдиній часовій осі, а також елементи керування для встановлення нижньої та верхньої температурної межі. Проведено комплексне тестування чотирьох станів, яке підтвердило миттєву та безпомилкову реакцію локальної апаратури і хмарного інтерфейсу на зміну умов середовища.

Створений програмно-технічний засіб автоматизує процес моніторингу та повністю нівелює ризики, пов'язані з людським фактором. Головна перевага для користувачів полягає у можливості дистанційного керування конфігурацією системи. У разі нещільно зачинених дверей або виходу температури за межі встановленого коридору, персонал миттєво отримує сповіщення. Глибока історична аналітика графіків дозволяє управлінцям знаходити зв'язок між частотою доступу до камери та порушеннями температурного режиму, що сприяє оптимізації робочих процесів та запобігає фінансовим збиткам від псування продукції.

Окрім харчової промисловості, складської логістики та закладів торгівлі, розроблений пристрій вирізняється високою універсальністю. Його впровадження є доцільним у фармацевтичній галузі (для моніторингу «холодового ланцюга» медикаментів), медичних лабораторіях, серверних

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кімнатах та дата-центрах (для контролю клімату телекомунікаційних стійок), а також у тепличних господарствах та інкубаторах.

Разом із тим, під час дослідної експлуатації комплексу було виявлено низку потенційних проблем та обмежень, притаманних поточній версії прототипу. Головною вразливістю системи є її архітектурна залежність від стабільності зовнішньої інфраструктури – стаціонарної електромережі та локального Wi-Fi покриття. У випадку збою в роботі маршрутизатора пристрій втрачає зв'язок із сервером Blynk, що тимчасово унеможлиблює дистанційний моніторинг.

Доцільно інтегрувати блок резервного живлення на основі літій-іонних акумуляторів для забезпечення безперервного моніторингу під час аварійних знеструмлень. Крім того, перспективним є додавання GSM/LTE-модуля зв'язку як резервного каналу передачі даних на випадок відсутності локальної мережі Wi-Fi, що дозволить системі надсилати SMS-сповіщення у будь-яких умовах. Також можна реалізувати функцію локального логування (резервного збереження) даних на SD-карту, що дозволить зберегти історію температурних коливань навіть при тривалій відсутності інтернет-з'єднання. Додатковим вагомим покращенням взаємодії стане інтеграція активного акустичного сповіщувача (зумера), який зможе дублювати візуальну світлодіодну індикацію гучним звуковим сигналом, привертаючи увагу персоналу безпосередньо на об'єкті ще до того, як вони перевірять мобільний додаток.

					КвРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. What is a refrigeration equipment monitoring system and how does it work?  
URL: <https://novatek-electro.com/en/blog/shcho-take-systema-monitorynhu-kholodylnogo-obladnannya/> (дата звернення: 20.02.2026).
2. Системи моніторингу температури Polymetrica. URL: <https://polymetrica.com/uk/poslugi/monitoring-temperature/> (дата звернення: 20.02.2026).
3. Механічний термометр: історія, опис та принцип дії. URL: <https://kulturabr.kiev.ua/mexanichnij-termometr-istoriya-opis-ta-princip-di%D1%97/> (дата звернення: 21.02.2026).
4. Логери температури для моніторингу транспортованих вантажів. URL: <https://promsystem.com.ua/UA/logery-temperature-dlya-monitoringu-transportovanyh-vantazhiv/> (дата звернення: 21.02.2026).
5. A review on ZigBee based WSNs: concepts, infrastructure, applications, and challenges / Н. А. Alobaidy et al. *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.* 2020. Vol. 9, No. 3. P. 189–198.
6. Системи температурного моніторингу ТЕРА. URL: <https://redmedua.com/uk/catalog/36-sistema-monitoringa> (дата звернення: 23.02.2026).
7. Призначення, структура і основні функції SCADA-систем. URL: <http://www.votum.ua/old/uk/publications/scada.htm> (дата звернення: 23.02.2026).
8. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. URL: <https://www.ptc.com/en/technologies/iiot/industrial-automation/scada?srsId=AfmBOorzWjqHrORrwLj4rShvVUEXLciT0RCyV-B9a-5L5rkWTbUOngD> (дата звернення: 23.02.2026).
9. Що таке система SCADA та як вона працює? URL: <https://www.sinsmarts.com/uk/blog/what-is-a-scada-system-and-how-does-it-work/> (дата звернення: 23.02.2026).

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. «Холодовий ланцюг» у закладі охорони здоров'я. URL: <https://medplatforma.com.ua/article/787-organizovumo-holodoviy-lantsyug-u-zaklad-ohoroni-zdorovya> (дата звернення: 23.02.2026).

11. Як працює IoT зсередини: Сенсори, протоколи, обробка даних. URL: <https://robotdreams.cc/uk/blog/772-yak-pracyuye-iot-zseredyny-sensory-protokoly-obrobka-danyh> (дата звернення: 24.02.2026).

12. Порівняння датчиків температури та вологості (DHT11 vs DHT22 vs BME280). URL: <https://myproject.com.ua/porivniannia-datchykyv-temperatury-ta-volohosti-dht11-vs-dht22-vs-bme280.html> (дата звернення: 16.04.2026).

13. Розумний дім. URL: [https://geekmatic.in.ua/ua/umnyj\\_dom\\_esp32\\_vvedenie](https://geekmatic.in.ua/ua/umnyj_dom_esp32_vvedenie) (дата звернення: 18.04.2026).

14. Холодовий ланцюг постачання: приклади інновацій сьогодення. URL: <https://confmanagement-proc.kpi.ua/article/view/329604> (дата звернення: 20.04.2026).

15. Автономна iot-система моніторингу мікроклімату аудиторій на основі відкритої diy-архітектури. URL: <https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/ppmm/article/view/961> (дата звернення: 20.04.2026).

16. Бараненко М. М. Автоматизація холодильної установки. 2025.

17. Науково-практичні підходи до побудови холодкових ланцюгів для забезпечення належної якості лікарських засобів / Р. В. Сагайдак-Нікітюк та ін. 2015.

18. Xu J., Gu B., Tian G. Review of agricultural IoT technology. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2022. Vol. 6. P. 10–22.

19. IoT-based classroom temperature monitoring and missing data prediction using raspberry Pi and ESP32 / M. A. Navarrete-Sanchez et al. *Journal of Robotics and Control (JRC)*. 2025. Vol. 6, No. 1. P. 234–245.

20. Subahi A. F., Bouazza K. E. An intelligent IoT-based system design for controlling and monitoring greenhouse temperature. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 125488–125500.

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. Ajreen M. Based temperature and humidity monitoring system using arduino uno and ESP8266 WiFi module. SSRN 3918308. 2021.
22. Design of monitoring system temperature and humidity using DHT22 sensor and NRF24L01 based on Arduino / Azhari et al. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2023. Vol. 2421, No. 1.
23. Сагун А. В. Особливості симуляції пристроїв бездротового зв'язку в середовищі Wokwi. *Scientific research: modern challenges and future prospects : materials of the 3rd Int. sci.-pract. conf.* (Munich, Germany, Oct. 21-23, 2024). Munich : MDPC Publishing, 2024. С. 503.
24. Development and Evaluation of an ESP32-based Temperature and Humidity Control Unit for Textile Storage / D. Harianto et al. *International Journal of Engineering Continuity*. 2025. Vol. 4, No. 1. P. 1–19.
25. Industrial temperature monitor based on nodemcu esp8266, mqtt and node-red / P. S. B. Macheso et al. *Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N) : proc. of the 3rd Int. Conf. IEEE*, 2021.
26. Raheja R., Rathaur P., Faiz M. A. A Review on IOT Based Smart Refrigerators. *The Academic*. 2024. Vol. 2, No. 2.
27. Performance analysis comparison of DHT11, DHT22 and DS18B20 as temperature measurement / D. Yulizar et al. *Science Education and Sciences 2022 (ICSES 2022) : proc. of the 2nd Int. Conf. Springer Nature*, 2023. Vol. 8.
28. Документація Arduino Uno R3. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/#suggested-libraries> (дата звернення: 26.04.2026).
29. Документація ESP32. URL: <https://www.theengineeringprojects.com/2020/12/esp32-pinout-datasheet-features-applications.html> (дата звернення: 26.04.2026).
30. Документація Arduino Uno R4. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-r4-wifi/> (дата звернення: 26.04.2026).
31. Документація датчика температури DHT11. URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated->

[Version-1143054.pdf?srsId=AfmBOooFI7LsySuBG0K6dpI2twIrz0g0IWXhJD9](#)

[hdQxijqoheo0zcHxD](#) (дата звернення: 27.04.2026).

32. Документація датчика температури SHT31-D. URL: [https://arduino.ua/files/Sensirion\\_Humidity\\_Sensors\\_SHT3x\\_Datasheet\\_digital-971521.pdf?srsId=AfmBOoqpGgssbeCkhoz25vCC8Nngm8av4k3yqWooKTKWhM80ZZgdSiBw](https://arduino.ua/files/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital-971521.pdf?srsId=AfmBOoqpGgssbeCkhoz25vCC8Nngm8av4k3yqWooKTKWhM80ZZgdSiBw) (дата звернення: 27.04.2026).

33. Interfacing SHT3x Humidity & Temperature Sensor with Arduino. URL: <https://how2electronics.com/interfacing-sht3x-humidity-temperature-sensor-arduino/> (дата звернення: 27.04.2026).

34. Interfacing SHT31 Temperature & Humidity Sensor with Arduino. URL: <https://lastminuteengineers.com/sht31-temperature-humidity-sensor-arduino-tutorial/> (дата звернення: 29.04.2026).

35. Документація геркона МКА-14103. URL: <https://mikroshop.ch/pdf/mka14103.pdf> (дата звернення: 28.04.2026).

36. LED Resistor. URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/resistor/led-resistor.html> (дата звернення: 29.04.2026).

37. Bohara B., Maharjan S., Shrestha B. R. IoT based smart home using Blynk framework. arXiv preprint arXiv:2007.13714. 2020.

38. Гура В. І., Лановський М. О. Студент ІV курсу спеціальності 123–Комп’ютерна інженерія факультету кібербезпеки, програмної інженерії та комп’ютерних наук. Передові технології в інформаційно-комунікаційній інженерії. С. 79.

39. Artificial intelligence enabled smart refrigeration management system using internet of things framework / Z. Dong et al. *Computing, Networks and Internet of Things* : proc. of the 2020 Int. Conf. 2020.

40. Afreen H., Bajwa I. S. An IoT-based real-time intelligent monitoring and notification system of cold storage. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 38236–38253.

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

41. Monitoring of temperature in retail refrigerated cabinets applying IoT over open-source hardware and software / J. Ramírez-Faz et al. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 3. P. 846.

					КВРКІ 022098.22.03.57 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72







МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Тащук Дмитро Богданович

Тема: Кіберфізична система моніторингу температурного режиму  
холодильного обладнання

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 66

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є синтез та проектування кіберфізичної системи моніторингу температурного режиму холодильного обладнання

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

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: в першому розділі кваліфікаційної роботи проведено системне дослідження предметної області, проаналізовано сучасні методи моніторингу мікроклімату холодильного обладнання, архітектуру систем класу «Інтернет речей» (IoT), обґрунтовано вибір сучасної 32-бітної мікроконтролерної платформи та цифрової сенсорної бази та виконано постановку задачі розробки кіберфізичної системи.

В другому розділі кваліфікаційної роботи проведено проектування та апаратну реалізацію кіберфізичної системи, а саме: розроблено структурну та принципову електричну схему; виконано попереднє віртуальне моделювання прототипу в САПР; здійснено фізичне конструювання апаратного блоку на базі мікроконтролера Arduino UNO R4 WiFi; оптимізовано підсистему збору даних шляхом встановлення високоточного датчика температури SHT31-D та магнітного модуля геркона з апаратним усуненням «брязкоту контактів»; спроектовано локальний людино-машинний інтерфейс на основі символьного дисплея LCD 1602 та системи світлодіодної індикації.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано мікропрограмну реалізацію логіки системи та її інтеграцію з хмарним середовищем, а саме: розроблено програмний код мовою C++ із застосуванням методу неблокуючого виконання завдань; налаштовано захищений мережевий обмін даними; спроектовано кросплатформний віддалений інтерфейс (дашборд) на базі платформи Blynk IoT із функцією дистанційного конфігурування температурних меж; проведено комплексне тестування чотирьох базових експлуатаційних станів прототипу (штатний режим, перегрів, переохолодження, розгерметизація камери).

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи:

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

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

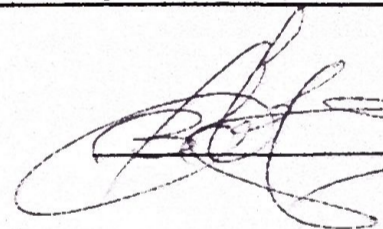
8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

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

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

Чесний Віктор Миколайович, канд. техн. наук  
доцент, доцент кафедри кібербезпеки

“29” 07 2026 р.

 (підпис)

## РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система моніторингу температурного режиму холодильного обладнання

Автор Дмитро ТАЩУК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: асистент Олексій ЛИГУН

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

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

#### Підтвердження:

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

- 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

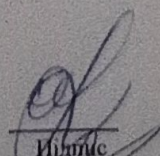
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 3.74%; та системою Anti-Plagiarism складає 19%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

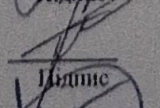
01.06.2026

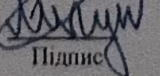
Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис

  
Підпис

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олексій ЛИГУН  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Зав. кафедри КІС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Дмитро ТАЦУК

---

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-3

### ЗАЯВА

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

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

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

29 травня 2026 року

## 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: Дмитро ТАЩУК

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система моніторингу температурного режиму холодильного обладнання

Експерт: Ольга ПАВЛОВА

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1:3.74%

Коефіцієнт подібності 2:0.58%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-29 16:27:18.0

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.

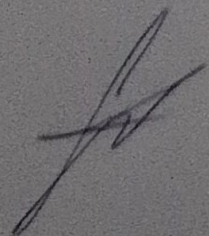
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

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:

2026-05-30

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

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

**Максимальне співпадіння з одним документом 19.0%**

**Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 12%**

ID: 272770 Назва: БКР Кіберфізична система моніторингу температурного режиму холодильного обладнання Додано в БД: 2026-05-29 Автора: Дмитро ТАЩУК Керівники: Ольга ПАВЛОВА Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	102972	673	21230 (21%)	133 (20%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
269584	Назва: Звіт ПДП Кіберфізична система моніторингу температурного режиму холодильного обладнання Додано в БД: 2026-02-28 Автора: Ташука Д.Б. Керівники: Павлова О.О. Консультанти: Опоненти:	19463 (19.0%)	116 (17.0%)