

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Галузь знань _____ 12 – Інформаційні технології _____

Спеціальність _____ 123 – Комп'ютерна інженерія _____

на тему «Кіберфізична система моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву»

КвРКІІ. 302191.23.02.50 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-23-2



Підпис

Богдан ТРЕТ'ЯКОВ
Ім'я, прізвище

Керівник _____ к.т.н. доцент _____
Науковий ступінь, вчене звання


Підпис

Марія КАПУСТЯН
Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри КІС, доктор філософії, доцент
Ольга ПАВЛОВА
28 05 2025 р. 

Хмельницький, 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

« 01 » 09 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Богдану ТРЕТ'ЯКОВУ

Прізвище, ім'я студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву

Керівник проекту (роботи) Марія КАПУСТЯН, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 08.01.2025 №8

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Аналіз відомих методів збору та обробки даних у системах моніторингу мікроклімату архівів



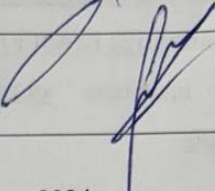
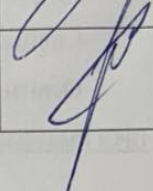
Моделювання процесу збору та обробки даних у кіберфізичній системі моніторингу мікроклімату

Метод збору, обробки та передачі даних у кіберфізичній системі моніторингу вологості та температури

Інформаційна технологія реалізації збору, збереження та аналізу мікрокліматичних параметрів у сховищі архіву

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

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Сергій ЛИСЕНКО, професор кафедри КПС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 02 » 09 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	02.09.2024	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2024	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	01.11.2024	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.12.2024	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.2025	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.02.2025	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2025	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2025	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2025	

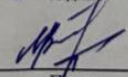
Студент


Підпис

Богдан ТРЕТ'ЯКОВ

Ім'я, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Марія КАПУСТЯН

Ім'я, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи: Кіберфізична система моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву

Автор роботи: Трет'яков Б.Р., студент групи КІ2м-23-2

Керівник роботи: Капустян М.В. кандидат технічних наук, доцент кафедри систем і захисту інформації.

Пояснювальна записка: 85 с., 15 рис., 0 табл., 2 дод., 80 джерел.

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ МІКРОКЛІМАТУ, ВОЛОГІСТЬ, ТЕМПЕРАТУРА, АРХІВНЕ СХОВИЩЕ, СЕНСОР DHT22, ESP8266, ОБРОБКА ДАНИХ.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу параметрів мікроклімату у приміщеннях архівного зберігання.

Предметом дослідження є методи та засоби реалізації кіберфізичної системи контролю температури та вологості на базі мікроконтролера ESP8266 та відповідних сенсорів.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та реалізація кіберфізичної системи для безперервного моніторингу вологості та температури у архівному сховищі з можливістю віддаленого доступу до даних та генерації попереджень при виході параметрів за допустимі межі.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи: аналізу технічної літератури, моделювання в середовищі Fritzing, розробки алгоритмів обробки даних у реальному часі, а також методи нечіткої логіки для формалізації граничних станів.

Наукова новизна отриманих результатів: набув подальшого розвитку метод використання сенсорів у складі автономної кіберфізичної системи.

На основі проведених досліджень розроблена архітектура і модель кіберфізичної системи, яка забезпечує збір, збереження, обробку та візуалізацію даних у реальному часі з реалізацією логіки сповіщень.

Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості впровадження запропонованої системи в реальні архівні сховища з метою автоматизованого контролю мікроклімату, що сприяє підвищенню збереженості документів та зниженню витрат на обслуговування інфраструктури.

У розділі 1 кваліфікаційної роботи проведено аналіз існуючих проблем та рішень у сфері моніторингу мікроклімату в архівних сховищах. Розглянуто сучасні методи та технології контролю температури і вологості, а також приклади реалізованих систем моніторингу. У розділі 2 здійснено постановку задачі розробки власної кіберфізичної системи моніторингу параметрів мікроклімату, розроблено математичну модель КФС, обґрунтовано вибір мікроконтролера, сенсорів температури та вологості, джерел живлення, засобів комунікації та протоколів передачі даних. У розділі 3 розроблено методи збору, обробки, збереження та аналізу даних у реальному часі, що є основою функціонування запропонованої кіберфізичної системи. У розділі 4 виконано моделювання та побудову апаратної частини системи, спроектовано з'єднання компонентів, змодельовано роботу системи в середовищі Fritzing, а також описано принципи її роботи у реальних умовах архівного сховища

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	5
ВСТУП	6
1.АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У ГАЛУЗІ МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ В АРХІВАХ	9
1.1. Значення контролю вологості та температури у сховищах архівів.....	9
1.2. Огляд сучасних методів та технологій моніторингу мікроклімату.....	11
1.3. Огляд сучасних систем моніторингу.....	14
1.4 Висновки.....	22
2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ, МОДЕЛЬ КФС ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ КОМПОНЕНТІВ	23
2.1. Постановка завдання розробки власної системи та модель КФС.....	23
2.2. Архітектура та структура системи.....	31
2.3 Вибір мікроконтролера.....	33
2.4. Вибір сенсорів температури та вологості.....	42
2.5. Вибір джерела живлення та засобів комунікації.....	46
2.6. Протокол передачі даних і хмарне зберігання.....	55
2.7. Висновки.....	58
3. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ЗБОРУ, ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ	60
3.1. Алгоритм збору та обробки даних у реальному часі.....	60
3.2 Попередня фільтрація та нечіткий аналіз даних.....	66
3.3. Методи збереження та аналізу даних.....	67
3.4. Реалізація виводу даних та інтерфейсу користувача.....	72
3.5. Висновки.....	77

4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ	79
4.1. Схема з'єднання компонентів.....	79
4.2. Моделювання роботи системи в середовищі Fritzing.....	79
4.3. Принцип роботи системи в реальному часі.....	81
4.4. Особливості розміщення датчиків у реальному сховищі.....	83
4.5. Висновки.....	86
ВИСНОВКИ	88
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	90
ДОДАТОК А Копія статті у науково-практичному виданні.....	99
ДОДАТОК Б Презентація до захисту кваліфікаційної роботи.....	102

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

КФС - Кіберфізична система

ШІ - Штучний інтелект

IoT - Інтернет речей (Internet of Things)

PCM - Protection Circuit Module (модуль схеми захисту)

BMS - Battery Management System (мікросхема захисту акумулятора)

SPI - Serial Peripheral Interface (послідовний периферійний інтерфейс)

СРЧ - Система реального часу

ВСТУП

Сучасні архіви зберігають унікальні документи та матеріали, які мають велику історичну, наукову та культурну цінність. Архівні матеріали можуть бути виконані на папері, пергаменті чи інших носіях, які чутливі до зовнішніх впливів. Висока вологість може спричинити розвиток грибків і бактерій, які руйнують папір та чорнило. Надто сухе повітря, навпаки, може призвести до висихання і крихкості документів, що ускладнює їхню подальшу обробку та використання. Коливання температури також негативно впливають на фізико-хімічні властивості архівних матеріалів, прискорюючи процеси старіння. Звичайні методи контролю, такі як ручне вимірювання вологості та температури, не завжди є ефективними, оскільки не забезпечують постійного моніторингу та швидкого реагування. Тому важливо застосовувати сучасні автоматизовані системи, які можуть відстежувати параметри мікроклімату в режимі реального часу.

Використання технологій Інтернету речей (IoT) та кіберфізичних систем дозволяє підвищити точність вимірювань та оперативність управління кліматичними умовами. Такі рішення можуть бути інтегровані з системами охорони, сповіщення та автоматичного регулювання мікроклімату. Завдяки цьому архіви можуть більш ефективно зберігати свої фонди та запобігати їхньому передчасному псуванню. У зв'язку з цим актуальною є розробка кіберфізичної системи моніторингу, яка забезпечуватиме постійний контроль і підтримку оптимальних умов у сховищі архіву. Дана система дозволяє не лише отримувати поточні дані про стан мікроклімату, а й прогнозувати можливі ризики на основі історичних показників. Наприклад, за допомогою аналізу зібраних даних можна виявити сезонні коливання вологості або критичні відхилення, які потребують негайного реагування. Крім того, такі системи можуть автоматично передавати сигнали тривоги у разі виходу параметрів за допустимі межі. Це особливо важливо для великих архівних комплексів, де ручний контроль кожного приміщення є вкрай складним завданням. Автоматизація процесів моніторингу сприяє зменшенню навантаження на персонал та підвищенню ефективності управління архівними фондами. Деякі сучасні кіберфізичні системи можуть бути інтегровані з системами

кондиціонування та вентиляції для автоматичного регулювання параметрів повітря. Використання таких технологій значно подовжує термін збереження архівних документів, мінімізуючи вплив несприятливих умов. Крім того, зібрані дані можуть використовуватися для розробки довгострокових стратегій збереження документів. У майбутньому подібні системи можуть бути доповнені штучним інтелектом для ще більш точного прогнозування змін мікроклімату та запобігання ризикам.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення кіберфізичної системи, що забезпечує безперервний моніторинг температури та вологості у сховищі архіву з віддаленим доступом до даних у реальному часі та оптимізованим енергоспоживанням сенсорних вузлів. Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- 1) Аналіз існуючих апаратно-програмних рішень для контролю мікроклімату
- 2) Моделювання процесу моніторингу температури й вологості
- 3) Розроблення методу збору, обробки та віддаленого керування даними
- 4) Створення архітектури кіберфізичної системи

Об'єктом дослідження є процес моніторингу температури та вологості в архівних сховищах.

Предметом дослідження є метод і кіберфізична система моніторингу зазначених параметрів на основі бездротової сенсорної мережі.

Наукова новизна отриманих результатів: Вдосконалено архітектуру кіберфізичної системи моніторингу мікроклімату архівів, яка на відміну від відомих аналогів:

1. знижує витрати на розгортання завдяки використанню недорогих модулів ESP8266 та DHT22;
2. спрощує експлуатацію завдяки автоматичній калібровці та веб-інтерфейсу без встановлення додаткового ПЗ;
3. забезпечує високоточний, безперервний збір і збереження даних у режимі реального часу з можливістю адаптивної зміни частоти вимірювань для економії енергії.

Практична значущість отриманих результатів: розроблена кіберфізична система дозволяє архівним установам оперативно відстежувати критичні відхилення температури чи вологості, зменшуючи ризик псування документів і витрати на аварійне відновлення. Запропонований підхід може бути масштабований для музейних фондів, бібліотек та інших об'єктів культурної спадщини.

Методи дослідження. Для виконання цілей, визначених у роботі, застосовано засади системного аналізу, що передбачають ієрархічне структурування та декомпозицію функцій кіберфізичної системи, положення загальної теорії систем і моделювання процесів тепломасообміну в архівному середовищі, теоретико-множинні підходи до формалізації інформаційних потоків

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано тези у Збірнику наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024».

1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У ГАЛУЗІ МОНІТОРИНГУ МІКРОКЛІМАТУ В АРХІВАХ

1.1. Значення контролю вологості та температури у сховищах архівів

Фізичний стан документів, що зберігаються у сховищах архівів, значною мірою залежить від параметрів мікроклімату, зокрема рівня вологості та температури. Будь-які відхилення від оптимальних умов можуть спричиняти незворотні процеси деградації матеріалів. З часом під впливом несприятливого середовища відбуваються хімічні та біологічні зміни, які можуть призвести до втрати інформації або фізичного руйнування документів. Особливо це актуально для носіїв, виготовлених з паперу, тканини, пергаменту та інших органічних матеріалів, що є вразливими до зовнішніх впливів [1].

Одним із головних факторів ризику для архівних матеріалів є висока відносна вологість. Паперові документи легко вбирають вологу з повітря, що може спричинити деформацію, появу хвиль і втрату механічної міцності. Крім того, вологе середовище сприяє розвитку мікроорганізмів, зокрема плісняви та бактерій, які не лише пошкоджують структуру паперу, але й залишають на ньому темні плями. Деякі види грибків виділяють ферменти, здатні розкладати целюлозу, що пришвидшує процес руйнування документів [2].

Зворотною проблемою є надмірна сухість повітря, яка також негативно впливає на збереження архівних матеріалів. За низької вологості папір стає ламким, а чорнила та барвники можуть втрачати насиченість. Дефіцит вологи в матеріалах може викликати їхнє розтріскування, що особливо небезпечно для старих рукописів та друківаних видань. Шкіряні палітурки книг також схильні до висихання, що може призводити до їхнього розшарування та втрати гнучкості.

Температурні умови відіграють не менш важливу роль у збереженні архівних матеріалів. Високі температури пришвидшують хімічні реакції у волокнах паперу, спричиняючи його пожовтіння та крихкість. Ультрафіолетове випромінювання, яке часто супроводжує підвищенні температури, призводить до вицвітання чорнил і погіршення якості друківаного тексту. Крім того, перегрів може пошкодити не

лише традиційні носії, але й магнітні та оптичні диски, що використовуються для цифрового збереження даних. Різкі температурні коливання створюють додаткові загрози для архівних матеріалів. Зміни температури можуть викликати утворення конденсату на поверхні документів, що сприяє їхньому зволоженню та розвитку грибкових уражень. Перепади температури також можуть спричиняти механічну напругу у матеріалах, особливо у багат шарових структурах, що призводить до їхнього поступового розшарування або розтріскування [3].

Проблема мікроклімату стосується не лише історичних документів, а й сучасних носіїв інформації. Наприклад, магнітні стрічки, жорсткі диски та флеш-пам'ять можуть зазнавати пошкоджень при значних температурних коливаннях або підвищеній вологості. Оптичні диски, такі як CD і DVD, вразливі до перегріву, що може спричинити втрату даних. Таким чином, підтримання стабільного клімату є критично важливим не лише для традиційних архівних фондів, але й для цифрових колекцій [4–6].

Традиційні методи моніторингу мікроклімату передбачають використання термометрів, гігрометрів та інших приладів для періодичного вимірювання параметрів середовища. Однак такі підходи не забезпечують безперервного контролю, що може призводити до запізненого реагування на зміни умов. Крім того, ручний збір даних є трудомістким і не завжди точним, оскільки залежить від людського фактора.

Сучасні автоматизовані системи моніторингу дозволяють забезпечити постійний контроль за температурою та вологістю в архівних приміщеннях. Використання датчиків і цифрових реєстраторів дозволяє отримувати дані в реальному часі та аналізувати їх для виявлення потенційних загроз. Інтеграція таких систем із системами кондиціонування та вентиляції дає можливість автоматично коригувати параметри мікроклімату, що значно підвищує ефективність збереження документів. Застосування кіберфізичних технологій у сфері архівної справи відкриває нові можливості для оптимізації процесів збереження документів. Використання штучного інтелекту та машинного навчання може допомогти прогнозувати зміни мікроклімату на основі історичних даних і

вживати заходів для запобігання критичним відхиленням. Такі підходи не лише підвищують рівень безпеки архівних фондів, а й сприяють зменшенню витрат на їхнє обслуговування [7–9].

Таким чином, мікрокліматичні умови відіграють ключову роль у збереженні архівних матеріалів, а їхній контроль є важливим завданням для архівних установ. Використання сучасних технологій моніторингу дозволяє ефективно підтримувати стабільне середовище, мінімізувати ризики пошкодження документів і забезпечити їхнє довготривале збереження [10–13].

1.2. Огляд сучасних методів та технологій моніторингу мікроклімату

Збереження архівних матеріалів вимагає постійного контролю за параметрами мікроклімату, що впливає на фізико-хімічний стан документів. Історично архівісти використовували традиційні методи контролю, які передбачали періодичне вимірювання температури та вологості за допомогою механічних або електронних приладів. Проте такі підходи не завжди гарантують оперативне реагування на критичні зміни мікроклімату, оскільки вони залежать від людського фактора. Відсутність безперервного моніторингу може спричинити ситуації, коли пошкодження матеріалів стає помітним лише на пізніх етапах. Тому в сучасній практиці архівного зберігання все частіше впроваджуються автоматизовані системи контролю, що дозволяють не лише фіксувати параметри середовища, а й регулювати їх у режимі реального часу [14–17].

Ручні методи контролю мікроклімату довгий час залишалися основним способом оцінки умов зберігання. Використовувалися традиційні гігрометри, термометри та психрометри, які потребували регулярного зчитування показників та ведення архівних записів. Такі методи мали значні недоліки, зокрема не точність вимірювань, залежність від людського спостереження та обмежену частоту перевірок. Оскільки зміни температури і вологості можуть відбуватися досить швидко, особливо у приміщеннях з недостатньою вентиляцією або поганою ізоляцією, традиційні підходи виявилися неефективними у забезпеченні

стабільного мікроклімату. З часом стало очевидним, що для якісного зберігання архівних матеріалів необхідно впроваджувати технологічні рішення, які забезпечують постійний контроль та миттєве реагування на зміни [18–22].

Одним із найбільш поширених методів автоматизації контролю мікроклімату стало використання електронних логерів даних, які здатні записувати показники температури і вологості з певною періодичністю. Дані, отримані такими пристроями, можуть бути проаналізовані за допомогою комп'ютерного програмного забезпечення, що дозволяє виявити критичні відхилення від нормативних значень. Однак самі по собі логери не вирішують проблеми підтримки стабільного мікроклімату, оскільки вони лише реєструють зміни, а не запобігають їм. Для ефективного контролю необхідно інтегрувати такі пристрої в комплексні системи моніторингу та управління, які можуть взаємодіяти з іншими елементами інфраструктури архіву, зокрема з системами вентиляції та кондиціонування повітря [23–27].

Розвиток інформаційних технологій сприяв появі більш складних систем контролю мікроклімату, які базуються на принципах Інтернету речей (IoT). Такі системи складаються з мережі датчиків, які передають інформацію до централізованої платформи, де вона аналізується у реальному часі. Завдяки цьому можна не лише відстежувати поточний стан мікроклімату, а й прогнозувати його зміни на основі історичних даних. Додатковою перевагою є можливість віддаленого контролю, що дозволяє архівістам отримувати інформацію про стан приміщень через спеціальні веб-інтерфейси або мобільні додатки. У деяких випадках такі системи можуть бути інтегровані з механізмами автоматичного регулювання параметрів повітря, що значно підвищує ефективність управління мікрокліматом у сховищах. Існуючі автоматизовані системи моніторингу мікроклімату можна поділити на дві основні категорії: автономні та інтегровані. Автономні системи зазвичай складаються з датчиків та логерів даних, які зберігають інформацію локально або передають її у хмарне сховище для подальшого аналізу. Такі рішення є зручними для невеликих архівів, де немає потреби у складній інфраструктурі керування мікрокліматом. Інтегровані системи,

навпаки, можуть працювати у зв'язці з вентиляційним обладнанням, що дозволяє автоматично регулювати параметри повітря залежно від отриманих даних. Наприклад, при перевищенні допустимого рівня вологості система може активувати осушувач повітря, а при зниженні температури - вмикати обігрівачі [28–32].

Деякі сучасні системи контролю використовують алгоритми штучного інтелекту для аналізу зібраних даних та прогнозування можливих ризиків. Такі алгоритми здатні виявляти закономірності у зміні параметрів мікроклімату та на основі цього прогнозувати майбутні відхилення. Наприклад, якщо система фіксує поступове підвищення рівня вологості у певні місяці року, вона може попередити персонал про можливу загрозу появи плісняви та рекомендувати відповідні коригувальні заходи. Це дозволяє не лише реагувати на зміни, а й запобігати їхнім негативним наслідкам ще до того, як вони стануть критичними.

Використання хмарних технологій у моніторингу мікроклімату відкриває нові можливості для ефективного управління умовами зберігання архівних матеріалів. Дані з датчиків можуть автоматично передаватися у централізовані сховища, де вони доступні для аналізу у будь-який момент. Це значно спрощує процес управління великими архівними комплексами, оскільки дозволяє отримувати узагальнену інформацію про стан усіх приміщень. Крім того, такі системи можуть взаємодіяти з іншими елементами інфраструктури архіву, такими як системи відеоспостереження та сигналізації, що підвищує загальний рівень безпеки зберігання документів. Незважаючи на значний прогрес у розробці систем моніторингу, існують певні виклики, які необхідно вирішити для забезпечення максимально ефективного контролю мікроклімату. Однією з головних проблем є вартість таких рішень, особливо для малих архівних установ, які мають обмежений бюджет. Крім того, впровадження складних автоматизованих систем потребує навчання персоналу, що також є додатковим фінансовим та організаційним викликом. Проте, враховуючи значну роль мікроклімату у збереженні документів, інвестиції у такі системи виправдані, оскільки дозволяють мінімізувати ризики пошкодження цінних матеріалів [33–37].

1.3. Огляд сучасних систем моніторингу

Кіберфізичні системи моніторингу стали важливим інструментом для забезпечення ефективного контролю параметрів навколишнього середовища в різних сферах діяльності, зокрема в архівах, бібліотеках та музеях. Це системи, які використовують комбінацію сенсорів, датчиків, мережевих технологій та програмного забезпечення для здійснення постійного контролю та автоматичного коригування умов зберігання. Вони здатні обробляти великі обсяги даних і на їх основі приймати рішення в реальному часі, що має значний вплив на збереження важливих документів та матеріалів.

Однією з основних переваг кіберфізичних систем моніторингу є їх здатність автоматизувати процеси управління мікрокліматом. Вони дозволяють здійснювати контроль за температурою, вологістю, рівнем освітленості, а також за наявністю шкідливих газів або інших небезпечних факторів. Завдяки цьому можна забезпечити оптимальні умови для збереження архівних матеріалів без необхідності постійного втручання персоналу. Більшість сучасних систем моніторингу побудовані на принципах Інтернету речей (IoT). Це дозволяє створювати масштабовані та гнучкі рішення, які можуть працювати на основі чисельних датчиків, підключених до єдиної мережі. Зібрані дані надходять до централізованої платформи для обробки, аналізу та збереження, а також можуть бути доступні через мобільні додатки або веб-інтерфейси для операторів [38–42].

Для забезпечення точності моніторингу важливою складовою є вибір відповідних сенсорів. Вони повинні мати високу точність вимірювання та здатність працювати в умовах, що можуть змінюватися, наприклад, при різних рівнях вологості або температури. Важливо, щоб датчики мали достатньо високу надійність і могли функціонувати без перебоїв протягом тривалого часу. Один з основних елементів таких систем - це здатність реагувати на зміни в режимі реального часу. Коли один з параметрів, таких як температура або вологість, виходить за межі встановлених норм, система може негайно повідомити операторів

через сповіщення або навіть самостійно вжити заходів для коригування ситуації. Наприклад, якщо система виявить високий рівень вологості, вона може активувати осушувач повітря для зниження рівня вологості до оптимальних значень. Однією з найважливіших функцій КФС є можливість збору та аналізу історичних даних, що дозволяє спрогнозувати зміни кліматичних умов. Зібрані за кілька років дані можуть бути використані для виявлення сезонних коливань температури та вологості, а також для аналізу трендів. На основі таких прогнозів можна розробити стратегії управління мікрокліматом на довгострокову перспективу [43–47].

Крім того, КФС забезпечують високий рівень безпеки. Багато з них інтегруються з системами відеоспостереження, доступу та охорони, що дозволяє забезпечити комплексний підхід до захисту архівних матеріалів. У разі будь-якого порушення режиму роботи або спроби несанкціонованого доступу, система може надіслати сигнал тривоги та вжити необхідних заходів для запобігання шкоді.

Особливо важливою є інтеграція КФС з іншими автоматизованими системами будівель. Це може бути система кондиціонування, вентиляції або осушення, яка автоматично регулюється в залежності від даних з датчиків. Автоматизація таких процесів значно зменшує людську помилку і забезпечує підтримку оптимальних умов навіть в умовах змінної вологості та температури.

Однак одним з основних викликів у розробці та експлуатації таких систем є надійність і точність сенсорів. Погані або неякісні датчики можуть призвести до помилкових вимірювань, що може в свою чергу вплинути на ефективність всієї системи. Тому важливо використовувати тільки перевірені та сертифіковані компоненти, а також проводити регулярні перевірки та калібрування системи.

До того ж, існують проблеми з масштабуванням таких систем на великі об'єкти. В разі наявності великої кількості датчиків, виникає необхідність у високопродуктивних обчислювальних потужностях для обробки великих обсягів даних. Окрім того, створення та підтримка мережі таких датчиків може бути досить дорогим процесом, що ускладнює впровадження таких систем в малих або середніх архівах [48–52].

Ще однією важливою особливістю сучасних КФС є їх здатність інтегруватися з технологіями штучного інтелекту та машинного навчання. Це дозволяє не лише здійснювати автоматичне коригування параметрів клімату, а й прогнозувати можливі проблеми на основі аналізу великих обсягів історичних даних. Машинне навчання дозволяє системам не тільки реагувати на зміни, але й адаптувати свої стратегії управління мікрокліматом залежно від конкретних умов.

Існуючі системи також забезпечують збереження і архівування всіх даних про кліматичні умови. Це не лише дозволяє здійснювати постійний моніторинг, але й надає можливість для ретроспективного аналізу та коригування помилок або недоліків у функціонуванні системи. Завдяки такій можливості, архіви можуть зберігати точні відомості про всі умови зберігання документів протягом тривалого часу [53–57].

До важливих функцій КФС відносять також можливість віддаленого моніторингу та керування системою. Завдяки використанню хмарних технологій, операторам не потрібно фізично перебувати на місці для отримання даних або для виконання налаштувань. Всі дані можна переглядати через веб-інтерфейс або мобільний додаток, що робить систему доступною з будь-якої точки світу.

Системи моніторингу можуть бути також оснащені алгоритмами для оптимізації енергоспоживання. Вони можуть аналізувати поточні умови в приміщенні та визначати, чи можна знизити споживання енергії без шкоди для збереження документів. Наприклад, при зниженні рівня вологості або температури до оптимальних значень система може зменшити роботу кондиціонерів або вентиляційних установок, що дозволяє економити енергію [58–62].

Важливою складовою таких систем є безпека даних. КФС часто працюють з чутливою інформацією, тому забезпечення конфіденційності та захисту даних від зловмисників є важливим аспектом. Це вимагає впровадження сучасних протоколів шифрування та захисту інформації для уникнення витоку даних.

Однією з перспективних областей розвитку є створення бездротових сенсорів нового покоління, які можуть здійснювати моніторинг більш широкого спектру параметрів. Ці сенсори повинні мати більшу точність та здатність до роботи в

екстремальних умовах, таких як низькі температури або висока вологість. Вони дозволяють зробити систему ще більш гнучкою та ефективною у великих архівних комплексах [63–67].

Існуючі КФС можуть використовувати різні методи передачі даних, такі як Wi-Fi, ZigBee, LoRaWAN або мобільні мережі. Вибір конкретного методу залежить від вимог до швидкості передачі даних, масштабів об'єкта та наявності інфраструктури. Наприклад, для великих архівних комплексів, що займають кілька приміщень, оптимальним варіантом є використання технологій, що дозволяють створювати великі бездротові мережі з низьким споживанням енергії, як LoRaWAN або ZigBee.

LoRaWAN є однією з найпопулярніших технологій для побудови мереж Інтернету речей, оскільки вона дає змогу ефективно з'єднувати пристрої на великих відстанях за допомогою бездротових каналів зв'язку. Завдяки цьому, LoRaWAN набув популярності в таких сферах, як сільське господарство, екологічний моніторинг, управління містами, а також для різних промислових застосувань. Одна з основних характеристик цієї технології - це можливість покриття великих територій з обмеженим споживанням енергії. Пристрої на основі LoRaWAN здатні працювати місяцями чи навіть роками без необхідності заряджати свої батареї, що робить її дуже привабливою для віддалених або важкодоступних локацій. Система LoRaWAN використовує технологію LoRa для забезпечення широкого діапазону передачі даних (Рис. 1.1). LoRa - це фізичний рівень, який використовує радіочастотні спектри в діапазонах, що не потребують ліцензії, зокрема, в діапазоні 868 МГц або 915 МГц, в залежності від регіону. Завдяки цьому, LoRaWAN може використовувати дешеві радіомодулі для зв'язку з іншими пристроями. Кожен пристрій у мережі може надсилати дані через шлюз до сервера, де вони обробляються та аналізуються. Мережа LoRaWAN може включати в себе десятки чи навіть сотні тисяч пристроїв, кожен з яких може працювати в різних умовах і мати різні потреби щодо пропускну здатності та енергоспоживання.

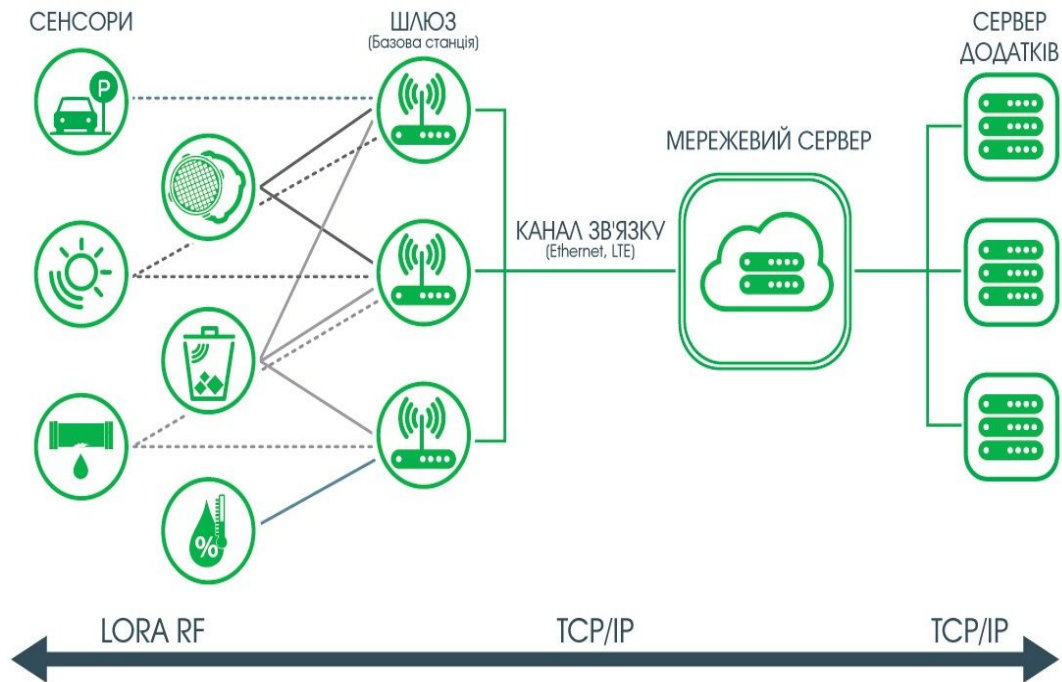


Рисунок 1.1. - Схема типової мережі LoRaWAN [72]

Однією з важливих особливостей LoRaWAN є його здатність працювати в умовах значних перешкод, таких як міські будівлі, лісисті місцевості чи навіть підземні приміщення. Завдяки спеціальному способу модуляції сигналу, LoRaWAN може забезпечити стабільний зв'язок на відстані кількох кілометрів у міських умовах і десятків кілометрів в сільській місцевості, де немає значних перешкод. Залежно від топографії, LoRaWAN може працювати на відстані від 2 до 15 км в містах і до 50 км в сільській місцевості. Для досягнення великої дальності передачі даних LoRaWAN використовує низькошвидкісну передачу інформації, що ідеально підходить для застосувань, де не потрібна велика пропускна здатність, наприклад, для моніторингу датчиків або відстеження руху. Зазвичай LoRaWAN передає лише короткі пакети даних, що дозволяє заощаджувати енергію та знижує навантаження на мережу. Це дозволяє пристроям працювати протягом довгого часу навіть з обмеженими ресурсами живлення, такими як батареї. Ще однією важливою особливістю LoRaWAN є її здатність працювати в багатокористувацьких мережах. Завдяки тому, що система використовує схему

частотного розділення каналу та часу, вона дозволяє одночасно працювати великій кількості пристроїв, не заважаючи один одному. Це особливо важливо в умовах, де потрібно покрити великі території великою кількістю пристроїв, таких як в разі розумних міст чи масштабних сільськогосподарських проєктів. LoRaWAN використовує декілька класів пристроїв, що дозволяє налаштовувати мережу залежно від вимог до енергоспоживання та пропускнуої здатності. Клас А є найменш енергоємним і підходить для пристроїв, які передають дані у встановлені інтервали часу. Клас В дає можливість пристроям мати певний час для відгуку на запити мережі, що підвищує їхню функціональність. Клас С дозволяє пристроям отримувати дані будь-який час, що робить їх ідеальними для застосувань, де необхідна швидка реакція на події.

Безпека в LoRaWAN забезпечується за допомогою кількох рівнів шифрування. Дані, що передаються між пристроєм і мережею, шифруються на рівні програмного забезпечення за допомогою AES-128. Ключі шифрування генеруються під час процесу реєстрації пристроїв у мережі, що додає додатковий рівень захисту від несанкціонованого доступу. Крім того, LoRaWAN підтримує автентифікацію пристроїв, що дозволяє гарантувати, що лише авторизовані пристрої можуть підключатися до мережі [68–69].

Технологія LoRaWAN активно використовується для створення так званих "розумних" міст, де вона забезпечує бездротовий зв'язок між різними об'єктами інфраструктури, такими як вуличне освітлення, системи управління водою, сміттєвими контейнерами та іншими. Це дозволяє покращити ефективність міських систем і зменшити споживання енергії завдяки моніторингу та автоматизації. Важливим аспектом є те, що LoRaWAN дозволяє створювати мережі без необхідності вкладати значні кошти в інфраструктуру. Використання безліцензійних радіочастот зменшує витрати на ліцензії, а можливість покриття великих територій через низькоенергетичні пристрої дозволяє знижувати витрати на обслуговування мережі. Це робить LoRaWAN доступним для малого та середнього бізнесу, а також для державних і муніципальних ініціатив. LoRaWAN також має великий потенціал для використання в промислових умовах. Наприклад,

в аграрному секторі вона дозволяє збирати дані з датчиків вологості, температури або рівня CO₂ на великих фермах, забезпечуючи точний моніторинг і оптимізацію умов для вирощування культур. В промисловості ця технологія застосовується для моніторингу виробничих процесів, логістики, а також для відстеження стану обладнання.

ZigBee - це бездротовий протокол зв'язку, який був розроблений для малопотужних пристроїв з низьким енергоспоживанням, що працюють на коротких відстанях. В основному цей стандарт застосовується в мережах Інтернету речей (IoT), де потрібне підключення бездротових пристроїв для автоматизації, контролю та моніторингу різноманітних систем, від розумних будинків до промислових додатків. ZigBee має низьке енергоспоживання, високу здатність до обробки даних і підтримує безпеку передачі інформації, що робить його популярним вибором для бездротових мереж.

Однією з основних переваг ZigBee є підтримка динамічного маршрутизації. Кожен пристрій у мережі може виступати як ретранслятор для даних, що передаються між іншими пристроями. Це дозволяє створювати мережі великого масштабу з численними пристроями, які можуть знаходитися на відстані один від одного. Завдяки цьому ZigBee має високу масштабованість і може бути використаний для побудови великих систем, таких як системи автоматизації будівель або промислові IoT-модулі.

Протокол ZigBee також розроблений для того, щоб пристрої мали дуже низьке споживання енергії. Це дозволяє використовувати акумулятори на тривалий час - від кількох місяців до кількох років, залежно від типу пристрою і умов його роботи. Більшість пристроїв ZigBee працюють в режимі "sleep" і активуються лише тоді, коли потрібно передати дані або отримати сигнал від іншого пристрою, що значно знижує енергоспоживання. Щодо безпеки, ZigBee забезпечує високий рівень захисту, використовуючи механізми шифрування на основі AES-128 для захисту даних від несанкціонованого доступу. Це робить мережі ZigBee надійними для застосувань, де передається чутлива інформація, таких як домашні системи безпеки або комерційні системи автоматизації.

ZigBee є відкритим стандартом, що дозволяє розробникам створювати сумісні пристрої та рішення на основі цього протоколу. Є багато виробників, що підтримують ZigBee, що забезпечує широкий вибір обладнання та сумісність між різними брендами та платформами. Стандарт має низькі витрати на розгортання, тому є популярним у таких сферах, як розумні будинки, автоматизація освітлення, енергозбереження та моніторинг здоров'я. Застосування ZigBee в розумних будинках включає автоматизацію освітлення, контролювання температури, моніторинг стану безпеки та управління побутовою технікою. У промисловості ZigBee використовується для моніторингу виробничих процесів, контролю за станом обладнання та збору даних про використання ресурсів. Цей протокол є також важливим для створення мереж для автоматизації сільськогосподарських процесів, таких як моніторинг рівня вологості ґрунту, температури та стану рослин.

Попри численні переваги, ZigBee має деякі обмеження. Одним з них є обмежена швидкість передачі даних, яка зазвичай не перевищує 250 кбіт/с. Це робить ZigBee менш придатним для застосувань, де потрібна висока пропускну здатність, таких як потокове відео або великі обсяги даних. Однак для більшості IoT-застосувань це не є проблемою, оскільки більшість з них потребує лише передачі малих обсягів даних, таких як показники температури, вологості, рівня CO₂ та інші. ZigBee також має деякі обмеження по дальності. Хоча діапазон зв'язку для стандартного пристрою може бути до 100 метрів в умовах відкритого простору, на практиці цей діапазон може бути меншим через перешкоди або фізичні бар'єри, такі як стіни. Однак завдяки підтримці динамічної маршрутизації та топології сітки, можна розширювати діапазон за рахунок ретрансляції сигналу іншими пристроями в мережі. ZigBee залишається одним з найбільш популярних і ефективних протоколів для малопотужних пристроїв, що працюють в рамках IoT.

Крім того, в майбутньому можливе використання кіберфізичних систем для інтеграції з іншими сферами діяльності, такими як охорона здоров'я, енергетика або навіть міське управління. Це дозволить створити єдину платформу для моніторингу всіх важливих параметрів у межах великої інфраструктури, що спрощує управління і забезпечує синергію між різними системами. Завдяки

інтеграції нових технологій, таких як блокчейн або штучний інтелект, КФС зможуть забезпечувати ще більшу прозорість і автоматизацію в управлінні архівними фондами. У майбутньому це дозволить значно зменшити кількість людських помилок та підвищити ефективність процесів збереження документів у архівах.

Розвиток кіберфізичних систем моніторингу дозволить архівам бути не тільки більш ефективними у збереженні документів, а й відкриє нові можливості для інтеграції технологій майбутнього, які забезпечать ще більш високу надійність, точність і безпеку збереження культурних та історичних цінностей.

1.4 Висновки

В першому розділі роботи було проведено детальний аналіз існуючих технологій моніторингу та автоматизації вимірювань параметрів навколишнього середовища. Показано важливість кіберфізичних систем для забезпечення точності та своєчасності вимірювань у таких критичних сферах, як збереження архівних матеріалів, зокрема в умовах постійних змін клімату та умов зберігання.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ, МОДЕЛЬ КФС ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ КОМПОНЕНТІВ

2.1. Постановка завдання розробки власної системи та модель КФС

Розробка кіберфізичної системи для моніторингу вологості та температури в архівних сховищах має вирішальне значення через обмеження існуючих рішень. Багато сучасних систем моніторингу покладаються на застарілі технології, ручний збір даних або не мають можливості аналізу в режимі реального часу, що робить їх неефективними для потреб архівів. Ці системи часто не забезпечують безперервного моніторингу, що призводить до запізненого реагування на зміни в навколишньому середовищі, які можуть пошкодити делікатні історичні документи. Крім того, багато доступних рішень вимагають дорогого обладнання або програмного забезпечення, що робить їх недоступними для невеликих архівів з обмеженим бюджетом. Нездатність деяких систем інтегруватися з сучасними системами аналізу даних і хмарними сховищами ще більше обмежує їхню ефективність. Через ці обмеження існує гостра потреба в більш доскональній, доступній та автоматизованій системі, пристосованій до умов архівного зберігання.

Однією з ключових проблем існуючих систем моніторингу є їхня залежність від ручного збору даних або періодичного зчитування показань датчиків, а не від безперервного моніторингу в режимі реального часу. Такий підхід може призвести до невиявлених коливань вологості та температури, які можуть завдати незворотної шкоди архівним матеріалам до того, як будуть вжиті коригувальні заходи. Крім того, ручні системи схильні до людських помилок, включаючи непослідовний запис даних і неправильну інтерпретацію показань. Багато старих систем також не мають належних механізмів оповіщення, а це означає, що архівісти не можуть бути вчасно повідомленими про небезпечні зміни в навколишньому середовищі. Відсутність автоматизації збільшує трудовитрати і ризик неточних показань, знижуючи ефективність заходів з контролю клімату. Ці

недоліки підкреслюють необхідність розробки більш досконалого та надійного рішення для моніторингу.

Архівні сховища мають унікальні вимоги до навколишнього середовища, які відрізняються від стандартних приміщень з клімат-контролем. Оптимальні умови для зберігання паперових документів, фотографій та інших історичних матеріалів вимагають суворого контролю вологості та температури, щоб запобігти їхньому псуванню. Навіть незначні відхилення від рекомендованих умов можуть прискорити хімічні реакції в папері, що призведе до пожовтіння, крихкості або появи плісняви. На відміну від звичайних сховищ, архіви часто містять чутливі матеріали, які є незамінними і потребують тривалого зберігання. Це робить точність і послідовність моніторингу клімату першочерговим пріоритетом. Крім того, архівні сховища можуть значно відрізнятися за розміром і плануванням, що вимагає гнучкої системи, яку можна адаптувати до різних просторових конфігурацій, зберігаючи при цьому точний контроль над навколишнім середовищем.

Іншим важливим фактором є вплив зовнішніх умов навколишнього середовища на архівні сховища. Сезонні зміни, коливання продуктивності систем опалення, вентиляції та кондиціонування, а також структурні фактори, такі як погана ізоляція чи вентиляція, можуть впливати на коливання вологості та температури. Без автоматизованої системи, здатної постійно адаптуватися до цих змін, архіви залишаються вразливими до загроз навколишнього середовища. Існуючі системи часто не враховують ці зовнішні впливи, що призводить до не послідовного контролю клімату. Крім того, архіви можуть зберігати матеріали в різних місцях, що вимагає системи, яка може централізувати дані з різних місць для комплексного моніторингу. Нова система моніторингу має вирішувати ці специфічні архівні проблеми, забезпечуючи при цьому масштабованість і адаптивність рішення.

Швидкий розвиток сучасних технологій дає можливість створити значно удосконалену систему моніторингу. Інтеграція пристроїв Інтернету речей (IoT), хмарних обчислень і штучного інтелекту (ШІ) уможливорює збір даних у реальному

часі, предикативну аналітику та автоматичне оповіщення. Бездротові сенсорні мережі можуть усунути потребу в складній електропроводці, знижуючи витрати на встановлення і підвищуючи гнучкість. Аналітика на основі штучного інтелекту може виявляти тенденції та аномалії в умовах навколишнього середовища, дозволяючи архівістам вживати превентивних заходів до того, як відбудеться пошкодження. Хмарні сховища забезпечують віддалений доступ до історичних даних і їхній аналіз, покращуючи процес прийняття рішень і довгострокові стратегії збереження. Ці технологічні досягнення уможливлюють розробку системи моніторингу, яка є більш ефективною, економічно доцільною та реагує на зміни навколишнього середовища.

Основна мета розробки спеціальної системи кіберфізичного моніторингу - забезпечити безперервний і точний контроль вологості та температури в архівних сховищах. Система повинна забезпечувати збір даних у реальному часі, автоматичне сповіщення та розширену аналітику для запобігання пошкодженню історичних документів навколишнім середовищем. На відміну від існуючих рішень, вона має бути економічно ефективною та адаптованою до різних розмірів і планування архівів. Нова система має інтегрувати сучасні технології Інтернету речей, що дасть змогу віддаленого доступу та управління умовами навколишнього середовища. Вона також повинна підтримувати хмарне зберігання даних і аналітику для відстеження довгострокових тенденцій і оптимізації стратегій клімат-контролю. Досягнувши цих цілей, система покращить збереження архівних матеріалів та підвищить загальну ефективність управління архівом.

Важливим аспектом розробки системи є створення надійної та масштабованої сенсорної мережі. Датчики мають бути стратегічно розміщені по всій території архівного сховища, щоб забезпечити повне покриття і точний збір даних. Ці датчики повинні бути здатні вимірювати вологість і температуру з високою точністю і передавати дані бездротовим способом до центрального процесора. Система повинна бути спроектована таким чином, щоб мінімізувати споживання енергії, забезпечуючи довготривалу роботу без частого технічного обслуговування. Крім того, використання датчиків, що самокалібруються, може

підвищити точність і зменшити потребу в ручному калібруванні. Впровадження надлишкової мережі датчиків може додатково підвищити надійність за рахунок перехресної перевірки даних з декількох джерел, запобігаючи помилковим показанням і збоям в роботі системи.

Програмний компонент системи повинен бути розроблений таким чином, щоб ефективно обробляти, аналізувати та візуалізувати дані. Зручний інтерфейс має надавати архівістам чіткі та зрозумілі уявлення про стан навколишнього середовища. Програмне забезпечення має підтримувати попередження та сповіщення в режимі реального часу, що дозволить швидко реагувати на потенційні загрози. Воно також має дозволяти аналізувати історичні дані, допомагаючи архівістам виявляти закономірності та впроваджувати довгострокові стратегії збереження. Інтеграція з існуючими системами клімат-контролю може уможливити автоматичне регулювання на основі показань датчиків, забезпечуючи підтримання оптимальних умов. Розробка мобільних додатків або веб-панелей може ще більше підвищити доступність, дозволяючи архівістам контролювати і керувати умовами зберігання з будь-якого місця.

Щоб забезпечити ефективність системи, необхідно провести ретельне тестування та валідацію. Початкове тестування має включати контрольовані експерименти в змодельованому архівному середовищі, щоб оцінити точність датчиків і швидкість реагування системи. Після доопрацювання систему слід розгорнути в реальних умовах архівного зберігання з постійним моніторингом і оцінкою продуктивності. Дані, зібрані під час тестування, слід проаналізувати для точного налаштування параметрів системи та підвищення надійності. Також слід враховувати відгуки користувачів-архівістів для покращення зручності користування та функціональності. Дотримуючись структурованого процесу тестування, систему можна оптимізувати, щоб вона відповідала найвищим стандартам точності, надійності та ефективності.

Успішне впровадження цієї системи кібер-фізичного моніторингу забезпечить значний прогрес у збереженні архівів. Завдяки використанню сучасних технологій, система запропонує надійне, економічно ефективне та автоматизоване

рішення для підтримки оптимальних умов зберігання. Вона зменшить ризики, пов'язані з коливаннями навколишнього середовища та людськими помилками, одночасно підвищуючи ефективність управління архівами. Майбутні розробки можуть включати алгоритми машинного навчання для прогнозованого обслуговування та інтеграцію з іншими технологіями розумних будівель. Зрештою, ця система сприятиме довгостроковому зберіганню цінних історичних матеріалів, забезпечуючи їхню доступність для майбутніх поколінь.

Одним з основних завдань запропонованої системи є автоматичний збір та аналіз даних про вологість і температуру. Система повинна безперервно відстежувати умови навколишнього середовища в архівному сховищі та реєструвати точні вимірювання через регулярні проміжки часу. На відміну від ручного моніторингу, який покладається на періодичне втручання людини, автоматизована система забезпечує відстеження коливань у реальному часі, які в іншому випадку можуть залишитися непоміченими. Датчики фіксуватимуть дані та передаватимуть їх до центрального процесора, де вони аналізуватимуться на предмет тенденцій, аномалій та потенційних ризиків. Така автоматизація усуває людські помилки в записі та інтерпретації даних, надаючи архівістам точну і всебічну інформацію про середовище зберігання. Крім того, аналіз історичних даних уможливить довгострокову оцінку клімату, що дозволить архівам оптимізувати стратегії збереження на основі фактів, а не припущень.

Ще одним важливим завданням системи є впровадження технологій Інтернету речей для віддаленого моніторингу. Традиційні системи контролю клімату в архівах часто вимагають нагляду на місці, що ускладнює оперативне реагування на зміни навколишнього середовища. Завдяки інтеграції датчиків з підтримкою Інтернету речей та хмарної передачі даних, запропонована система дозволить здійснювати моніторинг в режимі реального часу з будь-якого місця. Архівісти та керівники об'єктів зможуть отримати доступ до умов зберігання через веб-панель або мобільний додаток, що забезпечить гнучкість і миттєву обізнаність про потенційні проблеми. Ця дистанційна можливість особливо цінна для великих архівних установ з декількома місцями зберігання або установ, які не мають

штатного персоналу, що займається моніторингом кліматичних умов. Крім того, інтеграція з Інтернетом речей полегшує автоматичну синхронізацію даних на різних пристроях і платформах, гарантуючи, що всі зацікавлені сторони отримують актуальну інформацію.

Розробка програмного забезпечення для обробки, зберігання та візуалізації даних є ще одним ключовим завданням. Система повинна мати інтуїтивно зрозумілий користувацький інтерфейс, що дозволяє архівістам переглядати дані про стан довкілля в режимі реального часу, отримувати доступ до історичних тенденцій та створювати звіти. Програмне забезпечення має включати аналітичні інструменти, які допомагають виявляти закономірності у коливаннях вологості та температури, допомагаючи архівістам ухвалювати рішення на основі даних для оптимізації зберігання. Крім того, будуть впроваджені хмарні рішення для зберігання даних, щоб забезпечити надійне збереження зібраних даних та їхній легкий доступ для довгострокового використання. Система також має підтримувати функції експорту даних, уможливаючи інтеграцію з існуючим програмним забезпеченням для управління архівами та дотримання галузевих стандартів. Пріоритетом буде доступність для користувачів, що забезпечує ефективне використання системи персоналом з різним рівнем технічної підготовки.

Для підвищення надійності системи необхідно передбачити автоматизовані механізми сповіщення про зміни критичних параметрів. Коливання навколишнього середовища, що перевищують заздалегідь визначені порогові значення, можуть становити серйозні ризики для архівних матеріалів, що робить вчасне реагування критично важливим. Система буде оснащена сповіщеннями в режимі реального часу через електронну пошту, SMS або мобільні додатки, що забезпечить негайне оповіщення архівістів, коли умови стануть небезпечними. Крім того, можна інтегрувати предикативну аналітику на основі штучного інтелекту, щоб надавати ранні попередження до того, як відбудуться критичні зміни. Такий проактивний підхід мінімізує ймовірність деградації документів, дозволяючи архівістам вживати превентивних заходів до того, як буде завдано шкоди.

Для кожної контрольованої зони архіву Z_i , де $i=1,2,\dots,n$ позначимо наступні параметри:

$T_i(t)$ - температура ($^{\circ}\text{C}$) у момент часу t ;

$H_i(t)$ - вологість (%);

$T_{\text{норм}} \in [T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$ - допустимий інтервал температур;

$H_{\text{норм}} \in [H_{\text{min}}, H_{\text{max}}]$ - допустимий інтервал вологості.

Дані зчитуються датчиками КФС із похибкою $\varepsilon_{i,T}(t)$:

$$x_{i,T}(t) = T_i(t) + \varepsilon_{i,T}(t), \quad \varepsilon_{i,T}(t) \sim N(0, \sigma_T^2), \quad (2.1)$$

$$x_{i,H}(t) = H_i(t) + \varepsilon_{i,H}(t), \quad \varepsilon_{i,H}(t) \sim N(0, \sigma_H^2), \quad (2.2)$$

де $\varepsilon_{i,T}(t)$ - випадкова похибка вимірювання температури;

$N(0, \sigma_T^2)$ означає, що похибка має нормальний (гаусівський) розподіл;

σ_T^2 - дисперсія;

σ_T - стандартне відхилення.

Можна описати вектор стану середовища для зони Z_i наступним чином:

$$\vec{x}_i(t) = \begin{bmatrix} T_i(t) \\ H_i(t) \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Визначимо індикатор стабільності середовища:

$$S_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } T_i(t) \notin [T_{\text{min}}, T_{\text{max}}] \text{ або } T_i(t) \notin [H_{\text{min}}, H_{\text{max}}] \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (2.4)$$

Можна використовувати оцінку відхилення $L_i(t)$:

$$\delta T_i(t) = \max\{0, |T_i(t) - T_{\text{опт}}| - \Delta T\}, \quad (2.5)$$

$$\delta H_i(t) = \max\{0, |H_i(t) - H_{\text{опт}}| - \Delta H\}, \quad (2.6)$$

$$L_i(t) = \omega_T \cdot (\delta T_i(t))^2 + \omega_H \cdot (\delta H_i(t))^2, \quad (2.7)$$

де $T_{\text{опт}}, H_{\text{опт}}$ – бажані чи ідеальні значення;

$\Delta T, \Delta H$ – допустимі коливання;

ω_T, ω_H - вагові коефіцієнти критичності.

Нехай G – це шлюз, який передає дані, тоді процес передачі даних можна описати наступним чином:

$$\vec{x}_i(t) \xrightarrow{\text{LoRa / Wi-Fi}} G \xrightarrow{\text{TCP/IP}} S, \quad (2.8)$$

де S – центральний сервер або хмара.

Дані записуються в базу:

$$D_i = \{\vec{x}_i(t_k), S_i(t_k), S_i(t_k)\}_{k=1}^N. \quad (2.9)$$

Таким чином, розроблена модель кіберфізичної системи для моніторингу температури та вологості в архівних приміщеннях дозволяє контролювати мікроклімат у критично важливих зонах архіву, виявляти відхилення та швидко реагувати; оцінювати рівень ризику для документів через оцінку відхилення та зберігати історію для аудиту, аналітики або навчання моделей.

Успішна розробка та впровадження цієї системи кіберфізичного моніторингу принесе кілька ключових переваг та очікуваних результатів. По-перше, система значно покращить збереження архівних матеріалів завдяки підтримці стабільних та оптимальних кліматичних умов. Автоматизований моніторинг та оповіщення в режимі реального часу зменшить ризик пошкодження навколишнього середовища, продовживши термін зберігання чутливих історичних документів. По-друге,

система підвищить ефективність за рахунок зменшення потреби в ручних перевірках і регулюванні клімату. Це вивільнить час персоналу для інших важливих архівних завдань, забезпечуючи при цьому безперервний нагляд за умовами зберігання. По-третє, використання технологій Інтернету речей і хмарних сховищ даних надасть архівістам більший контроль і гнучкість, уможлививши віддалений моніторинг і централізований доступ до даних.

2.2. Архітектура та структура системи

Кіберфізична система моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву розроблена для забезпечення оптимальних умов зберігання архівних матеріалів. Основна мета системи полягає у постійному контролі ключових параметрів мікроклімату, таких як температура та вологість, що є критично важливими для збереження документів, книг та інших архівних матеріалів (Рис 2.1.).

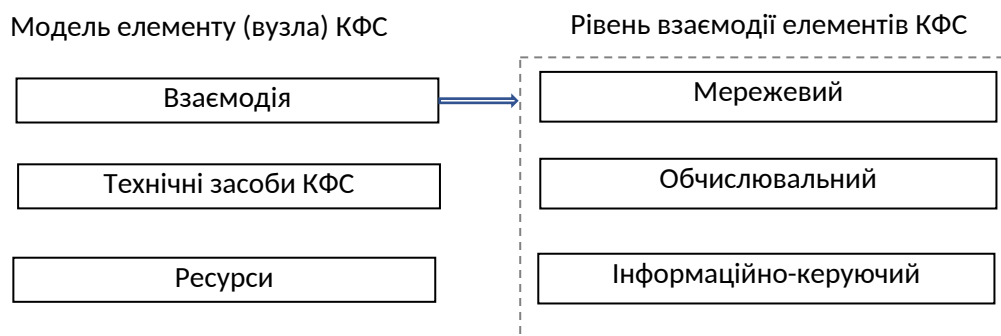


Рисунок 2.1 – Концептуальна модель КФС моніторингу мікроклімату архівних приміщень

Система дозволяє уникнути пошкоджень, викликаних надмірною вологістю, сухістю або коливаннями температури, які можуть призвести до руйнування паперу, появи цвілі або інших біологічних загроз. Завдяки автоматизації процесу моніторингу система забезпечує точність, оперативність та надійність у порівнянні з ручними методами контролю. Однією з ключових функцій системи є збір даних з датчиків температури та вологості, які розміщені у різних зонах сховища архіву.

Датчики постійно вимірюють параметри мікроклімату та передають ці дані до центрального вузла. Для забезпечення точності вимірювань використовуються високоякісні цифрові датчики. Дані збираються у реальному часі, що дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни умов зберігання. Кожен датчик має унікальний ідентифікатор, що дозволяє точно визначати місце розташування джерела даних. Це особливо важливо для великих сховищ, де умови можуть відрізнятися в різних зонах. Збір даних відбувається з певною періодичністю, яка налаштовується відповідно до вимог архіву.

Після збору даних з датчиків вони передаються через бездротову мережу до центрального вузла обробки. Для передачі даних використовується технологія Wi-Fi, які забезпечують низьке енергоспоживання та стабільний зв'язок навіть у умовах з перешкодами. Wi-Fi є ідеальним вибором для архіву, де важлива низька затримка передачі даних. Дані передаються через мережу з ячеїстою топологією, що забезпечує надійність та стійкість до збоїв. Кожен вузол мережі може виступати як передавач, що дозволяє підтримувати зв'язок навіть у разі виходу з ладу одного з вузлів. Передача даних відбувається у зашифрованому вигляді, що забезпечує їхню конфіденційність та захищеність.

Отримані дані зберігаються на сервері, де вони підлягають подальшій обробці та аналізу. Дані зберігаються у структурованому вигляді, що дозволяє легко аналізувати їх та будувати графіки зміни параметрів у часі. Система автоматично аналізує дані на предмет виявлення критичних змін, таких як різке підвищення вологості і температури. У разі виявлення таких змін система генерує попередження для адміністратора архіву. Крім того, дані можуть бути використані для побудови прогнозів та оптимізації умов зберігання.

Для зручності користувача дані відображаються через веб-інтерфейс або мобільний додаток. Візуалізація включає графіки зміни температури та вологості у реальному часі, таблиці з історичними даними та індикатори поточного стану. Веб-інтерфейс розроблений з урахуванням зручності використання, що дозволяє адміністраторам архіву швидко отримувати необхідну інформацію. Користувачі можуть налаштовувати параметри відображення, вибирати періоди для аналізу та

експортувати дані у зручному форматі. Для розробки інтерфейсу використовуються сучасні технології, такі як React.js або Node-RED, що забезпечують швидкість та інтерактивність. Візуалізація також включає можливість перегляду даних з конкретних датчиків, що дозволяє точно визначити джерело проблеми.

Однією з ключових функцій системи є генерація попереджень у разі виявлення критичних змін у параметрах мікроклімату. Попередження можуть надсилатися через SMS, email або push-сповіщення у мобільному додатку. Система дозволяє налаштувати порогові значення для температури та вологості, при досягненні яких генерується попередження. Наприклад, якщо вологість перевищує 70%, система автоматично повідомляє адміністратора про необхідність втручання. Попередження також можуть включати рекомендації щодо дій, які необхідно вжити для нормалізації умов зберігання. Ця функція дозволяє запобігти серйозним пошкодженням архівних матеріалів та забезпечити їхню довговічність.

Кіберфізична система моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву є сучасним рішенням для забезпечення оптимальних умов зберігання архівних матеріалів. Вона поєднує в собі точність вимірювань, надійність передачі даних та зручність візуалізації, що робить її незамінним інструментом для адміністраторів архіву. Система дозволяє не лише контролювати поточний стан мікроклімату, але й оперативно реагувати на будь-які зміни, запобігаючи потенційним загрозам. Завдяки використанню сучасних технологій, таких як ZigBee система забезпечує високу ефективність та масштабованість, що робить її придатною для використання як у невеликих, так і у великих архівах.

2.3 Вибір мікроконтролера

На даний момент є кілька можливих варіантів мікроконтролерів. Розглянемо їх та їхні відмінності.

1) ESP32 - це потужний і водночас енергоефективний мікроконтролер, який широко використовується у вбудованих системах та проектах Інтернету

речей. Він є вдосконаленою версією ESP8266 і відрізняється значно більшою продуктивністю, наявністю двоядерного процесора, розширеними можливостями підключення та підтримкою сучасних комунікаційних технологій.

Однією з головних переваг ESP32 є вбудована підтримка Wi-Fi і Bluetooth, що дозволяє використовувати його як основний вузол у бездротових мережах. Це відкриває можливості для збирання, передавання та аналізу даних без необхідності підключення зовнішніх модулів зв'язку. Пристрій може легко інтегруватися в IoT-системи, відправляючи дані на сервери, працюючи в режимі точок доступу або виконуючи роль мосту між різними мережевими технологіями (Рис. 2.2).

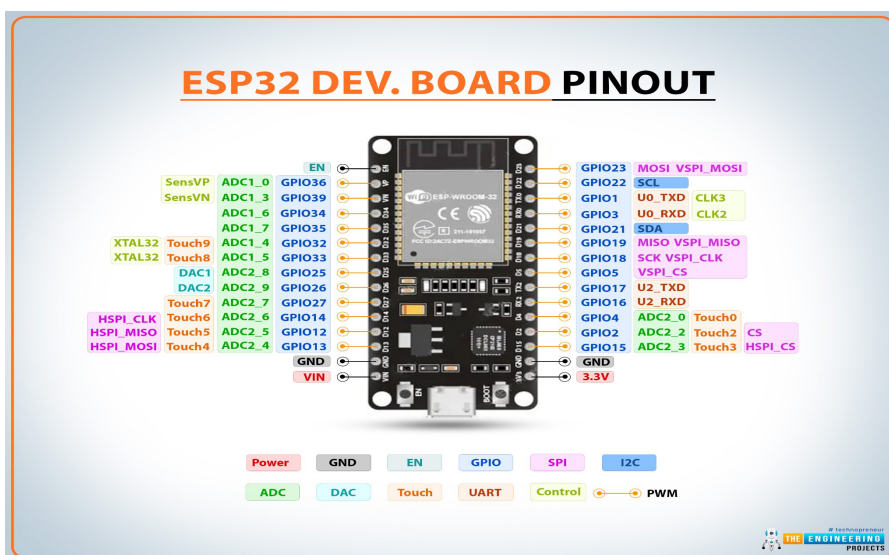


Рисунок 2.2 -Принципова схема ESP32 [70]

Завдяки двоядерному процесору Tensilica Xtensa LX6, ESP32 здатний виконувати кілька завдань одночасно. Це дозволяє йому працювати як з датчиками, так і з алгоритмами обробки даних, забезпечуючи швидку реакцію на зміну параметрів довкілля. Вбудований модуль енергоощадження дозволяє налаштовувати режими роботи так, щоб мінімізувати споживання енергії, що особливо важливо для автономних систем, які працюють на батареях.

ESP32 підтримує широкий спектр інтерфейсів для підключення зовнішніх пристроїв, серед яких SPI, I2C, UART, ADC, DAC і PWM. Це дає змогу взаємодіяти з різними типами сенсорів, дисплеїв, приводів і виконавчих механізмів. Окрім

цього, пристрій можна програмувати різними мовами, такими як C++, MicroPython та Lua, що робить його доступним як для досвідчених інженерів, так і для початківців.

У сфері автоматизації та моніторингу навколишнього середовища ESP32 може використовуватися для збору даних з датчиків температури, вологості, тиску та газового складу повітря. Отримані дані можуть аналізуватися безпосередньо на мікроконтролері або передаватися у хмарні сервіси для подальшої обробки. Завдяки потужним можливостям зв'язку він також підходить для створення розумних систем управління, таких як домашня автоматизація, промислові контролери або мережі моніторингу.

2) Arduino Nano (Рис. 2.3) - це один із найпопулярніших мікроконтролерних плат для розробників, інженерів і ентузіастів електроніки. Вона має всі функціональні можливості Arduino Uno, але відрізняється меншими розмірами та відсутністю стандартного роз'єму живлення. Завдяки своєму компактному форм-фактору, Nano ідеально підходить для вбудованих систем і проектів із обмеженим простором. Головною перевагою цієї плати є її зручність у програмуванні. Вона підтримує середовище Arduino IDE, яке має простий синтаксис і велику бібліотеку готових функцій. Завдяки цьому можна легко працювати з датчиками, сервоприводами, дисплеями та іншими модулями. Код завантажується на плату через інтерфейс USB, а живлення може подаватися як від комп'ютера, так і від зовнішнього джерела, наприклад, аккумулятора або адаптера.

Мікроконтролер працює на частоті 16 МГц та має 32 КБ флеш-пам'яті (для ATmega328P), з яких 2 КБ займає завантажувач (bootloader). Оперативна пам'ять (SRAM) становить 2 КБ, а EEPROM - 1 КБ, що дозволяє зберігати невеликі обсяги даних навіть після вимкнення живлення.

Arduino Nano підтримує 14 цифрових виходів, із яких 6 можуть працювати як ШІМ-виходи. Також на борту є 8 аналогових входів (ADC, 10-бітні), що дозволяє працювати з датчиками та іншими аналоговими сигналами. Для зв'язку з іншими пристроями є підтримка I2C, SPI та UART.

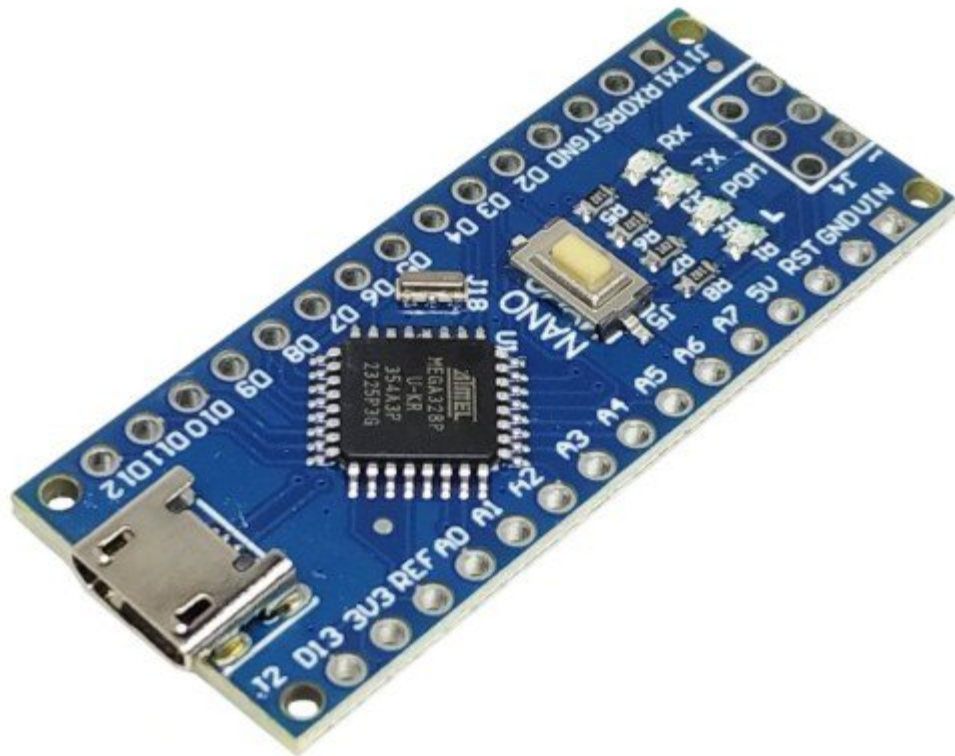


Рисунок 2.3 - Arduino Nano [71]

Плата може живитися через USB-порт (5V) або від зовнішнього джерела напруги через вивід VIN (7-12V). На відміну від Arduino Uno, у Nano відсутній роз'єм для підключення адаптера живлення, що робить його більш орієнтованим на інтеграцію в невеликі системи.

3) Raspberry Pi Pico (Рис. 2.4) - це компактний, енергоефективний мікроконтролер, який був розроблений компанією Raspberry Pi для вбудованих систем та IoT-проектів. На відміну від традиційних моделей Raspberry Pi, він не є одноплатним комп'ютером, а працює як мікроконтролер, схожий на Arduino, проте з більшою потужністю та гнучкістю. Ця плата побудована на основі власного чипа RP2040, який містить двоядерний процесор Arm Cortex-M0+, що працює на частоті до 133 МГц. Завдяки цьому вона здатна виконувати складніші завдання, ніж класичні мікроконтролери, такі як ATmega328P. Також Raspberry Pi Pico має 264 КБ оперативної пам'яті та 2 МБ флеш-пам'яті для зберігання програмного коду.

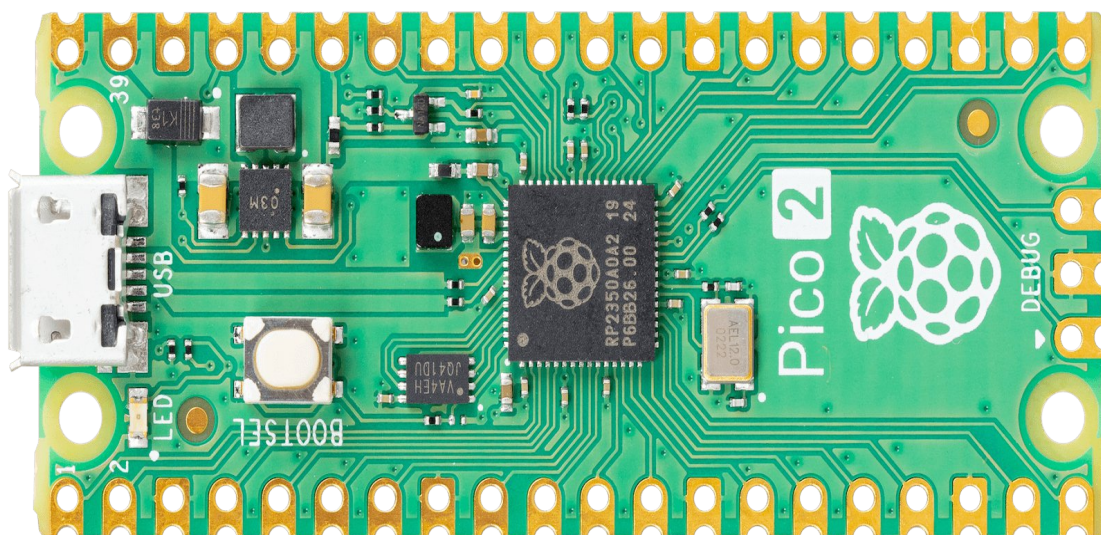


Рисунок 2.4 - Raspberry Pi Pico [73]

Однією з головних переваг цієї плати є її гнучкість у програмуванні. Raspberry Pi Pico підтримує дві основні мови: MicroPython і C/C++, що дозволяє обирати між простотою написання скриптів або оптимізованими низькорівневими алгоритмами. Завантаження коду на плату дуже просте: достатньо підключити її до комп'ютера через USB і скопіювати файл прошивки. Плата має 26 багатофункціональних GPIO-виводів, з яких кілька підтримують аналогові входи, PWM, I2C, SPI та UART. Це дозволяє легко підключати сенсори, дисплеї, приводи та інші компоненти. Однією з унікальних особливостей є PIO (Programmable I/O) - спеціальні блоки, що дозволяють створювати власні протоколи обміну даними, що особливо корисно для високошвидкісних комунікацій. На відміну від інших плат Raspberry Pi, Pico не має вбудованого Wi-Fi або Bluetooth, тому для підключення до мережі потрібні додаткові модулі, наприклад ESP8266 або ESP32. Це може бути недоліком.

4) STM32 (Рис. 2.5) - це серія потужних 32-бітних мікроконтролерів, розроблених компанією STMicroelectronics. Вони базуються на процесорній архітектурі ARM Cortex-M і використовуються в широкому спектрі вбудованих систем, від простих пристроїв до складних реальних додатків, таких як промислова автоматизація, робототехніка, медична електроніка та Інтернет речей (IoT).

Однією з ключових переваг STM32 є гнучкість і масштабованість. Вони доступні в різних серіях, таких як STM32F, STM32L, STM32H, STM32G та STM32U, кожна з яких оптимізована для певних завдань. Наприклад, серія STM32F забезпечує баланс між продуктивністю та енергоефективністю, STM32L спеціально розроблена для пристроїв із низьким енергоспоживанням, а STM32H має найвищу продуктивність серед STM32.

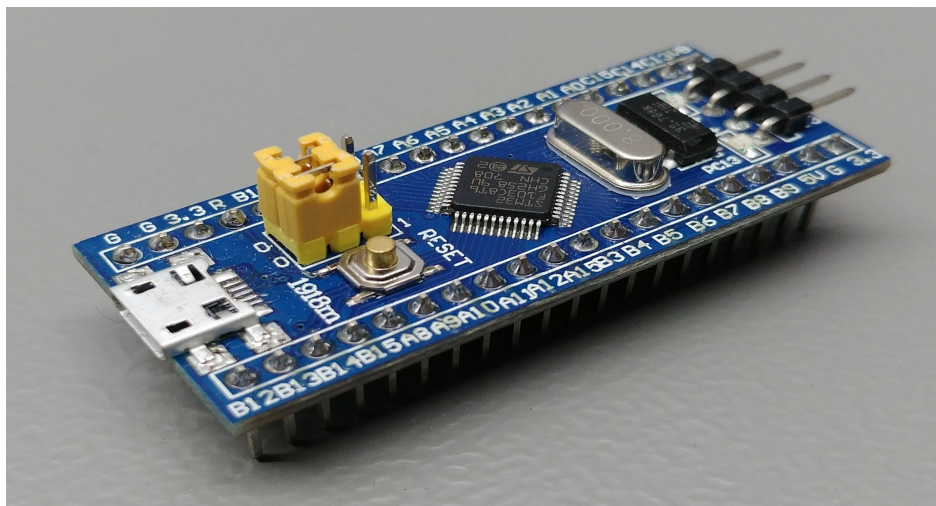


Рисунок 2.5 - STM32 [74]

Мікроконтролери STM32 підтримують різні периферійні інтерфейси, такі як I2C, SPI, UART, CAN, USB, Ethernet та SDIO, що робить їх ідеальними для комунікаційних завдань. Деякі моделі також містять вбудований Wi-Fi, Bluetooth та підтримку бездротових протоколів для IoT-додатків.

Особливістю STM32 є апаратне прискорення обчислень, включаючи плаваючу кому (FPU), цифрову обробку сигналів (DSP) та підтримку криптографічних функцій. Це дозволяє використовувати їх у високопродуктивних застосуваннях, наприклад, в обробці аудіо, відео або криптографії.

Програмування мікроконтролерів STM32 можливе через різні середовища розробки, зокрема STM32Cube IDE, Keil, IAR Embedded Workbench та Arduino IDE (для деяких моделей). Завдяки бібліотеці STM32 HAL (Hardware Abstraction Layer) спрощується робота з периферією, а низькорівневий API (LL - Low Layer) дозволяє точніше налаштовувати функціональність мікроконтролера.

Ще одна важлива перевага - низьке енергоспоживання. Деякі моделі можуть працювати в режимі глибокого сну з мінімальним споживанням енергії, що робить їх ідеальними для пристроїв на батарейному живленні.

STM32 широко використовується у вбудованих системах завдяки потужному поєднанню продуктивності, енергоефективності та багатофункціональності. Це одна з найкращих платформ для розробки сучасних електронних пристроїв, де важливі стабільність, надійність та розширені можливості підключення.

5) ESP8266(Рис. 2.6) - це компактний і потужний мікроконтролер з вбудованим Wi-Fi, розроблений компанією Espressif Systems. Він став надзвичайно популярним серед розробників IoT-проектів завдяки своїй низькій вартості, енергоефективності та гнучкості у використанні.

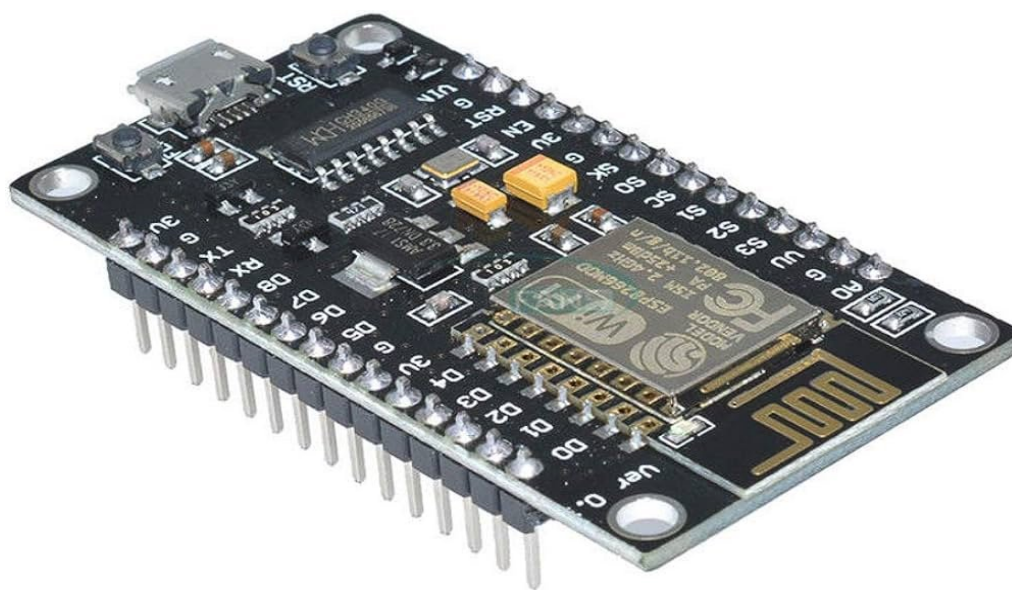


Рисунок 2.6 - Мікроконтролер ESP8266 [75]

Однією з головних переваг ESP8266 є вбудований Wi-Fi-модуль, який дозволяє легко підключати пристрої до інтернету без необхідності використання додаткових модулів. Це робить його чудовим вибором для розумного дому, систем моніторингу, автоматизації та віддаленого керування пристроями. Працює ESP8266 на 32-бітному процесорі Tensilica Xtensa LX106 із тактовою частотою 80–160 МГц. Він має до 4 МБ флеш-пам'яті, що достатньо для завантаження

складних програм. Оперативна пам'ять (RAM) становить близько 80 КБ, що може бути обмеженням для деяких проектів, але достатньо для більшості IoT-застосувань. ESP8266 має 13 доступних GPIO-виводів, які можна використовувати для підключення датчиків, дисплеїв, реле та інших електронних компонентів (Рис 2.7).

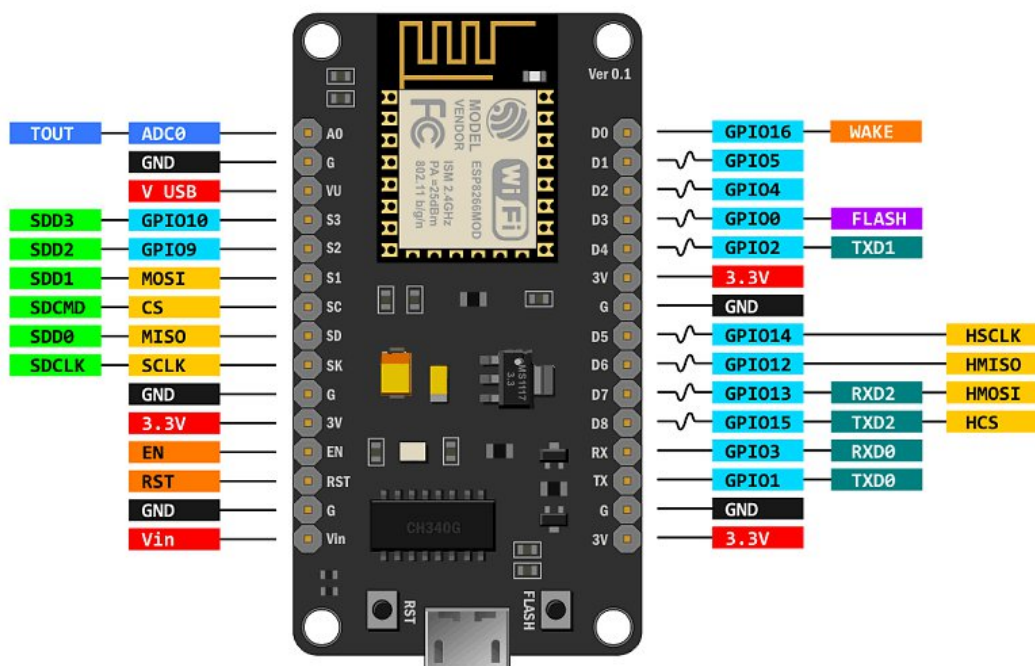


Рисунок 2.7 - Принципова схема ESP8266 [76]

Також підтримує I2C, SPI, UART, PWM і ADC, що дає змогу реалізувати різноманітні функції. Однак, на відміну від новіших ESP32, він має лише один аналоговий вхід (ADC), що може бути обмеженням у деяких застосуваннях.

Програмування ESP8266 можна здійснювати через Arduino IDE, MicroPython, Lua або ESP-IDF, що робить його доступним як для початківців, так і для досвідчених розробників. Завдяки активній спільноті та великій кількості бібліотек, розробка з ESP8266 значно спрощується.

Одним із ключових застосувань ESP8266 є створення веб-серверів або клієнтів для взаємодії з хмарними сервісами, наприклад, MQTT, Firebase, Blynk, Thingspeak тощо. Він може працювати як точка доступу (Access Point) або як клієнт

мережі (Station Mode), що дозволяє легко інтегрувати його в будь-яке бездротове середовище.

б) Teensy - це потужний мікроконтролер, який відзначається високою продуктивністю, компактними розмірами та розширеними можливостями для обробки сигналів і роботи з периферією. Його серцем є ARM Cortex-M процесори, що працюють на високих частотах, забезпечуючи швидке виконання завдань і можливість опрацьовувати складні алгоритми. Завдяки великій кількості цифрових і аналогових входів, він підходить для інтеграції з різними датчиками, дисплеями, сервоприводами та іншими електронними модулями.

Особливістю Teensy є підтримка роботи з аудіо в реальному часі, що робить його популярним серед розробників цифрових синтезаторів, звукових процесорів та MIDI-контролерів. Він дозволяє створювати складні звукові ефекти, працювати з мікрофонами, колонками та іншими аудіо пристроями. Вбудована флеш-пам'ять дозволяє зберігати великі обсяги даних, що особливо корисно для проектів, які потребують роботи з аудіо або логування інформації.

Teensy підтримує численні інтерфейси, серед яких UART, I2C, SPI, CAN, USB та Ethernet, що дозволяє легко підключати його до інших пристроїв. Він може працювати як USB-хост, що дає змогу підключати клавіатури, миші, флеш-накопичувачі та інші периферійні пристрої. Завдяки цьому він широко використовується в автоматизованих системах, робототехніці та IoT-проектах.

Попри свою потужність, плата має компактні розміри та енергоефективну архітектуру, що дозволяє використовувати її в портативних пристроях та автономних системах. Вона легко програмується через Arduino IDE із додатковим плагіном Teensyduino, а також підтримує професійні середовища розробки, що відкриває широкі можливості для створення складних інтегрованих рішень.

Вибір мікроконтролера для кіберфізичної системи моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву є важливим етапом, який вимагає врахування багатьох факторів. Важливим моментом є необхідність підключення до мережі. Система повинна передавати дані через інтернет або локальну мережу, слід вибирати пристрої з інтегрованими модулями бездротового зв'язку або

можливістю підключення до Ethernet. Це дозволяє легко інтегрувати систему в існуючу інфраструктуру та забезпечує стабільну передачу даних. Кількість та типи датчиків, які будуть використовуватися в системі, також впливають на вибір мікроконтролера. Деякі пристрої мають обмежену кількість входів, тому важливо переконатися, що обраний мікроконтролер може підтримувати всі необхідні датчики. Вартість мікроконтролера також впливає на вибір. Для невеликих проектів можна вибирати більш доступні рішення, тоді як для складних систем можуть знадобитися більш дорогі та потужні пристрої. Важливо знайти баланс між вартістю та функціональністю, щоб забезпечити ефективну реалізацію проекту в рамках виділеного бюджету.

В даному проекті буде застосовувано ESP8266 як основний мікроконтролер для зчитування даних із сенсора температури та вологості та передачі цих даних на сервер для подальшого зберігання й аналізу. Завдяки вбудованому Wi-Fi-модулю, ESP8266 забезпечує стабільне бездротове з'єднання з локальною мережею або інтернетом, що дозволяє реалізувати віддалений моніторинг параметрів мікроклімату у сховищі архіву в режимі реального часу. Мікроконтролер працюватиме в режимі клієнта (Station Mode) та періодично надсилатиме зібрані дані на хмарну платформу, де інформація зберігатиметься та візуалізуватиметься. Це дає змогу відповідальним особам оперативно реагувати на відхилення параметрів середовища та вживати необхідних заходів для збереження архівних матеріалів.

2.4. Вибір сенсорів температури та вологості

Для моніторингу температури та вологості навколишнього середовища можна застосовувати сенсор DHT22. Сенсор DHT22 (Рис. 2.8) є вдосконаленим цифровим датчиком для вимірювання температури та вологості, який забезпечує високу точність і стабільність в роботі. Він призначений для використання в широкому діапазоні температур і вологості, що робить його ідеальним для різних застосувань, від простих побутових проектів до складніших систем автоматизації.

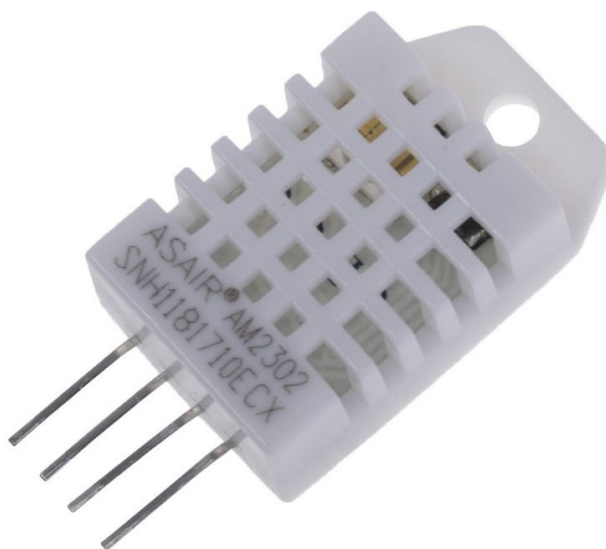


Рисунок 2.8 - Сенсор DHT22 [77]

Основною перевагою DHT22 є його здатність до роботи в широкому температурному діапазоні від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ з точністю до $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, а також вимірювати вологість у межах від 0 до 100% з точністю $\pm 2-5\%$. Ці характеристики роблять його корисним у різних умовах, таких як клімат-контроль у житлових приміщеннях, моніторинг навколишнього середовища, сільськогосподарські ферми, лабораторії, а також у системах для збереження архівів та музейних колекцій. Сенсор має цифровий вихід, що спрощує його інтеграцію в проекти на базі мікроконтролерів, таких як Arduino чи ESP8266. Він передає дані через один пін за допомогою протоколу однопроводового зв'язку (Рис. 2.9), що дозволяє зменшити кількість проводів та спрощує підключення до системи. Щодо особливостей конструкції, DHT22 має на борту вбудований чіп для обробки сигналів, що робить його більш надійним і стійким до зовнішніх перешкод порівняно з іншими датчиками температури та вологості. Він також має стабільний робочий діапазон напруги від 3.3V до 6V, що дозволяє застосовувати його в різних електронних схемах.

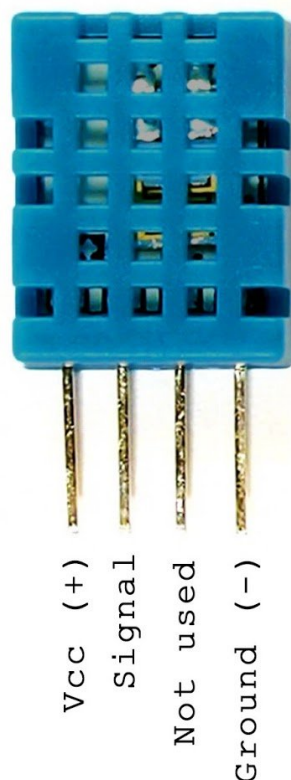


Рисунок 2.9 - Розташування пінів в DHT22 [78]

Важливою характеристикою є час між вимірюваннями, який складає близько 2 секунд. Це означає, що DHT22 не підходить для дуже швидких або частих вимірювань, але для нашого проекту, де потрібно стежити за змінами кліматичних умов на більш довгих проміжках часу, цього абсолютно достатньо.

DHT22 вирізняється своєю довговічністю - за нормальних умов експлуатації його ресурс може перевищувати 50 000 годин роботи без істотної втрати точності. Його стабільна робота в умовах підвищеної вологості або пилу (наприклад, у старих архівосховищах або підвальних приміщеннях) робить його практичним вибором. Сам корпус датчика має вентиляційні отвори, які дозволяють точніше зчитувати параметри навколишнього середовища, водночас зберігаючи внутрішню електроніку від безпосереднього контакту з вологою.

Ще однією перевагою є проста калібровка виробник DHT22 здійснює калібрування на заводі, тому сенсор готовий до використання "з коробки". Це

значно знижує поріг входу для студентів, розробників початкового рівня та аматорів, які бажають створити власну систему моніторингу.

З технічної точки зору, для коректної роботи сенсора важливо забезпечити правильне з'єднання з мікроконтролером. Зазвичай до сигнального піну підключається резистор на 4.7 кОм (pull-up) між піном даних та живленням, щоб уникнути помилок у передаванні сигналу. З огляду на специфіку однопровідного зв'язку, важливо також використовувати якісні провідники довжиною не більше 20 метрів (хоча на практиці, за умов правильного екранування, можливе збільшення довжини до 50 м).

У системах на базі ESP8266 сенсор DHT22 ідеально підходить завдяки вбудованим бібліотекам, які спрощують зчитування даних. Наприклад, бібліотека "DHT sensor library" для Arduino IDE дозволяє зчитувати дані температури і вологості всього кількома рядками коду. Це дає можливість швидко протестувати сенсор і перейти до реалізації функціоналу передачі даних на веб-сервер або в мобільний додаток.

Щодо споживання енергії, DHT22 є досить енергоефективним пристроєм - його середній споживаний струм становить приблизно 1.5 мА під час зчитування і менш ніж 100 мкА у стані очікування. Це дозволяє використовувати його в автономних системах, живлення яких забезпечується від акумулятора чи сонячної панелі. У поєднанні з мікроконтролером, який підтримує режим сну (deep sleep), можна досягти значного збільшення часу автономної роботи пристрою - від кількох днів до кількох тижнів.

Іншим важливим аспектом є стійкість до електромагнітних завад. У порівнянні з аналоговими сенсорами, цифровий інтерфейс DHT22 менш схильний до спотворення сигналів, що є важливим у середовищах з великою кількістю електроніки. У архівосховищах, де можуть бути присутні охоронні системи, освітлення або комп'ютерна техніка, це може бути суттєвою перевагою.

В контексті кіберфізичних систем, дані з DHT22 можуть бути передані на сервер за допомогою Wi-Fi або LoRa модуля. Надалі ці дані можуть зберігатися в базі даних, відображатися на графіках через вебінтерфейс або аналізуватися за

допомогою алгоритмів машинного навчання для виявлення аномалій або прогнозування змін клімату в приміщенні.

З точки зору програмного забезпечення, варто реалізувати журналювання вимірювань, щоб мати змогу відслідковувати динаміку змін температури та вологості за годину, день або тиждень. Це дозволяє створити історію кліматичних умов у сховищі, що може бути корисно як для внутрішнього аналізу, так і для зовнішнього аудиту.

У разі потреби, система з DHT22 може бути розширена за допомогою мобільного додатку, який надсилатиме сповіщення при досягненні критичних значень. Це можливо реалізувати за допомогою хмарних сервісів, таких як Blynk, ThingSpeak або MQTT-брокери. У випадку ESP8266 це також можна реалізувати за допомогою простого HTTP-сервера, що дозволяє переглядати дані з будь-якого браузера.

Загалом, DHT22 - це недорогий, точний і надійний сенсор, який ідеально підходить для задач моніторингу навколишнього середовища. У поєднанні з сучасними мікроконтролерами та інструментами Інтернету речей (IoT), він дозволяє створювати ефективні рішення для контролю клімату як у малих особистих проектах, так і в професійних автоматизованих системах.

2.5. Вибір джерела живлення та засобів комунікації

Для забезпечення стабільної та безперервної роботи кіберфізичної системи моніторингу температури та вологості в архівному сховищі необхідно розробити надійну систему живлення, яка дозволить пристрою функціонувати не лише в умовах наявного електроживлення, а й у разі його повної або часткової відсутності. Враховуючи специфіку архівного середовища, де збереження мікрокліматичних умов є критично важливим для збереження документів, фотоматеріалів, книг та інших цінностей, система моніторингу повинна функціонувати безперервно, фіксуючи навіть незначні зміни кліматичних параметрів.

Як основне джерело живлення для даної системи було обрано літєвий акумулятор з номінальною напругою 3.7 вольт (Рис 2.10). Таке рішення обумовлено тим, що акумулятори цього типу мають високу енергоємність, здатні забезпечувати стабільну напругу протягом тривалого періоду роботи та мають низький рівень саморозряду. Крім того, їх компактність і відносно невелика маса роблять їх зручними для використання у вбудованих і мобільних електронних системах, таких як наш моніторинговий пристрій.



Рисунок 2.10 - Літєвий акумулятор [79]

Однак, оскільки ключові компоненти системи, зокрема мікроконтролер ESP8266 та сенсор температури і вологості DHT22, потребують стабільної напруги живлення на рівні 5 вольт, виникає необхідність підвищити напругу з акумулятора до необхідного рівня. Для цього в системі використовується підвищувальний перетворювач напруги MT3608 (Рис 2.11). Цей компонент забезпечує ефективне підвищення напруги з 3.7 до 5 вольт при високому коефіцієнті корисної дії. Його застосування дозволяє гарантувати стабільне живлення компонентів навіть у випадках, коли напруга акумулятора поступово знижується під час його розрядження.

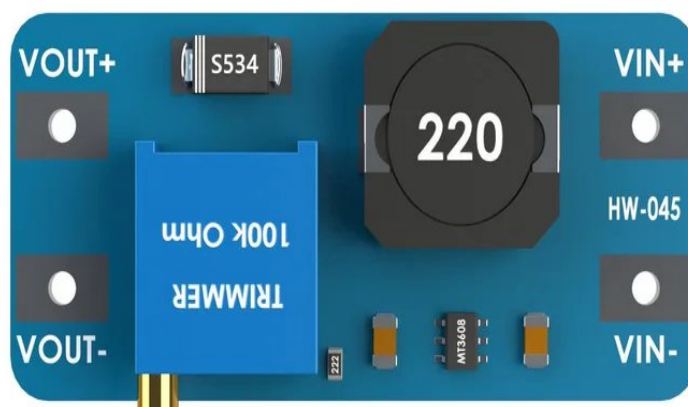


Рисунок 2.11 - Перетворювач напруги MT3608 [80]

MT3608 є компактним модулем, який дає змогу регулювати вихідну напругу вручну за допомогою потенціометра. Завдяки цьому можна точно налаштувати рівень напруги, необхідний для роботи системи. Його надійність, простота інтеграції та невисока вартість дозволяють ефективно використовувати даний компонент у системах моніторингу, де важливо забезпечити безперебійну роботу без ускладнення схеми живлення.

Разом із акумулятором і підвищувальним перетворювачем у системі передбачене використання блоку живлення на 5 вольт, який підключається до мережі змінного струму. Цей блок виконує функцію основного джерела живлення за нормальних умов, одночасно забезпечуючи заряджання акумулятора. Для реалізації процесу зарядки обрано спеціальний модуль - TP4056. Він призначений для автоматичного керування зарядженням літійових акумуляторів та включає захист від перевантаження, перезарядження, перегріву й глибокого розряду.

Модуль TP4056 здатний одночасно виконувати дві функції - заряджання акумулятора і передавання енергії на підвищувальний перетворювач, що живить систему. Таким чином, коли система підключена до мережі, енергія надходить до акумулятора через TP4056, а також використовується для живлення мікроконтролера та сенсора. У разі відключення електропостачання TP4056 автоматично припиняє заряджання, і система переходить на живлення від

акумулятора. Це перемикання відбувається без необхідності втручання оператора і не призводить до перерви в роботі системи. Подібна реалізація дозволяє забезпечити безперервність функціонування системи навіть у разі довготривалого зникнення напруги в мережі, що є особливо важливим для архівних установ, де умови зберігання мають суворо регламентовані параметри.

У межах реалізації проекту було використано літієвий акумулятор формату 18650 з ємністю 2000 мА·год. Такий акумулятор забезпечує декілька годин автономної роботи системи, залежно від енергоспоживання конкретних компонентів. Він підключений до TP4056, з якого виходить напруга до MT3608. Далі стабілізована напруга 5 вольт надходить на живлення мікроконтролера ESP8266, до якого підключено сенсор DHT22. Таким чином, енергетична архітектура системи дозволяє їй працювати як у звичайному режимі від мережі, так і в автономному - при живленні виключно від акумулятора.

Окремої уваги потребує питання безпеки. Під час роботи з літієвими акумуляторами важливо передбачити захист від короткого замикання, перегріву та перезарядження. Для цього використовуються акумулятори з вбудованим захисним контролером або додаткові модулі РСМ (Protection Circuit Module) чи ВМС (Battery Management System). У нашій системі було обрано акумулятор з вбудованим захистом, що забезпечує базову безпеку експлуатації в межах номінальних характеристик.

Резюмуючи вищевикладене, слід зазначити, що поєднання літієвого акумулятора, підвищувального перетворювача MT3608 та зарядного модуля TP4056 утворює ефективну та надійну систему живлення для системи. Така комбінація дозволяє забезпечити повну незалежність пристрою від зовнішнього електропостачання, зберігаючи при цьому здатність до самозарядження і стабільної подачі енергії. Простота реалізації, доступність компонентів, а також їх висока сумісність і взаємозамінність дозволяють рекомендувати дану архітектуру як універсальне рішення для широкого спектра задач в галузі Інтернету речей (IoT), екологічного моніторингу, автоматизації і, зокрема, для збереження культурної та історичної спадщини в умовах архівних приміщень.

Для локальної візуалізації даних будемо використовувати OLED-дисплей із діагоналлю 0.96 дюйма, побудований на контролері SSD1306. Він є популярним засобом виведення візуальної інформації в проектах на базі мікроконтролерів, таких як Arduino, ESP8266. Він належить до класу органічних світлодіодних дисплеїв, які відрізняються високою контрастністю, яскравістю, енергоефективністю та широким кутом огляду. Завдяки своїм фізичним властивостям і простоті інтеграції в електронні системи, цей дисплей здобув популярність у різноманітних проектах: від простих годинників до складніших кіберфізичних систем, які передбачають моніторинг та аналіз даних у режимі реального часу.

Фізичні характеристики дисплея включають невеликі габарити, які дозволяють зручно вбудовувати його навіть у компактні пристрої. Його роздільна здатність складає 128 пікселів по горизонталі та 64 по вертикалі. Всі пікселі є монохромними, тобто можуть відображати лише два стани: увімкнений або вимкнений, що ідеально підходить для графіки, іконок, символів або текстової інформації. Важливою особливістю є те, що кожен піксель є незалежним світлодіодом, який сам випромінює світло. Це означає, що дисплей не потребує підсвічування, як це необхідно в рідкокристалічних (LCD) екранах, і завдяки цьому споживає значно менше енергії, особливо коли більшість пікселів вимкнена.

OLED-дисплей, оснащений контролером SSD1306, підтримує два основні інтерфейси зв'язку - SPI (Serial Peripheral Interface) та I²C (Inter-Integrated Circuit). У більшості готових модулів, які використовуються з Arduino-сумісними платами, реалізований саме інтерфейс I²C, оскільки він передбачає використання лише двох проводів для передавання як даних, так і тактуючих імпульсів. Це дає можливість значно спростити монтаж пристрою та зменшити кількість використовуваних контактів мікроконтролера. Враховуючи, що в багатьох сучасних мікроконтролерах кількість доступних GPIO обмежена, така особливість є досить важливою. Дані по шині I²C передаються у вигляді пакетів, які містять адресу пристрою (у випадку SSD1306 це зазвичай 0x3C або 0x3D) та корисну інформацію - або команди керування, або графічні дані. Команди дають змогу вмикати чи

вимикати пікселі, керувати яскравістю, оновлювати зображення, задавати положення курсору або вибирати режим відображення.

Робота з дисплеєм починається з ініціалізації, яка виконується під час запуску мікроконтролера. На цьому етапі дисплею передаються необхідні конфігураційні параметри, такі як вибір сторінки пам'яті, тип адресації (горизонтальна, вертикальна або сторінкова), налаштування контрастності та режиму відображення. У більшості випадків усі ці процедури вже реалізовані у готових бібліотеках, які полегшують розробку - наприклад, `Adafruit_SSD1306`, `U8g2` або `GFX`. Такі бібліотеки дозволяють розробнику не занурюватися в особливості протоколу I²C чи командного набору SSD1306, а відразу працювати на вищому рівні - малювати текст, лінії, кола, прямокутники або навіть завантажувати зображення у вигляді монохромних растрових бітмапів.

Ще одним важливим аспектом у роботі з дисплеєм є структура його пам'яті. Контролер SSD1306 організовує відеопам'ять у вигляді сторінок, кожна з яких відповідає 8 горизонтальним рядкам пікселів. Таким чином, вся область екрану поділена на 8 сторінок по 128 байтів кожна. Передавання зображення на дисплей зазвичай здійснюється послідовно - сторінка за сторінкою, байт за байтом. Кожен байт визначає стан 8 вертикально розташованих пікселів. Такий підхід забезпечує високу швидкість оновлення зображення, особливо коли потрібно змінити лише частину дисплея, а не весь екран одразу.

Однією з важливих переваг OLED-дисплея на базі контролера SSD1306 є його енергоефективність. Завдяки тому, що кожен піксель самостійно випромінює світло, дисплей споживає енергію лише тоді, коли пікселі активні. Це особливо корисно в системах, які працюють від батарей або акумуляторів, де критично важливо зберігати заряд. У випадках, коли більшість дисплея залишається темною, енергоспоживання може знижуватися до кількох міліамперів. Крім того, при відображенні статичного зображення дисплей не потребує постійного оновлення, на відміну від деяких TFT-дисплеїв, де періодичне оновлення кадру є обов'язковим. Також варто зазначити, що OLED-дисплей не має потреби у

підсвічуванні задньої панелі, завдяки чому забезпечується глибокий чорний колір і висока контрастність, яка залишається сталою незалежно від кута огляду.

Щодо апаратного підключення, стандартний OLED-дисплей з інтерфейсом I²C має чотири виводи: VCC, GND, SCL і SDA. Напруга живлення VCC зазвичай складає 3.3 або 5 вольт, що робить дисплей сумісним як із мікроконтролерами на 3.3V (наприклад, ESP8266), так і з тими, які працюють на 5V (наприклад, Arduino Uno). Сигнальні лінії SCL (тактова) та SDA (дані) підключаються до відповідних пінів мікроконтролера, які підтримують шину I²C.

Для точної фіксації часу та дати використовуємо RTC-модуль DS3231, одним з найточніших і найзручніших для використання модулів реального часу. Його головною особливістю є вбудований температурно-компенсований кварцовий генератор, який забезпечує високу точність ходу годинника незалежно від змін температури навколишнього середовища. Це критично важливо у випадках, коли пристрій повинен працювати впродовж тривалого часу без підключення до зовнішніх джерел синхронізації, наприклад, у автономних системах моніторингу або в проектах зі збору даних у віддалених місцях.

На відміну від простіших RTC-модулів, таких як DS1307, модуль DS3231 забезпечує точність, що може досягати ± 2 хвилин на рік, що вважається дуже хорошим показником для пристроїв такого класу. Така висока стабільність забезпечується за рахунок вбудованого температурного датчика, який постійно відстежує температуру кристалу і автоматично вносить корекції у частоту генератора. Це дозволяє модулю зберігати точність навіть при різких змінах температури, що є надзвичайно важливим у системах, які працюють в умовах змінного клімату.

Модуль DS3231 також має на борту незалежне джерело живлення у вигляді роз'єму для підключення батарейки типу CR2032 або аналогічної. Це дозволяє зберігати поточний час і дату навіть у разі повного знеструмлення основної системи. Батарейка підтримує живлення внутрішнього годинника і регістрів пам'яті, тому навіть при тривалому відключенні живлення не виникає потреби повторно встановлювати час. Крім того, модуль має можливість визначати

наявність або відсутність основного живлення, автоматично перемикаючись між живленням від джерела і батареї, що забезпечує надійну роботу у всіх умовах.

Ще однією ключовою перевагою модуля DS3231 є наявність вбудованої пам'яті типу EEPROM або Flash (залежно від конкретної версії плати), а також наявність контактів для підключення шини I²C. Цей інтерфейс є надзвичайно зручним і широко підтримується практично всіма сучасними мікроконтролерами, включаючи Arduino, ESP8266, ESP32, STM32 та інші. Завдяки цьому підключення модуля до мікроконтролера не потребує великої кількості проводів - достатньо лише двох сигнальних ліній, крім живлення. Також завдяки використанню I²C шини зручно підключати кілька пристроїв до одного порту, що дозволяє економити пінові ресурси на платі.

У контексті використання RTC DS3231 в кіберфізичній системі моніторингу температури і вологості в архівному сховищі, цей модуль дозволяє точно зафіксувати час кожного вимірювання. Це є надзвичайно важливим для подальшого аналізу даних, виявлення тенденцій або критичних відхилень. Наприклад, завдяки точному часу можна визначити, коли саме в приміщенні відбулася зміна температури або вологості, що може свідчити про відкриття дверей, зміну погодних умов або збій у роботі кліматичної техніки. Таким чином, модуль DS3231 виступає не лише як хронометр, але і як основа для фіксації всіх змін у системі, дозволяючи створити структурований лог змін із зазначенням дати та часу.

Ще однією важливою характеристикою модуля реального часу DS3231 є його здатність забезпечувати апаратні сигнали переривання. Це можливо завдяки вбудованим будильникам, які можуть бути запрограмовані на спрацювання в заданий момент часу. Такий функціонал особливо корисний у системах, які повинні виконувати певні дії через задані інтервали або при досягненні конкретного часу. Наприклад, в системі моніторингу архівного середовища це може бути сигнал для активації збору даних кожні півгодини або початку зберігання отриманих значень у внутрішній пам'яті або на карту пам'яті. Будильники дозволяють знизити загальне енергоспоживання системи, адже

мікроконтролер може перебувати у режимі сну й активуватись лише на час вимірювання чи збереження інформації.

Особливістю DS3231 є підтримка двох незалежних будильників, кожен з яких має гнучке налаштування. Вони можуть бути запрограмовані на спрацювання щосекунди, щохвилини, щогодини, в певний день тижня або конкретну дату. Така гнучкість дозволяє будувати більш складні алгоритми роботи системи без необхідності постійного опитування модуля з боку мікроконтролера. Таким чином, сам модуль частково бере на себе керування подіями, що робить загальну архітектуру системи простішою і ефективнішою.

У модуля DS3231 також є вбудований температурний сенсор, який дозволяє зчитувати значення температури всередині корпусу з точністю до $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Цей сенсор спочатку був інтегрований для температурної компенсації генератора, але значення з нього також можна використовувати в додатку. У системі моніторингу це може бути додатковим джерелом інформації, яке допоможе перевіряти працездатність інших температурних сенсорів або виявляти перегрів самої плати. Хоча точність цього датчика не така висока, як у спеціалізованих пристроїв, він залишається корисним елементом резервного контролю.

Підключення модуля DS3231 до мікроконтролера є досить простим. Для цього потрібно використовувати стандартну I²C шину, яка складається з двох ліній: SDA (дані) та SCL (тактування). Живлення модуля можна здійснювати від стандартного джерела 3.3V або 5V, оскільки більшість плат на базі DS3231 мають на борту стабілізатори напруги і логічні рівні, сумісні як із низьковольтними, так і високовольтними мікроконтролерами. У випадку використання ESP8266, який працює на 3.3V, рекомендується перевірити специфікацію плати, щоб уникнути можливих конфліктів логічних рівнів. У багатьох випадках модуль DS3231 адаптовано до роботи з 3.3V системами, проте деякі версії вимагають 5V живлення.

Для програмного забезпечення з мікроконтролерами Arduino або ESP, доступна велика кількість бібліотек, які значно спрощують роботу з DS3231. Найпоширенішою бібліотекою є «RTClib» від Adafruit, яка підтримує не лише читання і запис часу, але й роботу з будильниками, зчитування температури та

навіть корекцію точності. Завдяки відкритому коду та великій спільноті розробників, можливості налаштування модуля майже необмежені. Це дозволяє інтегрувати його у складні багатофункціональні системи без необхідності писати програмне забезпечення з нуля.

Завдяки вбудованому джерелу резервного живлення, модуль DS3231 є повністю автономним у збереженні поточного часу. Це означає, що при кожному перезапуску системи або після втрати живлення не виникає необхідності повторно ініціалізувати час за допомогою зовнішніх засобів, таких як підключення до сервера часу через Wi-Fi. Це особливо важливо у випадках, коли система розгорнута у віддалених місцях, де немає постійного доступу до інтернету або можливості ручного втручання.

Ще однією перевагою DS3231 є його доступність на ринку і низька вартість у порівнянні з іншими модулями, які мають аналогічну функціональність і точність. Це дозволяє реалізувати навіть багатоканальні системи моніторингу, де кожен вузол буде мати власний незалежний RTC-модуль, без значного збільшення загальної вартості проекту. Завдяки цьому забезпечується не лише точність, але й гнучкість побудови всієї системи в цілому.

2.6. Протокол передачі даних і хмарне зберігання

У процесі проектування кіберфізичної системи моніторингу вологості та температури у сховищі архіву ключовим етапом стало забезпечення безпечної та стабільної передачі даних від сенсора до хмарного середовища, де інформація зберігатиметься, оброблятиметься і візуалізуватиметься для подальшого аналізу. З огляду на вибраний мікроконтролер ESP8266, що має вбудований Wi-Fi-модуль, була реалізована передача даних через бездротове з'єднання до публічної хмарної платформи.

Основним протоколом для передачі даних був обраний HTTP, що забезпечує просту реалізацію, високу сумісність з більшістю вебсервісів та достатній рівень стабільності для задач реального моніторингу мікроклімату в архівному

приміщенні. Протокол, реалізований у межах системи, базується на принципі HTTP-з'єднання з автентифікацією за допомогою токена, який надається кожному користувачу Blynk після реєстрації та створення нового проекту. Саме цей токен забезпечує захищений доступ до персонального хмарного простору, де відображаються передані з ESP8266 дані. Завдяки зручному мобільному додатку, користувач має змогу візуально спостерігати за змінами показників у реальному часі, а також переглядати історію зібраних даних, яка зберігається автоматично на серверах Blynk. Кожен зібраний параметр, наприклад, температура та вологість, передається на сервер у форматі JSON через POST-запит. Додатково передача супроводжується міткою часу, що дозволяє точно визначати, коли було зафіксовано ті чи інші показники. Для автентифікації і захисту даних на сервері використовується унікальний токен, який створюється при реєстрації на платформі Blynk. Цей токен дозволяє з'єднати ESP8266 з обраним проектом у хмарі, гарантуючи безпеку передавання даних.

Передача даних здійснюється на віртуальні порти Blynk, де кожен порт відповідає за певний параметр, наприклад, температура передається на віртуальний пін V0, а вологість - на V1. Це дозволяє створити інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для мобільного додатку, в якому користувач може в реальному часі переглядати всі необхідні показники. Платформа Blynk підтримує візуалізацію даних у вигляді графіків, що дозволяє спостерігати за змінами умов у сховищі архіву протягом часу.

Окрім зручності для користувача, Blynk надає можливість налаштування сповіщень за допомогою мобільного додатку. Наприклад, якщо температура або вологість у сховищі перевищує певні межі, система може автоматично відправити сповіщення на смартфон користувача. Такий підхід допомагає здійснювати контроль над умовами архіву дистанційно, навіть якщо спеціалісти не перебувають фізично на місці. Завдяки тому, що платформа має безкоштовний план для невеликих проектів, вона є ідеальним рішенням для кіберфізичної системи з мінімальними витратами на обслуговування інфраструктури. У разі необхідності,

система може бути розширена або перенесена на більш потужні сервери, якщо обсяг зберігання або кількість запитів до хмарного сервісу зросте.

З метою підвищення гнучкості обробки переданих даних та їхньої інтеграції з іншими інформаційними системами, розглядалася також можливість використання альтернативних протоколів передачі, таких як MQTT або WebSocket, які передбачають більш ефективний двосторонній обмін інформацією у режимі реального часу. Проте, з огляду на обмеження енергоспоживання та ресурси мікроконтролера, було прийнято рішення зосередитись на використанні протоколу HTTP, як такого, що гарантує стабільну роботу при мінімальних витратах обчислювальних потужностей.

Передача даних здійснюється з урахуванням структури поділу на циклічні сеанси зв'язку. Такий підхід дозволяє уникати постійного навантаження на мережу, оскільки дані надсилаються із заданою періодичністю, відповідно до параметрів, визначених у програмному коді. З технічної точки зору, це реалізується через інтервали виклику функцій HTTP POST, які активуються лише після завершення збору нових сенсорних показників. Така модель дозволяє досягти компромісу між частотою оновлення інформації та тривалістю автономної роботи системи на акумуляторному живленні.

Особливу увагу приділено синхронізації часових позначок для фіксації моменту збору кожного значення. Для цього використовується модуль реального часу DS3231, який забезпечує високоточне відлічування часу незалежно від наявності підключення до мережі. При кожному зчитуванні сенсорних даних, у тіло POST-запиту додається значення поточного часу у форматі ISO 8601, що дозволяє ефективно організувати базу даних у хмарному середовищі та здійснювати пошук, фільтрацію або агрегацію інформації за часовими мітками.

Після передачі, дані зберігаються у хмарному сховищі, пов'язаному із платформою Blynk. Для внутрішнього зберігання використовується модель, орієнтована на тимчасові ряди, що дозволяє використовувати ці дані у системах аналітики, передбачення або моделювання динаміки мікроклімату. У разі потреби, платформа дозволяє експортувати інформацію у форматах CSV або JSON, що

відкриває можливість подальшої обробки за допомогою спеціалізованих аналітичних інструментів, таких як MATLAB, R або Python-бібліотеки (наприклад, Pandas, Matplotlib).

Слід зазначити, що хоча передача даних у системі відбувається через відкритий протокол HTTP, додатковий рівень захисту реалізується за допомогою автентифікаційного токена. У разі модернізації проекту на наступних етапах можлива міграція на HTTPS із впровадженням SSL/TLS-шифрування, що гарантуватиме повний захист інформаційного каналу навіть у відкритих або нестабільних мережах. Такий перехід потребуватиме розширення обчислювальних можливостей або оптимізації енергоспоживання, однак його впровадження відповідає сучасним вимогам до безпеки IoT-систем. Розглядаючи перспективу масштабування, необхідно передбачити використання проміжного шлюзу, наприклад, MQTT-брокера або локального сервера, який прийматиме дані від кількох ESP8266 і надсилатиме їх у хмару вже в об'єднаному, оптимізованому вигляді. Така структура дозволить зменшити кількість запитів до віддаленого сервера, зменшити час відповіді та забезпечити кращий контроль над переданою інформацією, особливо у випадках інтенсивного моніторингу з багатьох точок розміщення сенсорів у великому архівному просторі.

Важливим компонентом подальшого розвитку системи є реалізація локального кешування даних. У випадках нестабільного або відсутнього інтернет-з'єднання, мікроконтролер або додатковий модуль зберігатиме сенсорні дані у внутрішній пам'яті або на карті microSD, після чого здійснюватиметься автоматична передача інформації до хмари при відновленні з'єднання. Така стратегія дозволяє зберегти безперервність збору показників та уникнути втрати даних, що є критично важливим для довготривалого моніторингу.

2.7. Висновки

У даному розділі розроблено математичну модель КФС, обґрунтовано вибір компонентів для реалізації кіберфізичної системи, включаючи сенсори для

вимірювання вологості та температури, а також пристрої для обробки та передачі зібраних даних. Під час вибору компонентів було враховано важливість надійності та точності вимірювань, а також енергоефективності системи. Обраний для проекту сенсор DHT22 забезпечує точність вимірювань, що є необхідним для збереження архівів. Вибір мікроконтролера ESP8266 базувався на його можливостях з обробки даних і підтримці бездротової комунікації Wi-Fi, що сприяє гнучкості та автономності системи. Важливим аспектом став підбір джерела живлення, яке гарантує безперервну роботу системи, а також засобів комунікації для надійної передачі даних. Реалізація протоколу передачі та використання хмарного зберігання дозволяють зберігати інформацію у реальному часі і забезпечують зручний доступ до неї.

3. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ЗБОРУ, ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ

3.1. Алгоритм збору та обробки даних у реальному часі

Особливе значення для кіберфізичної системи має розробка алгоритму збору та обробки даних у реальному часі. Такий алгоритм покликаний забезпечити безперервний та достовірний потік інформації про мікрокліматичні умови середовища, що критично важливо для збереження архівних документів. Оскільки навіть незначні відхилення параметрів температури чи вологості можуть призвести до прискореного старіння паперових носіїв або виникнення плісняви, система має функціонувати з максимальною точністю, стабільністю і надійністю. Розроблений алгоритм включає декілька взаємопов'язаних етапів: ініціалізацію апаратних компонентів системи, зчитування сенсорних даних, попередню обробку показників, їх виведення на дисплей, передачу через мережеві інтерфейси та збереження у базі даних або хмарному сховищі. Також алгоритм передбачає автоматичну перевірку отриманих значень на відповідність встановленим порогам, що дозволяє своєчасно виявляти критичні відхилення. У разі виявлення небезпечних умов система здатна ініціювати надсилання попереджень користувачу, що значно підвищує ефективність реагування на загрози для архівного фонду. Крім того, алгоритм має забезпечити періодичне оновлення інформації відповідно до заданого інтервалу, коректну синхронізацію з модулем реального часу (RTC), обробку помилок зчитування, а також мінімізацію енергоспоживання у випадках автономної роботи системи. Послідовність роботи кіберфізичної системи зображена на блок-схемі (рис. 3.1), яка ілюструє основні етапи функціонування: від збору інформації до передачі повідомлення користувачеві у разі відхилень від норми.

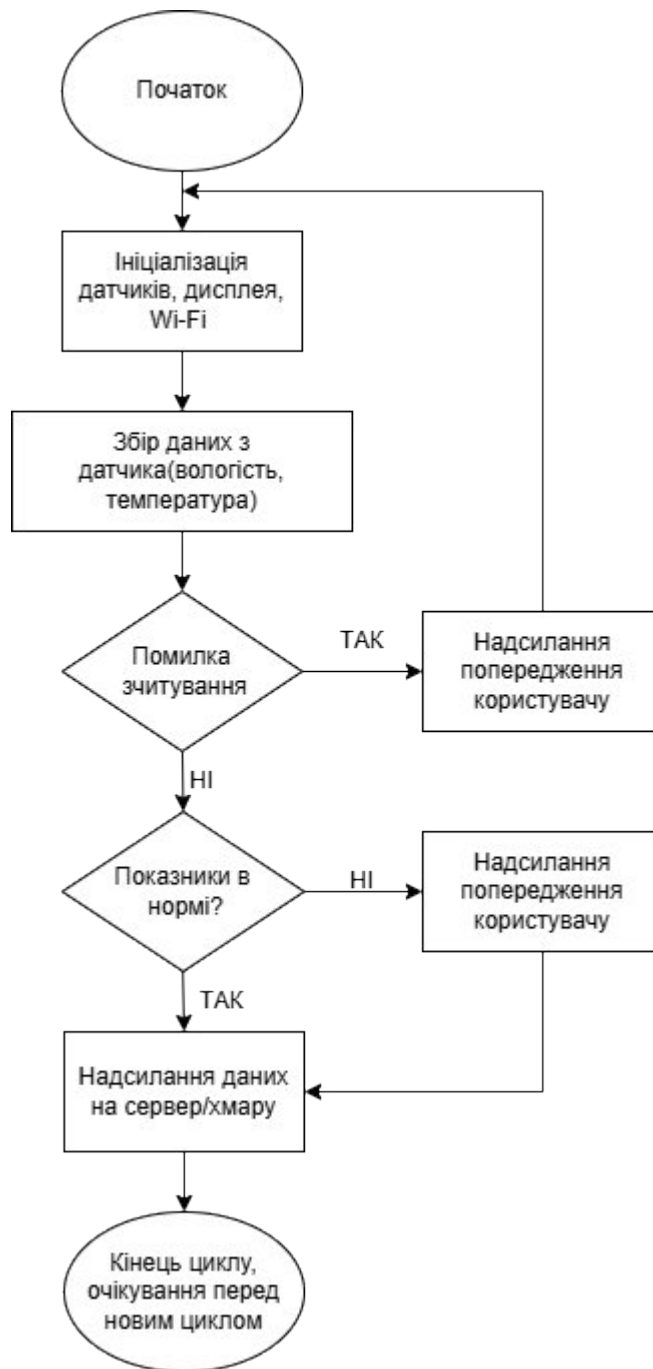


Рисунок 3.1 - Блок-схема алгоритму збору і обробки даних

Перший етап роботи алгоритму полягає у ініціалізації основних компонентів. Після подачі живлення на мікроконтролер ESP8266 запускається процедура ініціалізації бібліотек і компонентів, зокрема цифрового сенсора DHT22, який відповідає за вимірювання температури та відносної вологості повітря, модуля годинника реального часу DS3231, OLED-дисплея SSD1306 та модуля Wi-Fi. На цьому етапі виконується тестова перевірка доступності кожного пристрою за

допомогою сигналів зворотного зв'язку. Якщо один із компонентів не відповідає, система переходить у режим очікування з повідомленням про помилку на екрані.

Після завершення ініціалізації система переходить до регулярного зчитування сенсорних даних. DHT22, підключений до одного з цифрових пінів ESP8266, передає цифрові значення температури та вологості через спеціальний протокол передачі даних. Ці значення обробляються вбудованими функціями бібліотеки DHT.h, що дозволяє перевести їх у десятковий формат з точністю до одного знаку після коми. Завдяки високій чутливості DHT22 та точності вимірювань ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ для температури та $\pm 2\%$ для вологості), отримані дані можуть вважатися достовірними для використання у системах контролю мікроклімату.

Наступним етапом є попередня обробка даних. Алгоритм фільтрує показники для виключення різких стрибків, що можуть бути спричинені електромагнітними перешкодами або короткочасними збоїми у передачі даних. Для цього застосовується метод ковзного середнього з урахуванням останніх трьох вимірювань. Це дозволяє згладити коливання, зберігаючи при цьому реалістичну динаміку змін мікрокліматичних умов. Водночас система перевіряє, чи не виходять поточні значення за встановлені межі допустимих параметрів (наприклад, $18\text{--}22^{\circ}\text{C}$ для температури та $45\text{--}55\%$ для вологості). У разі фіксації критичних відхилень передбачена можливість подання сигналу тривоги, що може активувати зовнішнє інформування або записати подію у спеціальний лог.

Після фільтрації дані виводяться на OLED-дисплей у зручному для візуального контролю форматі. На екрані відображається поточна температура, вологість, а також дата і час, отримані з модуля DS3231. Інформація оновлюється щосекунди або відповідно до заданого інтервалу (наприклад, кожні 5 хвилин), що забезпечує користувачеві можливість безпосереднього моніторингу без підключення до мережі. Завдяки енергоефективному дисплею SSD1306 та правильній реалізації процедури оновлення екрану (оновлюється лише змінена частина зображення), вдається значно знизити навантаження на енергоспоживання.

Ключовим елементом алгоритму є передача даних до віддаленого серверу або локального хмарного середовища. Мікроконтролер ESP8266 підключається до

Wi-Fi мережі за вказаними у скетчі параметрами (SSID і пароль). Після встановлення стабільного з'єднання система формує HTTP-запит до API або відкритого вебсервісу, у якому передаються актуальні значення температури, вологості та часові мітки. Ці дані можуть зберігатися у базі даних MySQL, Google Sheets або іншій платформі, що підтримує REST API. Завдяки цьому користувач отримує змогу переглядати архів показників з будь-якої точки світу, а також аналізувати тенденції зміни мікроклімату за допомогою візуалізацій, графіків чи автоматичних звітів.

Важливою функцією алгоритму є синхронізація часу. RTC-модуль DS3231 забезпечує точне відображення поточного часу, що використовується як мітка у всіх записах. Однак у разі наявності інтернет-з'єднання можлива автоматична корекція часу через доступ до мережевого протоколу NTP (Network Time Protocol), що усуває накопичення похибок, які можуть виникати навіть у точних апаратних годинниках.

З метою підвищення надійності, алгоритм також включає механізми обробки помилок. Якщо на будь-якому етапі зчитування даних або передачі виникає збої, система намагається повторити спробу. Якщо помилка не усувається після трьох ітерацій, вона фіксується у лог-файлі та позначається спеціальним повідомленням на екрані. Завдяки цьому забезпечується прозорість функціонування системи, що дозволяє оперативно виявити й усунути несправності.

Для пристроїв, які працюють автономно на акумуляторі, алгоритм також містить механізм оптимізації енергоспоживання. Після завершення циклу вимірювання та передачі даних контролер може переходитися у режим глибокого сну (deep sleep), що дозволяє значно зменшити витрати енергії. Наприклад, у режимі очікування ESP8266 може споживати лише 0.01 мА, порівняно з 70–170 мА в активному режимі. Періодичність пробудження задається у програмному забезпеченні та може змінюватися залежно від потреб користувача.

У підсумку, розроблений алгоритм збору та обробки даних у реальному часі виконує центральну роль у функціонуванні кіберфізичної системи моніторингу температури та вологості. Його ефективність визначає точність моніторингу,

стабільність роботи всієї системи, а також можливість прийняття своєчасних рішень щодо підтримки оптимального мікроклімату у сховищі архіву. Інтеграція реального часу, попередньої обробки даних, дистанційної передачі та збереження інформації створює комплексний інструмент для сучасного архівного менеджменту, здатного адаптуватися до змін навколишнього середовища та вимог безпеки збереження культурної спадщини.

Продовжуючи опис функціонування кіберфізичної системи, важливо розглянути можливість її інтеграції з сучасними хмарними сервісами та базами даних. Це відкриває нові перспективи для збереження, обробки та аналізу зібраної інформації. Дані, що надходять у реальному часі, можуть бути збережені у Google Sheets, Firebase, MySQL або на власному сервері з підтримкою REST API. Така гнучкість забезпечує постійний доступ до інформації, навіть при відсутності прямого фізичного підключення до пристрою, а також дозволяє впроваджувати багаторівневий моніторинг з візуалізацією результатів у вигляді графіків, аналітичних панелей чи звітів. Оскільки накопичення значної кількості даних створює основу для глибшого аналізу, варто впроваджувати засоби машинного навчання або статистичної аналітики. Історичні дані, зібрані за тривалий період, дозволяють виявляти тенденції, аномалії та проводити прогнозування змін мікроклімату. Наприклад, якщо виявляється, що в певні періоди року або доби стабільно спостерігається підвищення вологості, система може не тільки сповістити про це, але й автоматично ініціювати корекційні дії - як-от включення осушувача або вентиляційної системи. Таким чином, система переходить з пасивного режиму спостереження до активного управління середовищем. Безпека інформації, що циркулює в системі, є критично важливою. Передавання даних до серверів має відбуватися із застосуванням сучасних протоколів шифрування, зокрема SSL або TLS. Кожен запит автентифікується, що виключає несанкціонований доступ до бази даних чи конфігурацій системи. Крім того, ведення журналів дій користувачів і системних подій забезпечує прозорість роботи та дозволяє швидко реагувати на потенційні загрози, збої чи порушення безпеки.

З урахуванням динамічного розвитку технологій, розроблена система повинна мати відкриту та модульну архітектуру. Це дає змогу легко оновлювати її складові, додавати нові модулі (наприклад, сенсори освітленості або газів), адаптувати під специфічні умови конкретного сховища або розширювати функціональність без повного перепроєктування. Такий підхід знижує вартість модернізації й забезпечує довготривалу актуальність рішення в умовах технологічного прогресу.

Ще одним важливим аспектом є зручність користування. Кінцевий користувач повинен мати змогу легко взаємодіяти з системою, розуміти показники, що відображаються, та приймати рішення на основі чіткої й візуально зрозумілої інформації. Для цього реалізовується простий вебінтерфейс або мобільний застосунок, що показує температурно-вологісні криві, рівень заряду акумулятора, статус підключення до Wi-Fi, останні збережені дані та попередження. Візуалізація не лише підвищує інформативність, але й допомагає в ухваленні швидких рішень у разі загрози архівним матеріалам.

Враховуючи потребу в забезпеченні безперебійної роботи у середовищах з нестабільним живленням або доступом до Інтернету, система підтримує автономний режим. У цьому випадку зібрані дані тимчасово зберігаються у локальному сховищі мікроконтролера або на SD-карті, а передавання відбувається згодом, після відновлення з'єднання. Це гарантує, що жодна інформація не буде втрачена, навіть за несприятливих умов. Також реалізується режим глибокого сну, коли контролер пробуджується лише на короткий час для вимірювань і передачі даних, що суттєво економить енергію та дозволяє працювати від акумулятора тривалий період. Технічна підтримка користувачів і можливість швидкого оновлення програмного забезпечення є невід'ємною складовою довготривалого функціонування такої системи. Усі користувачі мають доступ до технічної документації, інструкцій, а також можуть отримати дистанційну допомогу при налаштуванні або усуненні неполадок. Регулярне оновлення прошивки дозволяє додавати нові функції, покращувати стабільність роботи й забезпечувати відповідність сучасним стандартам безпеки та сумісності.

3.2 Попередня фільтрація та нечіткий аналіз даних

У кіберфізичних системах моніторингу температури та вологості однією з ключових завдань є забезпечення стабільності та достовірності вимірювань сенсорів. Сучасні цифрові датчики DHT22 мають хорошу точність, але в реальних умовах архівного сховища навіть вони можуть давати поодинокі «викиди» через короткочасні перешкоди, коливання живлення або короткі зміни навколишньої обстановки. Для усунення цих випадкових стрибків доцільно застосувати простий, але ефективний алгоритм фільтрації - ковзне середнє.

Метод ковзного середнього (англ. moving average) полягає у розрахунку середнього значення останніх N вимірювань у кожний момент часу. Нехай $x[k]$ - сире вимірне значення (температура і вологість) у дискретний момент k . Тоді фільтроване значення $\underline{x}[k]$ обчислюється за формулою:

$$\underline{x}[k] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[k-i] \quad (3.1)$$

де N - розмір «вікна» фільтра, тобто кількість останніх вимірювань, що враховуються;

$x[k-i]$ - попередні зчитування від сенсора.

Оптимальне значення N залежить від двох факторів: частоти опитування датчика та динаміки зміни мікроклімату в приміщенні архіву. Якщо датчик зчитується, наприклад, кожні 30 секунд, то за $N=5$ алгоритм враховує дані за останні 2,5 хвилини. Менше N робить фільтр «чутливішим» до швидких змін, але менш ефективним у згладжуванні шуму; більше N підвищує згладжування, але призводить до запізнювання реакції системи на реальні зміни умов. У практичних випробуваннях архівного середовища зазвичай N обирають у межах від 3 до 10, залежно від компромісу між стабільністю та оперативністю.

3.3. Методи збереження та аналізу даних

Програмне забезпечення, розроблене для функціонування кіберфізичної системи моніторингу, реалізоване на основі платформи Arduino із використанням мікроконтролера ESP8266. Його основне завдання полягає у зчитуванні, обробці, фільтрації, візуалізації та передачі даних у режимі реального часу. Структура програми організована у вигляді модульного скетчу з чітко розмежованими функціональними блоками. Комунікація з датчиком температури та вологості DHT22 здійснюється через цифровий пін з використанням однопровідного протоколу. Встановлений часовий інтервал між циклами зчитування забезпечує стабільність показників та знижує ризик накопичення похибок. Дані зчитуються як пара значень - температура в градусах Цельсія та відносна вологість у відсотках. Перед обробкою кожне з отриманих значень проходить перевірку на допустимість. У разі виявлення нульових або надмірних значень, які виходять за межі фізично можливих параметрів, вони виключаються з подальшої обробки. Таким чином, реалізовано базову фільтрацію, яка запобігає спотворенню результатів у випадку короткочасних збоїв або перешкод. У програмі також реалізовано повторне зчитування значень при виникненні сумнівів у достовірності, що сприяє підвищенню точності та зменшує кількість втрат інформації. Такий підхід гарантує стабільну роботу системи в умовах потенційних зовнішніх впливів, які можуть призводити до збоїв у зчитуванні.

Інформація, що відповідає критеріям достовірності, передається на дисплей OLED 0.96" із контролером SSD1306. Підключення дисплею здійснюється через інтерфейс I2C, що дозволяє використовувати лише два пін-контакти для передачі даних та синхронізації сигналів. Для виводу тексту використовується бібліотека Adafruit_SSD1306, яка підтримує графічне форматування та налаштування розміру шрифту. Дані подаються у компактному форматі: температура з точністю до одного знака після коми та вологість із точністю до цілих значень. Візуальне відображення забезпечує користувачеві зручне сприйняття показників у будь-який момент часу. У разі потреби інтерфейс дозволяє додавати короткі повідомлення

або сигнали, які сповіщають про зміну стану системи чи необхідність втручання персоналу. Така реалізація підвищує інтерактивність пристрою та робить його більш інформативним у реальних умовах експлуатації.

Синхронізація вимірювань у часовому контексті реалізується за допомогою модуля реального часу DS3231. Цей модуль забезпечує точне відображення дати й часу з мінімальним дрейфом годинника. Зчитування часових міток відбувається відразу перед кожним зчитуванням показників температури та вологості, завдяки чому кожне значення даних отримує унікальну прив'язку у форматі «рік-місяць-день година:хвилина:секунда». Це дозволяє не лише створювати локальну історію змін параметрів, а й відслідковувати динаміку змін при подальшому аналізі. Для забезпечення цілісності даних у випадку короткочасної втрати живлення, часові мітки зберігаються у змінних програми до моменту їх передачі. Завдяки стабільності роботи DS3231, інформація не втрачається навіть при повторному запуску системи. Передача даних у мережу здійснюється за умови активного з'єднання ESP8266 з Wi-Fi. Мікроконтролер ініціалізує підключення до вказаної мережі, використовуючи задані у коді параметри SSID і пароль. У разі успішного з'єднання формується HTTP-запит типу POST або GET залежно від обраного протоколу взаємодії з сервером. Дані упаковуються у формат JSON, що є зручним для парсингу на стороні приймача. Кожен пакет включає показники температури, вологості, а також часову мітку. Такий формат обміну дозволяє інтегрувати систему з хмарними платформами або локальними серверами для довготривалого зберігання та аналітики. Форматування JSON дає змогу використовувати дані як для побудови графіків, так і для автоматизованого контролю порогових значень через сторонні сервіси. Таким чином, система стає частиною ширшої інформаційної інфраструктури.

Програмний цикл роботи включає також механізми оптимізації енергоспоживання. У випадках автономного живлення від акумулятора система використовує режим сну (deep sleep), що дозволяє мікроконтролеру вимикати більшість внутрішніх блоків між циклами вимірювання. Цей режим активується через заданий інтервал часу, після чого система пробуджується, виконує цикл

зчитування, обробки, відображення та передачі даних, а потім знову переходить у режим очікування. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити загальне енергоспоживання й продовжити час автономної роботи при живленні від літій-іонного акумулятора. Налаштування тривалості сну проводиться дослідним шляхом відповідно до конкретних умов роботи системи. Враховується частота зміни мікроклімату та потреба у безперервному моніторингу, що дозволяє досягти оптимального балансу між енергоефективністю та точністю.

Код програми містить розділи ініціалізації бібліотек, налаштування пінів, зчитування сенсорних даних, форматування текстових повідомлень для дисплея, а також формування структури JSON для мережевої передачі. У випадку виявлення помилки під час зчитування з датчика або з'єднання з мережею, система переходить у стан очікування до наступного циклу вимірювання, не зберігаючи некоректну інформацію. Інтерфейс виводу на OLED-дисплей дозволяє також реалізувати вивід додаткових повідомлень, зокрема стану Wi-Fi з'єднання, статусу живлення або попереджень при досягненні критичних параметрів. Наприклад, при перевищенні встановленого порогу температури і вологості на дисплеї може відобразитися повідомлення типу «Тривога: Вологість > 70%», що полегшує оперативне реагування персоналу архіву.

Візуальна частина може бути доповнена графічними елементами - іконками або індикаторами статусу, що розширює інформативність виводу. У разі використання веб-інтерфейсу або мобільного застосунку ці елементи можуть бути синхронізовані з хмарними даними, отриманими із пристрою. Програмна реалізація передбачає також гнучкість конфігурації. За потреби можна змінити інтервал зчитування даних, порогові значення тривог, частоту оновлення дисплею або навіть формат даних для передачі на сервер. Завдяки відкритому коду користувач має можливість адаптувати систему під специфіку конкретного середовища - від невеликого архівного приміщення до великого сховища з кількома зонами моніторингу.

У процесі моніторингу мікроклімату архівного приміщення важливо не лише фіксувати абсолютні значення температури та вологості, а й інтерпретувати їх з

точки зору ризику для збереження архівних матеріалів. Проте класичні методи аналізу, що базуються на порогових значеннях, не завжди є ефективними у реальному середовищі, де фізичні процеси мають неперервний характер, а перехід від «нормального» до «небезпечного» стану часто є плавним. У зв'язку з цим, доречним є використання теорії нечітких множин, що дозволяє гнучко моделювати ситуації з невизначеністю та нечіткістю меж між станами мікроклімату.

Теорія нечітких множин (fuzzy sets theory), запропонована Лотфі Заде у 1965 році, дає змогу кожному значенню параметра призначати не абсолютне логічне значення (наприклад, “норма” або “відхилення”), а ступінь належності до кількох множин одночасно. Наприклад, температура 26°C може з деякою мірою належати як до множини “нормально”, так і до “тепло”, з різними коефіцієнтами належності.

У кіберфізичній системі для оцінки мікроклімату в архіві можна визначити нечіткі множини для кожного параметра. Для температури доцільно розглядати такі нечіткі множини, як “холодно”, “нормально”, “тепло”, “жарко”. Для вологості – “низька”, “оптимальна”, “висока”, “критична”. Кожна з цих множин має свою функцію належності, яка графічно може бути представлена у вигляді трикутної або трапецієподібної функції. Наприклад, функція належності для множини «нормальна температура» може мати максимум при 22–24°C і поступово зменшуватися до нуля при 18°C та 28°C.

Оцінювання параметрів відбувається шляхом обчислення ступеня належності поточного значення температури та вологості до кожної з визначених множин. Наприклад, при температурі 25°C і вологості 65% результати можуть виглядати наступним чином:

Температура 25°C:

- “нормально”: 0.4;
- “тепло”: 0.6.

Вологість 65%:

- “оптимальна”: 0.2;
- “висока”: 0.8.

Після цього застосовується система нечітких правил, яка формалізує залежності таких типів:

- якщо температура є “тепло” і вологість є “висока”, тоді ризик пошкодження документів - “високий”;
- якщо температура є “нормально” і вологість - “оптимальна”, тоді ризик - “мінімальний”;
- якщо температура - “жарко” або вологість - “критична”, тоді ризик - “критичний”.

Застосовуючи до кожного правила метод обчислення мінімуму (\min) для ступенів належності, система може розрахувати для кожного правила його ступінь активації. Наприклад, для першого правила (температура - “тепло”, вологість - “висока”) активність буде $\min(0.6, 0.8) = 0.6$. Це значення буде враховано у подальшій процедурі агрегації та дефазифікації. Після оцінки усіх правил здійснюється процедура дефазифікації, тобто перетворення набору нечітких оцінок у конкретне числове або вербальне рішення. У контексті системи моніторингу, результатом може бути одне з кількох повідомлень:

- “Умови є оптимальними”;
- “Умови близькі до критичних”;
- “Високий ризик пошкодження архівів - вжити заходів!”.

Таким чином, теорія нечітких множин дозволяє уникнути різких порогів та зменшити кількість хибних спрацювань, які виникають у разі класичного бінарного аналізу. Це особливо важливо в системах, що працюють без постійного втручання людини, де автоматичні сповіщення мають бути достатньо точними і релевантними до ситуації.

У практичній реалізації цієї системи алгоритм нечіткого аналізу може бути реалізований у мікроконтролері через спрощений набір правил або виконуватись на серверній стороні, якщо дані передаються в хмарне середовище. Для повноцінного нечіткого моделювання можна використовувати програмне забезпечення типу MATLAB Fuzzy Logic Toolbox, Fuzzy Lite, або прості бібліотеки в Arduino/Python з ручною реалізацією функцій належності та правил.

3.4. Реалізація виводу даних та інтерфейсу користувача

Вивід даних та організація взаємодії користувача з кіберфізичною системою моніторингу температури та вологості у сховищі архіву є ключовим компонентом у побудові ефективної системи зворотного зв'язку. Це забезпечує не лише отримання необхідної інформації в зручному для оператора вигляді, але й можливість оперативного реагування на зміни параметрів середовища, що особливо важливо для збереження архівних матеріалів, чутливих до впливу зовнішніх факторів.

Інтерфейс користувача в контексті даного проекту реалізовано в кількох напрямках: безпосередній фізичний вивід на OLED-дисплей, зчитування поточних параметрів через вебінтерфейс або мобільний пристрій за допомогою Wi-Fi-з'єднання, а також можливість збереження історичних даних у базі даних або зовнішньому хмарному сховищі. Такий підхід дозволяє забезпечити багаторівневий доступ до інформації, що підвищує надійність системи загалом.

Початковим етапом реалізації виводу даних стало використання OLED-дисплея з роздільною здатністю 128x64 пікселі на базі контролера SSD1306. Дисплей працює по протоколу I2C, що дозволяє зменшити кількість з'єднань із мікроконтролером ESP8266 та спростує загальну схему монтажу. Такий дисплей здатен виводити текстову інформацію про температуру, вологість повітря, стан живлення пристрою або поточну дату й час, синхронізовані з модулем RTC DS3231. Через обмежену площу екрану було реалізовано чергування даних із затримкою відображення, що дозволяє користувачу бачити усі ключові параметри системи послідовно без перевантаження візуальної інформації. Вивід організовано таким чином, щоб зменшити час перегляду інформації, при цьому забезпечивши чітке читання навіть за слабкого освітлення.

Крім дисплея, надзвичайно важливою є реалізація дистанційного перегляду даних. У нашому випадку це здійснюється через вебінтерфейс, що створюється за допомогою можливостей модуля ESP8266, зокрема його вбудованого Wi-Fi.

Контролер під'єднується до локальної Wi-Fi-мережі, після чого виступає в ролі вебсервера, що може обробляти HTTP-запити та повертати HTML-сторінки з оновленою інформацією. HTML-інтерфейс містить табличні елементи для зручного представлення даних та оновлюється кожні кілька секунд або за запитом користувача. Такий підхід дозволяє отримати інформацію про стан середовища у сховищі архіву з будь-якого пристрою, що має доступ до локальної мережі, наприклад зі смартфона, ноутбука чи планшета.

Завдяки інтеграції згодом можна розширити функціональність інтерфейсу, додавши візуальні графіки або інтерактивні панелі керування, які дозволяють змінювати параметри системи, наприклад, частоту вимірювань або порогові значення для генерації сповіщень. Для побудови графіків може бути використана бібліотека JavaScript, така як Chart.js, яка працює безпосередньо в браузері й не вимагає складних обчислень з боку контролера. У перспективі можлива також реалізація push-сповіщень або SMS-повідомлень при перевищенні критичних значень, що зробить систему повністю інтерактивною та автономною.

Особливу увагу у розробці інтерфейсу було приділено зручності використання та простоті сприйняття. На етапі тестування було виявлено, що надмірне ускладнення інтерфейсу або використання кольорових схем на невеликих екранах викликає зниження розбірливості інформації. Тому було обрано мінімалістичний стиль із використанням простих шрифтів та чітко структурованих блоків. Усі значення параметрів супроводжуються одиницями вимірювання, а також значками, що дозволяють миттєво ідентифікувати тип даних (наприклад, крапля для вологості, градусник для температури тощо).

Для надання більш глибокого аналізу, система також підтримує можливість передавання зібраних даних у хмарне середовище, зокрема Google Sheets, Firebase або інші сервіси з REST API. Це дає змогу здійснювати довготривале зберігання даних, їхню аналітику, експорт у формати CSV чи Excel, а також обмін результатами моніторингу між користувачами або з адміністративними структурами, відповідальними за збереження архівів. Передача даних здійснюється за допомогою HTTP-запитів або MQTT-протоколу, залежно від обраного сервісу.

Окрему увагу варто приділити питанню інформаційної безпеки та захисту доступу до інтерфейсу. У контексті проекту було реалізовано базову автентифікацію при вході на вебінтерфейс, що забезпечує захист від несанкціонованого перегляду. При подальшій розробці доцільно впровадити шифрування з'єднання через HTTPS, що можливо за умови використання SSL-сертифікатів, або навіть обмежити доступ через VPN.

Щодо роботи самого мікроконтролера, важливо зазначити, що одночасне виконання декількох задач - збирання даних, їх обробка, вивід на дисплей, обслуговування вебінтерфейсу - потребує належного управління ресурсами. Саме тому код програми розроблено з урахуванням не блокуючих затримок (через функцію *millis* () замість *delay* ()), що дозволяє контролеру ефективно працювати в умовах багатозадачності. Крім того, дані на дисплей виводяться лише при зміні значень, що знижує навантаження на пристрій.

Для полегшення діагностики та обслуговування системи інтерфейс також відображає інформацію про стан підключення до мережі Wi-Fi, рівень заряду акумулятора (якщо він передається через ADC-порт), а також сигнали про помилки або відсутність з'єднання із сенсорами. Таким чином користувач може швидко виявити несправності або відхилення в роботі без потреби в зовнішніх інструментах. У рамках інтерфейсу користувача також передбачено режим калібрування або ручного введення початкових параметрів, наприклад, бажаного діапазону температури чи вологості, які в подальшому використовуються для порівняння з реальними показниками та генерації повідомлень або світлових сигналів (наприклад, включення індикатора LED при перевищенні норми).

Реалізація інтерфейсу користувача в кіберфізичній системі моніторингу температури та вологості у сховищі архіву - це не лише питання зручності відображення інформації, але й складний технічний процес, що має низку обмежень і викликів. Для створення ефективного та стабільного інтерфейсу необхідно враховувати багато факторів, які впливають на якість взаємодії користувача з системою, а також на надійність її роботи в цілому.

Перш за все, слід зазначити, що одним із основних обмежень є обмежені апаратні ресурси мікроконтролера ESP8266, який використовується як ядро кіберфізичної системи. Хоча ESP8266 і є потужним та популярним модулем для IoT-проектів, він має обмежену обчислювальну потужність, обсяг оперативної пам'яті (RAM) та постійної пам'яті (Flash). Через це програмне забезпечення повинно бути оптимізоване, щоб ефективно використовувати доступні ресурси. Надмірне навантаження процесора складними обчисленнями або великими обсягами даних, що одночасно обробляються, може призводити до уповільнення роботи або навіть збою системи. Тому розробка інтерфейсу повинна враховувати мінімалізм у візуальному представленні даних і оптимізацію коду для уникнення надмірної обробки.

Обмежена оперативна пам'ять впливає і на можливість одночасного обслуговування кількох клієнтів у вебінтерфейсі. ESP8266 має обмежений стек і невелику кількість доступних сокетів, що обробляють HTTP-запити. У разі одночасного доступу декількох пристроїв до вебінтерфейсу може виникнути затримка або навіть відмова у обслуговуванні нових підключень. Ця особливість накладає певні обмеження на архітектуру вебінтерфейсу: необхідно враховувати, що система більше орієнтована на обслуговування одного або декількох одночасних користувачів з обмеженим потоком даних. Щоб пом'якшити цю проблему, в проекті можна використовувати кешування даних або скорочення обсягу переданих сторінок, а також обмеження частоти оновлення сторінки з боку клієнта.

Ще одним суттєвим викликом є обмеження пропускну здатності та стабільності мережевого з'єднання. Оскільки модуль ESP8266 підключається до локальної Wi-Fi мережі, якість та надійність сигналу можуть варіюватися в залежності від розташування пристрою, перешкод, завантаженості мережі або технічних несправностей. Нестабільне з'єднання може призводити до втрати пакетів даних, затримок у оновленні інформації на вебінтерфейсі або навіть до розриву зв'язку. У системі необхідно передбачити механізми повторного підключення до Wi-Fi мережі та відновлення роботи після тимчасових збоїв. Крім

того, обробка помилок у мережевій взаємодії має бути реалізована таким чином, щоб користувач отримував інформацію про стан підключення і міг оперативно реагувати у разі проблем.

Обмеження дисплея OLED з роздільною здатністю 128x64 пікселі теж створюють свої виклики. Малий розмір екрану не дозволяє відображати велику кількість інформації одночасно, через що необхідно розробити зручний спосіб перемикання між різними типами даних. Крім того, через обмеження за роздільною здатністю доводиться відмовлятися від кольорового відображення, складних графіків або анімацій, що обмежує візуальну привабливість інтерфейсу. Для вирішення цих питань у проекті використано мінімалістичний дизайн із чітким та зрозумілим розташуванням текстових іконок та символів. Також впроваджено циклічне чергування інформації, що дозволяє користувачу бачити всі необхідні параметри, не перевантажуючи екран.

Особливістю реалізації інтерфейсу є обмеження, пов'язані з одночасним виконанням кількох функцій мікроконтролером. ESP8266 має виконувати збір даних з датчиків, обробку цих даних, оновлення OLED-дисплея та обслуговування HTTP-запитів без блокувань. Для цього використовується програмний підхід, який уникає затримок типу `delay ()`, замінюючи їх неблокуючими викликами з таймером `millis ()`. Однак правильне розподілення часу між цими задачами - складне завдання, оскільки затримки можуть призвести до втрати свіжих даних або зниження чутливості системи до змін параметрів. Через це потрібна тонка настройка таймінгів, баланс між швидкістю оновлення інтерфейсу та ефективністю роботи мікроконтролера.

Ще один важливий виклик - це забезпечення безпеки даних і контролю доступу до вебінтерфейсу. У разі підключення до локальної мережі існує ризик несанкціонованого доступу, особливо якщо мережа не має достатнього рівня захисту. В нашому проекті реалізована базова автентифікація, проте через обмеження ESP8266 складно впровадити сучасні стандарти шифрування, такі як HTTPS з SSL-сертифікатами. Це створює потенційні вразливості, які можуть бути критичними у разі роботи з чутливою інформацією. Тому при подальшому

розвитку системи доцільно розглядати використання додаткових засобів захисту, наприклад, встановлення VPN або проксі-сервера, через які будуть проходити запити до контролера.

Щодо зберігання історичних даних, обмежена пам'ять ESP8266 не дозволяє зберігати великі обсяги інформації локально. Тому зберігання ведеться на зовнішніх сервісах через мережу, що додає складнощів у підтримці безперервного та надійного зв'язку. Крім того, організація регулярної передачі даних вимагає продуманого таймінгу, щоб не створювати надмірного навантаження на мережу і уникати конфліктів з іншими завданнями контролера.

Проблемою також є обмеженість інструментів відлагодження у вбудованих системах. Для діагностики роботи інтерфейсу часто використовується серійний порт, але у реальному середовищі експлуатації він недоступний або незручний. Відсутність можливості швидко побачити логіку помилок, збоїв або стану системи ускладнює усунення несправностей. Тому у проекті передбачено вивід інформації про помилки і стан мережі безпосередньо на OLED-дисплей або у вебінтерфейс, що значно полегшує моніторинг.

Усі ці функціональні можливості дозволяють стверджувати, що реалізація виводу даних та інтерфейсу користувача в кіберфізичній системі моніторингу температури та вологості є не лише допоміжним елементом, а одним із найважливіших модулів, який забезпечує зрозумілий, доступний і надійний зв'язок між фізичним світом і оператором. Завдяки цьому система може повноцінно використовуватися не лише як демонстраційний зразок, але й як повнофункціональне рішення для реального архівного приміщення.

3.5. Висновки

У розділі детально розглянуто методи збору, обробки та аналізу даних, які є ключовими для забезпечення ефективного функціонування кіберфізичної системи моніторингу температури та вологості у сховищі архіву. Основна увага приділяється алгоритму збору даних у реальному часі, який дозволяє безперервно

отримувати інформацію з сенсорів та оперативно реагувати на зміни навколишнього середовища. Такий підхід забезпечує актуальність і точність даних, що є важливим для збереження цілісності архівних матеріалів.

Особливе значення має реалізація попередньої фільтрації отриманих даних, що допомагає відсіяти випадкові шуми та спотворення, характерні для сенсорів, зокрема DHT22. Використання нечіткого аналізу дозволяє ефективно працювати з неповними або нечіткими даними, підвищуючи надійність прийнятих рішень щодо стану сховища. Ці методи сприяють формуванню більш точного та стабільного сигналу для подальшого аналізу.

Далі в розділі розглядаються методи збереження та організації даних, що включають використання локальних та хмарних сховищ. Це дозволяє не лише зберігати великі обсяги інформації, але й забезпечувати до неї швидкий доступ для подальшої обробки або моніторингу. Застосування ефективних методів організації даних є важливим аспектом для довготривалого збереження архівів.

Описано реалізацію інтерфейсу користувача, який забезпечує зручний виведення інформації про поточний стан температури та вологості. Інтерфейс сприяє оперативному моніторингу параметрів, дозволяє відслідковувати тенденції змін і приймати своєчасні рішення щодо регулювання кліматичних умов у сховищі. Завдяки цьому підвищується загальна ефективність системи та знижується ризик пошкодження архівних матеріалів.

4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ

4.1. Схема з'єднання компонентів

Одним із ключових етапів розробки кіберфізичної системи моніторингу температури та вологості у сховищі архіву є створення схеми з'єднання всіх основних компонентів. Це дозволяє забезпечити правильну роботу системи, злагоджену взаємодію між мікроконтролером ESP8266, сенсорами, блоками живлення та іншими елементами системи. Усі компоненти системи з'єднуються в єдину електричну мережу відповідно до їх функцій. Схематичне зображення цих з'єднань представлено у вигляді структурної схеми (рис 4.1).

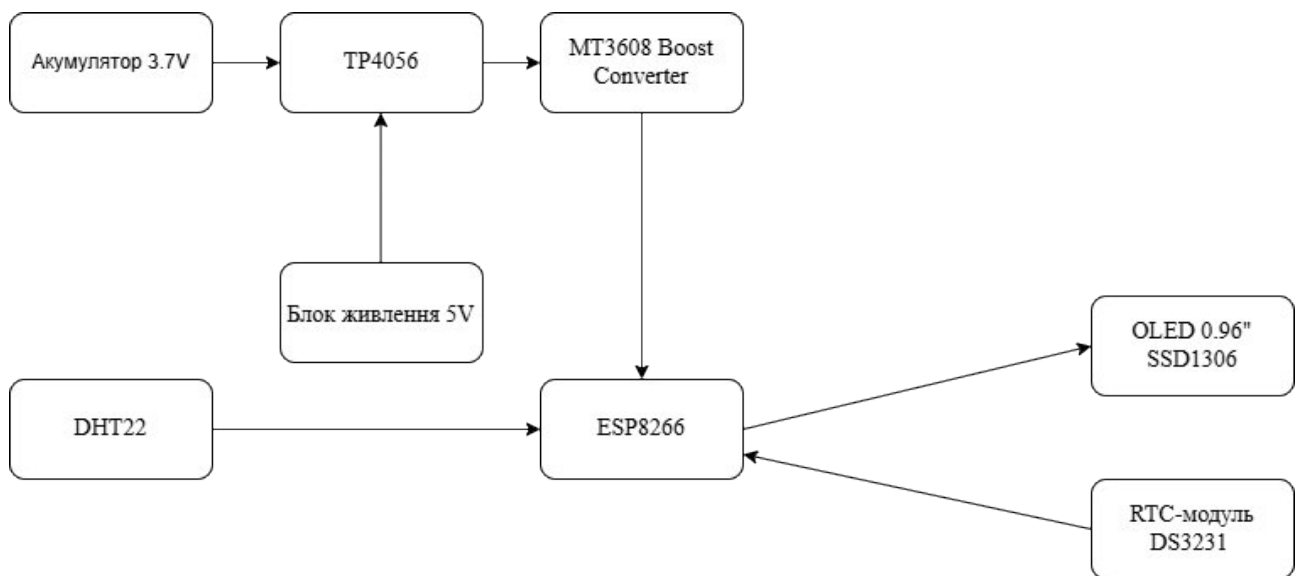


Рисунок 4.1 - Електронна схема підключення компонентів

4.2. Моделювання роботи системи в середовищі Fritzing

У рамках розробки кіберфізичної системи моніторингу температури та вологості у сховищі архіву особливу увагу було зосереджено на попередньому моделюванні всієї системи без створення її фізичної моделі. Це стало ключовим етапом проекту, адже дозволяє у безпечному середовищі протестувати функціональність схеми, оцінити доцільність обраної конфігурації компонентів.

Саме на цьому етапі формується уявлення про кінцевий вигляд системи, її робочий принцип, а також готується ґрунт для програмної реалізації та подальшого тестування.

В якості базового середовища моделювання було обрано програмне забезпечення Fritzing. Даний вибір обґрунтовується доступністю платформи, її гнучкістю, зручним інтерфейсом та широкою бібліотекою популярних електронних компонентів. У ході проектування було створено детальну монтажну схему, на якій зображено всі ключові компоненти системи, а також вказано електричні з'єднання між ними.

Основною ціллю моделювання є створення максимально наближеної до реальності візуалізації, яка точно передає взаємне розташування та підключення елементів. Серед основних компонентів, що підлягали моделюванню, можна виокремити такі: мікроконтролер ESP8266, цифровий сенсор температури і вологості DHT22, дисплей на основі технології OLED з роздільною здатністю 128x64 пікселі, модуль реального часу DS3231, зарядний модуль TP4056 з захистом, підвищувальний перетворювач напруги MT3608, а також літій-іонний акумулятор на 3.7 вольт, який забезпечує автономність пристрою.

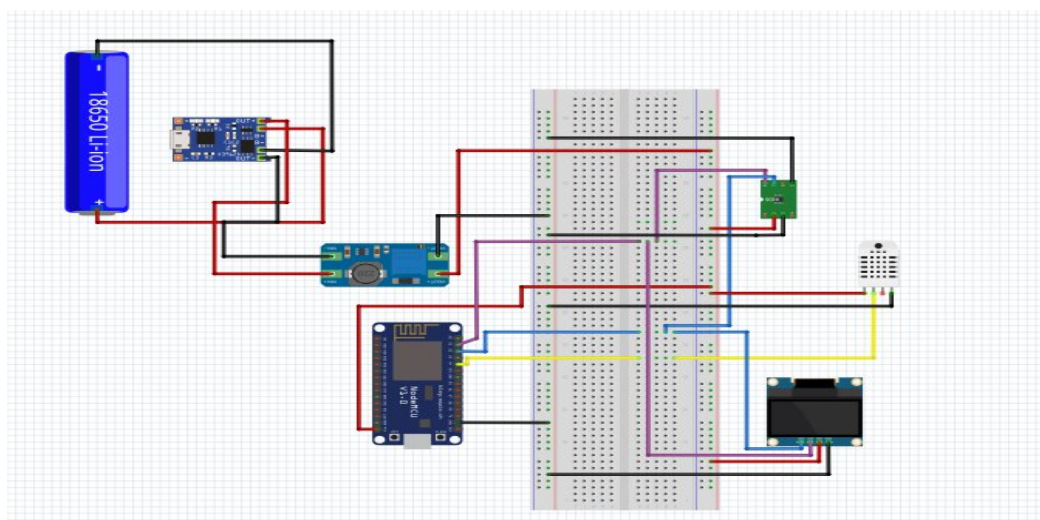


Рисунок 4.2 - Електронна схема підключення компонентів

4.3. Принцип роботи системи в реальному часі

Опис принципу роботи системи в реальному часі потребує глибокого розгляду як з технічної, так і з прикладної точки зору, особливо в контексті розробки кіберфізичної системи для моніторингу мікроклімату у сховищі архіву. Така система поєднує фізичні пристрої - сенсори температури та вологості, годинник реального часу, дисплей, контроллер, модулі зв'язку - з програмною логікою, яка в режимі реального часу реагує на зміну стану середовища та забезпечує належний контроль за умовами зберігання архівних матеріалів.

Система реального часу (СРЧ) - це обчислювальна система, у якій правильність виконання програм залежить не лише від логічної правильності обчислень, а й від того, наскільки швидко ці обчислення виконуються. Іншими словами, своєчасність реакції системи має вирішальне значення. У реальних умовах сховища архіву навіть незначні коливання температури і вологості можуть спричинити псування документів, фотографій або інших матеріалів. Тому система повинна не просто фіксувати зміни, а реагувати на них миттєво, надаючи користувачеві можливість своєчасно втрутитися.

Принцип дії такої системи базується на безперервному циклі роботи. Сенсори, наприклад DHT22, періодично (раз на кілька секунд) зчитують значення температури та вологості повітря у приміщенні. Ці дані миттєво передаються до мікроконтролера, який виконує програмно визначену обробку: перевіряє межі допустимих значень, форматує дані для відображення або збереження, і приймає рішення - чи потрібна подальша дія, наприклад, повідомлення про перевищення встановлених порогів.

Особливе значення у цьому процесі відіграє годинник реального часу (RTC), зокрема модуль DS3231. Він забезпечує надзвичайно точне вимірювання поточного часу, навіть у разі відключення живлення мікроконтролера. Завдяки йому кожне зчитування з сенсора супроводжується часовою міткою, що є критично важливим для аналізу історії змін параметрів мікроклімату. Якщо архівіст або інша відповідальна особа виявляє погіршення стану документів, він може

проаналізувати, коли саме відбувалося відхилення температури чи вологості і вжити відповідних заходів.

Реалізація системи в реальному часі також вимагає стабільної і передбачуваної затримки між етапами роботи. Наприклад, якщо обрано інтервал зчитування 5 секунд, то в ідеалі кожен цикл має завершуватися менш ніж за цей час, аби уникнути накопичення затримок. Мікроконтролер повинен бути достатньо швидким, щоб за ці кілька секунд не лише прочитати та обробити дані, а й вивести їх на OLED-дисплей (наприклад, SSD1306), оновити внутрішній журнал або базу даних, і за необхідності відправити повідомлення на сервер або мобільний пристрій адміністратора.

Важливим є і механізм сповіщення про порушення режиму. Якщо система працює в реальному часі, вона повинна негайно реагувати на вихід значень за межі допустимого діапазону. Це може бути звуковий сигнал, миготіння індикатора, push-повідомлення або повідомлення на сервер, залежно від реалізації. Наприклад, якщо вологість перевищила 70%, система в межах поточного циклу одразу має зафіксувати це, зберегти запис із точним часом, повідомити користувача і вивести попередження на екран. Затримка в кілька секунд у такій ситуації може стати критичною, особливо якщо йдеться про старовинні документи чи фотоматеріали.

Для систем реального часу надзвичайно важливою є енергонезалежність. Модуль RTC DS3231 оснащений резервною батареєю, що дозволяє зберігати точний час навіть у випадку вимкнення живлення. Це забезпечує безперервність роботи та точність запису даних. У поєднанні з акумулятором та модулем заряджання (наприклад, TP4056) система може працювати автономно протягом тривалого часу без втрати функціональності.

Ще один важливий аспект - можливість інтеграції з інтернетом речей (IoT). Мікроконтролер ESP8266 підтримує підключення до Wi-Fi, що дозволяє системі не тільки працювати локально, а й передавати дані в режимі реального часу на віддалений сервер або хмарну платформу. Це відкриває широкі можливості для централізованого моніторингу кількох сховищ одночасно, аналізу статистики, формування звітів та автоматичної побудови графіків.

У результаті можна стверджувати, що система в реальному часі у контексті моніторингу сховища архіву - це сукупність апаратних і програмних засобів, які взаємодіють таким чином, щоб забезпечити точне, своєчасне, безперервне та надійне відстеження параметрів середовища. Її ефективність безпосередньо залежить від здатності швидко реагувати на зміни, забезпечувати достовірність даних, працювати автономно та надавати доступ до інформації в режимі 24/7. Саме це робить подібні системи незамінними для об'єктів, де збереження матеріалів потребує суворого контролю умов навколишнього середовища.

4.4. Особливості розміщення датчиків у реальному сховищі

Забезпечення ефективного та достовірного моніторингу мікрокліматичних умов у приміщеннях, де зберігаються архівні матеріали, потребує ретельно спланованого підходу до розміщення датчиків. Правильне позиціонування сенсорів є критично важливим етапом, що безпосередньо впливає на точність збору даних, оперативність реагування системи та загальну надійність її функціонування. У даній дипломній роботі розглянуто різні аспекти розміщення сенсорів температури та вологості, а також фактори, що визначають найбільш доцільне їх розташування в архівному сховищі.

Розпочати варто з розуміння особливостей самого середовища. Архівне сховище є, як правило, закритим приміщенням з обмеженим доступом, у якому зберігаються документи, паперові матеріали, фотографії, креслення, мікрофільми та інші артефакти, чутливі до змін температурного режиму та відносної вологості. Надлишкова вологість призводить до утворення плісняви, грибків, а також прискорює процеси гниття й старіння паперу. Занадто сухе повітря, навпаки, призводить до деформації, ламкості та крихкості матеріалів. Тому підтримання стабільного клімату з урахуванням допустимих меж (зазвичай 18–22°C та 45–55% вологості) є пріоритетом.

Основним елементом моніторингу клімату в рамках проекту виступає цифровий сенсор DHT22, який забезпечує високу точність вимірювання

температури та вологості. У типових архівних приміщеннях одного датчика недостатньо для комплексного охоплення всього об'єму простору, оскільки кліматичні умови можуть варіюватися залежно від висоти, наявності вентиляційних отворів, близькості до зовнішніх стін або вікон, а також розташування джерел тепла.

Оптимальне розміщення сенсорів передбачає їх встановлення на рівні середньої висоти зберігання архівних коробів - приблизно на рівні 1.5–1.8 метра від підлоги. Така висота дозволяє отримувати усереднені показники температури й вологості, які найбільш точно характеризують умови зберігання більшості матеріалів. Водночас важливо уникати розміщення сенсора поблизу вікон, дверей або обігрівальних приладів, оскільки це може призвести до викривлення показників і зниження точності даних. Наприклад, сенсор, встановлений поруч з батареєю, постійно фіксуватиме підвищену температуру, що не буде репрезентативним для всього сховища.

Наступним критичним фактором є вільна циркуляція повітря навколо сенсора. Розміщення пристрою в замкненому просторі (наприклад, між коробами, полицями або іншими габаритними предметами) значно зменшує точність даних. Для уникнення локального перегріву або застою повітря рекомендується залишати щонайменше 20-30 сантиметрів вільного простору навколо датчика. У разі встановлення кількох сенсорів на різній висоті та в різних частинах приміщення можна відслідковувати зміни умов у вертикальному профілі, виявляти гарячі або холодні зони, та приймати відповідні заходи.

Розглядаючи аспекти кріплення сенсорів, варто обирати такі способи, які забезпечують їхню стійкість, нерухомість, а також збереження цілісності проводів. Найчастіше для цього використовуються пластикові тримачі, кліпси або монтаж на двосторонню стрічку. У разі необхідності мобільного варіанту системи (наприклад, для використання в кількох різних приміщеннях) передбачається кріплення на магнітну основу або знімну панель.

Важливою особливістю кіберфізичної системи є використання мікроконтролера ESP8266, що забезпечує зв'язок із хмарною платформою та

дозволяє здійснювати дистанційне спостереження. У зв'язку з цим необхідно передбачити розміщення мікроконтролера та інших електронних компонентів у місці, де є стабільний сигнал Wi-Fi. У архівах із товстими бетонними стінами сигнал може бути нестабільним, тому за можливості варто розмістити контролер ближче до точки доступу або використати додатковий Wi-Fi-репітер.

Ще одним аспектом, який варто враховувати під час розміщення елементів системи моніторингу в архівному сховищі, є питання безпеки та доступу до обладнання. У приміщеннях такого типу зазвичай обмежений доступ, а будь-яке стороннє втручання в архівну структуру повинно бути мінімізоване. У зв'язку з цим всі модулі слід встановлювати так, щоб вони не заважали персоналу, не ускладнювали роботу з фондами, і водночас були легкодоступними для обслуговування. Наприклад, модулі можна закріпити на бокових частинах стелажів, з використанням спеціальних пластикових тримачів або магнітних кріплень, що дозволяють легко знімати пристрої для обслуговування чи заряджання.

Також важливо продумати живлення компонентів у зв'язку з обмеженим доступом до електромережі у деяких зонах архіву. У цій дипломній роботі передбачається використання автономного живлення на основі літій-іонного акумулятора, тому слід забезпечити зручність для періодичного заряджання - або шляхом знімання модулів, або шляхом прокладення прихованих зарядних магістралей. Для цього доцільно передбачити легкодоступні місця розміщення модулів TP4056, до яких можна буде безпечно підключити зовнішнє живлення, не порушуючи внутрішній мікроклімат сховища.

Ще одним важливим аспектом є санітарно-гігієнічні умови та боротьба з пліснявою й мікрофлорою. У деяких архівних приміщеннях, особливо в старих будівлях або підвальних сховищах, присутність вологи та мікроорганізмів може спричинити зниження точності показань або навіть пошкодження електроніки. Тому всі сенсори та модулі, що використовуються, повинні бути або попередньо захищені герметичними корпусами, або розміщені в зонах з достатньою

вентиляцією, але без прямого контакту з поверхнями, на яких може накопичуватись конденсат чи грибок.

Окремої уваги потребує інтерференція з іншими пристроями в архіві, особливо якщо в приміщенні вже використовується система відеонагляду, сигналізації або локальна комп'ютерна мережа. Хоча модуль ESP8266 має низький рівень електромагнітного випромінювання, у разі розміщення його поблизу антен або кабельних каналів можуть виникнути завади. Тому рекомендується уникати прямих ліній між ESP8266 та активними елементами інших систем. Найкраще - виділити окрему зону, де всі бездротові компоненти системи моніторингу зосереджені в одній точці, з достатнім радіусом дії.

Також не слід забувати про естетичні вимоги, оскільки навіть у технічних зонах архіву часто встановлюються камери спостереження, а також інспектори перевіряють дотримання стандартів безпеки. Тому всі дроти, навіть якщо вони живлять лише OLED-дисплей або передають сигнали до ESP8266, мають бути акуратно зафіксовані, бажано в захисних гофротрубках або спеціальних коробах, що гармонійно вписуються в інтер'єр.

Додатково можна передбачити можливість розширення системи у майбутньому, якщо архів поповниться новими приміщеннями або з'явиться потреба контролювати нові параметри. У такому випадку вже на етапі розміщення компонентів доцільно передбачити резервні порти на ESP8266, вільні живильні лінії, а також маршрути для прокладання додаткових сенсорів.

4.5. Висновки

У четвертому розділі дипломної роботи спроектовано багаторівневу архітектуру кіберфізичних систем моніторингу, яка поєднує фізичні сенсори, вбудоване програмне забезпечення, мережеву інфраструктуру та хмарні сервіси в єдине цілісне рішення. На фізичному рівні система застосовує сенсори DHT22 для вимірювання температури й вологості та модуль DS3231 для прецизійного визначення поточного часу. Дані з датчиків надходять до

мікроконтролера ESP8266, який виконує попередню обробку показників, керує енергоспоживанням і формує MQTT-пакети для передавання в мережу. Міжрівнева взаємодія відбувається через Wi-Fi, що спрощує монтаж у складських приміщеннях і забезпечує гнучке масштабування без додаткових дротових з'єднань. З мережевого рівня інформація потрапляє на хмарний сервер, де її зберігають, аналізують і візуалізують у режимі реального часу.

Конкретна схема з'єднання компонентів була ретельно опрацьована для мінімізації кількості провідників, зниження електромагнітних завад і забезпечення можливості «гарячого» підключення живлення. Її працездатність перевірили за допомогою моделювання в середовищі Fritzing: у віртуальній збірці було протестовано правильність топології, логіку живлення й поведінку шини I²C за різних режимів роботи, включно з граничними ситуаціями, коли, наприклад, одночасно активуються модуль Wi-Fi та OLED-дисплей. Такий підхід дав змогу усунути потенційні помилки ще до виготовлення фізичного прототипу.

Підсумовуючи, у розділі створено і верифіковано апаратну частину та архітектуру кіберфізичної системи, що відповідає вимогам точності, надійності та енергоефективності й може бути адаптована до різних умов зберігання архівних матеріалів.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розроблено та реалізовано кіберфізичну систему моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву, яка забезпечує автоматизовану та ефективну роботу з даними про стан середовища в архівних приміщеннях. Рішення, запропоновані в ході дослідження, мають велике значення для забезпечення безпеки та збереження документів в умовах, що можуть спричиняти їх деградацію, зокрема зміни вологості та температури.

В першому розділі роботи проведено детальний аналіз існуючих технологій моніторингу та автоматизації вимірювань параметрів навколишнього середовища. Розроблено математичну модель КФС. Показано важливість кіберфізичних систем для забезпечення точності та своєчасності вимірювань у таких критичних сферах, як збереження архівних матеріалів, зокрема в умовах постійних змін клімату та умов зберігання. Виявлено, що ефективний моніторинг температури та вологості є критично важливим для довготривалого збереження архівних матеріалів, оскільки ці параметри можуть безпосередньо впливати на їх фізичний стан та загальний рівень деградації.

Другий розділ роботи містить обґрунтований вибір компонентів для реалізації кіберфізичної системи, включаючи сенсори для вимірювання вологості та температури, а також пристрої для обробки та передачі зібраних даних. Під час вибору компонентів було враховано важливість надійності та точності вимірювань, а також енергоефективності системи. Обраний для проекту сенсор DHT22 забезпечує точність вимірювань, що є необхідним для збереження архівів. Також було обрано ESP8266 для реалізації системи збирання та передачі даних через бездротову мережу Wi-Fi, що дозволяє спростити монтаж і забезпечити гнучкість у використанні системи в різних архівних приміщеннях.

Третій розділ роботи присвячений розробці методів збору, обробки та аналізу даних, а також моніторингу і керуванню системою. Розроблений метод базується на інтеграції даних від сенсорів, що забезпечують вимірювання температури та вологості, та дає змогу автоматично здійснювати моніторинг в режимі реального

часу. Завдяки такому підходу користувач може оперативно отримувати актуальні дані про стан середовища в архіві, що дає змогу своєчасно реагувати на зміни температури і вологості та попереджати можливі пошкодження архівних матеріалів.

У четвертому розділі дипломної роботи спроектовано архітектуру кіберфізичних систем, яка складається з кількох рівнів, що взаємодіють між собою для забезпечення безперервного моніторингу стану архіву. Система включає в себе фізичні сенсори, програмне забезпечення для обробки та аналізу даних, а також мережеву інфраструктуру для передачі даних. Запропонована архітектура є високоефективною та легко масштабованою, що дозволяє застосовувати її в різних умовах збереження архівних матеріалів.

Таким чином, результатами роботи є створення ефективної кіберфізичної системи, яка здатна автоматизувати моніторинг температури та вологості в архіві, забезпечуючи високий рівень збереження документів і матеріалів. Система, що була розроблена в рамках цього дослідження, може бути застосована в різних архівних установах, що дозволяє покращити управління умовами зберігання та забезпечити довготривале збереження важливих матеріалів. Розроблена система має великий потенціал для подальшої адаптації та інтеграції в різноманітні інфраструктури зберігання даних, що підтверджує її практичну значущість та перспективи для майбутнього розвитку в цій сфері.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано тези у Збірнику наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Baheti R., Gill H. Cyber-physical systems. *The impact of control technology*. 2011 12(1). 161-166.
2. Oks S. J., Jalowski M., Lechner M., Mirschberger S., Merklein M., Vogel-Heuser B., Möslin K. Cyber-physical systems in the context of industry 4.0: A review, categorization and outlook. *Information Systems Frontiers*. 26(5). 1731-1772.
3. Zhang K., Shi Y., Karnouskos S., Sauter T., Fang H., Colombo A. Advancements in industrial cyber-physical systems: An overview and perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. 19(1). 716-729.
4. Kumar R., Sangwan K. S., Herrmann C., Thakur S. A cyber physical production system framework for online monitoring, visualization and control by using cloud, fog, and edge computing technologies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2023. Vol. 36. No. 10. P. 1507–1525.
5. Aghazadeh Ardebili A., Martella C., Longo A., Rucco C., Izzi F., Ficarella A. IoT-Driven Resilience Monitoring: Case Study of a Cyber-Physical System. *Applied Sciences*. 2025. P. 2092.
6. Salam A. IoT in Cyber-Physical Systems. *Internet of Things for Sustainable Community Development: Wireless Communications, Sensing, and Systems*. 2024. P. 349–364.
7. Battistoni P., Cantone A. A., Martino G., Passamano V., Romano M., Sebillo M., Vitiello G. A cyber-physical system for wildfire detection and firefighting. *Future Internet*. 2023. Vol. 15(7). P. 237.
8. Aktan E., Bartoli I., Glišić B., Rainieri C. Lessons from bridge structural health monitoring (SHM) and their implications for the development of cyber-physical systems. *Infrastructures*. 2024. Vol. 9(2). P. 30.
9. Iqbal F., Alam Z., Shukla M., Malhotra J., Jha S. Transforming a standalone machine tool to a cyber-physical system: A use case of BEMRF machine tool to tackle the COVID-19 restrictions. *Cyber-Physical Systems*. 2022. P. 330–344.

10. Bharathi V. Vulnerability detection in cyber-physical system using machine learning. *Scalable Computing: Practice and Experience*. 2024. Vol. 25(1). P. 577–591.
11. Kumar P. A Cyber-Physical System Approach for Precision Agriculture Focused on Crop Growth. *Master's thesis, Arizona State University*. 2024.
12. Cicceri G., Guastella D. C., Sutera G., Cancelliere F., Vitti M., Randazzo G., Muscato G. An intelligent hierarchical cyber-physical system for beach waste management: the bioblu case study. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 134421–134445.
13. William P., Ramu G., Gupta L. R., Sing P., Shrivastava A., Srivastava A. P. Hybrid temperature and humidity monitoring system using IoT for smart garden. *2023 Second International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS)*. 2023. P. 1514–1518.
14. Gao Y., Jia F., Gao G. Ultra-thin, transparent, anti-freezing organohydrogel film responded to a wide range of humidity and temperature. *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 430. P. 132919.
15. Niu G., Wang Z., Xue Y., Yan J., Dutta A., Chen X., Yang L. Pencil-on-paper humidity sensor treated with NaCl solution for health monitoring and skin characterization. *Nano Letters*. 2022. Vol. 23(4). P. 1252–1260.
16. Ngoc T. T. H., Khanh P. T., Pramanik S. Smart agriculture using a soil monitoring system. *Handbook of Research on AI-Equipped IoT Applications in High-Tech Agriculture*. 2023. P. 200–220.
17. Anuar N. A., Jalaludin N. A., Sadun A. S. Temperature and Humidity Monitoring System. *Progress in Engineering Application and Technology*. 2024. Vol. 5(1). P. 259–266.
18. William P., Ramu G., Gupta L. R., Sing P., Shrivastava A., Srivastava A. P. Hybrid temperature and humidity monitoring system using IoT for smart garden. *2023 Second International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS)*. 2023. P. 1514–1518.
19. Gao Y., Jia F., Gao G. Ultra-thin, transparent, anti-freezing organohydrogel film responded to a wide range of humidity and temperature. *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 430. P. 132919.

20. Li J., Wu X., Chow S. K., Zhuang Q., Habert G. Thermal Comfort Comparison and Cause Analysis of Low-Temperature High-Humidity Indoor Environments of Rural Houses in Gansu Province, China. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(23). P. 16428.
21. Zhou I. Intelligent Frost Prediction and Active Protection Cyber-physical Systems in the Agricultural Sector. *University of Technology Sydney*. 2023.
22. Sivakumar V. G., Baskar V. V., Vadivel M., Vimal S. P., Murugan S. IoT and GIS Integration for Real-Time Monitoring of Soil Health and Nutrient Status. *2023 International Conference on Self Sustainable Artificial Intelligence Systems (ICSSAS)*. 2023. P. 1265–1270.
23. Selvarasu S., Bashkaran K., Radhika K., Valarmathy S., Murugan S. IoT-enabled medication safety: real-time temperature and storage monitoring for enhanced medication quality in hospitals. *2023 2nd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS)*. 2023. P. 256–261.
24. Hovorushchenko T., Aleksov S., Boyarchuk A. Decision-Making Method for the Humidity Control Subsystem of the Cyber-Physical System “Smart House”. *2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. 2023. P. 1–4.
25. Komarudin M., Septama H. D., Yulianti T. Autonomous cyber physical systems for monitoring of methane gas in rice field. *2nd International Conference on Smart and Innovative Agriculture (ICoSIA 2021)*. 2022. P. 138–143.
26. Waheed W., Anwer S., Khan M. U., Sajjad M., Alazzam A. 2D Ti₃C₂Tx-MXene nanosheets and graphene oxide based highly sensitive humidity sensor for wearable and flexible electronics. *Chemical Engineering Journal*. 2024. 480.
27. Tushkanova O., Levshun D., Branitskiy A., Fedorchenko E., Novikova E., Kotenko I. Detection of cyberattacks and anomalies in cyber-physical systems: Approaches, data sources, evaluation. *Algorithms*. 2023. 16(2). 85.
28. Hoenig A., Roy K., Acquaaah Y. T., Yi S., Desai S. S. Explainable AI for cyber-physical systems: Issues and challenges. *IEEE Access*. 2024. 12. 73113-73140.

29. Halder S., Afsari K., Akanmu A. A robotic cyber-physical system for automated reality capture and visualization in construction progress monitoring. *2023 2nd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems*. 2023. 2402.07034.
30. Chivarov N., Chikurtev D., Chivarov S., Atanasova S., Penev T., Yovanovska A. Concept of cyber-physical system for intelligent husbandry farm using openhab compatible IoT actuators and sensors. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2889, No. 1.
31. Pandey A., Joseph J. Cyber Physical Systems: Ethical and Legal Considerations for a Policy Design. *In Democracy and Democratization in the Age of AI*. 2025. P. 285–302
32. Simeone A., Grant R., Ye W., Caggiano A. A human-cyber-physical system for Operator 5.0 smart risk assessment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 129(5). P. 2763–2782.
33. Quiñones C., Adviento-Borbe M. A., Larazo W., Harris R. S., Mendez K., Cunningham S. S., Lorence A. Field-based infrastructure and cyber–physical system for the study of high night air temperature stress in irrigated rice. *The Plant Phenome Journal*. 2023. Vol. 6(1). P. 20085.
34. Anuar N. A., Jalaludin N. A., Sadun A. S. Temperature and Humidity Monitoring System. *Progress in Engineering Application and Technology*. 2024. Vol. 5(1), P. 259–266.
35. Maceli M. Internet of things in the archives: novel tools for environmental monitoring of archival collections. *Records Management Journal*. 2020. 30(2). 201-220.
36. Ngoc T. T. H., Khanh P. T., Pramanik S. Smart agriculture using a soil monitoring system. *Handbook of Research on AI-Equipped IoT Applications in High-Tech Agriculture*. 2023. P. 200–220.
37. Kumar A., Singh V., Kumar S., Jaiswal S. P., Bhadoria V. S. IoT enabled system to monitor and control greenhouse. *Materials Today: Proceedings*. 2022. P. 3137–3141.

38. Selvarasu S., Bashkaran K., Radhika K., Valarmathy S., Murugan S. IoT-enabled medication safety: real-time temperature and storage monitoring for enhanced medication quality in hospitals. *2023 2nd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS)*. 2023. December. P. 256–261.
39. Mohammed M., Riad K., Alqahtani N. Design of a smart IoT-based control system for remotely managing cold storage facilities. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 13. P. 4680.
40. Martinelli L., Calcerano F., Adinolfi F., Chianetta D., Gigliarelli E. Open HBIM-IoT Monitoring Platform for the Management of Historical Sites and Museums. An Application to the Bourbon Royal Site of Carditello. *International Journal of Architectural Heritage*. 2025. Vol. 19, No. 2. P. 153–170.
41. Emamian M., Eskandari A., Aghaei M., Nedaei A., Sizkouhi A. M., Milimonfared J. Cloud computing and IoT based intelligent monitoring system for photovoltaic plants using machine learning techniques. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 9. P. 3014.
42. Mishra N., Jain S. K., Agrawal N., Jain N. K., Wadhawan N., Panwar N. L. Development of drying system by using internet of things for food quality monitoring and controlling. *Energy Nexus*. 2023. Vol. 11. P. 100219.
43. Findell K. L., Yin Z., Seo E., Dirmeyer P. A., Arnold N. P., Chaney N., Santanello Jr J. A. Accurate assessment of land–atmosphere coupling in climate models requires high-frequency data output. *Geoscientific Model Development*. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 1869–1883.
44. Anderson P., Aranas E., Assaf Y., Behrendt R., Black R., Caballero M., Winzeck S. Project Silica: towards sustainable cloud archival storage in glass. *ACM Transactions on Storage*. 2025. Vol. 21, No. 1. P. 1–31.
45. Foster J., Smallcombe J. W., Hodder S., Jay O., Flouris A. D., Havenith G. Quantifying the impact of heat on human physical work capacity; part II: the observed interaction of air velocity with temperature, humidity, sweat rate, and clothing is not captured by most heat stress indices. *International Journal of Biometeorology*. 2022. Vol. 66, No. 3. P. 507–520.

46. Mohammed S. A. S., Aluri A., Duru K., Venkatachalam P., Karra C., Kalluri S. IoT Based Humidity, Temperature, and Gas Monitoring Using Arduino UNO. *ECS Transactions*. 107. 2022 (1). 6435.
47. Javed S. H., Ahmad M. B., Asif M., Akram W., Mahmood K., Das A. K., Shetty S. APT adversarial defence mechanism for industrial IoT enabled cyber-physical system. *IEEE Access*. 2023.11. 74000-74020.
48. Ejinaka O. R., Obeta U. M. Harnessing intelligent cyber-physical systems for advanced healthcare delivery: A scoping review and future directions. *Intelligent Cyber-Physical Systems for Healthcare Solutions: From Theory to Practice*. 2024. 419-438.
49. Chien T. H., Chen Y. L., Wu J. S., Siao C. Y., Chien L. R., Chang R. G. An improved method for online teacher training courses for bilingual education based on cyber-physical systems. *Applied Sciences*. 2022. 2346.
50. Yonatan Y. K., Mukti A. T., Firmansyah R. N. Analisa Penerapan Sensor Suhu Menggunakan Arduino Uno di dalam Sistem Pertanian GreenHouse: Sensor DHT22. *Journal of Engineering Environmental Energy and Science*. 2025. 4(1). 39-46.
51. Kim K. K., Kim J. S., Euom I. C. Research on a Identifying Maliciously Manipulated Measurement Data Based on Characteristics of Cyber-Physical System *12th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN)*. – IEEE. 2024. – C. 187–192.
52. Bozkurt A., Fries C., Tasci T., Leberle U., Kessler D., Joos M., Hinderer M. Cyber-Physical-Systems for Fluid Manufacturing Systems. *Conference on production systems and logistics*. 2023. 2701-6277. 640-653.
53. Sahil Sood S. K. Fog-assisted energy efficient cyber physical system for panic-based evacuation during disasters. *The Computer Journal*. 2022. 65(6). 1540-1559.
54. Qian M., Qian C., Xu G., Tian P., Yu W. Smart Irrigation Systems from Cyber–Physical Perspective: State of Art and Future Directions. *Future Internet*. 2024. 16(7). 234.

55. Fedyshyn T., Przystupa K., Bubela T., Petrovska I. Data Acquisition System for Monitoring Soil Parameters. *International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications*. 2023. pp. 499–513
56. Hazarika A., Choudhury N., Shu L., Su Q. Real-time Detection of Cyber-physical Attacks on Smart-IP-Camera using Network & Telemetry Data. *IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems*. 2025.
57. Kamatchi T. P., Priya D. Cyber Physical Systems in Clinical Setting. *In Cyber Physical Systems-Advances and Applications*. 2024. pp. 45-81.
58. Kostin V., Sokolova N., Kochetkov V., Yudaev I., Silaev A., Borzin R. Digitization of feeding processes in pond aquaculture using a cyber-physical system for analyzing monitoring data and transmitting information using LoRaWAN technology. *International Conference on Intelligent Computing & Optimization*. April 2023. pp. 17-26.
59. Ye Z., Wei Y., Yang S., Li P., Yang F., Yang B., Wang L. IoT-enhanced smart road infrastructure systems for comprehensive real-time monitoring. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*. 2024. 4. pp. 235-249.
60. Haq M. A. U., Rehman S. U., Alhulayyil H. A., Alzahrani T. A., Alsagri H. S., Faheem M. Wireless antenna sensors for biosimilar monitoring toward cyber-physical systems: a review of current trends and future prospects. *IEEE Access*. 2023. 11. 132037-132054.
61. Wibawa I. M. S., Putra I. K. Design of air temperature and humidity measurement based on Arduino ATmega 328P with DHT22 sensor. *International Journal of Physical Sciences and Engineering*. 2022. 6(1). 9-17.
62. Deab M. Y., Croock M. S. Smarter dam based on cyber-physical system utilizing Raspberry Pi4 and NodeMCU ESP8266. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2022. 11(6). 3403-3413.
63. Sutikno T., Fernando R., Pamungkas A., Purnama H. S., Raditya A., Baswara C. Mechanical gear footstep power generation using a mini generator with buck and boost selectors. *International Journal Advances in Applied Sciences*. 2023. 4. 343-349.

64. Ana P., Ekah U. J., Oyo-Ita E. IoT-based biometric attendance system for CRUTECH. *International Journal of Science and Research Archive*. 5. 2022 (1). 39-50.
65. Permata R. S., Ilham D. N., Risky M. M., Harahap M. K., Kurniadi S. Design of an automatic temperature and humidity measuring device in the oyster mushroom cultivation room. *PERFECT: Journal of Smart Algorithms*. 2024 1(1). 13-17.
66. Nasution T. I., Sinaga S. H. Design of monitoring system temperature and humidity using DHT22 sensor and NRF24L01 based on Arduino. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. 2421(1). p. 012018.
67. Mubarakah N., Iddha F. Prototype An ESP32-Based Room Humidity and Temperature Controller With IoT. In *2022 6th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*. 2022. November. IEEE. pp. 121-126.
68. Yudithia F. A., Herda D. L. Smart Air Humidifier For Air-conditioned Rooms Based On NodeMCU ESP8266. *JATAED: Journal of Appropriate Technology for Agriculture, Environment, and Development*. 1. 2024 (2). 54-58.
69. Phadke M., Korde M. IoT-Based Weather Monitoring System Using NodeMCU ESP8266. *International Conference on Smart Computing and Communication*. 2024. January. pp. 211-220.
70. ESP32 analogRead(A10) not working with WiFi. *Arduino Forum*. URL: <https://forum.arduino.cc/t/esp32-analogread-a10-not-working-with-wifi/1209232/2> (дата звернення: 27.03.2025).
71. Arduino Nano micro USB V3. URL: <https://uamper.com/Arduino-Nano-micro-USB-V3-yellow> (дата звернення: 22.03.2025).
72. Особливості LoRaWAN. URL: <https://iotji.io/osoblyvosti-lorawan/> (дата звернення: 02.04.2025).
73. Raspberry Pi Pico (вигляд зверху і знизу). *Вікіпедія*. URL: https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Файл:Raspberry_Pi_Pico_top_and_bottom_composite.jpg (дата звернення: 21.05.2025).

74. STM32 плата розробника на STM32F103C6T6 (синя). URL: <https://ardushop.in.ua/arduino/stm32-developer-board-on-stm32f103c6t6-blue> (дата звернення: 31.03.2025).
75. Плата розробника ESP8266 NodeMCU. URL: <https://rozetka.com.ua/ua/480554139/p480554139/> (дата звернення: 05.04.2025).
76. Модуль NodeMCU ESP8266. URL: <https://diylab.com.ua/p280592656-modul-nodemcu-esp8266.html> (дата звернення: 24.03.2025)
77. DHT22 - датчик температури та вологості. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/dht22-datchyk-temperatury-ta-volohosti_98732.html (дата звернення: 20.03.2025).
78. DHT11 sensor with display. URL: <https://home.et.utwente.nl/slootenvanf/2019/05/02/dht11-sensor-with-display/> (дата звернення: 29.03.2025).
79. Qimoo 4500mAh 16.65Wh Rechargeable Batteries. URL: <https://www.amazon.ae/Qimoo-4500mAh-16-65Wh-Rechargeable-Batteries-Electronics/dp/B0CLY34SF1> (дата звернення: 21.03.2025).
80. MT3608 DC to DC Boost Converter 2A. URL: <https://grabcad.com/library/mt3608-dc-to-dc-boost-converter-2-a-1> (дата звернення: 04.04.2025).

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

КОПІЯ СТАТТІ У НАУКОВО-ПРАКТИЧНОМУ ВИДАННІ

Актуальні проблеми комп'ютерних наук

УДК 004.4

Трет'яков Б.Р.

Хмельницький національний університет

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ РІВНЯ ВОЛОГОСТІ ТА ТЕМПЕРАТУРИ У СХОВИЩІ АРХІВУ

Розглянуто прикладні аспекти розробки кіберфізичної системи моніторингу для контролю рівня вологості та температури у сховищі архіву на основі IoT-технологій. Запропонована система забезпечує постійний та автоматизований моніторинг ключових показників, таких як температура і вологість, які є критично важливими для підтримки належних умов зберігання цінних документів та артефактів. Система функціонує за допомогою датчиків, розташованих у різних зонах архівного сховища, які безперервно збирають інформацію про кліматичні умови.

The applied aspects of developing a cyber-physical monitoring system for controlling the humidity and temperature levels in an archive storage facility based on IoT technologies. The proposed system provides continuous and automated monitoring of key indicators, such as temperature and humidity, which are critical for maintaining proper storage conditions for valuable documents and artifacts. The system operates with the help of sensors located in different areas of the archival storage facility, which continuously collect information about climatic conditions.

У багатьох архівних сховищах підтримка стабільних умов температури та вологості є ключовою для збереження цінних документів та матеріалів, що можуть бути чутливими до змін навколишнього середовища. Недостатній контроль цих параметрів може призвести до поступового пошкодження паперових носіїв, руйнування плівок і навіть утворення плісняви. Створення кіберфізичної системи моніторингу для контролю умов зберігання є важливим завданням, яке сприяє збереженню культурної спадщини та наукової цінності архівних документів.

Сучасні дослідження зосереджені на розробці систем моніторингу мікроклімату в архівах та музеях з використанням технологій Інтернету речей (IoT), що дозволяють автоматизувати збір та обробку даних про температуру, вологість та інші параметри. Ці системи забезпечують безперервний моніторинг та передають інформацію до централізованих платформ, що дозволяє персоналу оперативно контролювати умови зберігання.

Проте більшість розроблених рішень не враховують повністю потреби архівних сховищ, де умови можуть значно коливатися в різних зонах зберігання. Наявні системи часто фокусуються лише на окремих аспектах моніторингу, а

питання інтеграції всіх ключових параметрів з можливістю отримання попереджень в реальному часі залишається відкритим.

Використання частотного аналізу даних, подібно до методу TF (term frequency) в обробці тексту, може стати ефективним підходом для відстеження змін основних параметрів, таких як температура та вологість, у великих обсягах інформації, що надходить із різних датчиків.

Для візуалізації класифікації й аналізу даних з сенсорною деталізацією система може використовувати графіки, побудовані на основі кривих або прямих ліній, що відобразять закономірності в історичних даних про умови зберігання (рисунок 1).

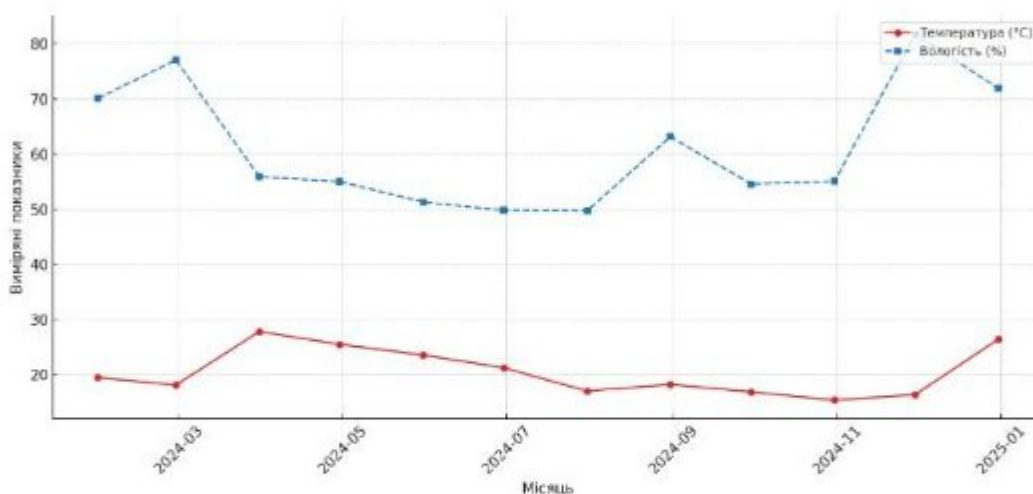


Рисунок 1 – Графік рівня температури та вологості

Сучасні системи моніторингу на основі IoT забезпечують базовий контроль мікроклімату в архівах, однак вони часто не здатні гнучко налаштувати параметри для різних типів документів, які можуть потребувати індивідуальних умов зберігання. Наприклад, старовинні рукописи, фото- і відео-матеріали, карти або плівки потребують різних температурних режимів та рівнів вологості, що є важливим аспектом для збереження їх фізичних властивостей.

Метою дослідження є розробка інтегрованої кіберфізичної системи, яка дозволить не лише контролювати параметри температури і вологості, але й автоматично генерувати попередження, щоб зменшити ризик пошкодження матеріалів.

Запропонована кіберфізична система моніторингу складається з датчиків, розташованих у зонах архівного сховища, які контролюють температурний режим і рівень вологості в режимі реального часу. Дані, що збираються датчиками,

передаються до хмарного сервера, де вони обробляються і зберігаються, що дозволяє створити історію змін параметрів і забезпечує доступ до інформації у будь-який час.

Система підтримує автоматичне надсилання попереджень, якщо будь-який з параметрів виходить за межі встановлених норм, що дозволяє швидко реагувати на потенційно небезпечні ситуації. Інтерфейс системи надає можливість візуалізувати показники температури і вологості у вигляді графіків, що полегшує аналіз змін умов протягом різних періодів і допомагає приймати вчасні рішення для підтримки оптимального мікроклімату.

Розроблена кіберфізична система моніторингу може бути ефективним помічником у підтриманні стабільних умов зберігання архівних документів, що дозволяє зменшити ризики пошкодження матеріалів через несприятливі умови. Вона повинна забезпечувати автоматичний контроль за основними параметрами та дозволяти персоналу архіву оперативно реагувати на будь-які зміни, забезпечуючи захист культурної та наукової спадщини.

Перелік посилань

1. Ullo, S. L., & Sinha, G. R. (2020). Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors. *Sensors*, 20(11), 3113. <https://doi.org/10.3390/s20113113>
2. Мартинюк, А. Д., Зайцева, Е. А. Методологія моніторингу параметрів мікроклімату в тепличних системах. *Журнал сільськогосподарських наук*. 2021. № 4. С. 130-136.
3. Сидоренко, І., & Гусак, В. (2022). Використання сенсорних технологій у кіберфізичних системах для моніторингу кліматичних умов. *Технічний журнал*, 17(4), 55-63. DOI: 10.2229/tj.2022.04.055.

ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ



Кіберфізична система моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву

Студент Трет'яков Богдан
Керівник к.т.н., доцент Капустян Марія

Актуальність дослідження

Актуальність обраної теми зумовлена потребою в надійному та безперервному контролі параметрів мікроклімату в архівних приміщеннях, де зберігаються історичні документи, ділова або наукова документація. Надмірна вологість або перепади температури можуть призвести до руйнування паперових носіїв, що вкрай небажано. Сучасні технології дають змогу автоматизувати процес контролю, оперативно фіксувати порушення, передавати інформацію на віддалені пристрої або сервіси, що й стало предметом даного дослідження.



Мета, об'єкт дослідження, предмет дослідження

Метою дипломної роботи є розробка кіберфізичної системи, яка дозволяє здійснювати постійний моніторинг температури та вологості у сховищі архіву з можливістю локального відображення інформації та передавання її у мережу.

Об'єктом дослідження виступає процес вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в архівному приміщенні.

Предметом дослідження є методи та засоби реалізації кіберфізичної системи контролю температури та вологості

Основні задачі дослідження

- Основними задачами дослідження стали:
- аналіз вимог до умов зберігання архівних матеріалів;
 - вивчення існуючих рішень та визначення їхніх недоліків;
 - вибір апаратної платформи та сенсорів;
 - розробка схеми з'єднання компонентів;
 - моделювання роботи системи та візуалізація її структури;



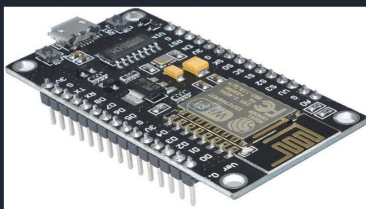
Публікація

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію у Збірнику наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024».(Додаток А)

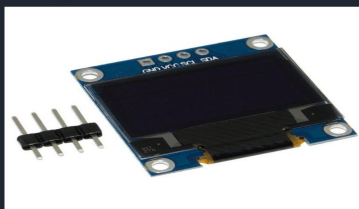


Вибір складових частин кіберфізичної системи визначення температури та вологості

Мікроконтролер ESP8266



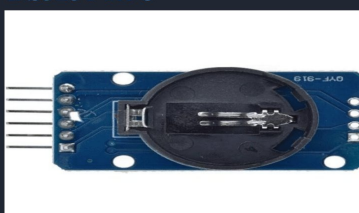
Модуль OLED 128x64



Датчик DHT22



Модуль годинника реального часу DS3231 RTC



Вибір складових частин кіберфізичної системи визначення температури та вологості

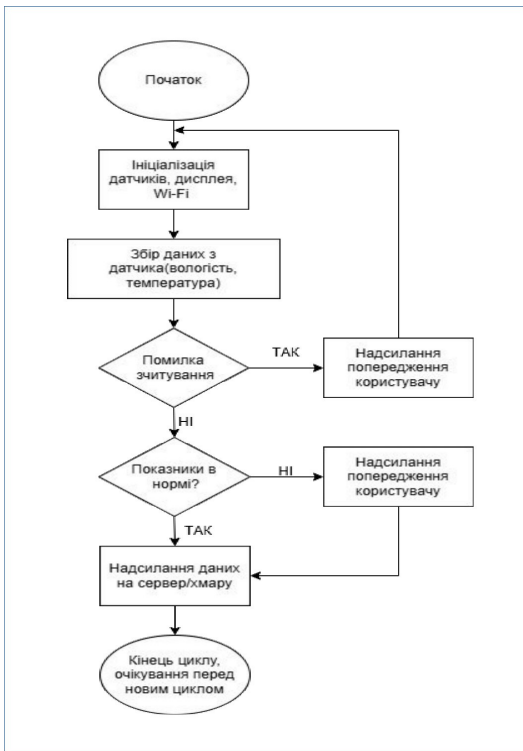
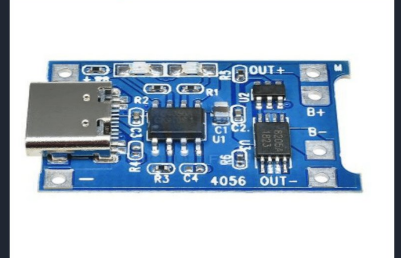
Літєвий акумулятор 3.7V



Перетворювач напруги MT3608

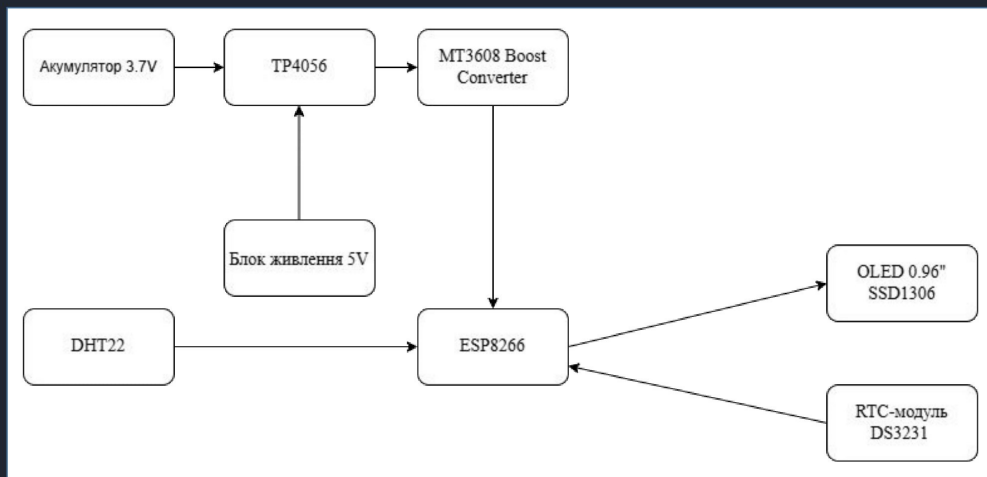


Плата зарядки TP4056



Блок-схема алгоритму збору і обробки даних

Структурна схема кіберфізичної системи



Математична модель

Врахування похибки вимірювання

$T_i(t)$ - температура ($^{\circ}\text{C}$) у момент часу t ;

$H_i(t)$ - вологість (%);

$T_{\text{норм}} \in [T_{\text{min}}, T_{\text{max}}]$ - допустимий інтервал температур;

$H_{\text{норм}} \in [H_{\text{min}}, H_{\text{max}}]$ - допустимий інтервал вологості.

Дані зчитуються датчиками КФС із похибкою $\varepsilon_{i,T}(t)$:

$$x_{i,T}(t) = T_i(t) + \varepsilon_{i,T}(t), \quad \varepsilon_{i,T}(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_T^2),$$

$$x_{i,H}(t) = H_i(t) + \varepsilon_{i,H}(t), \quad \varepsilon_{i,H}(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_H^2),$$

де $\varepsilon_{i,T}(t)$ - випадкова похибка вимірювання температури;

$\mathcal{N}(0, \sigma^2)$ означає, що похибка має нормальний (гаусівський) розподіл;

σ^2 - дисперсія;

σ - стандартне відхилення.

Можна описати вектор стану середовища для зони Z_i наступним чином:

Оцінка відхилення

$$\delta T_i(t) = \max\{0, |T_i(t) - T_{\text{опт}}| - \Delta T\},$$

$$\delta H_i(t) = \max\{0, |H_i(t) - H_{\text{опт}}| - \Delta H\},$$

$$L_i(t) = \omega_T \cdot (\delta T_i(t))^2 + \omega_H \cdot (\delta H_i(t))^2,$$

де $T_{\text{опт}}$, $H_{\text{опт}}$ - бажані чи ідеальні значення;

ΔT , ΔH - допустимі коливання;

ω_T , ω_H - вагові коефіцієнти критичності.

Математична модель

Модель передавання даних

$$\vec{x}_i(t) \xrightarrow{\text{LoRa / Wi-Fi}} G \xrightarrow{\text{TCP/IP}} S,$$

де S – центральний сервер або хмара.

Індикатор стабільності середовища

$$S_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } T_i(t) \notin [T_{min}, T_{max}] \text{ або } T_i(t) \notin [H_{min}, H_{max}] \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

Структура запису в базі даних

$$D_i = \{\vec{x}_i(t_k), S_i(t_k), S_i(t_k)\}_{k=1}^N.$$

Висновок

У процесі виконання дипломної роботи було досягнуто поставленої мети: розроблено та реалізовано прототип кіберфізичної системи моніторингу температури та вологості для архівного сховища. Основним результатом стало створення доступного, надійного та автономного пристрою з можливістю локального й віддаленого доступу до даних.

Робота має як теоретичне, так і практичне значення. Теоретичне полягає у дослідженні підходів до побудови таких систем, вибору архітектури та оптимальних компонентів. Практичне значення проявляється в можливості впровадження розробленого рішення в реальні умови архівних установ, музеїв, бібліотек, де контроль клімату є критичним. Наукова новизна полягає у комплексному підході до побудови системи із забезпеченням автономного живлення, безперервного збору даних, синхронізації з точним годинником та інтеграції з інтернет-сервісами.

ДЯКУЮ ЗА
УВАГУ!

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: Богдан ТРЕТ'ЯКОВ

Співавтор:

Назва: Трет'яков_Кіберфізична система моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 3.4%

Коефіцієнт подібності 2: 1%

Мікропробіли: 14

Заміна букв: 16

Інтервали: 0

Білі знаки: 1

Дата створення звіту: 2025-05-21 22:30:21.0

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:

2025-05-22

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Thu May 22 07:57:33 EEST 2025; Медзвіт Дмитро Миколайович, Хмельницький національний університет, ХНУ

Anti-Plagiarism v-15.274 Educational

The maximum coincidence with one document **0.0%**

Dictionaries check: on_US, ru_RU, ua_UA **Errors in the documents: 9%**

ID: 241653 Title: МКР Кіберфізична система моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву Added in a DB: 2025-05-22 Authors: Богдан ТРЕТЯКОВ Heads: Марія КАПУСТЯН Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	159488	1159	888 (1%)	13 (1%)

Plagiarism sources:

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Богдан ТРЕТ'ЯКОВ

Тема: Кіберфізична система моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 85

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі розглянуто розробку кіберфізичної системи моніторингу температури та вологості повітря у сховищі архіву

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню _____

Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз сучасних технологій моніторингу температури та вологості, а також обґрунтовано доцільність використання кіберфізичних систем у сфері зберігання архівних матеріалів. У другому розділі здійснено вибір компонентів системи, зокрема сенсора DHT22 та мікроконтролера ESP8266, з урахуванням вимог до точності, надійності та енергоефективності. У третьому розділі описано методи збору, обробки та аналізу даних з датчиків, що забезпечують моніторинг у реальному часі та оперативне реагування на зміни параметрів середовища. У четвертому розділі спроектовано архітектуру кіберфізичної системи, яка об'єднує сенсори, програмне забезпечення та мережеву інфраструктуру, забезпечуючи масштабованість і безперервний контроль умов зберігання.

4. Позитивні сторони роботи: _____

5. Негативні сторони роботи: _____

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: _____

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на достатньому рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «задовільно» 3.00 (E)

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

Славомир Данис Анаболікович, доцент, к.т.н.,
кафедри АКБГАР

“ 1 травня ” _____ 2025р.



Завідувачу кафедри КІС
доктору філософії, доценту
Ользі ПАВЛОВІЙ

Трет'якова Богдана Романовича

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2М-23-2

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених шлях для виявлення плагіату в текстах робіт.

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

22 квітня 2025 року



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

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Кіберфізична система моніторингу рівня вологості та температури у сховищі архіву

Автор: Трет'яков Богдан Романович

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Капустян Марія Вікторівна, к.т.н., доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи.	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укривтя запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

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

- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформлені посилання;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 3,35% і адресується до 41 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 1%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи



Марія КАПУСТЯН

Гарант ОП



Олег САБЕНКО

Завідувач кафедри КІС



Ольга ПАВЛОВА