

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів у режимі реального часу на базі мікроконтролера ESP32

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

КРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група KI2-22-4


Підпис

Артем НОРЧУК
Ініціали, прізвище

Керівник

Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Олександр ГУРАЛЬНИК
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер канд. фіз.-мат. наук, доцент

Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище

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


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

дата

Хмельницький 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

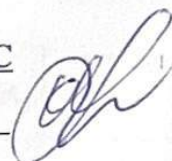
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедри КІІС

Ольга ПАВЛОВА



“ 10 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Норчуку Артему Сергійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів у режимі реального часу на базі мікроконтролера ESP32

Керівник проекту (роботи) Гуральник Олександр Борисович

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

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Дослідження предметної області та постановка задачі

Проектування кіберфізичної системи віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів

Програмно-апаратна реалізація, моделювання та тестування системи

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

Схема

електрично-принципова

Структурна схема, функціональна схема та блок-схема алгоритму роботи

Графічний інтерфейс користувача


6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

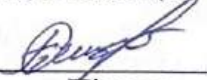
7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напряму 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 проектування системи віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – проектування системи віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів	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

Артем НОРЧУК
Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи  Підпис

Олександр ГУРАЛЬНИК
Імя, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів у режимі реального часу на базі мікроконтролера ESP32».

Автор роботи: Норчук А. С.

Керівник роботи: Гуральник О. Б.

Пояснювальна записка: 71 с., 18 рис., 5 табл., 4 дод., 47 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

БІОМАТЕРІАЛИ, ВІДДАЛЕНИЙ МОНІТОРИНГ, ВОЛОГІСТЬ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, ТЕМПЕРАТУРА, ESP32.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню кіберфізичної системи віддаленого моніторингу умов зберігання біологічних матеріалів на базі мікроконтролерної платформи ESP32. Актуальність теми зумовлена вимогами до стабільності температурного та вологісного режимів у спеціалізованих установах, де відхилення від норми можуть призвести до псування біологічних зразків. Своєчасний контроль параметрів середовища та миттєве інформування персоналу дають змогу попереджати аварійні ситуації та підвищувати надійність зберігання біоматеріалів.

Метою роботи є проектування, програмно-апаратна реалізація, моделювання та тестування кіберфізичної системи для збору, передавання, оброблення й візуалізації даних з датчиків у реальному часі. Для досягнення поставленої мети було проведено аналіз сучасних підходів до побудови IoT-систем, обґрунтовано вибір елементної бази, розроблено архітектуру системи, спроектовано програмне забезпечення та створено користувацькі інтерфейси на базі платформи Blynk. Отримані результати підтверджені шляхом створення та випробування програмно-апаратного прототипу системи, та тестування сценаріїв критичного відхилення параметрів.




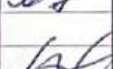

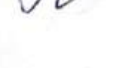
Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Дослідження предметної області та постановка задачі	6
1.1 Проблематика трансплантації у сучасній медицині.....	6
1.2 Аналіз існуючих технологій та вирішення проблеми	11
1.3 Аналіз апаратної платформи.....	17
1.4 Визначення вимог та розробка технічного завдання	20
1.5 Постановка задачі.....	21
2 Проектування кіберфізичної системи віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів.....	23
2.1 Загальна архітектура системи та принцип її функціонування	23
2.2 Вибір апаратних компонентів системи.....	29
2.3 Проектування апаратної структури вузла моніторингу	34
2.4 Проектування програмної архітектури та алгоритмів оброблення даних	41
2.5 Проектування підсистеми передавання, збереження та візуалізації даних	43
2.6 Висновки до розділу.	46
3 Програмно-апаратна реалізація, моделювання та тестування системи.....	47
3.1 Моделювання системи в середовищі Wokwi	47
3.2 Програмна реалізація вузла моніторингу	50
3.3 Реалізація та налаштування веб-інтерфейсу і мобільного застосунку	52
3.4 Попереднє тестування в середовищі моделювання.....	55
3.5 Апаратна реалізація пристрою.....	57
3.6 Тестування фізичного прототипу системи.....	59
3.7 Оцінка результатів, переваг та обмежень системи.....	61
3.8 Висновки до третього розділу	63

КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ				
Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата
Виконав	Норчук А.С.			
Перевір.	Гуральник О.Б.			
Н.контр.	Кисіль Т.М.			
Затвер.	Павлова О.О.			
Кіберфізична система віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів у режимі реального часу на базі мікроконтролера ESP32				
		Літера	Арк.ш.	Арк.шіт.
		у	2	71
ХНУ КІ2-22-4				

Висновки	65
Перелік джерел посилання	67
Додаток А Схема електрично-принципова	72
Додаток Б Структурна схема, функціональна схема та блок-схема алгоритму роботи	73
Додаток В Графічний інтерфейс користувача.....	74
Додаток Г Лістинг коду до проєкту.....	75

ВСТУП

У сучасному світі інформаційних технологій та автоматизації особливого значення набувають кіберфізичні системи, які об'єднують фізичні процеси з програмною складовою. Ці системи набули широкого розповсюдження у багатьох галузях, особливо в критично важливих сферах – промисловості, медицині, біотехнологіях та інших, де потрібен постійний і точний моніторинг, контроль даних та швидка реакція на їх зміну.

Зберігання біологічних матеріалів, зокрема органів, тканин, крові та біологічних зразків, вимагає точного дотримання чітко визначених умов температури, вологості та інших параметрів. Навіть незначні відхилення від норми можуть призвести до втрати якості матеріалу або зробити його непридатним для подальшого використання. Особливо актуальна ця проблема у сфері трансплантології, де правильне зберігання трансплантатів безпосередньо впливає на можливість врятувати людське життя.

В умовах підвищених ризиків для критичної інфраструктури та порушення стабільності енергопостачання значення систем безперервного віддаленого моніторингу додатково зростає. Застосування таких рішень у режимі реального часу стає критично важливим, оскільки оперативне виявлення порушень умов зберігання дозволяє запобігти втраті цінних біологічних трансплантатів.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка кіберфізичної системи віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів у режимі реального часу на базі мікроконтролера ESP32. Запропонована система забезпечує збір даних із сенсорів температури та вологості, їх передачу через бездротові мережі та візуалізацію інформації для оперативного аналізу стану середовища зберігання [14, 17, 38].

Робота охоплює дослідження та аналіз існуючих систем зберігання біологічних матеріалів у контрольованих умовах, а також методів і технічних засобів їх побудови. У межах дипломної роботи розглядаються принципи

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

функціонування кіберфізичних систем моніторингу, здійснюється розробка системи збору даних із сенсорів, їх передача за допомогою бездротового зв'язку та подальша обробка для забезпечення контролю параметрів зберігання в режимі реального часу.

Створений фізичний прототип системи може бути використаний як база для впровадження у медичних установах, лабораторіях і біобанках з метою підвищення надійності зберігання біологічних матеріалів, виявлення відхилень від норми для оперативного втручання та мінімізації людського фактора.

Об'єктом дослідження є процеси дистанційного моніторингу параметрів середовища під час зберігання та транспортування біологічних матеріалів.

Предметом дослідження є архітектура, апаратно-програмне забезпечення та алгоритми функціонування кіберфізичної системи на базі мікроконтролера ESP32 для реалізації моніторингу в режимі реального часу.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Проблематика трансплантації у сучасній медицині

Трансплантація органів є одним із найбільш технологічно складних і водночас життєво необхідних напрямів сучасної медицини. Вона застосовується як єдиний ефективний метод лікування термінальних стадій органної недостатності, зокрема серцевої, ниркової, печінкової та легеневої. Розвиток хірургічних технологій, імуносупресивної терапії та методів консервації органів дозволив значно підвищити відсоток успішних трансплантацій, однак проблема дефіциту донорських органів і забезпечення їх належного зберігання залишається критичною.

За даними міжнародних медичних організацій, щороку у світі виконується понад 150 тисяч трансплантацій органів, проте ця кількість покриває лише частину реальної потреби. Кількість пацієнтів, які перебувають у листі очікування, значно перевищує кількість доступних донорських органів. У деяких країнах очікування трансплантації нирки може тривати декілька років, а для трансплантації серця або легень – навіть місяці можуть стати критичними [30, 31, 43].

На рисунку 1.1 відображено динаміку співвідношення потреби в трансплантації та кількості проведених операцій у США за період 2000–2024 років (за даними OPTN/UNOS). Незважаючи на те, що в останні роки (2020–2024) спостерігається стрімке, рекордне зростання кількості донорів та виконаних трансплантацій, глобальна проблема дефіциту донорських органів залишається актуальною.

Також потрібно відмітити, що спад кількості очікуючих у черзі після 2015 року відбулися не через вирішення проблеми, а значною мірою через запровадження нових систем розподілу та чистки списків – почали активніше видаляти пацієнтів, чий стан за час очікування настільки погіршився, що вони

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фізично не змогли б перенести операцію. Хоча не потрібно виключати позитивну динаміку графіка та той факт що ефективність трансплантації значно зросла в порівнянні з минулими десятиліттями.[37, 41]

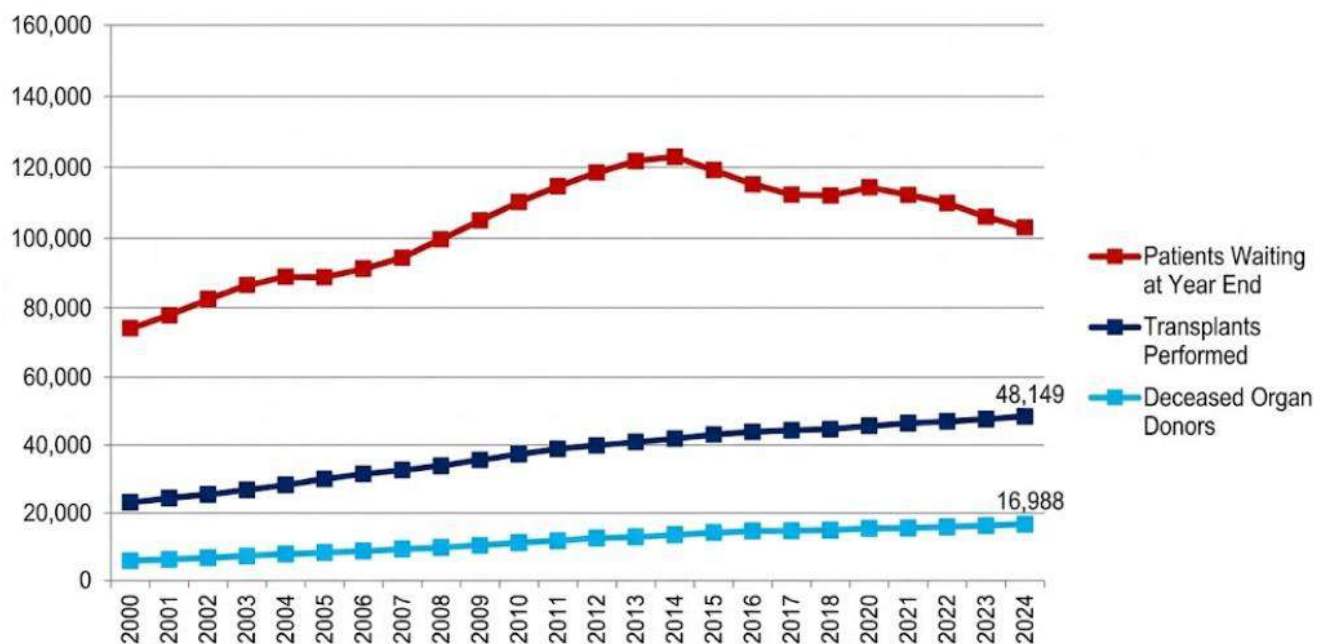


Рисунок 1.1 – графік на основі даних від OPTN та UNOS [31]

В Україні система трансплантації активно розвивається в останні роки, однак матеріалу для трансплантування суттєво не вистачає для покриття потреби. Значна кількість пацієнтів із термінальною органною недостатністю змушена тривалий час перебувати на замісній терапії (гемодіаліз, механічна підтримка серця тощо), що знижує якість життя та збільшує ризик летальних ускладнень [3].

Таким чином, кожен донорський орган є надзвичайно цінним ресурсом, а його втрата через порушення умов зберігання або транспортування має як медичні, так і соціально-економічні наслідки.

Важливим параметром, що визначає успішність трансплантації, є час холодової ішемії (Cold Ischemia Time, CIT) – період від моменту охолодження органа після його експлантації до відновлення кровотоку в організмі реципієнта.

У цей час орган перебуває без фізіологічної перфузії, що зумовлює розвиток ішемічних змін навіть за умов зниженого температурного режиму [21].

Після припинення перфузії клітини не отримують кисень і переходять на анаеробний метаболізм, що супроводжується накопиченням лактату та виснаженням запасів аденозинтрифосфату (АТФ). Дефіцит АТФ призводить до порушення роботи натрійкалієвих насосів, накопичення натрію і води всередині клітин, а також підвищення концентрації внутрішньоклітинного кальцію. У сукупності ці процеси спричиняють клітинний набряк, пошкодження мембран і розвиток некрозу. Охолодження лише уповільнює зазначені механізми, але не зупиняє їх повністю [8, 20, 23].

Зі збільшенням тривалості холодової ішемії зростає ризик первинної дисфункції трансплантата після пересадки. Допустимі часові межі холодової ішемії для різних органів наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Критичні терміни холодової ішемії для донорських органів

Орган	Оптимальний час (год)	Граничний час (год)	Наслідки перевищення часу ішемії
Серце	4	6	Незворотна втрата скорочувальної здатності кардіоміоцитів
Легені	4	6	Набряк легень, зниження газообмінної функції
Печінка	8	12	Первинна дисфункція, порушення синтезу факторів згортання
Підшлункова залоза	10	18	Розвиток панкреатиту трансплантата, тромбоз
Нирки	24	36	Відстрочена функція трансплантата (потреба в діалізі)

Збереження функціонування органів працює за принципом гіпотермії. Відповідно до правила Ван-Гоффа, зниження температури органа на 10 градусів уповільнює швидкість руйнівних процесів у 2–3 рази. При температурі близько +4 градусів метаболізм клітини зменшується до 5–10% від норми, що дозволяє мінімізувати деструктивні процеси в органі на деякий час. Однак в цьому процесі потрібно точно контролювати температуру, дозволяється відхилення всього в декілька градусів, приблизно від +2 до +8, для запобігання критичних загроз. При зниженні температури нижче нуля розпочинається процес кристалізації клітинної рідини, що спричиняє пошкодження та руйнацію клітинних мембран. А при перевищенні даної планки значно вкорочує допустимий час холодової ішемії, пришвидшуючи клітинний метаболізм та накопичення шкідливих продуктів, що призводить до пошкодження клітин і тканин [22].

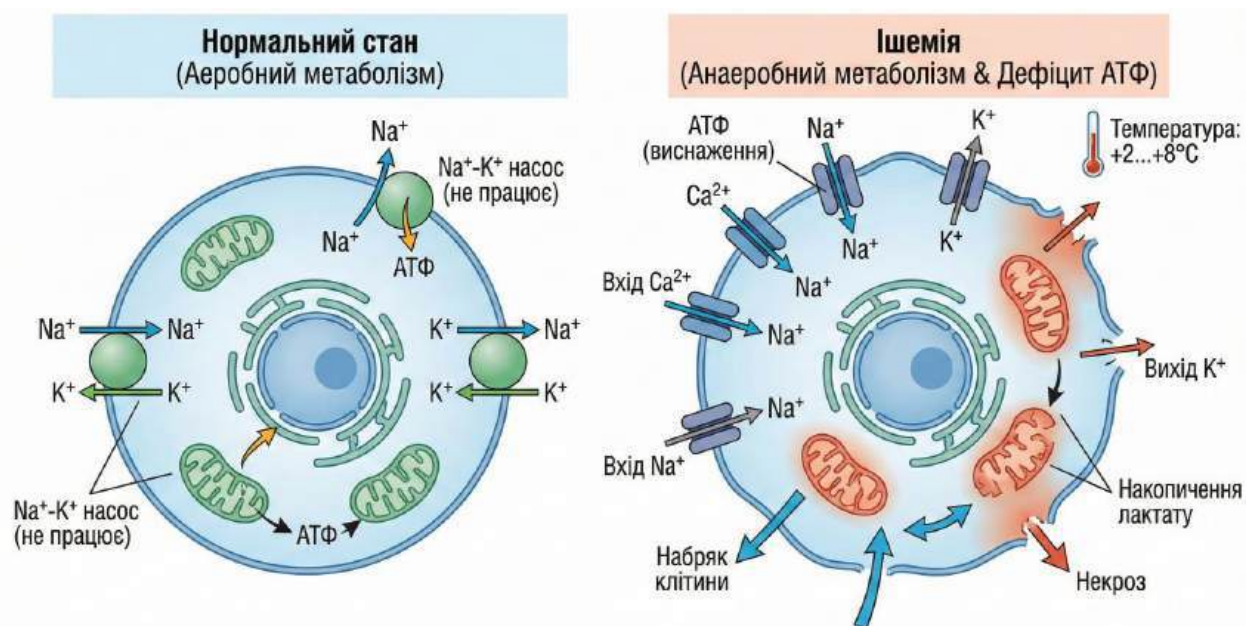


Рисунок 1.2 – Біохімічні механізми ушкодження клітин під час ішемії.

Хоча при зберіганні біоматеріалів основним фактором є температура, вологість також відіграє важливу роль, особливо під час транспортування в контрольованому середовищі. Згідно зі стандартами GSP, оптимальний діапазон становить 35–60%. Зниження вологості спричиняє дегідратацію та пошкодження

клітин, а надмірна – загрожує конденсатом і мікробним забрудненням. Для кіберфізичної системи моніторинг цього показника необхідний для виявлення розгерметизації та оцінки стабільності мікроклімату, що обґрунтовує інтеграцію датчика вологості. Детальніше вплив вологості наведено у таблиці 1.2 [15].

Варто зазначити, що згідно з міжнародними протоколами транспортування, донорські органи (нирки, печінка, серце) зберігаються тільки за системою потрійного пакування. Орган занурюється у охолоджений консерваційний розчин у первинному стерильному пакеті, який герметично закривається та поміщається у вторинний і третинний захисні контури для забезпечення повної стерильності. У такому випадку датчик розробленої кіберфізичної системи буде розміщений між зовнішнім пакуванням та стінками термоконтейнера. тому стабільний рівень вологості в цьому просторі буде значити герметичність контейнера та пакування, в той же час різка зміна вологості може свідчити про відкриття контейнера, або розгерметизацію пакування та витік розчину для збереження органів, що вимагає негайного втручання медичного персоналу для порятунку трансплантата [16, 18, 46].

Таблиця 1.2 – Вплив відхилень рівня вологості на біологічні матеріали

Рівень вологості	Фізичний процес	Наслідки для біоматеріалу
Низька	Інтенсивне випаровування вологи з поверхні зразка (дегідратація), кристалізація солей	Зміна осмотичного тиску, ушкодження клітинних мембран, втрата функціональної активності тканини
Надмірна	Конденсація водяної пари на стінках контейнера та поверхні зразків	Порушення стерильності, активний ріст бактерій та грибків, розведення консерваційних розчинів

Кінець таблиці 1.2

Контрольована	Підтримання рівноважного стану між зразком і середовищем	Збереження життєздатності клітин, стабільність фізико-хімічних параметрів, мінімізація ризиків псування
---------------	----------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------

Отже враховуючи попередні дані можна сказати що життєздатність донорського органу визначається складною взаємодією часу, температури, вологості та багатьох інших факторів навколишнього середовища. Навіть незначні відхилення від оптимальних умов можуть спричинити руйнування клітин та втрату цінного матеріалу для порятунку життів.

Через вузькі допустимі межі параметрів зберігання, є потреба створення автоматизованої системи безперервного моніторингу температури та вологості для можливості оперативного реагування в разі різких та критичних змін у даних. Саме таке завдання вирішується шляхом розробки кіберфізичної системи.

1.2 Аналіз існуючих технологій та вирішення проблеми

У сучасній медицині для зберігання органів, біологічних зразків та інших матеріалів застосовуються спеціалізовані холодильні системи з контролем температури. Рівень технологічності таких систем досить сильно відрізняється – від промислових професійних рішень з автоматикою до більш базових пристроїв без вбудованого моніторингу. Аналіз існуючих підходів дозволяє оцінити їхні сильні та слабкі сторони та обґрунтувати необхідність розробки більш доступного рішення [42]. Особливо актуальним є забезпечення постійного контролю температурних параметрів у режимі реального часу, оскільки навіть незначні відхилення можуть негативно вплинути на якість та придатність біологічних матеріалів. Крім того, сучасні тенденції розвитку медичного

обладнання орієнтовані на підвищення надійності систем моніторингу та спрощення їх інтеграції у повсякденну роботу медичних установ.

Огляд високотехнологічних рішень:

До цієї категорії належать системи, що забезпечують активний контроль середовища, мають вбудовані модулі бездротового зв'язку та спеціалізоване програмне забезпечення.

1) Paragonix SherpaPak™ Cardiac Transport System (виробник: Paragonix Technologies, Inc., США) є одним із найбільш передових рішень на ринку медичної логістики, сертифікованим FDA (Управлінням з продовольства і медикаментів США) та CE (Європейський сертифікат відповідності). Система розроблена для заміни традиційного методу "ice box", який не гарантує стабільності температурного режиму [33, 34]. Її використання дозволяє підвищити безпеку транспортування донорських органів та зменшити ризик пошкодження тканин під час перевезення.

В основі роботи системи лежить технологія пасивного терморегулювання з використанням матеріалів зі змінним фазовим станом (Phase Change Material, PCM). На відміну від звичайного льоду, який має температуру 0°C і може викликати обмороження тканин органа, PCM-панелі SherpaPak™ запрограмовані на підтримання температури в діапазоні, що виключає кристалізацію води в клітинах [32]. Це забезпечує більш стабільні умови зберігання серця та сприяє продовженню допустимого часу транспортування.

Система складається з двох основних частин: зовнішній захисний кейс який забезпечує фізичний захист від ударів та вібрацій, а також термоізоляцію від зовнішнього середовища та внутрішній стерильний контейнер що безпосередньо вміщує донорський орган, занурений у консерваційний розчин, та оточений охолоджувальними елементами PCM. Додатково система оснащена елементами контролю стану транспортування, що дозволяє відстежувати дотримання необхідних умов під час перевезення. На рисунку 1.3 зображено зовнішній та внутрішній вигляд контейнера.

					КВРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 – Paragonix SherpaPak™ Cardiac Transport System [33]

Ключовою особливістю системи є інтеграція компонентів IoT (Internet of Things) для забезпечення моніторингу та звітності. Технічні характеристики системи Paragonix SherpaPak включають температурний режим, який забезпечує утримання температури в межах від +4 до +8 градусів протягом 40+ годин, що перекидає максимальний час ішемії для серця. Також у системі наявна телеметрія завдяки вбудованому модулю зв'язку, який передає дані на хмарний сервер у реальному часі. Мобільний додаток Paragonix App дає змогу лікарям відстежувати геолокацію контейнера, поточну температуру та статус транспортування.

Незважаючи на високу технологічність, система має суттєві обмеження, що перешкоджають її масовому впровадженню в країнах, що розвиваються. Перш за все, це одноразове використання, оскільки згідно з регламентом виробника та санітарними нормами, система є одноразовою, що призводить до значних екологічних та фінансових витрат. Іншим фактором є висока вартість, адже ціна одного комплекту для транспортування становить кілька тисяч доларів США, що значно підвищує собівартість операції трансплантації. Крім того,

обмеженням є замкнута екосистема, що зумовлює неможливість інтеграції з сторонніми датчиками або системами аналітики без дозволу виробника.

2) TransMedics Organ Care System (OCS) Heart (виробник: TransMedics, Inc., США) – це єдина у світі доступна платформа для транспортування донорського серця, що використовує принцип перфузії поза організмом. Ця технологія кардинально відрізняється від традиційного методу холодової консервації, оскільки підтримує орган у функціонуючому та живому стані. Система OCS фактично є портативним реанімаційним комплексом, що дозволяє не лише зберігати, а й оцінювати якість органа в реальному часі [28].

На відміну від систем, що сповільнюють метаболізм шляхом охолодження, система OCS імітує умови людського тіла. Основні принципи її роботи базуються на особливому температурному режимі, який передбачає підтримку стабільної температури на рівні 34–37 градусів. Також у системі реалізована перфузія, завдяки якій забезпечується безперервна циркуляція насиченої киснем крові донора, збагаченої поживними речовинами, через артерії серця. Окрім цього, важливим аспектом є безперервне функціонування, тобто серце не перестає працювати та скорочуватись впродовж усього часу збереження.



Рисунок 1.6 – TransMedics OCS Heart [28]

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Переваги технології полягають у збільшенні часу збереження, адже мінімізація часу холодової ішемії дозволяє безпечно зберігати органи на значно довший інтервал часу, ніж стандартні 4–6 годин. Іншою перевагою є зниження ризиків, оскільки можливість провести тестування роботи серця перед імплантацією знижує ризик первинної дисфункції трансплантата у реципієнта.

Незважаючи на революційність, технологія має бар'єри, що унеможливають її повсюдне застосування. До них належить надвисока вартість, оскільки вартість одного одноразового модуля перфузії перевищує \$40,000–\$50,000, що робить процедуру надто дорогою. Крім того, бар'єром є складність експлуатації, адже робота з системою вимагає залучення висококваліфікованого персоналу та спеціального навчання хірургічної бригади.

Огляд бюджетних та стандартних рішень:

У більшості лікарень в яких не вистачає фінансування, для транспортування та тимчасового зберігання донорських органів використовується обладнання, яке забезпечує лише базову функцію охолодження без систем контролю та моніторингу.

Пасивні ізотермічні контейнери (Igloo, Coleman, VYPE та інші) є найбільш масовим та доступним рішенням для забезпечення холодового ланцюга на етапі транспортування. Вони широко використовуються службами екстреної медичної допомоги, центрами крові та кур'єрськими службами для перевезення чутливих до температури вантажів [38, 39].

Основою конструкції є принцип пасивного охолодження. Ключовим елементом є термоізоляційний шар, який мінімізує теплообмін із зовнішнім середовищем. Джерелом холоду виступають попередньо заморожені акумулятори холоду або евтектичні пластини, наповнені розчином із заданою температурою фазового переходу.

Незважаючи на простоту та низьку вартість, використання таких контейнерів пов'язане з значним ризиком – повною відсутністю інформації про стан вантажу під час руху. Через відсутність активного охолодження

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температура всередині контейнера залишається нестабільною. Через відсутність можливості визначити коливання температури, процес транспортування фактично здійснюється без засобів об'єктивного моніторингу, що унеможливорює гарантування збереження якості біоматеріалу. Це створює ризик втрати біологічного матеріалу або вакцин внаслідок технічної несправності системи кондиціонування в автомобілі швидкої допомоги.



Рисунок 1.7 – Пасивні ізотермічні контейнери Igloo та Coleman [1, 2]

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика існуючих рішень

Характеристика	Професійні системи	Стандартні бокси
Вартість	Висока (\$5,000 – \$50,000+)	Середня / Низька (\$100–400)
Моніторинг у реальному часі	Так (вбудований)	Ні
Універсальність	Спеціалізовані	Універсальні
Складність обслуговування	Потребує сертифікованого персоналу	Не потребує

Проведений аналіз демонструє суттєвий технологічний розрив. Існуючі професійні системи з моніторингом є економічно недоцільними та неможливими для масового впровадження в умовах обмеженого фінансування медичної системи. Водночас дешеві рішення не гарантують безпеки біоматеріалів через відсутність функції моніторингу.

Оптимальним шляхом вирішення проблеми є не закупівля дороговартісного нового обладнання, а модернізація наявного холодильного обладнання. Пропонується розробка портативного модуля на базі мікроконтролера ESP32, який може бути поміщений у будь-який стандартний медичний холодильник або транспортний контейнер. Це дозволить наділити бюджетне обладнання функціоналом преміум-класу за мінімальні кошти, що є особливо важливим для районних лікарень та центрів трансплантації в умовах економії ресурсів

1.3 Аналіз апаратної платформи

У процесі розробки автоматизованої системи моніторингу умов зберігання біоматеріалів важливо розуміти переваги та недоліки різних апаратних запчастин, які забезпечить не лише ефективний збір даних, а й стабільну передачу інформації до хмари. Для кращого розуміння на базі яких компонентів є можливість зібрати систему – проведемо огляд елементів з такими критеріями: низьке енергоспоживання (важливо для автономних боксів), підтримка бездротової передачі даних, компактність, широка підтримка серед розробників, а також доступність компонентів на ринку [5, 13].

При проєктуванні системи контролю параметрів мікроклімату основним компонентом є мікроконтролер, що виступає в ролі обчислювального ядра. Саме він відповідає за зчитування даних із сенсорів, обробку вимірювань, прийняття логічних рішень (тривога), а також передачу результатів на сервер. Отже, вимоги

до мікроконтролера є особливо важливими та визначають не лише технічну, але й економічну ефективність усієї системи [26, 40].

Огляд платформ мікроконтролерів:

Для реалізації апаратної частини системи моніторингу часто використовують такі платформи: Arduino (ATmega328P), ESP8266 та ESP32 [27, 29]. Кожна з платформ має свої технічні особливості, архітектурні відмінності та сфери застосування. Вибір мікроконтролера безпосередньо впливає на функціональні можливості системи, її продуктивність, енергоспоживання та можливості подальшого розширення.

Щодо продуктивності та архітектури, Arduino має просту 8-бітну архітектуру без вбудованих мережевих модулів, що робить платформу зручною для базових задач керування та навчальних проєктів. ESP8266 є одноядерним мікроконтролером із вбудованим модулем Wi-Fi, завдяки чому широко використовується в IoT-пристроях та бездротових системах моніторингу. Натомість ESP32 оснащений двоядерним процесором Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, що дозволяє значно ефективніше розподіляти ресурси між окремими задачами, наприклад обробкою даних датчиків, роботою мережевих сервісів та керуванням периферією [4, 11, 12].

Для автономних систем важлива енергоефективність, зокрема підтримка режимів глибокого сну. Контролери сімейства ESP здатні знижувати споживання струму до 10 мкА, забезпечуючи тривалу роботу від акумулятора, коли пристрій активується лише для замірів.

Крім того, важливу роль відіграють периферія та інтерфейси (GPIO), оскільки для підключення дисплея, датчиків та індикації необхідна достатня кількість контактів. На відміну від ESP8266, де кількість GPIO є обмеженою, ESP32 пропонує значно ширші можливості для масштабування апаратної частини.

Огляд датчиків температури та вологості:

Для моніторингу середовища зберігання розглядаються як аналогові (наприклад, класичні терморезистори), так і сучасні цифрові датчики [10, 24, 25]. Що стосується комплексності вимірювань, то на відміну від DS18B20 який вимірює лише температуру, датчики серії DHT фіксують ще й відносну вологість. Як зазначено в розділі 1.2, її контроль також важливий для уникнення утворення конденсату або пересихання зразків.

Важливим критерієм є точність вимірювань, адже похибка бюджетного DHT11 становить близько 2 °С. Натомість більш просунутий DHT22 забезпечує точність до 0.5 °С для температури та 2–5% для вологості, що достатньо для систем моніторингу. Крім того, обраний інтерфейс передачі даних та однопровідна шина суттєво спрощують схемотехніку та дозволяють віддалити датчик на відстань до 20 метрів. Це оптимально для випадків, коли сенсор монтується всередині холодильної камери, а керуючий блок ззовні [45].

Огляд засобів локальної візуалізації даних:

Окрім віддаленої передачі даних, система потребує локального інтерфейсу, щоб медичний персонал міг миттєво оцінювати параметри без смартфона чи ПК. Для цього розглядаються різні типи дисплеїв [19, 44]. Зокрема, символні LCD дисплеї 1602 базового стандарту 16x2 з двома рядками по 16 символів дозволяють компактно та зрозуміло виводити основні показники, такі як температура та вологість.

При цьому важливе значення мають способи підключення, адже стандартне підключення екрана вимагає 6–10 пінів. Використання додаткового I2C-модуля скорочує цю кількість до двох ліній (SDA, SCL), заощаджуючи порти мікроконтролера для іншої периферії. Крім того, суттєвим фактором є енергоспоживання, оскільки, на відміну від графічних матриць (OLED або TFT), класичні символні LCD-дисплеї споживають значно менше енергії, що є важливою перевагою для систем з автономним або резервним живленням.

1.4 Визначення вимог та розробка технічного завдання

На основі проведеного аналізу предметної області та існуючих аналогів було сформовано перелік технічних вимог до розроблюваної кіберфізичної системи моніторингу умов зберігання біоматеріалів. Ці вимоги є основою для подальшого проєктування апаратної та програмної частин пристрою.

Функціональні вимоги визначають базову поведінку системи та перелік конкретних задач, які вона повинна виконувати в процесі своєї роботи. Першим завданням є збір даних, що передбачає безперервне зчитування показників температури та відносної вологості навколишнього середовища всередині холодильника або спеціального термоконтейнера за допомогою підключених сенсорів.

Для забезпечення належного контролю система має підтримувати дворівневий моніторинг, який поєднує локальні та бездротові засоби доступу до інформації. З метою безпосереднього візуального нагляду медичним персоналом на місці, поточні показники мікроклімату мають виводитися на локальний інформаційний дисплей. Одночасно з цим керуючий мікроконтролер повинен забезпечувати стабільне підключення до мережі для періодичної відправки зібраних пакетів даних на віддалену хмарну платформу, де здійснюється їх подальше зберігання.

Крім того, обов'язковою складовою є логіка тривоги, яка базується на алгоритмі порівняння поточних вимірних значень із заздалегідь встановленими допустимими межами. У разі фіксації будь-якого відхилення від норми, система має автоматично генерувати відповідний сигнал сповіщення для попередження персоналу про зміну умов зберігання.

Для забезпечення належної якості розробки окремо визначаються нефункціональні вимоги, які описують такі важливі атрибути системи, як точність, надійність та зручність використання. Щодо точності вимірювань,

похибка вимірювання температури не повинна перевищувати $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, а відносної вологості $\pm 5\%$.

Важливим фактором є періодичність оновлення, відповідно до якої оновлення даних на локальному дисплеї має відбуватися кожні 5 секунд, тоді як відправка даних на сервер повинна здійснюватися кожну хвилину. Окрім цього, важливу роль відіграє ергономічність, тому медичний персонал не повинен проводити складні налаштування чи калібрування перед кожним використанням системи.

Зважаючи на бюджетний характер розробки та обрану апаратну базу, система має ряд експлуатаційних обмежень, які необхідно враховувати під час її впровадження. Перш за все, наявна залежність від Wi-Fi (2.4 ГГц), оскільки відправка даних на сервер вимагає активного підключення. Під час транспортування для цього потрібен мобільний роутер або роздача зі смартфона, а без мережі пристрій функціонує виключно як локальний вимірювач із виведенням показників на екран.

Іншим обмеженням є зовнішнє живлення, адже базова конфігурація не має вбудованого акумулятора, проте пристрій може працювати від зовнішньої батареї з напругою 5 В. Крім того, існують температурні обмеження дисплея, оскільки рідкокристалічний дисплей може знижувати швидкість оновлення символів або втрачати контрастність при температурах, нижчих нуля. Оскільки цільовий діапазон зберігання органів становить від 2 до 8 градусів, це обмеження є прийнятним, проте пристрій не розрахований на використання у морозильних камерах ультранизьких температур.

1.5 Постановка задачі

Мета роботи полягає у розробці та дослідженні кіберфізичної системи для безперервного моніторингу параметрів мікроклімату (температури та відносної вологості) під час зберігання і транспортування біологічних матеріалів.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Створення такої системи спрямоване на мінімізацію ризиків псування чутливих медичних зразків (зокрема тих, що потребують жорсткого температурного контролю) шляхом забезпечення постійного локального візуального контролю та надійного віддаленого логування даних у режимі реального часу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс взаємопов'язаних завдань. Перш за все, потрібно провести аналіз існуючих апаратних платформ, сучасних цифрових сенсорів та засобів візуалізації даних, що дозволить сформувати оптимальну за критеріями вартості, енергоефективності та точності конфігурацію майбутнього пристрою. Наступним етапом є безпосереднє проектування та розробка віртуальної та апаратної архітектури вузла моніторингу, яка має об'єднати в єдину систему керуючий мікроконтролер, цифрові датчики параметрів мікроклімату та локальний інформаційний дисплей для оперативного відображення поточного стану [47, 7].

Окрему увагу необхідно приділити програмній складовій, що передбачає створення програмного забезпечення для мікроконтролера, яке реалізує алгоритми періодичного опитування сенсорів, фільтрації та первинної обробки отриманих значень, а також безперебійного виведення інформації на локальний екран. Крім того, важливим завданням є реалізація підсистеми зв'язку, яка забезпечить бездротову передачу сформованих пакетів даних через мережу Wi-Fi на віддалений сервер або хмарну платформу для їх подальшого довгострокового аналізу, архівації та доступу користувачів через веб-інтерфейс [6, 8].

У даному розділі було проведено огляд сучасних апаратних рішень та сформовано технічні вимоги до системи моніторингу мікроклімату, призначеної для забезпечення належних умов збереження чутливих біоматеріалів. На основі цього аналізу було чітко визначено головну мету роботи, а також сформульовано перелік завдань розробки, вирішенню яких присвячені наступні розділи дослідження.

2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ВІДДАЛЕНОГО КОНТРОЛЮ УМОВ ЗБЕРІГАННЯ БІОЛОГІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Загальна архітектура системи та принцип її функціонування

У межах даної роботи запропоновано кіберфізичну систему дистанційного моніторингу умов зберігання біологічних матеріалів, спроектовану на базі мікроконтролера з підтримкою бездротового зв'язку та датчика температури і вологості. Система призначена для вимірювання параметрів мікроклімату в закритих сховищах та їх подальшого передавання для контролю й аналізу. Завдяки автоматизації цього процесу мінімізується людський фактор, забезпечується висока точність вимірювань та створюються умови для надійного збереження чутливих біологічних зразків.

Розроблене проєктне рішення має забезпечувати збір, первинне оброблення, візуалізацію та передавання інформації про стан навколишнього середовища всередині спеціалізованих сховищ, а також безперервний контроль температури та вологості з можливістю оперативного реагування на відхилення від заданих норм. Основою її функціонування є взаємодія апаратних і програмних компонентів, зокрема центрального мікроконтролера, сенсорного модуля, засобів локальної індикації та системи оповіщення, кожен із яких виконує визначену роль у загальному ланцюзі оброблення даних. Відповідно до запропонованої архітектури отримана від датчика інформація підлягає фільтрації, аналізу та порівнянню з граничними значеннями, після чого може відобразитися локально або передаватися через мережу до хмарного середовища для подальшого зберігання, оброблення та віддаленого моніторингу.

Для аналізу логіки роботи системи, послідовності оброблення сигналів і взаємозв'язків між окремими модулями розроблено загальну структурну схему, яка відображає архітектуру запропонованого рішення та принцип його функціонування.

Центральний мікроконтролер є головним обчислювальним вузлом системи та інтелектуальним ядром керування. Його робота організована у вигляді безперервного циклу: зчитування даних із датчиків, їх первинна фільтрація та програмна обробка, порівняння з встановленими межами та прийняття рішень. У разі виявлення відхилень контролер активує систему оповіщення та передає тривожні повідомлення на сервер. Завдяки двоядерній архітектурі забезпечується паралельне виконання задач моніторингу та мережевої взаємодії без втрати продуктивності. Також мікроконтролер керує периферійними модулями та реалізує передачу даних до віддаленої інфраструктури.

Датчик температури та вологості виступає сенсорним модулем, що є первинним джерелом даних про стан навколишнього середовища. Його робота базується на цифровому протоколі обміну: за запитом від мікроконтролера пристрій формує та передає структурований пакет даних, який містить актуальні показники температури й вологості.

Модуль візуалізації призначений для локального відображення поточних параметрів системи. Його робота синхронізована з циклом опитування датчика: після кожного оновлення даних мікроконтролер передає нові значення на дисплей. Це дозволяє оперативно отримувати інформацію. Окрім показників температури та вологості, екран відображає статус підключення системи, що спрощує діагностику.

Модуль звукового оповіщення виконує функцію аварійної сигналізації. Його активація відбувається при перевищенні встановлених меж. У цьому випадку мікроконтролер подає сигнал на випромінювач, який генерує звукове оповіщення. Це забезпечує миттєве інформування персоналу навіть за відсутності доступу до мережі або мобільних пристроїв.

Блок живлення забезпечує стабільне електроживлення всіх компонентів системи. Передбачена можливість використання як стаціонарних джерел живлення, так і автономних акумуляторів, що дозволяє підтримувати безперебійну роботу системи навіть у разі відключення електроенергії.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Канал бездротового зв'язку (Wi-Fi модуль) забезпечує передачу зібраної телеметрії до хмарного сервісу або бази даних через мережу Wi-Fi. Це дає змогу здійснювати дистанційний моніторинг параметрів та отримувати віддалений доступ до даних через мобільний або веб-інтерфейс за наявності доступу до мережі інтернет, а також забезпечує оперативне отримання сповіщень про стан контрольованих параметрів.

Платформа Blynk виступає центральною сполучною ланкою системи, забезпечуючи стабільну взаємодію між апаратною частиною та програмним інтерфейсом користувача. Вона відповідає за приймання телеметрії від мікроконтролера, збереження історії вимірювань у хмарному сховищі та формування оперативних сповіщень. Завдяки хмарному сервісу забезпечується трансляція даних на клієнтські пристрої (смартфони, планшети, ПК) у реальному часі, що дозволяє користувачеві дистанційно відстежувати стан об'єкта та миттєво отримувати інформацію про критичні зміни.

Користувацька підсистема моніторингу (Blynk App та Blynk Web Dashboard) є програмним комплексом, що реалізує візуалізацію зібраної телеметрії та забезпечує зручну взаємодію користувача з системою у режимі реального часу. Вона включає графічні індикатори, які використовуються для відображення динаміки змін температури та вологості в часі, що дозволяє аналізувати поведінку параметрів і виявляти характерні тренди (наприклад, поступове нагрівання або різкі коливання), а також числові віджети, які надають поточні значення вимірюваних величин із мінімальною затримкою. Додатково підсистема містить систему сповіщень, що завдяки інтеграції з Blynk Cloud забезпечує автоматичну відправку push-повідомлень на смартфон користувача у разі виходу показників за встановлені граничні межі, навіть якщо застосунок неактивний або закритий, що значно підвищує оперативність реагування та загальну надійність моніторингу.

Загальну логіку взаємодії елементів представлено на рисунку 2.1.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

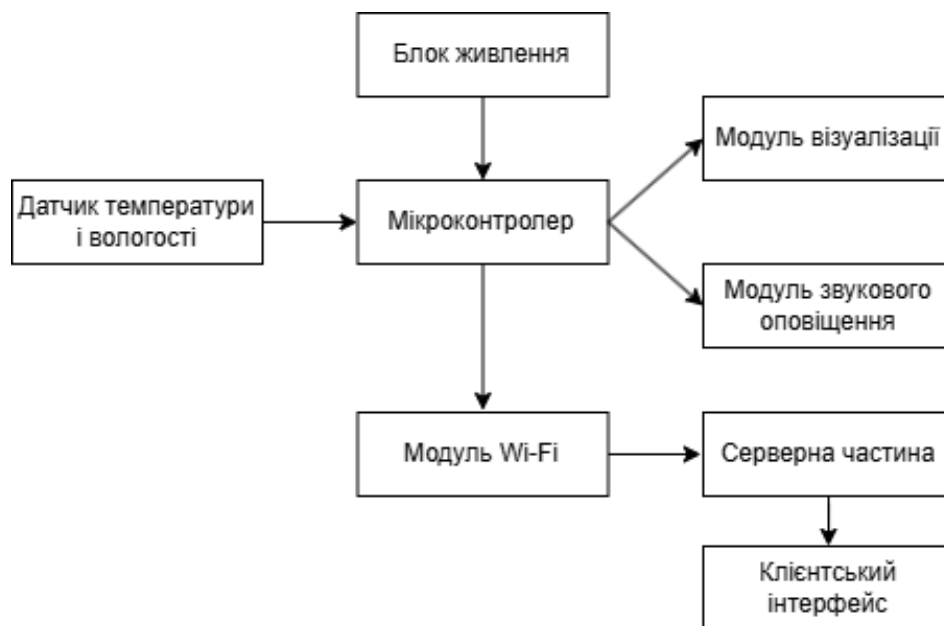


Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема системи дистанційного моніторингу умов зберігання біологічних матеріалів

На структурній схемі відображено, що мікроконтролер виступає центром інтеграції всіх периферійних пристроїв. Після опитування датчиків дані паралельно виводяться на локальний екран та транслюються через мережевий шлюз до зовнішньої системи моніторингу. У випадку фіксації показників, які виходять за межі норми, контролер надсилає сигнал тривоги на пристрій який використовується для моніторингу та ініціює роботу звукового оповіщувача.

Таким чином, представлена структурна схема дозволяє наочно відобразити принципи побудови розроблюваної системи та визначити послідовність процесів перетворення інформації, що забезпечують високу надійність контролю за біологічними зразками.

Функціонування розробленої кіберфізичної системи базується на циклічному процесі збору, обробки та передавання телеметричної інформації. Повний робочий цикл системи можна розділити на наступні послідовні етапи

Під час зчитування первинних даних датчик температури та вологості періодично вимірює температуру та вологість всередині контейнера за запитом

мікроконтролера. Отримана інформація перетворюється на структурований сигнал, готовий до передачі на обчислювальний вузол.

На етапі приймання та обробки мікроконтролером центральний модуль отримує дані через відповідні інтерфейси зв'язку. Тут виконується первинна програмна обробка, що включає перевірку коректності отриманих значень та подальше використання даних для реалізації логіки контролю.

Далі відбувається логічний аналіз та перевірка меж, під час яких програма мікроконтролера порівнює отримані значення з попередньо встановленими критичними межами зберігання біоматеріалів. Якщо показники виходять за межі норми, система ініціює роботу звукового модуля сповіщення.

Для локальної візуалізації актуальні дані виводяться на підсистему локального відображення. Це дозволяє персоналу, що знаходиться безпосередньо біля сховища, оперативно контролювати умови без використання додаткових гаджетів.

Мережеве передавання даних забезпечується вбудованим Wi-Fi модулем, за допомогою якого мікроконтролер встановлює мережеве з'єднання з серверною частиною платформи. Дані пакуються у відповідний протокол і відправляються у хмару для подальшої обробки.

Дистанційне зберігання та архівація відбуваються, коли серверний вузол приймає телеметрію та фіксує її у базі даних. Це забезпечує можливість тривалого зберігання історії вимірювань, яка може бути використана для внутрішнього контролю умов зберігання та подальшого аналізу.

Моніторинг та взаємодія з користувачем реалізуються через мобільний застосунок або веб-інтерфейс Blynk, де кінцевий користувач отримує доступ до інформації. Система візуалізує дані у двох формах: числові панелі для миттєвого зчитування поточного стану та інтерактивні графіки для аналізу динаміки змін та перегляду історії за минулі періоди.

У разі різкої зміни температури та перевищення встановлених порогів, відбувається генерація тривожних повідомлень, контролер надсилає сигнал

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тривоги на хмарний сервер, який автоматично генерує та надсилає push-сповіщення на смартфон відповідальній особі, що сприяє оперативному інформуванню відповідальній особі на загрозу деградації біоматеріалів.

Також для забезпечення стабільної роботи та оперативного реагування на зміну умов зберігання біоматеріалів, у системі реалізовано чіткий регламент взаємодії між апаратним модулем та хмарною платформою Blynk.

1. Тип та склад даних, що передаються:

– Телеметрія (датчики): значення температури (у градусах Цельсія) та відносної вологості (у відсотках). Ці дані передаються на віртуальні піни V0 та V1.

– Події (Alerts): текстові рядки сповіщень (temp_alert, hum_alert), що містять інформацію про конкретне порушення режиму та поточне значення параметра.

– Локальні сигнали: керуючі сигнали на дисплей (через шину I2C) та на пін звукового оповіщувача.

2. Формат даних та протокол: обмін із хмарою відбувається за протоколом Blynk (на базі TCP/IP). Дані інкапсулюються у цифрові пакети, де значення сенсорів передаються у форматі числа з рухомою комою для забезпечення точності до десятих частин градуса чи відсотка. Текстові повідомлення передаються у форматі String.

3. Періодичність обміну: опитування датчиків та оновлення даних у хмарі відбувається з інтервалом 5 секунд. Це забезпечує достатню ефективність моніторингу, що важливо для чутливих біологічних матеріалів.

4. Ініціація передавання: основним ініціатором обміну виступає мікроконтролер. Він зчитує дані та передає їх на сервер Blynk. Проте, події сповіщень ініціюються лише за умови виконання логічного фільтра (вихід за межі 2–8°C для температури або 35–60% для вологості), що дозволяє уникати спаму повідомленнями.

5. Тип обміну: у даній конфігурації реалізовано переважно односторонній потік даних від пристрою до хмари, однак архітектура Blynk передбачає можливість двостороннього обміну, наприклад потенційна зміна критичних показників через застосунок.

2.2 Вибір апаратних компонентів системи

У процесі розробки кіберфізичної системи моніторингу умов зберігання біоматеріалів головним етапом є вибір апаратної платформи. Вона повинна забезпечити не лише точний збір даних, а й стабільну передачу інформації до хмарного сховища в режимі реального часу. Основними критеріями відбору компонентів були: обчислювальна потужність, низьке енергоспоживання (для забезпечення автономності), вбудована підтримка бездротових протоколів зв'язку, компактні габарити та економічна доцільність.

1) Вибір керуючого мікроконтролера (ESP32):

Для реалізації обчислювального ядра розроблюваної системи після розгляду популярних платформ, вибір було зупинено на системі на кристалі (SoC) ESP32 від компанії Espressif Systems, яка поєднує високу продуктивність, широкі функціональні можливості та доступну вартість.

Однією з важливих особливостей ESP32 є її мультипроцесорна архітектура, що базується на двоядерному 32-бітному процесорі з тактовою частотою до 240 МГц. Це забезпечує значно вищу продуктивність у порівнянні з одноядерними мікроконтролерами. Така архітектура дозволяє реалізувати паралельне виконання задач: наприклад, одне ядро може бути задіяне для обробки мережесих протоколів (Wi-Fi, Bluetooth), тоді як друге виконує основну логіку програми – опитування датчиків, обробку вимірянних даних та керування виконавчими елементами.

Інтегровані інтерфейси бездротового зв'язку, такі як вбудовані модулі Wi-Fi, значно спрощують апаратну реалізацію системи. Відсутність необхідності у додаткових зовнішніх модулях зменшує загальну вартість пристрою, його габарити та енергоспоживання. Завдяки цьому мікроконтролер може безпосередньо передавати дані до хмарних сервісів, мобільних додатків або локальних серверів, що є особливо важливим для систем дистанційного моніторингу параметрів середовища.

В умовах автономної роботи, зокрема у пристроях, що живляться від акумуляторів, важливою характеристикою є енергоефективність та режими енергозбереження. ESP32 підтримує декілька таких режимів, включаючи Light Sleep та Deep Sleep. У режимі Deep Sleep споживання струму може знижуватись до близько десяти мікроампер, що дозволяє суттєво продовжити час роботи пристрою без підзарядки.

Розвинена периферія та інтерфейси мікроконтролера включають до 34 універсальних GPIO-виводів, що можуть конфігуруватися як цифрові входи або виходи. Також підтримуються апаратні інтерфейси I2C, SPI, UART, що забезпечує зручне підключення різноманітних пристроїв.

Пристрій має достатній обсяг пам'яті та обчислювальні ресурси, зокрема оперативну пам'ять SRAM до 520 КБ, а також підтримує підключення зовнішньої флеш-пам'яті, обсяг якої зазвичай становить 4 МБ і більше. Завдяки цьому мікроконтролер може ефективно працювати з великими обсягами даних і виконувати обчислювально складні задачі.

Великою перевагою є широка програмна підтримка та розвинена екосистема ESP32. Для розробки можуть використовуватись такі середовища, як Arduino IDE, PlatformIO або офіційний фреймворк ESP-IDF. Велика спільнота розробників, наявність готових бібліотек та прикладів значно спрощують процес розробки, налагодження та масштабування системи, що дозволяє скоротити час реалізації проєкту та підвищити його надійність.

Всі ці фактори, разом із надійністю та універсальністю застосування, зумовлюють те, що ESP32 широко використовується у промислових та побутових IoT-рішеннях, підтверджуючи свою стабільність роботи на практиці.

2) Вибір датчика температури та вологості (DHT22):

Оскільки біологічні матеріали є чутливими до змін параметрів навколишнього середовища, для системи моніторингу необхідно забезпечити достатню точність і стабільність вимірювань температури та вологості. З цією метою було обрано цифровий датчик DHT22, який є покращеною версією DHT11 і широко використовується у подібних застосуваннях.

Важливою перевагою цього сенсора є комбіноване вимірювання, адже DHT22 дозволяє одночасно вимірювати температуру та відносну вологість. Це значно спрощує загальну структуру системи та забезпечує узгодженість отриманих телеметричних даних.

Датчик забезпечує високу точність і широкий діапазон роботи, маючи суттєво кращі характеристики порівняно з DHT11. Похибка становить близько $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ для температури та $\pm 2-5\%$ для вологості, що цілком підходить для розробки проекту. Робочий діапазон температур становить від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$, а вологості – від 0% до 100%, що дозволяє використовувати його в різних умовах, зокрема в охолоджених середовищах.

Передача даних здійснюється через однопровідний цифровий інтерфейс, що гарантує високу стійкість до завад і спрощує підключення. При цьому можлива передача сигналу на відстань до 20 метрів, що дає змогу за потреби винести мікроконтролер за межі безпосередньо контрольованої зони.

Крім того, відзначається простота інтеграції пристрою, оскільки для підключення датчика необхідний лише один GPIO-пін, що дозволяє ефективно використовувати ресурси мікроконтролера. Наявність великої кількості готових програмних бібліотек додатково спрощує програмну реалізацію та взаємодію з обчислювальним ядром.

					КВРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) Вибір засобу візуалізації (LCD 1602 I2C)

Для забезпечення локального контролю параметрів системи обслуговуючим персоналом було обрано символічний рідкокристалічний дисплей LCD 1602 у поєднанні з I2C-адаптером. Такий підхід дозволяє поєднати простоту реалізації з достатньою інформативністю відображення.

Однією з головних переваг такого рішення є мінімізація з'єднань. У стандартному паралельному режимі LCD 1602 потребує значної кількості виводів мікроконтролера (від 6 до 10), однак використання спеціального I2C-адаптера дозволяє скоротити їх всього до двох сигнальних ліній – SDA та SCL, що суттєво спрощує загальну схему підключення та звільняє виводи для інших периферійних пристроїв.

Також забезпечується висока ергономічність відображення, адже дисплей має зручний формат, який дозволяє виводити 16 символів у 2 рядки. Цього цілком достатньо для чіткого представлення основної інформації у зрозумілому для оператора вигляді. Наприклад, на екрані можна одночасно відобразити поточні значення температури та відносної вологості всередині контейнера.

Крім того, обраний модуль відзначається загальною надійністю та простотою використання. Дисплей LCD 1602 є перевіреним і широко розповсюдженим рішенням у вбудованих системах, яке характеризується стабільною роботою, низьким рівнем енергоспоживання та хорошою читабельністю символів за різних умов освітлення завдяки наявності підсвічування.

4) Вибір пристрою звукового оповіщення (piezo buzzer):

Для реалізації функції звукової сигналізації у разі виходу параметрів мікроклімату за допустимі межі було обрано активний п'єзоелектричний випромінювач. Його використання дозволяє оперативно інформувати персонал про аварійні ситуації без необхідності постійного візуального контролю системи.

Важливою перевагою цього компонента є автономність формування сигналу. Даний випромінювач належить до активного типу, тобто вже містить у своїй структурі вбудований генератор звукової частоти. Завдяки цьому для активації звуку достатньо просто подати на нього напругу живлення, що звільняє мікроконтролер від необхідності постійного програмного формування ШІМ-сигналу.

Також він забезпечує достатній рівень гучності для надійного сповіщення. Рівень звукового тиску пристрою становить близько 85 дБ, що дає можливість сприйняття тривожного сигналу обслуговуючим персоналом навіть у робочих приміщеннях з підвищеним рівнем стороннього шуму.

Додатково п'єзоелектричний випромінювач характеризується високою енергоефективністю та надійністю. Пристрій споживає мінімальну кількість струму (до 30 мА), завдяки чому його можна ефективно використовувати у складі енергоефективних та автономних систем моніторингу без суттєвого навантаження на джерело живлення.

Також варто відзначити простоту інтеграції модуля в загальну схему пристрою. Підключення випромінювача здійснюється безпосередньо до одного з цифрових виходів мікроконтролера, що дозволяє уникнути розробки складних схем узгодження. Таке рішення допомагає швидко інтегрувати звуковий модуль у систему та забезпечити безвідмовну роботу контуру аварійної сигналізації.

Підсумкові дані та вартість компонентів наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики та вартість апаратних компонентів

Назва компонента	Ключові технічні характеристики	Орієнтовна вартість
Мікроконтролер ESP32	2 ядра (240 МГц), Wi-Fi/Bluetooth, 520 КБ SRAM	240 грн
Датчик DHT22	Діапазон: від -40 до +80°C (±0.5°C), 0 – 100% RH (±2%)	140 грн

Закінчення таблиці 2.1

Дисплей LCD 1602 I2C	Символьний (16x2), підключення по 2 дротах	115 грн
Зумер ТМВ12А05	Активний, живлення 5В, звук 85 дБ	25 грн
Разом:		520 грн

Запропонований набір компонентів дозволяє створити надійну систему з мінімальними витратами. Вартість розробки (близько 500–600 грн) є конкурентною перевагою порівняно з промисловими реєстраторами даних, що свідчить про потенційну економічну доцільність подальшого розвитку такого рішення у медичних закладах.

2.3 Проектування апаратної структури вузла моніторингу

Проектування апаратної частини вузла моніторингу базується на створенні надійного локального пристрою, здатного автономно зчитувати параметри мікроклімату, візуалізувати їх для користувача та передавати дані у хмарне сховище. Такий пристрій повинен забезпечувати стабільну роботу в умовах тривалої експлуатації, мати достатню точність вимірювань і бути стійким до впливу зовнішніх факторів.

Ключовим аспектом є інтеграція датчиків, мікроконтролера та периферійних модулів у єдину систему, що забезпечує постійний збір і обробку даних у реальному часі. Особлива увага приділяється енергоефективності пристрою, оскільки вузол може працювати автономно або від обмежених джерел живлення. Також важливим є забезпечення надійного зв'язку з мережею для передачі даних, що дозволяє реалізувати віддалений моніторинг і оперативне реагування на зміну контрольованих параметрів.

Функціональна побудова вузла моніторингу базується на використанні центрального мікроконтролера, який виконує роль ядра системи – обробника даних, координатора роботи всіх периферійних модулів та шлюзу для передачі інформації на сервер. Такий підхід забезпечує узгоджену взаємодію всіх компонентів та дозволяє реалізувати безперервний цикл збору, обробки та передачі даних.

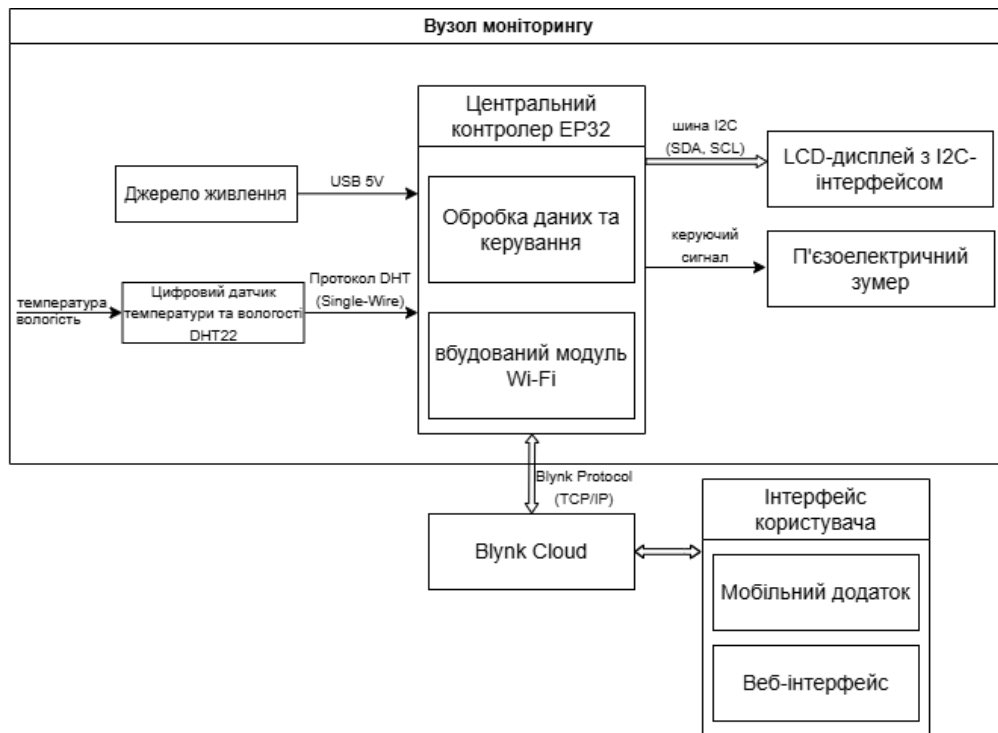


Рисунок 2.2 – Функціональна схема вузла моніторингу

Функціональна схема відображає основні інформаційні потоки між складовими системи, включаючи сенсорний модуль, обчислювальний блок, засоби індикації, оповіщення та мережевий інтерфейс.

Логіка роботи вузла базується на чіткій послідовності дій, першою з яких є збір даних. Від цифрового датчика DHT22 до мікроконтролера передається структурований пакет даних фіксованої довжини 40 біт, який містить значення відносної вологості, температури та контрольну суму. Дані надходять у вигляді двох основних параметрів мікроклімату, представлених у числовому форматі, придатному для подальшої обробки. Отриманий пакет використовується

мікроконтролером як вхідний інформаційний потік для аналізу, перевірки коректності та формування наступних етапів обробки і передачі даних у системі.

На етапі обробки центральний контролер ESP32 здійснює приймання цифрових даних від сенсорного модуля через виділений GPIO-порт. Тут відбувається їхня первинна програмна обробка, перевірка коректності отриманих значень та порівняння з попередньо встановленими критичними межами. У результаті на цьому етапі формується структурований набір даних, повністю придатний для подальшого використання іншими підсистемами.

Для забезпечення локального контролю реалізовано етап візуалізації. Оброблений набір даних, що містить поточні значення температури та вологості, передається від мікроконтролера до дисплея у вигляді послідовності символів для відображення. Дані попередньо перетворюються у текстовий формат, придатний для виводу на екран у вигляді рядків з числовими значеннями та службовою інформацією. Передавання здійснюється після кожного оновлення вимірюваних параметрів, у результаті чого на дисплеї формується актуальне відображення поточного стану мікроклімату

Важливою захисною функцією є оповіщення персоналу. У випадку виходу контрольованих параметрів за межі встановленої норми, мікроконтролер миттєво формує керуючий сигнал, що активує п'єзоелектричний зумер, який у свою чергу генерує безперервний або імпульсний звуковий сигнал тривоги.

Кінцевим етапом у цьому циклі є мережева взаємодія. Завдяки вбудованому Wi-Fi модулю мікроконтролера ESP32, оброблені дані формуються у мережеві пакети за протоколом TCP/IP та передаються на віддалений сервер Blynk Cloud. Передача здійснюється за спеціалізованим протоколом Blynk, що забезпечує подальше відображення інформації у мобільному додатку користувача, а також дозволяє реалізувати віддалений моніторинг і контроль стану середовища у реальному часі.

Таким чином, функціональна схема вузла моніторингу відображає повний цикл обробки інформації – від отримання первинних вимірювань до їх

локального та віддаленого представлення, що забезпечує ефективність і надійність роботи системи.

Апаратна реалізація вузла моніторингу виконана на базі мікроконтролера ESP32, який вирізняється високою обчислювальною продуктивністю, енергоефективністю та наявністю інтегрованих бездротових інтерфейсів Wi-Fi і Bluetooth. Використання даного мікроконтролера дозволяє реалізувати як локальну обробку даних, так і їх передачу до віддалених серверів без застосування додаткових комунікаційних модулів.

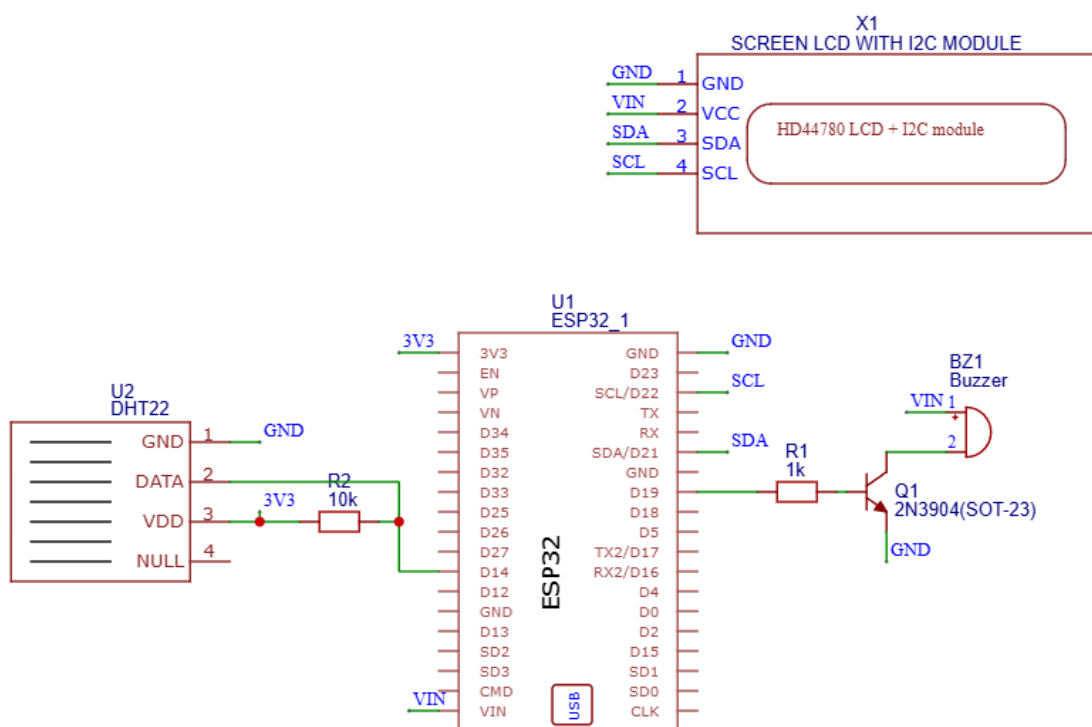


Рисунок 2.3 – Схема електрична принципова

Принципова електрична схема відображає всі електричні з'єднання між компонентами системи, включаючи лінії живлення, сигнальні з'єднання та елементи узгодження. Особлива увага приділена забезпеченню стабільності сигналів, захисту входів мікроконтролера та коректній роботі периферійних пристроїв.

Датчик температури та вологості DHT22 підключений до цифрового входу мікроконтролера на пін D14, який використовується для обміну даними за однопровідним протоколом. Для забезпечення стабільної передачі сигналу на лінії DATA застосовано підтягувальний резистор номіналом 10 кОм, підключений до шини 3.3 В. Це дозволяє уникнути плаваючого рівня сигналу та суттєво підвищує надійність зчитування телеметричних даних у реальному часі.

Для виведення інформації рідкокристалічний дисплей LCD підключено за допомогою стандартного I2C-модуля розширення до ESP32, що значно зменшує загальну кількість необхідних провідникових з'єднань. Лінія передачі даних SDA підключена до пина D21, а лінія синхронізації SCL – до пина D22. Живлення LCD-модуля здійснюється від шини 5 В, яка на схемі позначена як VIN. Ця лінія була обрана спеціально для забезпечення стабільної роботи елементів підсвічування та досягнення належної контрастності відображення символів.

Окрему увагу приділено модулю звукової сигналізації. Оскільки струм споживання активного зумера під час роботи може перевищувати допустимий безпечний поріг для окремого пина контролера, у системі використано схему керування на біполярному транзисторі Q1. База цього транзистора підключена до виходу D19 мікроконтролера через обмежувальний резистор R1 номіналом 1 кОм, який надійно захищає цифровий вихід від електричного перевантаження.

Живлення системи реалізовано за комбінованою схемою. Основна напруга 5 В подається через вбудований USB-роз'єм мікроконтролера та безпосередньо використовується для живлення найбільш енергоємних компонентів, а саме LCD-дисплея та звукового зумера, які потребують саме такого рівня напруги для своєї стабільної роботи. Оскільки сам мікроконтролер ESP32 та підключені до нього цифрові датчики функціонують від напруги 3.3 В, вхідний потік додатково стабілізується інтегрованим на плату лінійним перетворювачем. Це забезпечує повністю безпечне та стабільне живлення всієї логічної частини системи, ефективно запобігаючи пошкодженню чутливих напівпровідникових компонентів контролера.

Вузол моніторингу спроектований з урахуванням можливості автономної роботи у мобільних умовах, зокрема при використанні у переносних контейнерах для контролю мікроклімату. Як основне джерело живлення обрано зовнішній павербанк, що підключається через стандартний інтерфейс USB. Такий підхід забезпечує простоту експлуатації, доступність джерела живлення та можливість швидкої заміни або підзарядки без демонтажу пристрою.

Також у разі стаціонарного використання, наприклад у холодильних установках або складських приміщеннях, пристрій може бути підключений до загальної лінії живлення 5 В, що усуває необхідність використання автономних джерел енергії.

Для оцінки загального енергоспоживання системи у таблиці 2.2 відображено середнє значення споживання струму основних компонентів при роботі.

Таблиця 2.2 – Середні показники струму при роботі компонентів.

Компонент	Стан	Струм (мА)
ESP32	Активний	160 – 240
LCD 1602 (з I2C)	Увімкнена підсвітка	20 – 30
DHT22	У момент зчитування	1.5
Buzzer	Активна сигналізація	20
Разом (пікове)	Всі системи активні	~200 – 300 мА

Слід зазначити, що пікове споживання спостерігається рідко, оскільки зувер активується лише при аварійних умовах, а датчик працює імпульсно.

Розрахунок автономності: при використанні павербанка ємністю 10000 мА·год, з урахуванням втрат на перетворення напруги та внутрішніх процесів, ефективна ємність становить приблизно 7000 – 8000 mAh. Середнє споживання за умови постійного з'єднання, періодичної передачі даних та вимкненої звукової

сигналізації складатиме близько 200 мА. Розрахунковий час автономної роботи T обчислюється за формулою 2.1:

$$T = \frac{E}{I} = \frac{8000}{200} = 40 \text{ год.} \quad (2.1)$$

Як бачимо з обчислень за умови постійної активності контролера система здатна функціонувати майже дві доби безперервної роботи від павербанку, що є більш ніж достатнім показником для задач моніторингу у переносному контейнері, де контроль параметрів здійснюється протягом обмеженого часу транспортування або зберігання.

При збільшенні інтервалів між циклами вимірювання (наприклад, виконання одного циклу кожні 2 – 3 хвилини), за умови, що це не впливає на вимоги до точності та оперативності контролю, середнє енергоспоживання системи може бути суттєво знижене. У такому випадку автономність роботи значно зростає.

Отже, запропонована логіка живлення забезпечує як мобільність і автономність пристрою, так і можливість його інтеграції у стаціонарні системи, що робить вузол моніторингу універсальним у різних умовах експлуатації.

Важливим етапом при проектуванні кіберфізичної системи є визначення конструктивного розміщення її елементів та забезпечення їхнього надійного захисту від зовнішніх чинників. Безпосередньо сам пристрій розміщується в зоні моніторингу або на зовнішній панелі контейнера, залежно від умов експлуатації та вимог до зручності доступу користувача.

Датчик температури та вологості DHT22 виноситься у внутрішній об'єм контейнера для забезпечення безпосереднього контакту з контрольованим середовищем. Для підвищення точності вимірювань датчик рекомендується розміщувати на невеликій відстані від стінок контейнера, оскільки вони можуть мати іншу теплопровідність та впливати на локальні температурні показники.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для основної плати керування разом із дисплеєм рекомендовано використання пластикового корпусу зі ступенем захисту не нижче IP54. Такий корпус забезпечує захист від пилу та бризок води з будь-якого напрямку, що є досить важливим при експлуатації у холодильних або транспортних контейнерах. Герметизація також запобігає утворенню конденсату на електронних компонентах, який може виникати внаслідок різких перепадів температури. Додатково корпус виконує функцію механічного захисту від ударів, вібрацій та пошкоджень під час транспортування, завантаження та розвантаження контейнера.

2.4 Проєктування програмної архітектури та алгоритмів оброблення даних

Програмне забезпечення вузла моніторингу розроблене на базі фреймворку Arduino з використанням бібліотек, що реалізують взаємодію з хмарним сервером за клієнт-серверною архітектурою. Логіка побудована за модульним принципом, що забезпечує гнучкість налаштування та легкість налагодження.

Все програмне забезпечення розділене на функціональні модулі, кожен з яких відповідає за конкретний аспект роботи пристрою:

- Модуль ініціалізації: виконується один раз при запуску. Налаштовує порти введення-виведення (GPIO), ініціалізує шину I2C для дисплея, встановлює з'єднання з Wi-Fi та автентифікується на сервері Blynk;
- Модуль опитування датчиків: здійснює зчитування цифрового сигналу з DHT22. Включає програмні фільтри для відсікання некоректних значень;
- Модуль формування тривоги: порівнює поточні значення температури та вологості з заданими критичними. Активує зумер та надсилає Push-сповіщення у мобільний додаток у разі виходу за межі;

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Модуль візуалізації: оновлює інформацію на LCD-дисплеї, виведить поточні значення та статус підключення;
- Модуль передавання даних: відповідає за передачу на віртуальні піни хмарної платформи;
- Модуль обробки помилок: контролює стан підключення. У разі втрати Wi-Fi сигналу модуль намагається відновити зв'язок у фоновому режимі, не блокуючи роботу локального сповіщення;

Логіка роботи побудована на подієво-орієнтованій моделі за допомогою таймерів (BlynkTimer), що дозволяє уникати використання функції delay() і забезпечує безперебійну роботу.

Після ініціалізації керування передається головному циклу, який активує модуль опитування датчиків кожні 5000 мс. Дані з датчика передаються в модуль обробки помилок. Якщо дані валідні, вони надходять до модуля формування тривог та модуля передавання даних.

Модуль формування тривог використовує прапорці стану (isTempAlertSent), щоб уникнути повторного спаму сповіщеннями при разовому виході за межі норми.

Основним алгоритмом системи є цикл моніторингу та реагування.

Вхідні дані: цифрові дані датчика DHT22 (вологість h, температура t).

Вихідні дані: візуалізація на LCD, цифрові дані на сервері Blynk, стан GPIO піна зумера (HIGH/LOW).

Покроковий опис алгоритму роботи:

1. Старт: ініціалізація послідовного порту, LCD, датчика та підключення до Wi-Fi.
2. Таймер: кожні 5 секунд таймер ініціює виклик функції sendSensorData.
3. Зчитування: запит даних з DHT22.
4. Валідація: якщо дані не отримані, вивід помилки в консоль та повернення до кроку 2.
5. Передача: відправлення h на віртуальний пін V0, t на пін V1.

6. Логічний аналіз: якщо $t < 2$ або $t > 8$, встановити статус тривоги та відправити "temp_alert", якщо $h < 35$ або $h > 60$, встановити статус тривоги та відправити "hum_alert".

7. Локальне сповіщення: якщо хоча б один параметр поза межами норми – активувати зумер.

8. Візуалізація: оновлення даних на LCD-дисплеї.

9. Цикл: очікування наступного спрацювання таймера.

Блок-схема алгоритму роботи зображена на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – блок-схема алгоритму роботи.

2.5 Проектування підсистеми передавання, збереження та візуалізації даних

Дана підсистема є однією з основних складових розроблюваної системи моніторингу, оскільки саме вона забезпечує передачу інформації від

вимірювального вузла, до кінцевого користувача. Окрім функції передавання даних, підсистема виконує їх збереження з метою формування історії вимірювань, що дозволяє здійснювати подальший аналіз параметрів середовища.

Важливим аспектом її функціонування є також візуалізація отриманих даних у зручному для користувача вигляді. Це забезпечує оперативне реагування на зміни контрольованих параметрів та підвищує ефективність прийняття рішень. Таким чином, підсистема поєднує в собі функції передавання, збереження та інтерпретації даних.

Для передавання даних обрано бездротовий канал зв'язку Wi-Fi. Вибір обґрунтований наявністю вбудованого модуля в мікроконтролері ESP32, високою швидкістю передачі та можливістю легкої інтеграції в існуючу інфраструктуру приміщень, де зберігаються біологічні матеріали.

Взаємодія між пристроєм та сервером базується на прикладному протоколі платформи Blynk. Дані передаються у форматі пакетів, що містять унікальний ідентифікатор пристрою (Auth Token).

Структура повідомлення включає наступні поля:

- Device ID: унікальний токен авторизації.
- Virtual Pin V0: значення вологості.
- Virtual Pin V1: значення температури.
- Event Log: статус тривоги.
- Timestamp: мітка часу формується засобами хмарної платформи під час реєстрації даних.

Періодичність відправлення даних становить 5 секунд, що дозволяє оперативно реагувати на небезпечні зміни стану середовища, не перевантажуючи канал зв'язку.

Збереження інформації реалізовано на стороні хмарної інфраструктури Blynk Cloud. Історичні дані зберігаються у хмарному середовищі платформи Blynk і доступні через вбудовані засоби візуалізації сервісу.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Логіка збереження передбачає запис поточних даних у реальному часі, що робить їх доступними для миттєвого відображення. При цьому історичні дані зберігаються так, що кожен запис містить мітку часу та відповідні показники сенсорів, це дозволяє формувати архіви з різною глибиною зберігання, яка визначається налаштуваннями системи (від 1 доби до 1 року). Доступ до архіву реалізовано таким чином, що користувач може переглядати історію через інтерфейс графіків, обираючи необхідний часовий проміжок.

Локальна візуалізація здійснюється за допомогою символного дисплея LCD 1602, підключеного по шині I2C. На екрані в реальному часі відображаються поточні значення температури та вологості. Це дозволяє персоналу на місці швидко перевірити стан системи без використання гаджетів.

Віддалена візуалізація реалізована через веб-панель та мобільний застосунок. Головне вікно містить статус пристрою (Online/Offline) та головні цифрові індикатори. У системі передбачено віджети «Value Display», що відображають поточну температуру у градусах Цельсія та вологість у відсотках, графіки «SuperChart», які демонструють динаміку змін параметрів і дозволяють аналізувати стабільність роботи холодильного обладнання, а також система сповіщень, що у разі виходу параметрів за межі норми генерує Push-повідомлення. Зовнішній вигляд прототипу веб-інтерфейсу системи моніторингу наведено у рисунку 2.5.

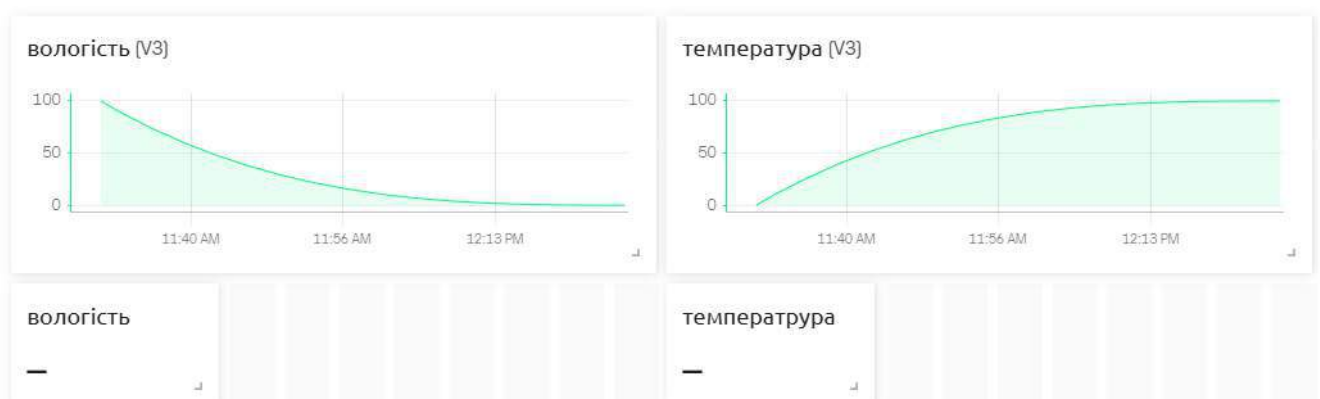


Рисунок 2.5 – прототип веб-інтерфейсу системи моніторингу.

2.6 Висновки до розділу.

У другому розділі було розроблено комплекс проектних рішень для створення кіберфізичної системи віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів. За результатами проведеної роботи можна зробити наступні висновки:

Сформовано архітектуру системи, що базується на трирівневій моделі: рівень збору даних (датчик DHT22 та ESP32), рівень передавання (Wi-Fi та хмара Blynk) та рівень представлення (LCD-дисплей, веб-інтерфейс та мобільний застосунок).

Обґрунтовано вибір елементної бази, де основним елементом визначено мікроконтролер ESP32. Це рішення є доцільним завдяки наявності вбудованого Wi-Fi модуля, достатньої кількості GPIO та низької вартості, що дозволяє реалізувати автономний та компактний пристрій.

Спроектовано програмну структуру, яка побудована за модульним принципом із використанням подієво-орієнтованого підходу. Це забезпечує стабільну роботу системи без блокування мережесих запитів та дозволяє реалізувати інтелектуальну логіку сповіщень.

Визначено принципи візуалізації та збереження даних, що поєднують локальний моніторинг (LCD) для оперативного персоналу та хмарне сховище з аналітичними графіками для віддаленого контролю та ведення історії вимірювань.

Розроблені проектні рішення спрямовані на забезпечення відповідності технічним вимогам і створюють основу для подальшої реалізації та тестування системи.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

3.1 Моделювання системи в середовищі Wokwi

У межах даної роботи попереднє моделювання запропонованих проєктних рішень виконувалася у середовищі Wokwi. Це дало змогу реалізувати віртуальний прототип вузла моніторингу, перевірити логіку функціонування програмного забезпечення, взаємодію компонентів та базові сценарії роботи системи ще до виготовлення фізичного макета.

Вибір середовища Wokwi для моделювання та перевірки працездатності віртуального прототипу зумовлений підтримкою мікроконтролерів ESP32, зручністю налагодження та можливістю моделювання мережевої взаємодії. На відміну від традиційних симуляторів, Wokwi дозволяє емулювати Wi-Fi з'єднання через шлюз Wokwi-GUEST, що є досить важливим для перевірки працездатності IoT-системи та її взаємодії з хмарним сервером Blynk.

Процес створення віртуальної моделі у середовищі Wokwi охоплював декілька етапів: вибір компонентної бази, опис їхнього електричного з'єднання та конфігурацію параметрів симуляції. Використання даного інструментарію дозволило мінімізувати ризики пошкодження реальних компонентів через можливі помилки в схемотехніці на етапі проєктування.

Для реалізації функціональних вимог системи до складу моделі було включено кілька основних елементів. Центральним обчислювальним модулем виступає мікроконтролер ESP32-DevKit-V1, який здійснює збір даних з датчиків, керування периферією та обмін даними з хмарою.

Для моделювання процесу зчитування параметрів навколишнього середовища обраний цифровий датчик температури та вологості DHT22. У середовищі Wokwi цей компонент дозволяє динамічно змінювати значення температури та вологості під час симуляції, що є незамінним для тестування реакції системи на критичні зміни умов.

Візуалізація поточного стану системи безпосередньо на місці встановлення пристрою виконується за допомогою рідкокристалічного дисплея LCD1602 з модулем I2C. Використання I2C інтерфейсу дозволило значно скоротити кількість задіяних GPIO-контактів мікроконтролера. Як засіб локального звукового оповіщення у разі виходу показників за межі встановлених норм до схеми доданий п'єзоелектричний випромінювач (зумер).

Організація зв'язків між компонентами виконана за наступним принципом:

Сигнальний вивід цифрового датчика DHT22 підключено до GPIO 14 мікроконтролера. Живлення цього модуля здійснюється від шини 3.3 В, що відповідає технічним характеристикам ESP32 та запобігає перевантаженню вхідних пінів.

Для забезпечення надійної передачі даних і виводу текстової інформації модуль дисплея LCD1602 підключено до апаратних виводів I2C мікроконтролера, а саме: SDA до GPIO 21 та SCL до GPIO 22.

Локальна звукова сигналізація реалізована через активний зумер, який підключений до цифрового піну GPIO 19. У моделі керування цим зумером здійснюється простим вмиканням або вимиканням сигналу.

Побудована графічна модель (Рисунок 3.1) є цифровим прототипом, що відображає архітектуру кіберфізичної системи у реальному часі. Кожен елемент на схемі виконує свою функцію у загальній схемі моніторингу: від первинного перетворення фізичних величин датчиком DHT22 до виводу критичних сповіщень через периферію. Однією з головних переваг використання Wokwi у порівнянні з класичним фізичним макетуванням є гнучкість налаштування логічних зв'язків. Замість використання з'єднувальних дротів, які у реальних умовах можуть мати поганий контакт, опис зв'язків у Wokwi здійснюється через текстовий файл конфігурації `diagram.json`. Це дозволяє миттєво перепризначати GPIO-виводи мікроконтролера ESP32, експериментувати з різними

комбінаціями пінів та уникати конфліктів апаратних інтерфейсів ще на етапі узгодження апаратної конфігурації системи.

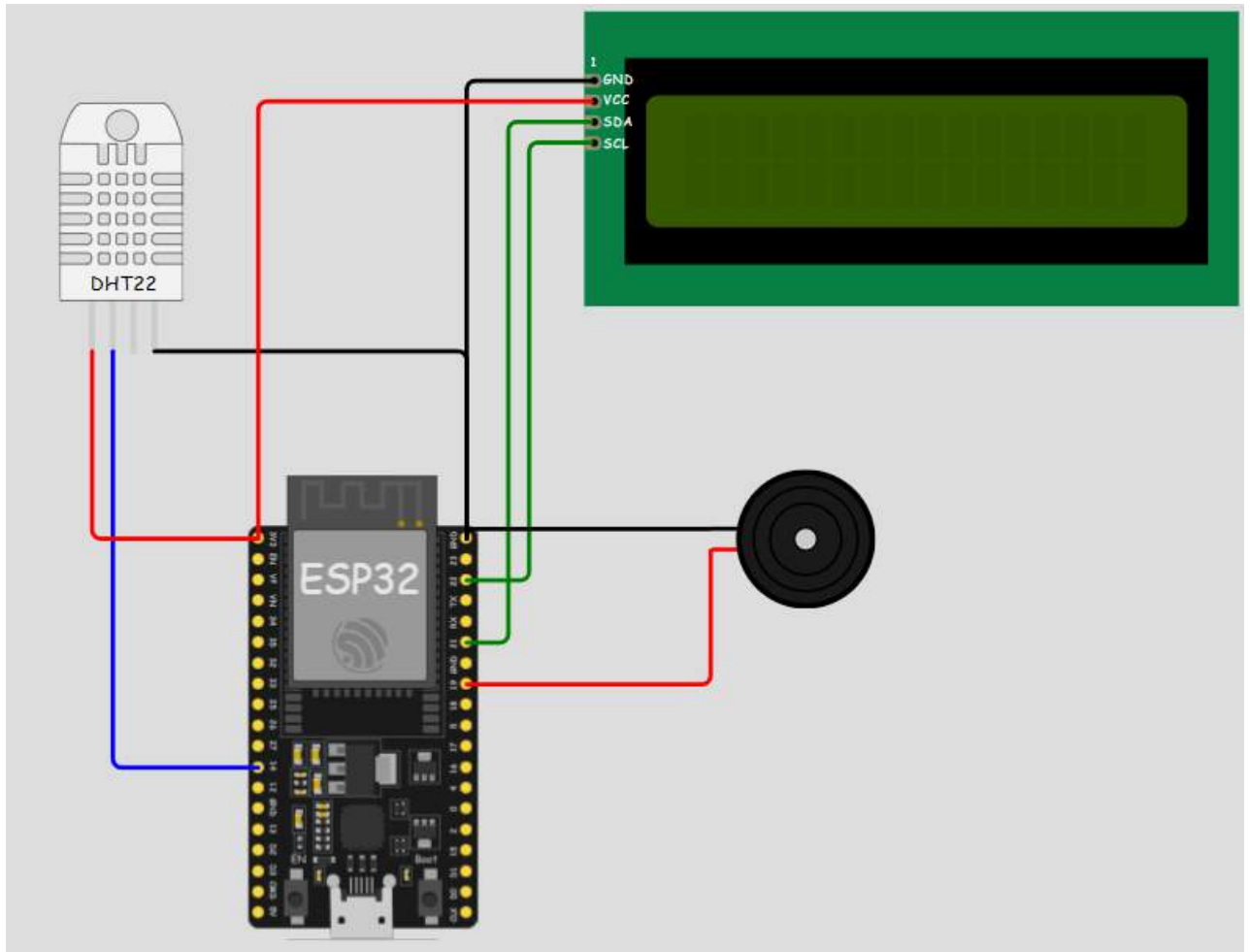


Рисунок 3.1 – Візуалізація схеми моделювання у середовищі Wokwi

Отже, у даному розділі розглянуто процес створення віртуальної моделі системи у середовищі Wokwi, обґрунтовано вибір інструменту та описано склад і принцип взаємодії основних компонентів. Сформована модель відображає структуру вузла моніторингу, дозволяє наочно представити організацію з'єднань і слугує основою для подальшої реалізації та дослідження роботи системи.

3.2 Програмна реалізація вузла моніторингу

Програмне забезпечення вузла моніторингу розроблене мовою C++ з використанням середовища Arduino IDE та бібліотек для роботи з ESP32. Логіка програми побудована на подієво-орієнтованій моделі, що дозволяє ефективно поєднувати підтримку Wi-Fi з'єднання, обмін даними з хмарною платформою Blynk та опитування датчиків.

Для забезпечення функціонування коду було задіяно набір спеціалізованих бібліотек:

- WiFi.h та BlynkSimpleEsp32.h: забезпечують мережеву взаємодію та протокол зв'язку з сервером Blynk;
- DHT.h: містить методи для роботи з протоколом передачі даних датчика DHT22;
- LiquidCrystal_I2C.h: реалізує керування дисплеєм через інтерфейс I2C;
- BlynkTimer: важливий компонент для організації асинхронного виконання функцій без блокування основного циклу програми функцією delay().

На початку коду визначено ідентифікатори шаблону та токен автентифікації (BLYNK_AUTH_TOKEN), які пов'язують пристрій з конкретним дашбордом у хмарі. Також відбувається ініціалізація датчика DHT на GPIO 14 та зумера на GPIO 19.

У функції setup() виконується початкова ініціалізація всіх підсистем. Після запуску послідовного порту для налагодження, програма переводить пін баззера у стан виходу та ініціалізує LCD-дисплей. Для інформування користувача про процес запуску на екран виводиться сервісне повідомлення "System starting...". Важливим етапом є виклик Blynk.begin(), який встановлює Wi-Fi з'єднання та авторизується на сервері.

Основний цикл програми loop() містить лише виклики Blynk.run() для підтримки зв'язку та timer.run() для контролю виконання запланованих завдань. Такий підхід гарантує стабільність стека Wi-Fi та запобігає зависанню пристрою.

Ключовою функцією програми є `sendSensorData()`. Згідно з налаштуваннями таймера, ця функція активується кожні 5 секунд. Вона відповідає за повний цикл обробки: від отримання даних до прийняття рішень про активацію тривоги.

Особливістю реалізації є використання прапорців стану (`isTempAlertSent`, `isHumAlertSent`). Це дозволяє уникнути повторного надсилання ідентичних сповіщень на смартфон користувача, надсилаючи Push-повідомлення лише у момент перетину межі критичного діапазону.

Нижче наведено детальну логіку роботи цієї функції.

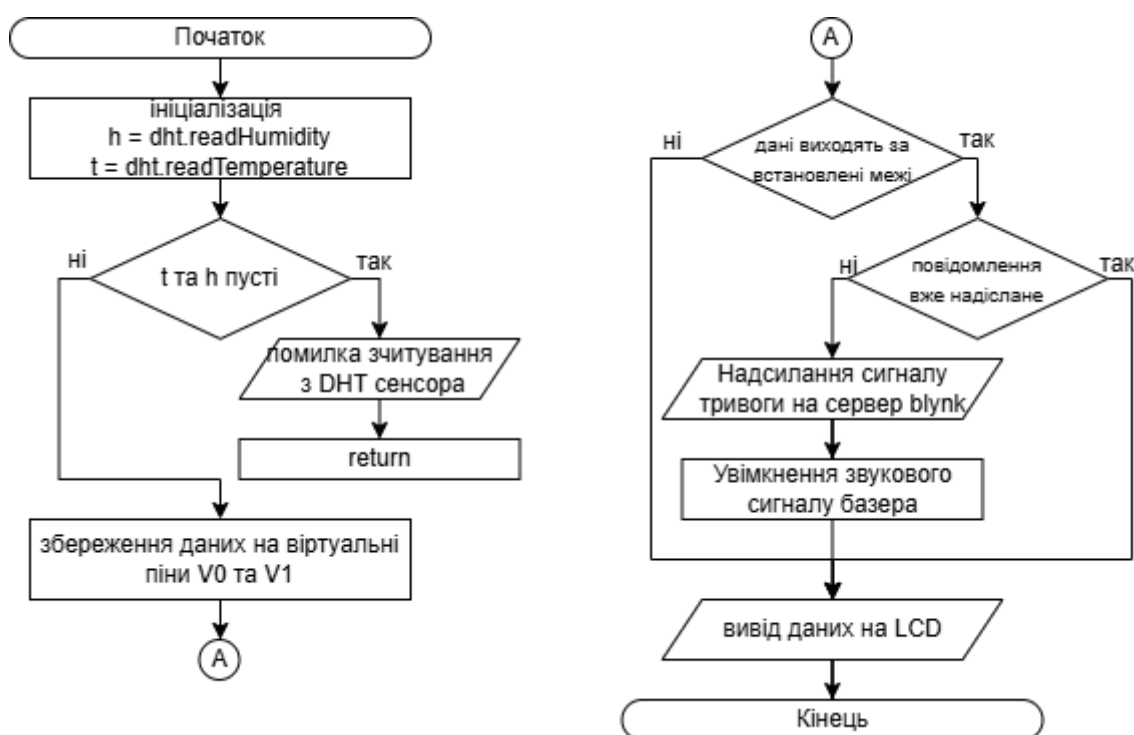


Рисунок 3.2 – блок-схема функції `sendSensorData`

Внутрішня логіка функції `sendSensorData` забезпечує цикл обробки отриманої інформації, що включає візуалізацію, дистанційну передачу та сповіщення в разі тривоги. Відразу після зчитування показників із датчика DHT22, система виконує оновлення даних на віртуальних пінах V0 та V1 хмарної платформи Blynk. При цьому в системі реалізовано механізм анти-спаму: показники відправляються лише у разі їхньої фактичної зміни, що зменшує

кількість надлишкових передавань даних і сприяє стабільнішій роботі каналу зв'язку. Це дозволяє користувачеві відстежувати стан об'єкта в реальному часі через мобільний додаток. Паралельно з цим реалізовано механізм перевірки, який звіряє відповідність температури (+2°C...+8°C) та вологості (35%...60%) встановленим критеріям безпеки для біологічних матеріалів. У разі виходу за ці межі програма активує змінну тривоги alertActive, подає сигнал на п'єзоелектричний випромінювач (GPIO 19) та ініціює відправку Push-повідомлення через сервіс Blynk.logEvent, причому використання логічних прапорців запобігає дублюванню сповіщень при тривалому перебуванні показників у критичній зоні. Кінцевим етапом виконання функції є форматування та вивід актуальних значень на рідкокристалічний дисплей LCD1602.

Отже, у даному розділі розглянуто структуру та принципи побудови програмного забезпечення вузла моніторингу, описано використані бібліотеки, організацію основного циклу програми та механізми обробки даних. Реалізована програмна логіка забезпечує узгоджену взаємодію між апаратними компонентами, хмарною платформою Blynk та користувацьким інтерфейсом, формуючи цілісну основу для подальшого функціонування системи.

3.3 Реалізація та налаштування веб-інтерфейсу і мобільного застосунку

Для забезпечення віддаленого контролю та оперативного реагування на зміну умов зберігання було використано платформу Blynk IoT. Процес налаштування включав створення хмарного шаблону пристрою, визначення потоків даних та розробку графічної оболонки для користувача.

Основою взаємодії між мікроконтролером ESP32 та хмарою Blynk є механізм віртуальних пінів (Virtual Pins). На відміну від фізичних контактів на платі, віртуальні піни – це програмні канали зв'язку, які дозволяють передавати дані незалежно від апаратної частини. У межах проєкту було налаштовано два основні потоки (Datastreams): V0 (Humidity) це потік даних для передавання

значень вологості типу Double, діапазону 0 – 100% та V1 (Temperature) потік даних для передавання значень температури типу Double, діапазону -10...+20°C.

Така організація дозволяє пристрою надсилати числові значення в хмару, де вони автоматично прив'язуються до відповідних графічних віджетів.

Для обробки критичних станів використано систему подій (Events). Подія в платформі Blynk є механізмом серверного формування сповіщень при настанні визначених умов. Було створено два типи сповіщень: temp_alert та hum_alert. При виході параметрів за межі норми сервер Blynk реєструє подію статусу "Warning" та автоматично надсилає Push-повідомлення на смартфон користувача.



ID	Name	Pin	Color	Data Type	Units	Is Raw	Min	Max
1	Humidity V0	V0		Double	%	false	0	100
2	Temperature V1	V1		Double	°C	false	-10	20

Рисунок 3.3 – Налаштування Datastreams у консолі Blynk.



Name	Code	Color	Type	Notifications
temp_alert	temp_alert		Warning	Enabled
hum_alert	hum_alert		Warning	Enabled

Рисунок 3.4 – Налаштування Events у консолі Blynk.

Веб-інтерфейс було розроблено за допомогою конструктора Dashboard. Він орієнтований на стаціонарний моніторинг і забезпечує аналіз даних завдяки графікам. Серед основних елементів інтерфейсу присутня візуалізація статусу пристрою, яка відображає стан підключення у форматі Online або Offline. Також передбачені індикатори реального часу Value Display, що демонструють останні отримані значення температури та вологості. Крім того, інтерфейс містить історичні графіки Charts, які дозволяють відстежувати зміну параметрів у часі

(поточні дані, за годину, день або тиждень), що є необхідним для виявлення закономірностей у роботі холодильного обладнання.

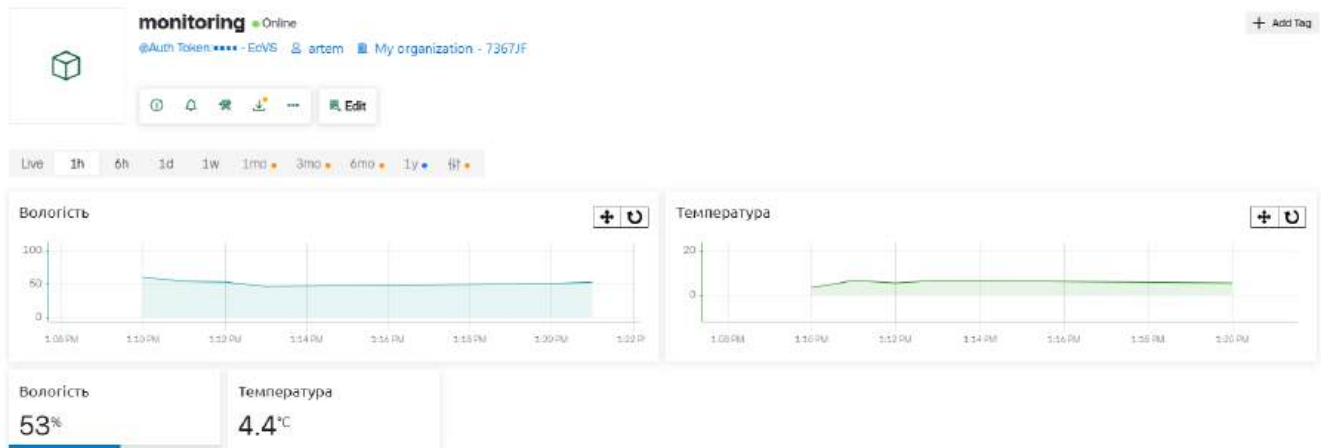


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд веб-інтерфейсу моніторингу.

Мобільний інтерфейс спроектовано для швидкого та зручного доступу до інформації з телефону у будь-який момент часу. Його структура дублює основні показники веб-панелі моніторингу, проте адаптована під особливості сенсорного керування та вертикальне розташування екранів мобільних пристроїв. Завдяки цьому користувач може легко переглядати поточні параметри системи, не витрачаючи багато часу на навігацію між розділами.

Особливістю застосунку є можливість отримання сповіщень у фоновому режимі. Коли датчик фіксує відхилення від встановлених меж, користувач бачить спливаюче повідомлення з точним значенням температури або вологості, що спричинило тривогу. Це дозволяє оперативно реагувати на потенційно небезпечні ситуації навіть тоді, коли застосунок не відкритий на екрані.

Крім того, мобільний інтерфейс забезпечує стабільний зв'язок із серверною частиною системи через мережу Інтернет, що дає змогу отримувати оновлені дані в режимі реального часу. Завдяки поєднанню простоти використання, швидкого доступу до інформації та підтримки push-сповіщень мобільний застосунок значно підвищує зручність експлуатації всієї системи моніторингу.

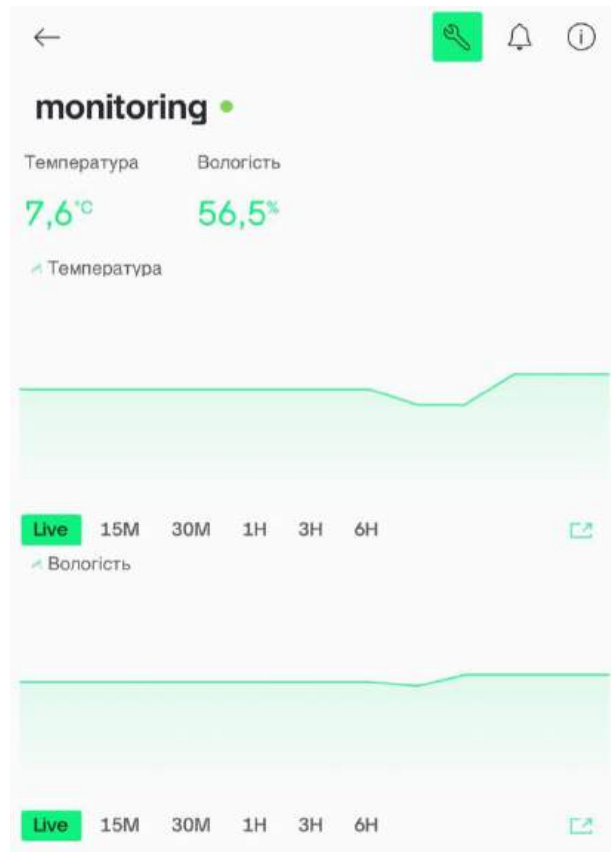


Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд мобільного інтерфейсу.

Завдяки поєднанню віртуальних пінів для передачі даних та системи подій для тривоги, було реалізовано надійну дворівневу систему візуалізації, яка не потребує складного адміністрування та забезпечує високу швидкість інформування персоналу.

Реалізовані веб-панель та мобільний застосунок забезпечують доступ до актуальних показників середовища та їхньої історії, а інтегрована система сповіщень гарантує миттєве інформування користувача про критичні відхилення параметрів, що є визначальним для надійної експлуатації кіберфізичної системи.

3.4 Попереднє тестування в середовищі моделювання

Перед збіркою фізичного прототипу було виконано етап попереднього тестування програмно-апаратної частини в інтерактивному середовищі моделювання Wokwi. Метою цього кроку став первинний аналіз працездатності

алгоритму, перевірка коректності зчитування параметрів датчика DHT22 та контроль логіки реагування на критичні зміни середовища.

За допомогою вбудованих інтерактивних регуляторів середовища Wokwi здійснювалася динамічна зміна значень температури (t) та вологості (h). Такий підхід дозволив штучно відтворити критичні умови експлуатації, зокрема аварійну розгерметизацію камери зберігання біологічних матеріалів або раптовий вихід з ладу кліматичного обладнання.

Під час проведення попередніх тестів особлива увага приділялася аналізу трьох основних компонентів системи. Спершу було виконано перевірку мережевої взаємодії та хмарної інтеграції. Програма успішно здійснювала з'єднання з сервером Blynk, підтвердивши стабільну відправку даних із заданою частотою один раз на 5 секунд.

Наступним етапом стало тестування логіки аварійного оповіщення, де моделювання підтвердило надійність дворівневого алгоритму. При виході температури за межі 2 – 8 °C або вологості поза діапазон 35 – 60 % модуль обробки помилок миттєво фіксував порушення. У відповідь система реагувала подвійно: вмикала локальний зумер та одночасно надсилала Push-сповіщення на смартфон через Blynk.logEvent.

Заключна частина перевірки стосувалася стабілізації та автоматичного відновлення системи. Тести підтвердили, що після повернення контрольованих параметрів до норми звукова сигналізація автоматично вимикалася, а прапорці аварійного стану скидалися. Це довело коректність захисту від повторних спрацьовувань.

Таким чином, попереднє комп'ютерне моделювання повністю підтвердило правильність закладених архітектурних рішень та працездатність програмного коду. Успішні результати симуляції в середовищі Wokwi засвідчили відповідність системи базовим технічним вимогам, що дозволило завершити етап віртуального проектування та перейти до створення апаратної частини пристрою.

3.5 Апаратна реалізація пристрою

Успішне завершення етапу комп'ютерного моделювання та програмної симуляції дозволило перейти до практичного етапу фізичної збірки та апаратної реалізації кіберфізичної системи. Головним завданням цього розділу є опис процесу створення реального фізичного прототипу пристрою, компоновання його елементної бази та з'єднання всіх периферійних модулів у єдиний апаратний комплекс.

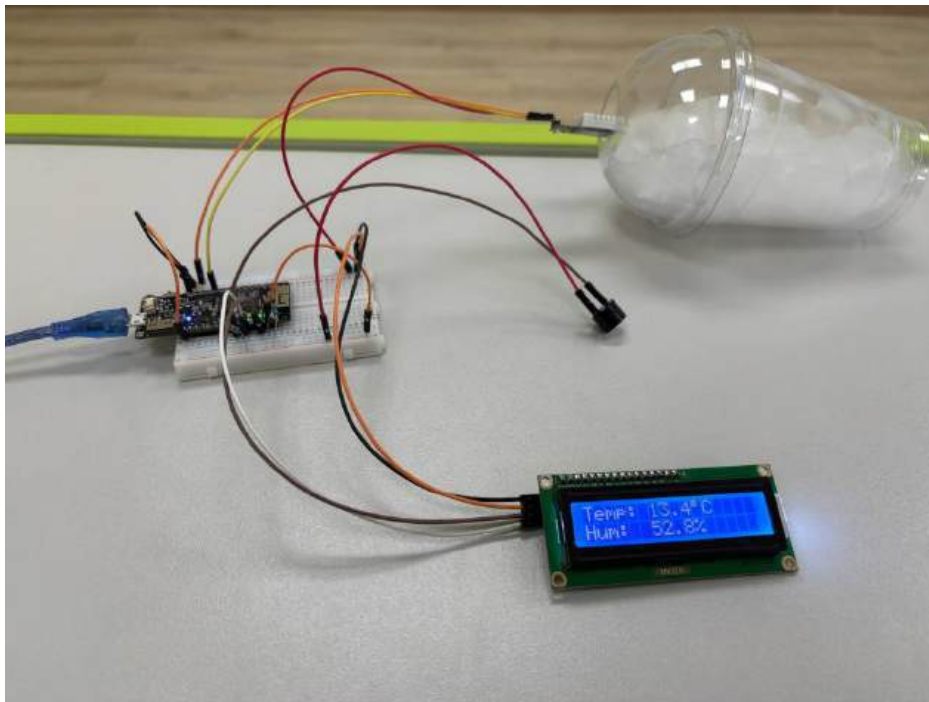
Апаратна архітектура пристрою базується на модульному принципі, що забезпечує високу ремонтпридатність, простоту заміни компонентів та можливість подальшого масштабування системи. Фізична збірка прототипу виконувалася з використанням кількох елементів, основою серед яких є мікроконтролер ESP32. Модуль встановлено на макетну плату для забезпечення надійного контакту з іншими периферійними пристроями. Оскільки мікроконтролер має високу щільність виводів, особлива увага під час монтажу приділялася коректному розподілу ліній живлення та сигнальних GPIO.

Для отримання метрик середовища до системи інтегровано цифровий датчик DHT22. Його підключено з урахуванням можливості віддаленого розміщення від основного пристрою за рахунок довжини з'єднувальних дротів. Це дозволяє винести вимірювальний елемент безпосередньо у зону моніторингу, що забезпечує точність фіксації параметрів та одночасно захищає головну плату від впливу зовнішніх факторів.

Візуалізація даних реалізована за допомогою рідкокристалічного дисплея LCD 1602 з I2C адаптером. Використання цього перехідника дозволило кардинально скоротити кількість необхідних для підключення дротів з 16 до 4. Модуль підключено напряму до апаратних пінів I2C мікроконтролера ESP32, а на зворотному боці самого адаптера було виконано ручне налаштування контрастності відображення символів.

Локальне оповіщення забезпечує зумер, який підключено безпосередньо до цифрового виводу GPIO19 мікроконтролера, що дозволяє програмно керувати активацією звукового сигналу в разі виникнення аварійних ситуацій.

Монтаж елементів на етапі створення пристрою здійснювався за допомогою гнучких з'єднувальних провідників типу дюпон. Таке рішення забезпечило швидке з'єднання модулів, простоту заміни компонентів під час тестування та необхідну гнучкість при просторовому розміщенні датчиків і засобів індикації.



Зображення 3.7 – Апаратна реалізація пристрою дистанційного контролю мікроклімату

У ході розробки та апаратного проектування системи було успішно підбрано й інтегровано основні компоненти кіберфізичної системи. Використання мікроконтролера ESP32, цифрового датчика DHT22 з можливістю віддаленого вимірювання та активного зумера дозволило створити основу для моніторингу параметрів середовища. Оптимальний вибір способів з'єднання та

конфігурації виводів забезпечив стабільну роботу локальної аварійної логіки та дозволив налагодити безперебійну передачу даних у хмарний сервіс.

3.6 Тестування фізичного прототипу системи

Завершальним етапом розробки кіберфізичної системи стала перевірка її працездатності в реальних умовах експлуатації. Тестування створеного фізичного прототипу проводилося шляхом імітації сценаріїв роботи та ретельного аналізу реакції як програмної, так і апаратної частин. Головною метою цього етапу є експериментальне підтвердження того, що розроблена система здатна не лише зчитувати мікрокліматичні показники, а й оперативно реагувати на критичні зміни середовища у реальному часі.

Для проведення випробувань та імітації критичних умов використовувався контейнер з льодом, всередину якого поміщали датчик DHT22. Процес розгерметизації камери зберігання біоматеріалів або зміни температурного режиму відтворювали шляхом вилучення датчика з охолодженого середовища та його подальшого природного нагрівання до кімнатної температури. Це дозволило перевірити швидкість реакції системи на різке виникнення аварійної ситуації та точність фіксації динамічних змін мікроклімату.

Аналіз результатів експерименту зафіксував чітке відпрацювання системи за чотирма основними сценаріями. Під час реалізації сценарію нормальної експлуатації та підтримки цільових параметрів середовища кіберфізична система демонструвала високу стабільність. Фізичний датчик успішно зчитував дані, які після обробки мікроконтролером ESP32 виводилися на локальний LCD 1602 дисплей та одночасно передавалися в хмару Blynk із частотою один раз на 5 секунд. Затримка відображення між моментом реального вимірювання та оновленням віджетів в інтерфейсі мобільного застосунку становила 1–3 секунди, що є прийнятним показником для завдань віддаленого моніторингу біоматеріалів.

У межах сценарію порушення температурного режиму, для перевірки якого датчик DHT22 діставали з контейнера з льодом, значення внаслідок природного нагрівання до кімнатної температури перетнуло верхню безпечну межу. Модуль обробки помилок зафіксував це порушення, після чого на цифровий вивід GPIO19 активного зумера надійшов сигнал високого рівня (HIGH), що увімкнуло локальне звукове оповіщення. Одночасно було викликано функцію `Blynk.logEvent("temp_alert")`, завдяки чому хмарний сервер оперативно надіслав Push-сповіщення на смартфон користувача.

Для перевірки сценарію критичної зміни вологості, що також є важливим для запобігання утворенню конденсату, було окремо протестовано реакцію апаратної частини на зміну вологісного режиму. Шляхом підведення вологого пару показник `h` було штучно піднято вище 60 %. Програма ідентифікувала це як порушення, і система, аналогічно до температурної тривоги, увімкнула звуковий зумер та надіслала на мобільний пристрій відповідне сповіщення `hum_alert`, що підтвердило надійність та незалежність роботи дворівневої перевірки параметрів.

Заключним етапом випробувань став сценарій автоматичного відновлення та скидання станів, де перевірялося очищення аварійних прапорців після стабілізації параметрів. Після припинення зовнішнього впливу та повернення показників середовища до нормальних цільових значень звукова тривога автоматично вимикалася. Програмні прапорці аварійного стану `isTempAlertSent` та `isHumAlertSent` скидалися в початковий стан, що довело готовність системи до реєстрації наступних можливих інцидентів без потреби ручного перезавантаження мікроконтролера.

Випробування фізичного пристрою продемонстрували його відповідність усім висунутим проєктним вимогам. Кіберфізична система надійно ідентифікує аварійні ситуації, дублює інформацію на локальному екрані та забезпечує гарантоване інформування персоналу через мобільний додаток, приклад якого

наведено нижче, що дозволяє звести до мінімуму ризику псування біологічних матеріалів.

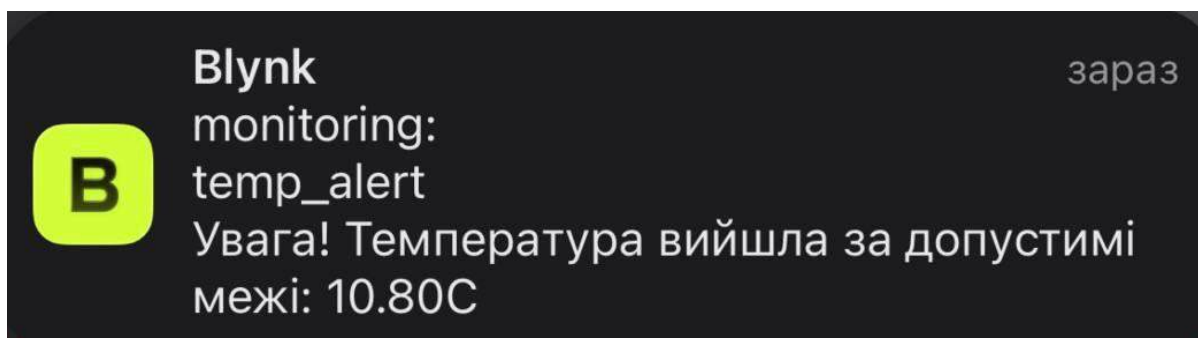


Рисунок 3.8 – Push-сповіщення тривоги на мобільному пристрої.

3.7 Оцінка результатів, переваг та обмежень системи

За результатами проведеного моделювання та тестування було здійснено комплексну оцінку розробленої кіберфізичної системи. Результати тестування свідчать про відповідність основних функцій системи вимогам технічного завдання, проте, як і будь-яке інженерне рішення, вона має свої сильні сторони та певні технічні межі.

Розроблений прототип має низку суттєвих конкурентних переваг, серед яких першочерговою є висока економічна ефективність. Використання доступного мікроконтролера ESP32 та сенсорів серії DHT дозволило максимально мінімізувати вартість апаратної частини. У порівнянні з промисловими логерами температури, кінцева вартість даного рішення є у кілька разів нижчою, при забезпеченні базових функцій віддаленого моніторингу. Окрім цього, пристрій вирізняється низькою енергозатратністю, адже архітектура ESP32 поєднує високу продуктивність із мінімальним споживанням енергії. Це дозволяє гнучко організувати живлення системи як від постійної мережі, так і від автономного акумулятора, що гарантує безперебійну роботу навіть у разі аварійних вимкнень електрики.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливою перевагою є механізм зменшення надлишкових повідомлень (анти-спам). Програмна логіка забезпечує дворівневий захист від перевантажень. По-перше, реалізовано перевірку зміни даних, тобто показники відправляються на сервер Vlynk виключно у разі їхньої фактичної зміни, що унеможливорює відключення пристрою сервером через спам однаковими даними. По-друге, використання прапорців стану (isTempAlertSent) запобігає повторному надсиланню десятків Push-повідомлень при одиничному виході параметра за межі норми. Такий підхід оптимізує роботу мікроконтролера та не перевантажує канал зв'язку

У системі реалізовано два рівні візуалізації даних: локальний дисплей і хмарний інтерфейс. Це дозволяє персоналу безпосередньо в приміщенні швидко переглядати поточні показники без використання додаткових пристроїв, тоді як віддалені користувачі можуть контролювати стан системи з будь-якого місця через мобільний застосунок або вебінтерфейс.

Окрім цього, ваєливою є легка масштабність системи, адже завдяки платформі Vlynk до неї можна легко додати нові датчики (наприклад, датчик відкриття дверей камери або виток холодоагенту) без кардинальної зміни архітектури.

Поряд із перевагами, було виявлено деякі обмеження, які слід враховувати при експлуатації. Перш за все, це залежність від Wi-Fi інфраструктури, оскільки ESP32 використовує Wi-Fi для з'єднання та передачі даних. Через це стабільність моніторингу напряму залежить від якості покриття та роботи роутера. У разі збою мережі, віддалений доступ буде тимчасово втрачено, хоча локальна сигналізація продовжить працювати.

Іншим фактором є точність бюджетних сенсорів. До недоліків системи можна віднести обмежену точність використаного датчика температури DHT22, похибка якого становить близько $\pm 0,5$ °C. Це може впливати на недостатню точність вимірювань у задачах, де важлива висока точність контролю параметрів.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, присутня залежність від хмарного сервісу, адже система використовує сторонню платформу Blynk. Будь-які технічні роботи на серверах провайдера або обмеження тарифних планів можуть вплинути на функціональність збереження історії даних.

Таким чином, розроблена система є збалансованим рішенням для загального моніторингу умов зберігання, яке при мінімальних витратах забезпечує достатній рівень безпеки та інформативності.

3.8 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було виконано програмну та апаратну реалізацію запропонованих проєктних рішень для кіберфізичної системи моніторингу умов зберігання біоматеріалів. На основі виконаної роботи можна зробити висновок, що в першу чергу було підтверджено працездатність системи в середовищі моделювання Wokwi. Створення віртуального прототипу дозволило перевірити коректність взаємодії мікроконтролера ESP32 із периферійними пристроями (сенсором DHT22, дисплеєм LCD1602 та баззером) та налагодити програмний код.

Також було успішно реалізовано багаторівневий інтерфейс користувача. Використання платформи Blynk IoT забезпечило створення зручної веб-панелі та мобільного застосунку. Завдяки механізму віртуальних пінів вдалося організувати передачу даних у реальному часі, а використання історичних графіків дозволило здійснювати збереження вимірювань для подальшого аналізу умов зберігання.

На основі отриманих результатів моделювання було виконано реальний монтаж компонентів за допомогою гнучких провідників. Це дозволило перенести відлагоджений програмний алгоритм на реальне апаратне забезпечення.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливим етапом стало тестування системи реагування на аварійні події. Перевірка підтвердила, що система чітко ідентифікує вихід показників температури та вологості за встановлені межі. Поєднання локальної звукової сигналізації та віддалених Push-повідомлень забезпечує високу надійність інформування персоналу.

Наостанок було проведено детальну оцінку розробленого рішення. Аналіз результатів показав, що система є економічно вигідною, енергоефективною та захищеною від надлишкового спаму повідомленнями. Водночас виявлено певні обмеження, зокрема залежність від Wi-Fi інфраструктури та обмежену точність сенсорів.

Таким чином, отримані результати моделювання та подальші випробування створеного фізичного прототипу свідчать, що розроблена система повністю відповідає поставленим цілям роботи. Успішна інтеграція апаратних компонентів та хмарного сервісу Blynk дозволяє використовувати цей пристрій як надійну основу для автоматизації контролю мікроклімату в медичних та дослідницьких лабораторіях.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розроблено та досліджено кіберфізичну систему для віддаленого моніторингу умов зберігання біологічних матеріалів. Проведене дослідження охопило повний цикл створення пристрою – від аналізу предметної області до моделювання та тестування апаратного пристрою.

Спочатку було проведено аналіз предметної області та огляд існуючих рішень у сфері моніторингу умов зберігання біоматеріалів, що дозволило визначити головні підходи до побудови подібних систем. Також проаналізовано вимоги до зберігання біоматеріалів, що дозволило визначити критичні параметри моніторингу, зокрема температуру у вузькому діапазоні 2–8°C та вологість 35–60%, і сформулювати технічні вимоги до надійності системи.

Наступним кроком було обґрунтовано архітектуру кіберфізичної системи, яка базується на енергоефективному мікроконтролері ESP32 з підтримкою Wi-Fi. Таке рішення дозволило створити автономний вузол, здатний працювати у складі сучасних концепцій інтернету речей (IoT).

Для забезпечення функціонування вузла розроблено програмне забезпечення для обробки даних. Впроваджена логіка "анти-спаму" та використання віртуальних пінів для зв'язку з хмарою Blynk забезпечили стабільну передачу даних та інтелектуальне керування локальними і віддаленими сповіщеннями.

Разом з цим спроектовано дворівневий інтерфейс користувача, що включає локальний LCD-дисплей для оперативного персоналу та кросплатформний мобільний застосунок. Це забезпечує безперервний контроль параметрів незалежно від місцезнаходження відповідальної особи.

На завершальному етапі проведено успішне конструювання та тестування системи. Результати випробувань повністю підтвердили високу швидкість реакції системи на аварійні події та коректність роботи алгоритмів візуалізації.

Практичне значення роботи полягає у створенні бюджетного, але ефективного рішення, яке за своїми функціональними можливостями

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(віддалений доступ, ведення історії, Push-сповіщення) забезпечує базовий набір функцій, характерних для сучасних систем віддаленого моніторингу. У межах роботи було створено та перевірено апаратний прототип системи, який може слугувати основою для подальшого вдосконалення, масштабування та практичної апробації в умовах реальної експлуатації для медичних закладів, банків крові та лабораторій для автоматизації контролю мікроклімату та зниження ризику псування критично важливих зразків.

Загалом, розроблена система продемонструвала працездатність, достатню точність вимірювань і зручність у використанні. Отримані результати підтверджують її ефективність у задачах моніторингу параметрів середовища, що робить рішення придатним для подальшого масштабування та впровадження в системах моніторингу.

					КвРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ізотермічний контейнер Campingaz Coleman URL: <https://epicentrk.ua/ua/shop/konteyner-izotermicheskiy-campingaz-coleman-28qt-xtreme.html> (дата звернення: 14.02.2026)
2. Ізотермічний контейнер Igloo Sportsman. URL: <https://ua.thermos-ua.com/p/izotermicheskiy-konteyner-igloo-sportsman-30-28-l-0342235035670-172902> (дата звернення: 14.02.2026)
3. Підсумки трансплантації в Україні за 2025 рік URL: <https://moz.gov.ua/uk/transplantaciya-za-2025-rik-ukrayinski-mediki-vikonali-ponad-650-organnih-peresadok-pidsumki> (дата звернення: 17.03.2026)
4. Посібник з мікроконтролерів ESP32. ARIAT Tech. 2024. 20 Nov. URL: <https://ua.ariat-tech.com/blog/ESP32-Microcontroller-Guide.html> (дата звернення: 23.02.2026)
5. Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M. et al. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. Vol. 17, Is. 4. P. 2347–2376. DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095
6. ESP32 Arduino Core's documentation URL: <https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/> (дата звернення: 5.04.2026).
7. Arduino IDE 2.0 Documentation. Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc> (дата звернення: 5.04.2026).
8. Blynk Documentation URL: <https://docs.blynk.io/en>
9. Colvin M., Smith J. M., Skeans M. A. et al. OPTN/SRTR 2018 Annual Data Report: Heart. *American Journal of Transplantation*. 2020. Vol. 20. P. 340–426. DOI: 10.1111/ajt.15676.
10. Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22. Aosong Electronics Co., Ltd. URL:

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf> (дата звернення: 23.02.2026)

11. ESP32 Series Datasheet. Espressif Systems. 2023. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 23.02.2026)

12. ESP32 User Guide. Espressif Systems. 2024. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/get-started/index.html> (дата звернення: 23.02.2026)

13. Shewring N., IoT Made Simple: Architecture, Protocols, and Applications for Beginners., 2024. 134 p. URL: <https://www.amazon.com/IoT-Made-Simple-Architecture-Beginners-ebook/dp/B0DR55TH5B> (дата звернення: 5.03.2026)

14. Faucon P. Practical IoT System Design : Architecture, Edge Intelligence, Cloud Integration, and Real-World Deployment Patterns. Birmingham : Packt Publishing, 2025. 491 p.

15. Good storage and distribution practices for medical products. *WHO Technical Report Series*, No. 1025. Annex 7. World Health Organization. 2020. URL: <https://www.who.int/publications/m/item/trs-1025-annex-7> (дата звернення: 20.02.2026)

16. Guidance on regulations for the transport of infectious substances 2021-2022. World Health Organization. 2021. 25 Feb. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240019720> (дата звернення: 14.02.2026)

17. Hassan Q. F. Internet of Things A to Z: Technologies and Applications. Wiley-IEEE Press, 2020. 752 p.

18. Health Resources and Services Administration. HRSA. URL: <https://www.hrsa.gov/> (дата звернення 11.02.2026)

19. Hitachi HD44780U (LCD-II) Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver. Hitachi, Ltd. URL:

					КВРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/HD44780.pdf> (дата звернення 11.02.2026)

20. Ischemic Cell Damage - Lecturio. URL: <https://app.lecturio.com/#!/article/2935>. (дата звернення: 12.02.2026).

21. Jing L., Yao L., Zhao M., Peng L., Liu M. Organ preservation: from the past to the future. *Acta Pharmacologica Sinica*. 2022. DOI: 10.1038/aps.2017.182.

22. Juricic S., Klac J., Stojkovic S. et al. Molecular and Cellular Mechanisms of Myocardial Ischemia and Reperfusion Injury: A Narrative Review. *Cells*. 2026. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4409/15/3/265> (дата звернення 17.02.2026)

23. Kalogeris T., Baines C. P., Krenz M., Korthuis R. J. Cell biology of ischemia/reperfusion injury. *International Review of Cell and Molecular Biology*. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3904795/> (дата звернення 17.02.2026)

24. Khan A. How to Build IoT Projects at Home (DIY Guide). Independently published, 2024. 56 p.

25. Kondaveeti A., Kumaravelu N. K. A comprehensive study on various temperature and humidity sensors for agricultural and industrial applications. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*. 2021. Vol. 5, Is. 6. P. 121–125.

26. Lea P. Internet of Things for Architects: Architecting IoT solutions by implementing sensors, communication infrastructure, edge computing, analytics, and security. Packt Publishing, 2022. 526 p.

27. Maier A., Sharp A., Vagapov Y. Comparative Analysis and Practical Implementation of the ESP32 Microcontroller Module for the Internet of Things. *Internet Technologies and Applications (ITA)*. 2017. P. 143–148. DOI: 10.1109/ITECHA.2017.8101926

28. OCS Heart. TransMedics. URL: <https://www.transmedics.com/ocs-heart/> (дата звернення: 14.02.2026).

					КВРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

29. Oner V. O. Developing IoT Projects with ESP32 : Unlock the full Potential of ESP32 in IoT development to create production-grade smart devices. 2nd ed. Birmingham : Packt Publishing, 2024. 412 p.

30. Organ Donation Statistics. URL: <https://www.organdonor.gov/learn/organ-donation-statistics> (дата звернення 11.02.2026)

31. Organ Procurement & Transplantation Network (OPTN) HRSA. URL: <https://www.hrsa.gov/optn> (дата звернення: 11.02.2026)

32. Oró E., de Gracia A., Castell A., Farid M. M., Cabeza L. F. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*. 2017. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.03.058.

33. Paragonix SherpaPak. Paragonix Technologies. URL: <https://www.paragonixtechnologies.com/sherapak> (дата звернення: 14.02.2026).

34. Paragonix SherpaPak. The Organ Donation and Transplantation Alliance. 2023. 7 Mar. URL: <https://www.organdonationalliance.org/article/latest-clinical-evidence-points-to-paragonix-sherapak-as-a-tool-to-reduce-unpredictable-severe-complications-following-heart-transplantation/> (дата звернення: 14.02.2026)

35. Pharmacy Refrigerator P130. B Medical Systems. URL: <https://www.bmedicalsyste.ms.com/en/product/p130-2/> (дата звернення: 14.02.2026).

36. Sarker V. K., Queralt J. P., Gia T. N. et al. A programmable gateway with cloud connectivity for IoT-based healthcare applications. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/340098826_IoT_based_temperature_and_humidity_monitoring_framework (дата звернення: 14.02.2026)

37. Sauer M. The Long Haul: Engineering High-Tech Solutions to the Organ Shortage. Harvard ALI Social Impact Review. 2023. 31 Jan. URL: <https://www.sir.advancedleadership.harvard.edu/articles/engineering-high-tech-solutions-organ-shortage> (дата звернення: 17.02.2026)

38. Shakila M., Thasneem A., Shanthini S. et al. IoT based cold chain logistics monitoring. *Proceedings of the International Conference on Inventive Communication*

and Computational Technologies (ICICCT 2020). 2020. P. 1381–1385. DOI: 10.1109/ICICCT.2018.8473216

39. Singh S. P., Burgess G., Singh J. Performance comparison of thermal insulated packaging boxes, bags and containers for medical transport. *Packaging Technology and Science*. 2018. Vol. 21, Is. 1. DOI: 10.1002/pts.773.

40. Subhedar M., Mahalle P., Pawar P. Smart IoT for Sustainable Development. Boca Raton : CRC Press, 2025. 338 p.

41. Taking Steps to Solve the Organ Transplant Crisis. *Health Matters*. 2021. 19 July. URL: <https://healthmatters.nyp.org/taking-steps-to-solve-the-organ-transplant-crisis/> (дата звернення: 17.02.2026)

42. Tiwari D., Prasad D., Guleria K., Ghosh P. A. IoT based Smart Healthcare Monitoring Systems: A Review. *2021 6th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC)*. 2021. P. 465–469. DOI: 10.1109/ISPCC53510.2021.9609386

43. U.S. surpassed 48,000 organ transplants in 2024. United Network for Organ Sharing (UNOS). 2025. 15 Jan. URL: <https://unos.org/media-resources/releases/u-s-surpassed-48000-organ-transplants-in-2024/> (дата звернення: 4.03.2026)

44. UM10204: I2C-bus specification and user manual. NXP Semiconductors. 2021. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf> (дата звернення: 17.02.2026)

45. White E. Making Embedded Systems: Design Patterns for Great Software. 2nd ed. O'Reilly Media, 2024. 425 p.

46. WHO Expert Committee on Specifications for Pharmaceutical Preparations: fifty-eighth report. *WHO Technical Report Series*, No. 1060. World Health Organization. 2025. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240108264> (дата звернення: 4.03.2026)

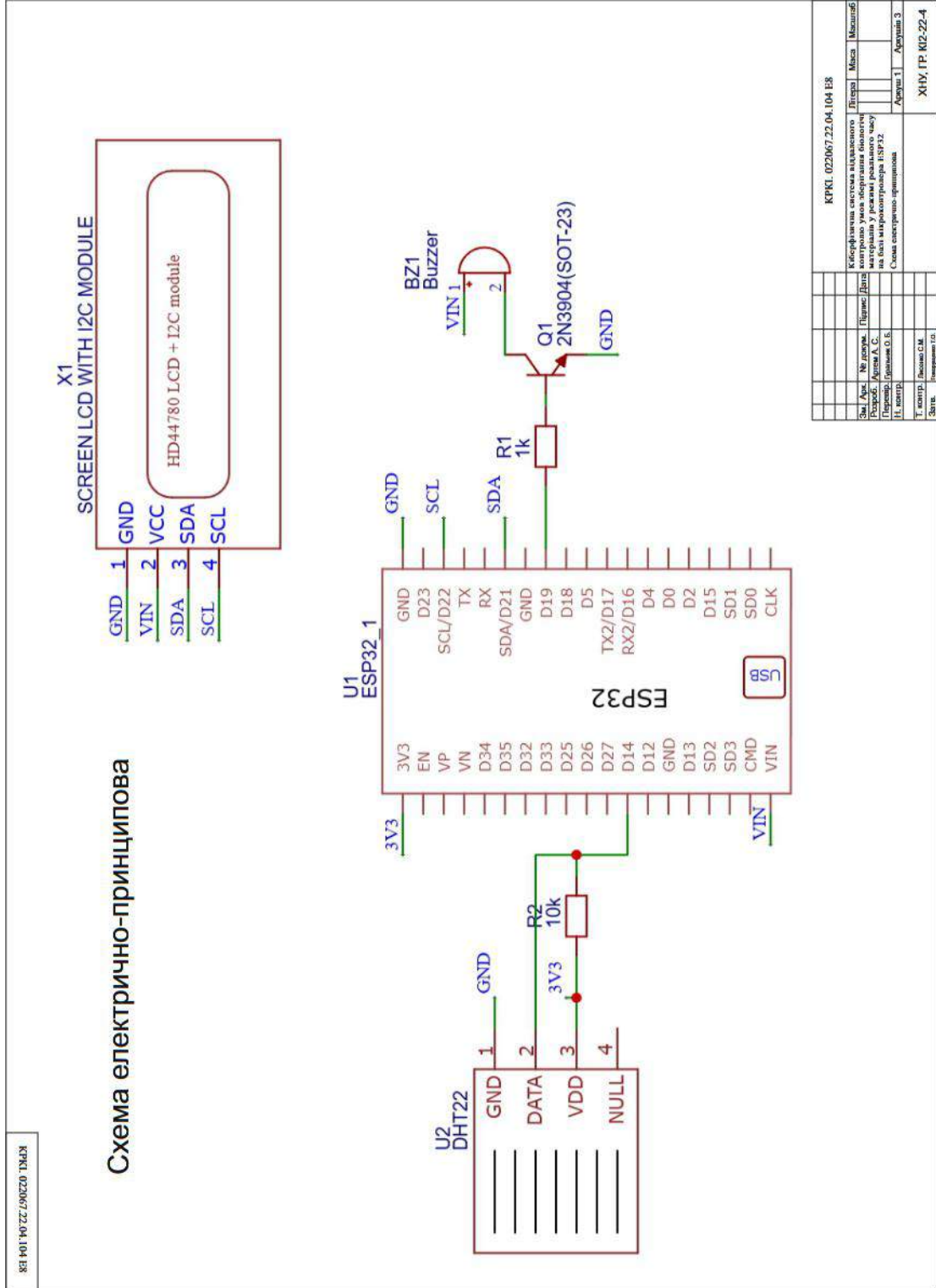
47. Wokwi guides and documentation URL: <https://docs.wokwi.com/> (дата звернення: 5.04.2026)

					КВРКІ. 022067.22.04.104.ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

Копія креслення «Схема електрично-принципова»



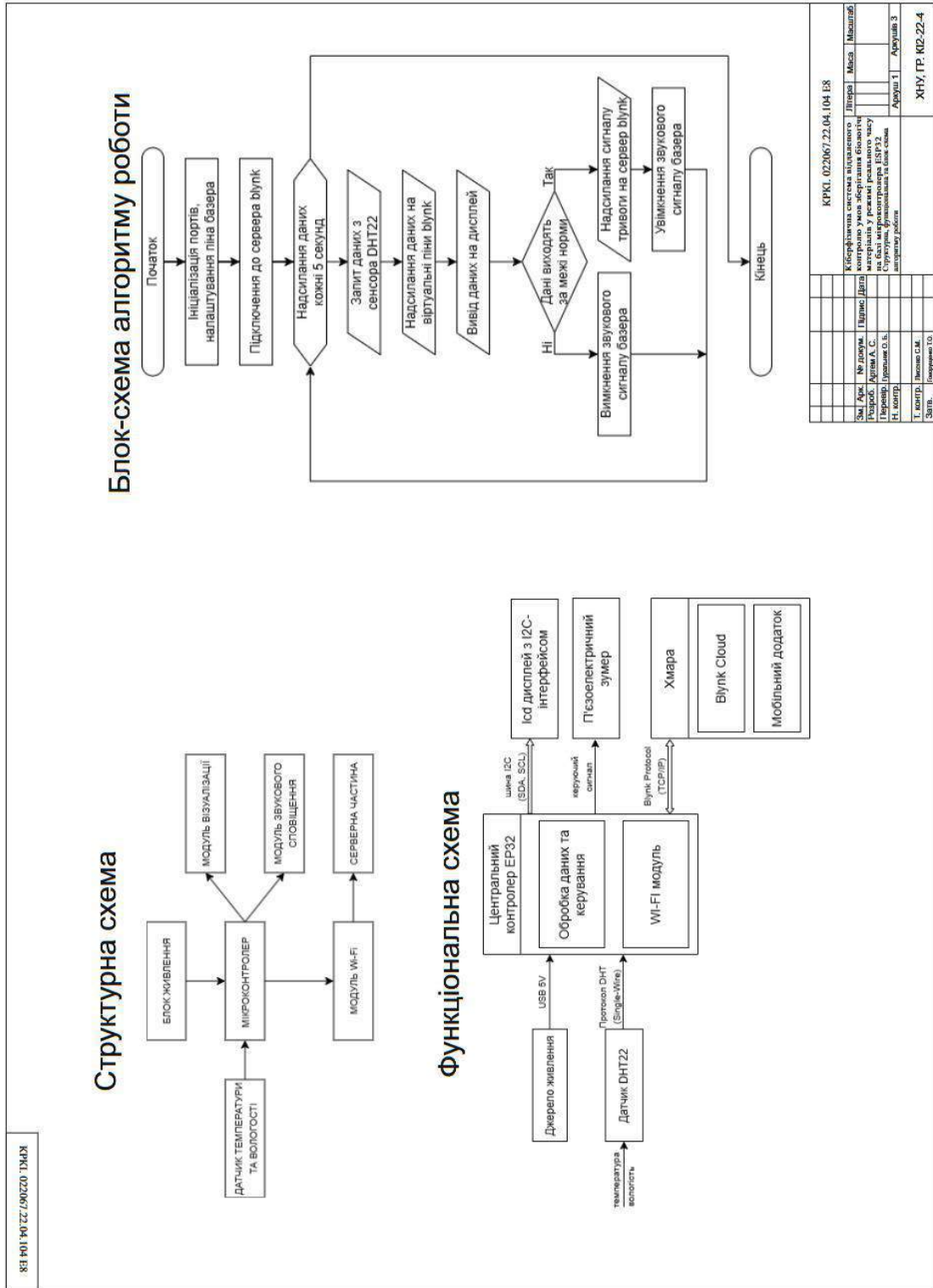
КРКЛ 022067.22.04.104 Е8

КРКЛ 022067.22.04.104 Е8			
Зм. Авт.	На посаду	Підпис:	Дата
Розроб:	Артема А. С.	Кіберфізична безпека підприємства	
Н. керів:	Григорук О. Б.	виготовлено згідно з технічними вимогами	
У. керів:	Бонівець Г.М.	на базі мікроконтролера ESP32	
Затв.	Програмист	Листопад	Месіць
		Август 1	Август 3
		ХНУ, ГР. КІЗ-22-4	

ДОДАТОК Б

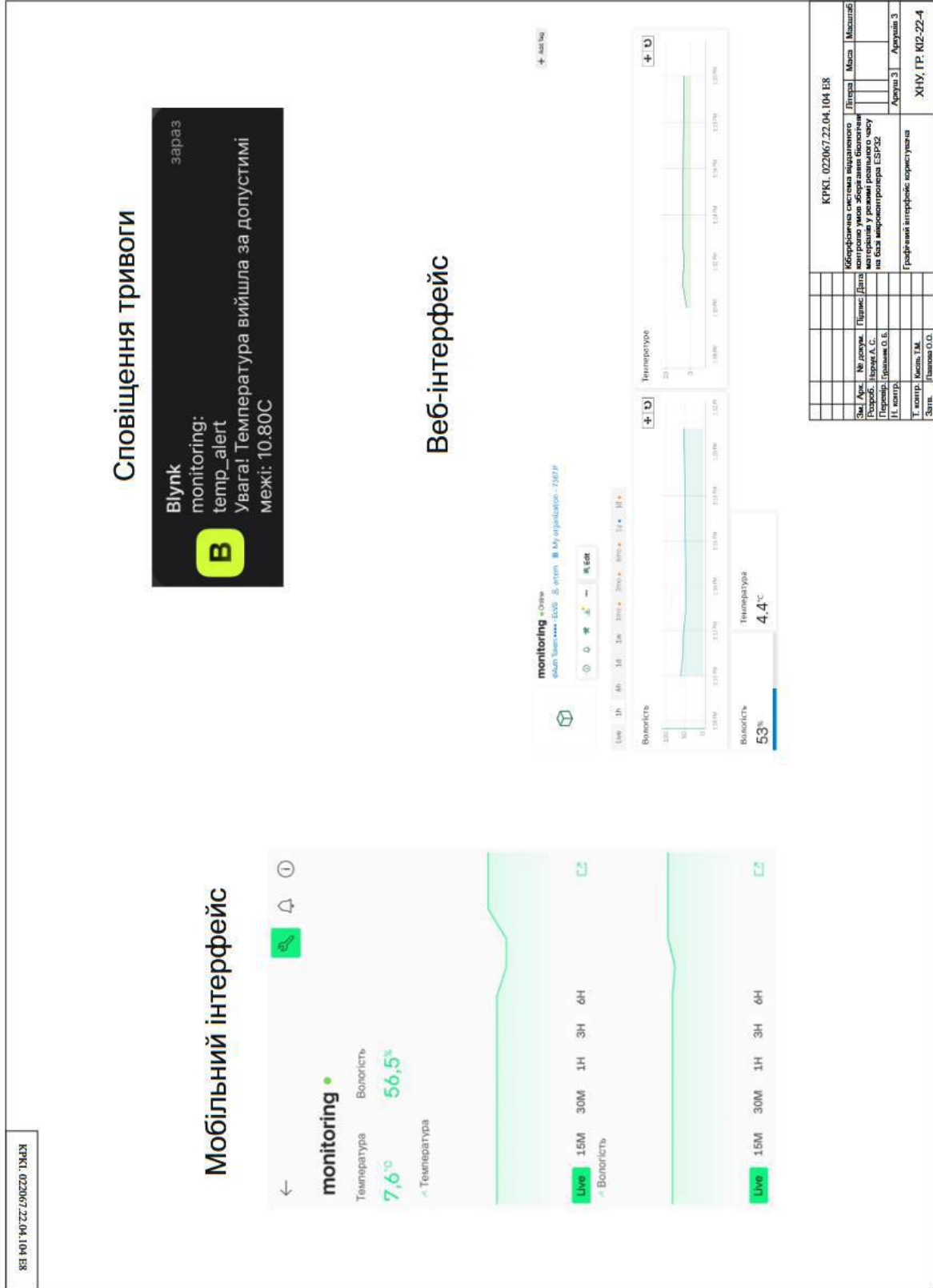
(обов'язковий)

Копія креслення «Структурна схема, функціональна схема та блок-схема алгоритму роботи»



ДОДАТОК В (обов'язковий)

Копія креслення «Графічний інтерфейс користувача»



ДОДАТОК Г (обов'язковий)

Лістинг коду до проекту

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL4FEjUXyEt"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "monitoring"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "Xks11oTMbSpEKcx5s0yoWpdXmuSbEcVS"

#define BLYNK_PRINT Serial

#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

char ssid[] = "Wokwi-GUEST";
char pass[] = "";

#define DHTPIN 14
#define DHTTYPE DHT22
#define BUZZER_PIN 19

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

BlynkTimer timer;
bool isTempAlertSent = false;
bool isHumAlertSent = false;

float last_t = -100.0;
float last_h = -100.0;

// зчитування та відправка даних
void sendSensorData() {
    float h = dht.readHumidity();
    float t = dht.readTemperature();

    if (isnan(h) || isnan(t)) {
        Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
        return;
    }

    // відправка даних якщо змінилися
    if (t != last_t) {
        Blynk.virtualWrite(V1, t);
        last_t = t;
    }
}
```

```

}

if (h != last_h) {
    Blynk.virtualWrite(V0, h);
    last_h = h;
}

// логіка сповіщення та баззера
bool alertActive = false;

if (t <= 2 || t >= 8) {
    alertActive = true;
    if (!isTempAlertSent) {
        Blynk.logEvent("temp_alert", String("Увага! Температура
вийшла за допустимі межі: ") + t + "C");
        isTempAlertSent = true;
        Serial.println("Temp alert sent to Blynk!");
    }
} else {
    isTempAlertSent = false;
}

if (h <= 35 || h >= 60) {
    alertActive = true;
    if (!isHumAlertSent) {
        Blynk.logEvent("hum_alert", String("Увага! Вологість
вийшла за допустимі межі: ") + h + "%");
        isHumAlertSent = true;
        Serial.println("Hum alert sent to Blynk!");
    }
} else {
    isHumAlertSent = false;
}

// керування зумером
if (alertActive) {
    digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH);
} else {
    digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
}

// вивід на LCD
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Temp: ");
lcd.print(t);
lcd.print(" C  ");

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Hum: ");
lcd.print(h);
lcd.print(" %  ");
}

```

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);

  pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);

  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("System starting...");

  dht.begin();

  Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass);

  lcd.clear();

  timer.setInterval(5000L, sendSensorData);
}

void loop() {
  Blynk.run();
  timer.run();
}
```

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Інформаційна система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із оптимізацією планування завдань

Автор Артем НОРЧУК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: Олександр ГУРАЛЬНИК

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 1,9%; та системою Anti-Plagiarism складає 0,72%, 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

Олександр ГУРАЛЬНИК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Норчуку Артему Сергійовичу

Тема: Кіберфізична система віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів у режимі реального часу на базі мікроконтролера ESP32

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 73

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка кіберфізичної системи віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів у режимі реального часу на базі мікроконтролера ESP32.

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

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено дослідження предметної області та виконано постановку задачі. Розглянуто проблематику трансплантації у сучасній медицині, значення контролю температури та вологості під час зберігання і транспортування біологічних матеріалів, проаналізовано вплив часу холодової ішемії на життєздатність донорських органів. Також здійснено аналіз існуючих професійних і бюджетних рішень для транспортування та зберігання біоматеріалів, зокрема спеціалізованих систем Paragonix SherpaPak, TransMedics OCS Heart та пасивних ізотермічних контейнерів. Окрему увагу приділено вибору апаратної платформи, зокрема мікроконтролера ESP32, датчика DHT22 та засобів локальної візуалізації даних.

У другому розділі кваліфікаційної роботи виконано проектування кіберфізичної системи віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів. Розроблено загальну архітектуру системи та описано принцип її функціонування. Обґрунтовано вибір основних апаратних компонентів. Спроектовано апаратну структуру вузла моніторингу, програмну архітектуру та алгоритми оброблення даних. Також

розглянуто підсистему передавання, збереження і візуалізації даних із використанням хмарної платформи Blynk, веб-інтерфейсу та мобільного застосунку.

У третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано програмно-апаратну реалізацію, моделювання та тестування системи. Здійснено моделювання системи в середовищі Wokwi, що дозволило перевірити взаємодію мікроконтролера ESP32 із сенсором DHT22, дисплеєм LCD1602 та звуковим оповіщувачем. Розроблено програмне забезпечення вузла моніторингу, реалізовано підключення до Wi-Fi, передавання даних до Blynk, логіку аварійних сповіщень і механізм запобігання надлишковому надсиланню повідомлень. Описано створення веб-інтерфейсу та мобільного застосунку для віддаленого моніторингу. Проведено попереднє тестування в середовищі моделювання, виконано апаратну реалізацію фізичного прототипу та перевірено його працездатність у реальних умовах. За результатами тестування підтверджено коректність роботи системи, її здатність зчитувати мікрокліматичні параметри, відображати їх локально, передавати до хмарної платформи та реагувати на аварійні ситуації.

4. Позитивні сторони роботи: робота має прикладне значення; поєднання локального контролю параметрів із віддаленим моніторингом через хмарну платформу.

5. Негативні сторони роботи: обмежена увага до довготривалої перевірки точності вимірювань.

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

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


8. Інші зауваження: зауважень немає.

9. Оцінка дипломної роботи: відмінно

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

Степан Миколайович Засеєвський PhD, ст. викладач К. Відербергівки

“28” 05 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Артем НОРЧУК

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-4

ЗАЯВА

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

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

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

1 травня 2026 року



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: Артем НОРЧУК

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів у режимі реального часу на базі мікроконтролера ESP32

Експерт: Олександр ГУРАЛЬНИК

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 1.9%

Коефіцієнт подібності 2: 0.72%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 6

Дата створення звіту: 2026-05-20 06:27:22.0

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:

2026-05-20

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

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

Максимальне співпадіння з одним документом 16.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Помилоч в документах: 10%**

ID: 271761 Назва: БКР Кіберфізична система віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів у режимі реального часу на базі мікроконтролера ESP32 Додано в БД: 2026-05-20 Автора: Артем НОРЧУК Керівники: Олександр ГУРАЛЬНИК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	101448	755	17511 (17%)	161 (21%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
269545	Назва: Звіт з ПДП Кіберфізична система віддаленого контролю умов зберігання біологічних матеріалів у режимі реального часу на базі мікроконтролера ESP32 Додано в БД: 2026-02-26 Автора: Норчук А. С Керівники: Гнатчук Є.Г. Консультанти: Опоненти:	16163 (16.0%)	145 (19.0%)