

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

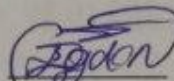
Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія

на тему «Кіберфізична система моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій»

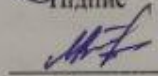
КвРКІП. 301150.23.01.51 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-23-1


Підпис

Богдан ГУЦАЛ
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

82 05 2025 р.

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 ГУЦАЛУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій

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

Прізвище, ім'я, по батькові, 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 дипломне проектування

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

Аналіз сучасних методів моніторингу стану бджолиних вуликів

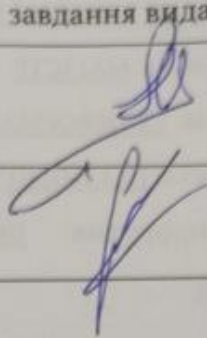

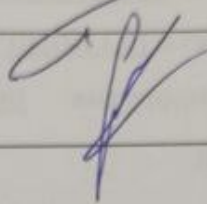

Моделювання архітектури кіберфізичної IoT-системи моніторингу бджолиних вуликів

Розробка методів збору, передачі та обробки даних про стан вулика

Тестування функціональності, стабільності зв'язку та автономності системи

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 «01» _____ 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	01.09.2024	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	

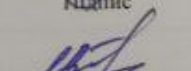
Студент


 Підпис

Богдан ГУЦАЛ

Ім'я, прізвище

Керівник роботи


 Підпис

Марія КАПУСТЯН

Ім'я, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: Кіберфізична система моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій

Автор роботи: Богдан ГУЦАЛ

Керівник роботи: Марія КАПУСТЯН, к.т.н., доцент

Пояснювальна записка: 86 с., 34 рис., 5 дод., 103 джерел.

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ ВУЛИКІВ, ІОТ ТЕХНОЛОГІЇ, БДЖІЛЬНИЦТВО, СЕНСОРИ, БЕЗДРОТОВИЙ ЗВ'ЯЗОК, ХМАРНІ СЕРВІСИ, АВТОНОМНІСТЬ СИСТЕМИ.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу стану бджолиних вуликів із використанням сучасних технологій.

Предметом дослідження є кіберфізична система на основі IoT для автоматизованого збору, обробки та аналізу даних про стан вуликів.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розробка кіберфізичної системи моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій, що дозволяє здійснювати автоматизований дистанційний контроль стану вуликів у режимі реального часу.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи системного аналізу, теорія нечітких множин, методи проектування IoT-систем, аналізу даних, а також методи моделювання та тестування інформаційних систем.

Наукова новизна отриманих результатів:

– набув подальшого розвитку метод побудови кіберфізичних систем моніторингу з використанням бездротових технологій зв'язку та розподіленої обробки даних;

– набула подальшого розвитку інформаційна технологія дистанційного моніторингу бджолиних вуликів із застосуванням хмарних сервісів для зберігання, аналізу та візуалізації даних.

На основі проведених досліджень розроблена архітектура і компоненти програмного забезпечення кіберфізичної системи, яка включає модулі збору даних

з датчиків, передачі через бездротовий канал, обробки та представлення інформації в мобільному інтерфейсі.

Практична значимість отриманих результатів полягає у створенні дієвого рішення для пасічників, яке дозволяє підвищити ефективність контролю за станом бджолосімей, зменшити ризики втрат та оптимізувати витрати на утримання вуликів.

У першому розділі проведено аналіз предметної області, розглянуто сучасні проблеми у сфері бджільництва, проаналізовано існуючі методи моніторингу вуликів, а також здійснено порівняльний аналіз IoT-рішень для дистанційного контролю стану бджолиних сімей.

У другому розділі розроблено архітектуру та алгоритм кіберфізичної IoT-системи моніторингу бджолиних вуликів, визначено вимоги до системи, обґрунтовано вибір апаратних компонентів (датчиків, мікроконтролерів, модулів зв'язку) та обрано відповідне програмне забезпечення і хмарні сервіси.

У третьому розділі реалізовано апаратну та програмну частину розробленої системи, здійснено налаштування сенсорів, створено мобільний інтерфейс для візуалізації даних, а також інтегровано систему з хмарним середовищем.

У четвертому розділі проведено тестування роботи кіберфізичної системи, перевірено стабільність бездротового зв'язку, точність сенсорів, ефективність передачі даних, автономність роботи пристроїв, а також оцінено перспективи масштабування і подальшого розвитку системи.

ЗМІСТ

СКРОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	5
ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО МОНІТОРИНГУ БДЖОЛИНИХ ВУЛИКІВ	9
1.1 Проблеми сучасного бджільництва	9
1.2 Використання IoT-технологій у сільському господарстві.....	12
1.3 Огляд існуючих методів моніторингу вуликів.....	15
1.4 Порівняльний аналіз ІОТ-рішень для бджільництва	18
1.5 Перспективи розвитку технологій моніторингу бджолиних вуликів	21
1.6 Висновки	24
2 МОДЕЛЬ ТА АРХІТЕКТУРА КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ БДЖОЛИНИХ ВУЛИКІВ	26
2.1 Вимоги до системи.....	26
2.2 Модель кіберфізичної системи для моніторингу бджолиних вуликів.....	27
2.3 Вибір апаратних компонентів системи	28
2.4 Вибір середовища програмної розробки	45
2.5 Хмарні сервіси для зберігання та аналізу даних	47
2.6 Розробка алгоритму функціонування системи.....	49
2.7 Висновки	52
3 РЕАЛІЗАЦІЯ АПАРАТНОЇ ТА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ	54
3.1 Розробка апаратної частини системи.....	54
3.1.1 Схема підключення датчиків.....	56
3.2 Розробка програмної частини	65

3.3	Налаштування хмарного сервісу та інтерфейсу користувача	71
3.4	Висновки	74
4	ТЕСТУВАННЯ ТА ПЕРЕВІРКА ЕФЕКТИВНОСТІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ	76
4.1	Тестування системи в реальних умовах.....	76
4.1.1	Умови проведення тестування	76
4.2	Перевірка стабільності бездротового зв'язку (LoRa).....	77
4.3	Тестування сенсорів.....	80
4.4	Тестування роботи мобільного інтерфейсу (blynk).....	84
4.5	Перевірка автономності передавача.....	85
4.6	Масштабованість розробленої системи та перспективи вдосконалення	87
4.7	Висновки.....	89
	ВИСНОВКИ	91
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	92
	ДОДАТОК А Лістинг програмного забезпечення передавача даних для кіберфізичної IoT-системи моніторингу вуликів	102
	ДОДАТОК Б Лістинг програмного забезпечення приймача даних для кіберфізичної IoT-системи моніторингу вуликів	107
	ДОДАТОК В Наукова праця здобувача.....	119
	ДОДАТОК Г Алгоритм роботи КФС.....	123
	ДОДАТОК Д Презентаційні матеріали.....	124

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- LoRa - Long Range (технологія бездротового зв'язку великої дальності)
- GPIO - General Purpose Input/Output (універсальний цифровий вхід/вихід)
- OLED - Organic Light-Emitting Diode (тип енергоефективного дисплея)
- ADC - Analog-to-Digital Converter (аналогово-цифровий перетворювач)
- SDA - Serial Data Line (лінія передачі даних в I2C)
- SCK - Serial Clock (тактовий сигнал, зазвичай у SPI або HX711)
- КФС - кіберфізична система
- I2C - Inter-Integrated Circuit (інтерфейс для з'єднання пристроїв)
- IoT - Internet of Things (Інтернет речей)

ВСТУП

У сучасному світі бджоли відіграють надзвичайно важливу роль у сільському господарстві та екосистемі, оскільки вони є основними запилювачами багатьох сільськогосподарських культур. Проте, останніми роками вчені фіксують значне скорочення популяції бджіл через низку факторів, таких як зміна клімату, хвороби, використання пестицидів та інші несприятливі умови. Така ситуація створює серйозну загрозу для біорізноманіття та продовольчої безпеки. Традиційні методи догляду за бджолами мають низку недоліків. Пасічникам часто доводиться регулярно перевіряти вулики вручну, що потребує багато часу та ресурсів, а також може чинити стрес для бджіл. Брак оперативної інформації про стан вуликів може призводити до запізнених реакцій на проблеми, такі як перегрівання вуликів, нестача корму чи зараження шкідниками.

Одним із можливих способів зменшення ризиків для бджолиних сімей є впровадження технологій Інтернету речей (IoT) для моніторингу стану вуликів у реальному часі. Ці технології дозволяють автоматично збирати та аналізувати дані про температуру, вологість, вагу вулика, рівень активності бджіл тощо, що допомагає пасічникам оперативно реагувати на можливі проблеми.

Застосування кіберфізичних систем у моніторингу вуликів дозволяє поєднати фізичні компоненти (датчики, контролери, модулі зв'язку) з програмним середовищем для збору, передачі та обробки даних. Це забезпечує створення інтелектуального середовища, де рішення приймаються на основі реальних вимірювань, що підвищує загальну стійкість та автономність системи. Такі рішення є перспективними не лише для приватних пасік, а й для промислового бджільництва.

Розвиток цифрових технологій відкриває нові можливості для модернізації бджільництва. Інтеграція IoT-пристроїв у пасічне господарство дозволяє зменшити людський фактор, підвищити ефективність роботи та своєчасно виявляти потенційні загрози для бджолосімей. Завдяки цьому можна зменшити втрати,

пов'язані з хворобами, температурними коливаннями чи іншими негативними чинниками, що напряму впливають на продуктивність пасіки.

Актуальність роботи полягає в розробці кіберфізичної системи моніторингу бджолиних вуликів із використанням технологій Інтернету речей (IoT), що забезпечує безперервний дистанційний контроль за станом вуликів. У контексті зростаючої ролі бджільництва у сільському господарстві виникає потреба в автоматизованих системах, здатних своєчасно виявляти зміни мікроклімату та активності бджолосімей для запобігання втратам.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розробка кіберфізичної системи моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій, що дозволяє здійснювати автоматизований дистанційний контроль стану вуликів у режимі реального часу.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати сучасні методи моніторингу бджолиних вуликів із застосуванням IoT-технологій;
- визначити технічні вимоги до кіберфізичної системи моніторингу вуликів;
- розробити архітектуру IoT-системи, що включає сенсорні пристрої, мікроконтролери, модулі зв'язку та хмарні сервіси;
- реалізувати програмне забезпечення для збору, передачі, зберігання та візуалізації даних про стан бджолиних вуликів;
- провести тестування розробленої системи в реальних умовах та оцінити її стабільність, автономність і ефективність.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу стану бджолиних вуликів із використанням сучасних технологій.

Предметом дослідження є кіберфізична система на основі IoT для автоматизованого збору, обробки та аналізу даних про стан вуликів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні підходу до побудови кіберфізичних систем моніторингу на основі IoT, що дозволяє забезпечити безперервний дистанційний контроль за станом бджолиних вуликів з використанням бездротового зв'язку та хмарних сервісів. Запропонована система

поєднує сучасні сенсорні технології з програмними засобами обробки та візуалізації даних, що підвищує ефективність обслуговування пасік.

Практична значимість отриманих результатів полягає у створенні дієвого рішення для пасічників, яке дозволяє підвищити ефективність контролю за станом бджолосімей, зменшити ризики втрат та оптимізувати витрати на утримання вуликів.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію [88] у Збірнику наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024». (Хмельницький – 2023. – С. 303-305).

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО МОНІТОРИНГУ БДЖОЛИНИХ ВУЛИКІВ

1.1 Проблеми сучасного бджільництва

Сучасне бджільництво стикається з низкою серйозних викликів, що безпосередньо впливають не лише на ефективність пасічного господарства, але й на стан глобальної екосистеми. Однією з найбільш критичних проблем є зменшення чисельності бджолиних сімей у багатьох регіонах світу. Хоча за даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO) загальна кількість бджолиних сімей у світі з 1990 року зросла майже на 47%, у країнах Європи та Північної Америки спостерігаються значні сезонні втрати – від 30% до 60% щороку. В Україні, за останніми оцінками, щорічна смертність бджолиних сімей становить близько 20-25%, що значно перевищує довоєнні показники. Основними причинами цього явища є вплив хімічних засобів захисту рослин, кліматичні зміни, хвороби, зменшення площ медоносних культур, а також наслідки воєнних дій. Особливої актуальності ця проблема набуває з огляду на той факт, що близько 75% сільськогосподарських культур залежать від запилення тваринами, насамперед бджолами. Зниження популяції запилювачів загрожує стабільності продовольчих систем і потребує впровадження новітніх технологій для моніторингу стану бджолиних сімей.

Графік ілюструє динаміку смертності бджолиних сімей в Україні в період з 2018 по 2024 рік. Він побудований на основі доступних оцінок і відображає стійку тенденцію до зростання втрат. Графік тенденції смертності бджолиних сімей зображений на рисунку 1.1.

У 2018 році рівень смертності становив близько 10%, а до 2024 року він зріс до 23%. Така негативна динаміка свідчить про зростаючі проблеми у галузі бджільництва, які можуть бути зумовлені різними факторами: використанням пестицидів, хворобами, кліматичними змінами, скороченням кормової бази, а також впливом війни.

Зростання рівня смертності бджіл є тривожним сигналом для аграрного сектору, оскільки запилення відіграє критично важливу роль у врожайності багатьох культур. Якщо тенденція збережеться, це може призвести до значних економічних збитків та ще більш глибоких екологічних наслідків.

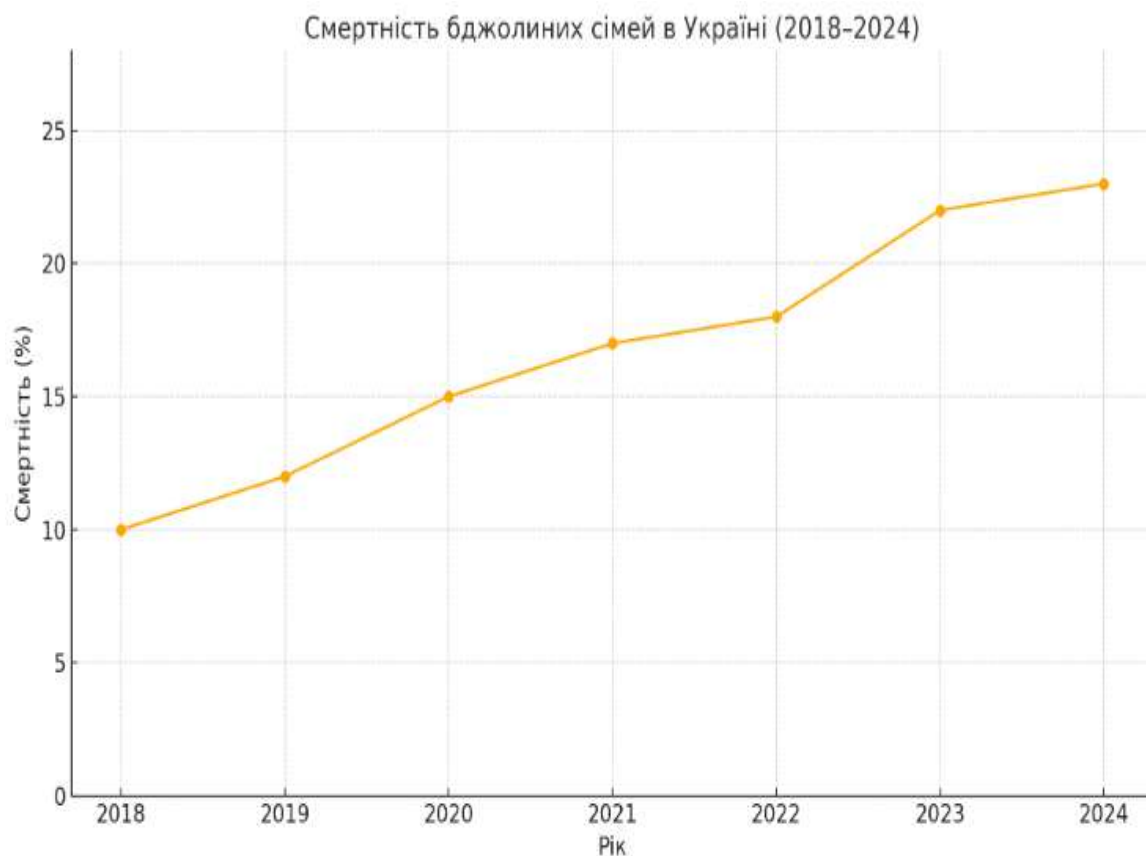


Рисунок 1.1 – Тенденція смертності бджолиних сімей

Сучасне бджільництво як галузь стикається з численними викликами, які можна умовно поділити на три великі категорії: екологічні (втрата біорізноманіття, пестициди, кліматичні зміни), біологічні (хвороби бджіл, паразити) та технологічні. На жаль, не всі ці проблеми піддаються технічному вирішенню - екологічні та біологічні фактори часто вимагають комплексних підходів. Однак саме технологічні аспекти, пов'язані з моніторингом і управлінням вуликами, найкраще підходять для впровадження інноваційних IoT-рішень. Саме тому [15] розробка кіберфізичних систем, здатних віддалено відстежувати параметри навколишнього

середовища та внутрішнього стану вуликів, є актуальним і перспективним напрямом для підвищення ефективності сучасного бджільництва.

Серед основних проблем, які можна вирішити за допомогою нашої системи, на перший план виходять труднощі з оперативним моніторингом стану вуликів [16]. Традиційні методи контролю вимагають постійної фізичної присутності бджоляра, що в умовах великої пасіки стає майже неможливим. В результаті - запізніле виявлення критичних ситуацій: перегріву чи переохолодження вулика, порушень вентиляції, змін вологості. Ці фактори безпосередньо впливають на здоров'я бджолиної родини, її продуктивність і виживаність.

Окремо варто звернути увагу на проблему контролю ваги вуликів. Нині бджолярі змушені проводити зважування вручну, що не дозволяє відстежувати динаміку добових змін. Втрачається цінна інформація про інтенсивність збору нектару, можливі крадіжки меду або несподіване зменшення ваги, яке може свідчити про проблеми в родині. Без автоматизованого моніторингу неможливо точно визначити оптимальний момент для відкачування меду чи підгодівлі бджіл.

Важливою проблемою є відсутність централізованого збору даних та їх аналітичної обробки. Більшість бджолярів веде записи в зошитах або електронних таблицях, що ускладнює виявлення тенденцій, прогнозування розвитку ситуації та прийняття обґрунтованих рішень. Особливо це актуально для великих господарств, де кількість вуликів перевищує кілька десятків [21-25].

Додаткову складність створює відсутність систем раннього попередження про критичні стани. Такі ситуації як роїння, напад ос чи виникнення хвороб часто виявляються надто пізно, коли вже заподіяно значну шкоду. При цьому багато з цих подій мають характерні ознаки, які можна виявити за допомогою сучасних датчиків.

Саме ці технологічно вирішувані проблеми - недостатній моніторинг, відсутність автоматизації збору даних, неможливість оперативного реагування - стають основним об'єктом нашої роботи. Впровадження кіберфізичної системи на основі IoT дозволить створити ефективний інструмент для їх подолання, що в

результаті сприятиме підвищенню продуктивності пасік, зменшенню втрат бджолиних сімей та оптимізації витрат праці бджолярів [26-28].

1.2 Використання IoT-технологій у сільському господарстві

Сучасне сільське господарство переживає технологічну революцію, де IoT (Internet of Things) відіграє роль ключового каталізатора змін. Ці технології вже трансформували традиційні підходи до управління ресурсами, дозволяючи фермерам оптимізувати виробничі процеси, зменшити витрати та підвищити ефективність. В аграрному секторі IoT використовується для точного землеробства, де датчики ґрунту, метеостанції та дрони збирають дані про вологість, температуру і вміст поживних речовин. Ця інформація дозволяє розраховувати оптимальні обсяги поливу, добрив та пестицидів, уникаючи надлишкового використання ресурсів. Наприклад, проєкт FarmBeats від Microsoft поєднує IoT, дрони та штучний інтелект для аналізу ґрунту в країнах з обмеженим доступом до технологій, таких як Індія чи Кенія, демонструючи зростання врожайності на 20-30%. Окрім рослинництва, IoT-системи застосовуються для моніторингу тварин: сенсори на коровах або вівцях відстежують їхнє здоров'я, місцезнаходження та активність, запобігаючи епідеміям і втратам. Розумні теплиці, оснащені автоматизованими системами клімат-контролю, регулюють температуру, освітлення та полив на основі даних із сенсорів, забезпечуючи ідеальні умови для росту рослин навіть у екстремальних кліматичних умовах [31-35].

Сучасні IoT-технології трансформують традиційні практики в точні науково обґрунтовані процеси. Від полів зі злаками до тепличних комплексів, IoT-системи забезпечують безпрецедентний рівень контролю над виробництвом. Наприклад, у прецизійному землеробстві компанія John Deere впровадила технологію Connected Crops – мережу ґрунтових сенсорів, що аналізують нітратний склад, вологість і рН з точністю до 0,1 одиниці. Ці дані інтегруються з хмарною платформою, де алгоритми машинного навчання прогнозують оптимальні терміни посіву та

внесення добрив, зменшуючи витрати азотних сполук на 22% без втрати врожайності.

ІоТ-технології займають важливе місце в сільському господарстві, дозволяючи оптимізувати процеси управління ресурсами та підвищувати ефективність агровиробництва, зокрема, в моніторингу таких критичних параметрів, як вологість і температура ґрунту. Одним із яскравих прикладів таких рішень є система СторХ, яка використовує передові технології для поліпшення зрошення та управління агропосівами.

СторХ – це система моніторингу і аналізу даних для сільського господарства, яка використовує ІоТ-технології для оптимізації зрошення та управління агропосівами. Вона складається з бездротових сенсорів, які вимірюють ключові параметри, такі як вологість ґрунту, температура, рН та рівень азоту. Ці датчики встановлюються в ґрунті та зчитують дані, які потім передаються через бездротові мережі на хмарну платформу для подальшого аналізу. На рисунку 1.2 зображена система моніторингу СторХ.



Рисунок 1.2 – Система моніторингу СторХ [89]

Основною метою СторХ є надання фермерам точних даних для управління зрошенням. Сенсори вимірюють вологу ґрунту в реальному часі, що дозволяє

точно визначати, коли потрібно поливати рослини, оптимізуючи водоспоживання. Це не лише допомагає знизити витрати води, але й покращує ефективність використання ресурсів, що є важливим для збереження довкілля та зменшення витрат на водопостачання.

Система інтегрується з мобільними додатками, що дає можливість фермерам отримувати дані на своїх пристроях у зручному вигляді. Крім того, платформою можна користуватися для налаштування автоматичних рекомендацій щодо поливу, що дозволяє значно спростити управління водними ресурсами. Використання CropX допомагає зменшити втрати води, підвищити врожайність та знизити загальні витрати на ведення господарства.

У тваринництві IoT-рішення досягли неймовірної деталізації: імплантовані RFID-чіпи від SCR Dairy моніторять не лише місцезнаходження корів, а й аналізують жувальну активність з частотою 4 рази на секунду. Система виявляє відхилення в румінації – ключовому показнику здоров'я – з точністю 96%, попереджаючи про кетоз за 48 годин до появи клінічних симптомів. Це дозволило фермам у Нідерландах знизити смертність поголів'я на 17% за п'ять років.

Транспортні ланцюги також перетворюються: смарт-контейнери Panasonic Cool Transport оснащені мультисенсорними модулями, які відстежують не лише температуру, а й концентрацію етилену в фруктах. Дані обробляються edge-обчислювачами безпосередньо в фургоні, що дозволяє динамічно змінювати маршрути доставки на основі прогнозованого терміну дозрівання. Впровадження таких систем у Чилі зменшило втрати винограду під час експорту на 31%.

Критичним технологічним фундаментом цих рішень є гібридні мережі зв'язку. Наприклад, у проєкті WineTech у Франції комбінують LoRaWAN для передачі даних з виноградників (до 10 км радіусу) із Starlink для хмарної синхронізації. Це забезпечує затримку передачі менше 100 мс навіть у гірській місцевості, де традиційний інтернет недоступний.

Еволюція агро-IoT йде до створення автономних кіберфізичних систем. Наприклад, роботизовані трактори AgBot IV від Queensland University самостійно проводять аналіз ґрунту за допомогою лазерної спектроскопії, корегуючи глибину

оранки в реальному часі. Такі рішення вже демонструють зниження енерговитрат на 40% порівняно з традиційними методами.

Таким чином, IoT у сільському господарстві перестає бути набором розрізнених технологій – це інтелектуальна екосистема, де кожен сенсор, пристрій і алгоритм синхронізовані для максимізації ефективності при мінімальному втручанні людини [7-14].

1.3 Огляд існуючих методів моніторингу вуликів

Моніторинг стану бджолиних вуликів завжди був невід'ємною частиною бджільництва, але з плином часу методи його проведення зазнали значних змін. Традиційні підходи, які ґрунтуються на безпосередній участі бджоляра, досі залишаються популярними, особливо серед дрібних господарств. Вони передбачають регулярний візуальний огляд вуликів, використання простих аналогових приладів, таких як термометри та гігromетри, а також ведення ручних записів у спеціальних журналах [18]. Візуальний огляд дозволяє оцінити стан рамок, кількість меду та розплоду, а також виявити ознаки хвороб або паразитів, наприклад кліща *Varroa destructor*. Однак ці методи мають низку суттєвих недоліків, серед яких можна виділити стрес для бджіл через постійне відкриття вулика, суб'єктивність оцінок, яка залежить від досвіду бджоляра, та неможливість отримання даних у реальному часі. Це ускладнює оперативне реагування на зміни, оскільки інформація про стан вулика часто надходить із запізненням [29-30].

На противагу традиційним методам, сучасні автоматизовані системи моніторингу, засновані на технологіях Internet of Things (IoT), пропонують принципово нові можливості. Такі системи використовують різноманітні датчики, встановлені безпосередньо в вуликах або навколо них. Температурні та гігromетричні датчики дозволяють відстежувати мікроклімат усередині вулика, що є критично важливим для виявлення аномалій, таких як різкі перепади температури, які можуть свідчити про інші проблеми. Вагові датчики фіксують зміни маси вулика, що допомагає оцінити кількість меду та виявити крадіжки.

Акустичні датчики аналізують звукові вібрації, створювані бджолами, для виявлення хвороб або стресових станів. Інфрачервоні датчики або камери можуть відстежувати активність бджіл біля входу в вулик, що є важливим показником їхнього здоров'я та продуктивності.

Дані з цих датчиків передаються через бездротові мережі, такі як Wi-Fi, LoRaWAN або GSM, на хмарні платформи, де вони зберігаються та аналізуються. Використання хмарних технологій дозволяє застосовувати алгоритми машинного навчання для прогнозування ризиків, таких як спалахи хвороб або нестача кормових ресурсів, на основі історичних даних. Бджоляр отримує доступ до інформації через веб-додатки або мобільні програми, де дані представлені у вигляді зручних графіків, діаграм та сповіщень [26-28]. Наприклад, система HiveGenius (Німеччина) використовує комбінацію температурних, гігрометричних та вагових датчиків з передачею даних через LoRaWAN, що робить її ідеальною для віддалених пасік. Інший приклад – ApisProtect (Ірландія), яка аналізує акустичні сигнали для виявлення хвороб, забезпечуючи високий рівень автоматизації.

Проте, незважаючи на всі переваги, сучасні IoT-системи мають свої обмеження. Висока початкова вартість обладнання може бути перешкодою для малих та середніх бджолярських господарств, особливо в регіонах з обмеженим доступом до фінансування. Технічна складність впровадження та обслуговування систем вимагає певних знань у сфері електроніки та програмування, що не завжди доступне для традиційних бджолярів. Крім того, ефективність таких систем сильно залежить від якості інтернет-з'єднання, яке може бути нестабільним у віддалених сільських районах. Незважаючи на це, автоматизовані системи моніторингу продовжують активно вдосконалюватися, зокрема за рахунок зниження вартості компонентів, підвищення енергоефективності та розробки більш інтуїтивних інтерфейсів для користувачів [36-40].

Порівняльний аналіз традиційних та сучасних методів показує, що останні є значно ефективнішими у забезпеченні точності, оперативності та глибини аналітики. Вони дозволяють перейти від реактивного підходу, коли дії вживаються після виникнення проблеми, до проактивного, де ризики виявляються на ранніх

етапах. Наприклад, аналіз тенденцій температури може попередити бджоляра про можливе перегрівання вулика влітку, а зниження активності бджіл – про початок хвороби. Це не лише зменшує втрати, але й підвищує загальну ефективність управління пасікою. Водночас, традиційні методи залишаються актуальними для невеликих господарств або як додатковий інструмент у поєднанні з сучасними технологіями, забезпечуючи гнучкість та надійність [41].

Сучасні IoT-системи моніторингу бджолиних вуликів не лише трансформують бджільництво, але й стають інструментом для дослідження ширших екологічних процесів. Наприклад, дані про активність бджіл можуть служити індикатором стану навколишнього середовища: зниження збору пилку може вказувати на деградацію рослинності, а зміни у звукових паттернах – на забруднення повітря. Такі системи вже використовуються в глобальних екологічних проєктах, таких як Earthwatch Institute, де дані з пасік інтегруються з метеорологічними та ґрунтовими даними для моделювання впливу клімату на запилення.

Цікавим напрямком є інтеграція IoT-систем зі штучним інтелектом (AI). Наприклад, алгоритми комп'ютерного зору аналізують відео з камер, встановлених біля входу в вулик, щоб класифікувати активність бджіл або виявляти присутність хижаків (наприклад, азійських шершнів). Такі рішення, як BeeSecure (Франція), використовують нейромережі для розпізнавання паттернів у поведінці бджіл, що дозволяє прогнозувати ризик роїння або хвороб із точністю до 92%. Крім того, AI допомагає оптимізувати маршрути кочівних пасік: аналізуючи дані про квітучість рослин із супутників та IoT-датчиків, система рекомендує оптимальні місця для переміщення вуликів.

Важливим аспектом, який часто залишається поза увагою, є соціальний вплив IoT-технологій на бджолярські спільноти. Впровадження автоматизованих систем змінює роль бджоляра: з ремісника, який керується досвідом та інтуїцією, він перетворюється на аналітика, який працює з даними. Це вимагає нових навичок і часто викликає опір у традиційних господарствах. Проте в країнах, де бджільництво є ключовим джерелом доходу (наприклад, Ефіопія, Непал), IoT-

системи стають інструментом боротьби з бідністю: вони дозволяють зменшити втрати меду та підвищити ціну продукції за рахунок сертифікації «розумного бджільництва» [26-28].

Окремо варто згадати про використання дронів у комбінації з IoT. Дрони, оснащені мультиспектральними камерами, обстежують територію навколо пасіки, виявляючи джерела пилку, забруднені водойми або незаконні вирубки лісів. Ці дані інтегруються з показниками з вуликів, створюючи комплексну картину екосистеми. Наприклад, проект HiveMapper (США) створює 3D-мапи місцевості на основі даних з дронів і вуликів, що допомагає бджолярам планувати розміщення пасік.

Не менш цікавий вплив IoT-моніторингу на наукові дослідження. Дані з тисяч вуликів, зібрані в реальному часі, дозволяють ентомологам аналізувати макропроцеси, такі як міграції бджіл або адаптацію до змін клімату. Наприклад, дослідницька група Global Bee Health Network використовує анонімізовані дані з комерційних IoT-систем для вивчення поширення хвороб у різних регіонах світу. Це дозволяє створювати глобальні карти ризиків і розробляти превентивні стратегії.

Однак існують і етичні дилеми. Збір великих обсягів даних про бджіл і їхнє середовище викликає питання щодо конфіденційності та безпеки. Наприклад, дані про точне розташування пасік можуть бути використані зловмисниками для крадіжки меду або вуликів. Крім того, надмірна автоматизація може призвести до втрати традиційних знань про бджільництво, які формувалися століттями. Тому важливим кроком у розвитку IoT-систем є створення етичних стандартів, які б балансували технологічний прогрес із збереженням культурної спадщини [42-47].

1.4 Порівняльний аналіз ІОТ-рішень для бджільництва

Останніми роками технології Інтернету речей (IoT) активно впроваджуються у бджільництво, дозволяючи бджолярам віддалено контролювати стан вуликів, запобігати хворобам колоній і оптимізувати процес догляду за пасікою. На ринку

існує велика кількість IoT-рішень для моніторингу бджолиних сімей, серед яких є як комерційні, так і відкриті системи. Кожне з них має свої переваги, недоліки та особливості реалізації, що впливає на вибір конкретної технології залежно від умов експлуатації та фінансових можливостей пасічника [48-51].

Одним із найпоширеніших комерційних рішень є система BroodMinder, яка пропонує бездротові датчики для збору інформації про температуру, вологість та вагу вуликів. Компонент системи BroodMinder зображені на рисунку 1.3. Основна особливість цієї системи полягає в простоті встановлення та використання, оскільки датчики працюють на основі Bluetooth Low Energy (BLE) та передають дані на мобільний додаток або сервер. BroodMinder має зручний інтерфейс і аналітичні інструменти для відстеження змін у вуликах. Проте ключовим недоліком є обмежений радіус дії Bluetooth, що ускладнює використання системи на великих пасіках, а також залежність від мобільного пристрою для збору даних, оскільки інформація не передається автоматично на великі відстані [86-87].



Рисунок 1.3 – Компонент системи BroodMinder [90]

Ще одним відомим рішенням є Arnia, яка позиціонується як комплексна система моніторингу бджолиних вуликів. Вона включає широкий набір датчиків, що вимірюють температуру, вологість, вагу, активність бджіл і навіть рівень шуму всередині вулика. Завдяки використанню GSM-зв'язку, система може передавати дані безпосередньо на сервер без потреби в локальному з'єднанні. Однією з ключових переваг Arnia є можливість аналізу акустичних сигналів у вулику, що дозволяє виявляти роїння або проблеми зі здоров'ям колонії ще до їхнього критичного розвитку. Проте цей підхід має й певні недоліки: висока вартість обладнання та абонентської плати за передачу даних через стільникову мережу може зробити систему недоступною для невеликих пасік.

Beehive Monitoring – ще одна IoT-система, що використовує датчики температури, вологості, ваги та шуму для моніторингу колонії. Дані передаються через GSM- або Wi-Fi-з'єднання на сервер, де аналізуються в режимі реального часу. Основною перевагою Beehive Monitoring є підтримка сповіщень, які надсилаються користувачеві в разі критичних змін параметрів. Це дозволяє пасічникам швидко реагувати на загрози для бджолиних сімей. Однак вартість такого рішення залишається досить високою, особливо якщо пасіка розташована в регіоні зі слабким покриттям мобільного зв'язку.

Одним із популярних рішень у сегменті LoRaWAN є HiveMind, яке дозволяє здійснювати моніторинг вуликів навіть у важкодоступних районах завдяки використанню низькоенергетичної мережі LoRaWAN. Це рішення відрізняється енергоефективністю та здатністю працювати на великих відстанях без необхідності в постійному підключенні до інтернету. HiveMind збирає дані про температуру, вологість, вагу та активність бджіл, а потім передає їх на сервер через базову станцію LoRaWAN. Головним недоліком цієї системи є необхідність встановлення власної базової станції або підключення до існуючої LoRaWAN-мережі, що може вимагати додаткових витрат і технічних знань [79-85].

Серед відкритих рішень варто відзначити HiveMonitor, який базується на відкритому програмному забезпеченні та платформах Raspberry Pi або ESP32. Ця система дозволяє пасічникам самостійно створювати IoT-рішення для моніторингу

бджолиних вуликів із використанням датчиків температури, вологості, ваги та рівня звуку. Основною перевагою HiveMonitor є гнучкість і можливість налаштування системи відповідно до потреб конкретної пасіки. Водночас цей підхід вимагає значного рівня технічної підготовки та знань у програмуванні, що може стати перешкодою для широкого впровадження серед звичайних бджолярів.

Ще одним проектом із відкритим кодом є OpenHive, який пропонує набір апаратних і програмних засобів для створення персоналізованої системи моніторингу. OpenHive дозволяє використовувати Wi-Fi або LoRaWAN для передачі даних, що дає можливість адаптувати систему під конкретні потреби пасічника. Однією з переваг є активна спільнота розробників, які постійно вдосконалюють систему. Проте, як і у випадку з HiveMonitor, використання OpenHive вимагає технічних навичок і часу для налаштування.

Аналізуючи ці рішення, можна зробити висновок, що вибір IoT-системи для моніторингу вуликів залежить від багатьох факторів, включаючи розмір пасіки, доступність інтернет-з'єднання, бюджет та технічні можливості пасічника. Комерційні системи, такі як BroodMinder, Arnia та Beehive Monitoring, пропонують зручність і простоту у використанні, але мають високу вартість та обмеження у способах передачі даних. Рішення на базі LoRaWAN, як-от HiveMind, є більш ефективними для пасік у віддалених районах, але потребують встановлення додаткової інфраструктури. Відкриті проекти, такі як HiveMonitor і OpenHive, забезпечують високу гнучкість та можливість налаштування, але вимагають технічних знань і часу на розгортання.

1.5 Перспективи розвитку технологій моніторингу бджолиних вуликів

Перспективи розвитку технологій моніторингу бджолиних вуликів мають величезний потенціал для трансформації бджільництва в найближчі десятиліття. У майбутньому можна очікувати значний прогрес у застосуванні Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (ШІ), машинного навчання та інших інноваційних

технологій, що дозволяють значно підвищити ефективність управління пасіками та забезпечити безперервний моніторинг стану бджолиних сімей [52-56].

Одним із головних напрямків розвитку є вдосконалення сенсорних технологій, які відіграють ключову роль у зборі даних. Сучасні датчики для моніторингу температури, вологості, ваги та рівня CO₂ у вуликах вже демонструють хороші результати, однак існує потреба в більш точних і стійких сенсорах. В майбутньому датчики можуть бути ще менш за розмірами, водночас більш чутливими до змін навколишнього середовища. Це дозволить отримувати ще більш точні дані про стан вулика, що суттєво зменшить ризики пов'язані з непередбачуваними змінами кліматичних умов або поведінки бджіл.

Штучний інтелект і машинне навчання обіцяють значно підвищити рівень автоматизації процесів збору та обробки даних. Ідея полягає не лише у зборі інформації про стан бджолиних сімей, але й у можливості обробляти ці дані та на основі алгоритмів визначати найбільш оптимальні умови для розвитку бджіл. Наприклад, ШІ може не лише сигналізувати про необхідність втручання пасічника, але й самостійно генерувати рекомендації щодо підвищення ефективності роботи пасіки, прогнозуючи, коли і як найкраще здійснити підживлення або перекладку рамок. Такі інтелектуальні системи зможуть навчатися на основі історичних даних, адаптуючи свої прогнози до реальних умов, що значно знижує потребу в людському контролі [17].

Інтеграція технологій IoT із хмарними платформами дозволяє створювати глобальні системи моніторингу, де пасічники зможуть в реальному часі отримувати дані з різних частин світу та навіть управляти своїми пасіками дистанційно. Це створює нові можливості для розширення масштабу пасічного бізнесу. Хмарні сервіси також дозволяють зберігати та аналізувати великі обсяги даних, що зібрані з багатьох вуликів, забезпечуючи доступ до інформації через інтуїтивно зрозумілі мобільні додатки та онлайн-платформи. Можна буде швидко реагувати на зміни в стані бджолиних сімей, отримуючи повідомлення про будь-які відхилення від нормальних показників [57-64].

Ще одним перспективним напрямком є автоматизація управління умовами всередині вулика. Відкриття нових можливостей у галузі автоматичних систем контролю дасть змогу створити "розумні" вулики, які автоматично адаптуються до змін умов довкілля. Такі вулики можуть регулювати температуру і вологість, запобігаючи перегріву або надмірній вологості, що є критичними для здоров'я бджіл. Наприклад, на основі зібраних даних система може активувати вентиляцію або автоматично включити обігрів для підтримки оптимальних умов. У результаті пасічники зможуть зменшити кількість ручної роботи та забезпечити більш ефективне управління пасікою, що в свою чергу дозволить знизити витрати та підвищити продуктивність [73-78].

Іншими важливими інноваціями є використання дронів та роботів для автоматизації моніторингу і обслуговування вуликів. Дрони можуть здійснювати повітряний моніторинг пасіки, забезпечуючи огляд важкодоступних місць і надаючи більш точні дані про стан вуликів з висоти. Роботи можуть використовуватися для виконання завдань, які наразі виконуються вручну, наприклад, переміщення рамок або навіть здійснення певних лікувальних процедур для бджіл [65].

Також можна очікувати, що інновації в галузі енергозабезпечення будуть сприяти розвитку автономних систем для моніторингу. Наприклад, використання сонячних панелей або інших відновлювальних джерел енергії дозволить пасічникам зменшити залежність від зовнішніх джерел енергії та забезпечити постійну роботу IoT-систем навіть у віддалених районах, де доступ до електрики обмежений.

Таким чином, майбутнє технологій моніторингу бджолиних вуликів виглядає захоплюючим, з великою кількістю інновацій, що можуть значно полегшити роботу пасічників і підвищити ефективність їхніх пасік. Інтеграція IoT, штучного інтелекту та автоматизації дозволить створювати більш стабільні і ефективні екосистеми для бджіл, що в свою чергу сприятиме збереженню здоров'я бджолиних популяцій і розвитку сільського господарства в цілому [66-72].

1.6 Висновки

Аналіз сучасних підходів до моніторингу бджолиних вуликів дозволив виявити ключові проблеми, з якими стикається бджільництво у XXI столітті. Глобальне зменшення популяції бджіл, спричинене кліматичними змінами, використанням пестицидів та поширенням паразитів, підкреслює необхідність впровадження інноваційних технологій для забезпечення сталого розвитку галузі. Традиційні методи моніторингу, такі як візуальний огляд або використання аналогових приладів, мають низку суттєвих недоліків, включаючи суб'єктивність, трудомісткість та неможливість отримання даних у реальному часі. Це обмежує їхню ефективність у умовах стрімкого погіршення стану бджолиних сімей та зростання екологічних ризиків.

Сучасні IoT-системи, засновані на високотехнологічних датчиках, бездротових мережах та хмарних платформах, пропонують принципово новий підхід до управління пасіками [19-20]. Вони забезпечують автоматизований збір, передачу та аналіз даних, що дозволяє бджолярам оперативно реагувати на зміни стану вуликів, прогнозувати ризики та оптимізувати виробничі процеси. Наприклад, системи на базі LoRaWAN або NB-IoT дозволяють моніторити віддалені пасіки з мінімальними енерговитратами, тоді як інтеграція зі штучним інтелектом забезпечує високу точність діагностики хвороб або стресу бджіл. Комерційні рішення, такі як HiveGenius або ApisProtect, демонструють високу ефективність у великих господарствах, але їхня вартість залишається перешкодою для малих та середніх пасік.

Порівняльний аналіз IoT-рішень показав, що вибір технології залежить від масштабу господарства, бюджету та технічних потреб. Недорогі модулі на базі Arduino або ESP32 є оптимальними для ентузіастів і дрібних бджолярів, тоді як комплексні платформи «під ключ» краще підходять для великих або кочівних пасік. Крім того, важливим фактором є енергоефективність обладнання та його екологічна безпека, особливо в контексті зростаючої уваги до сталого розвитку.

Однак впровадження IoT-технологій у бджільництві стикається з низкою викликів. Серед них – висока початкова вартість обладнання, необхідність технічної підтримки, залежність від інтернет-інфраструктури та етичні питання, пов'язані зі збором і використанням даних. Для подальшого розвитку галузі необхідно зосередитися на зниженні вартості компонентів, розробці простих у використанні інтерфейсів та залученні бджолярів до процесу адаптації технологій через навчальні програми.

У цілому, IoT-системи моніторингу відкривають нові можливості для бджільництва, трансформуючи його з ремесла в точну науку [1-6]. Вони не лише допомагають зменшити втрати, але й сприяють збереженню бджіл як ключового ланцюжка екосистеми, що є критично важливим для забезпечення продовольчої безпеки та боротьби з кліматичними змінами.

2 МОДЕЛЬ ТА АРХІТЕКТУРА КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ БДЖОЛИНИХ ВУЛИКІВ

2.1 Вимоги до системи

Розробка кіберфізичної системи моніторингу бджолиних вуликів вимагає врахування низки критичних вимог, які забезпечать її ефективність у різноманітних умовах експлуатації. Перш за все, система має забезпечувати високу точність вимірювань ключових параметрів. Наприклад, похибка визначення температури не повинна перевищувати $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, оскільки навіть незначні відхилення можуть свідчити про порушення терморегуляції вулика, що часто пов'язане зі захворюваннями бджіл. Аналогічно, вимірювання вологості має бути стабільним у діапазоні $\pm 3\%$, щоб уникнути помилкових сповіщень про конденсацію вологи всередині вулика, яка може призвести до розвитку грибкових інфекцій.

Енергоефективність є ще одним ключовим аспектом, особливо для систем, розгорнутих у віддалених районах. Апаратні компоненти повинні працювати від акумуляторів протягом мінімум 6-12 місяців без необхідності заміни, що вимагає використання технологій зниженого споживання енергії, таких як періодичний режим сну датчиків або оптимізація інтервалів передачі даних. Наприклад, модулі на базі LoRaWAN здатні передавати інформацію на відстань до 15 км, споживаючи мінімум енергії завдяки коротким імпульсам зв'язку.

Масштабованість системи має дозволяти підключати до 100 і більше вуликів в єдиній мережі з централізованим керуванням. Це особливо важливо для великих пасік або кооперативів, де дані з різних джерел мають агрегуватися для аналізу тенденцій. Надійність також відіграє вирішальну роль: обладнання має витримувати екстремальні умови, такі як температура від -20°C взимку до $+50^{\circ}\text{C}$ влітку, а також високу вологість, яка характерна для літніх місяців. Використання герметичних корпусів для датчиків та захисних покриттів для плат допомагає запобігти корозії та механічним пошкодженням.

Крім технічних вимог, важливим аспектом є простота інтеграції системи з існуючою інфраструктурою бджолярів. Інтерфейси користувача (веб-додатки або

мобільні програми) мають бути інтуїтивно зрозумілими навіть для тих, хто не має технічної освіти. Наприклад, автоматичні сповіщення про аномалії у вигляді SMS або push-повідомлень дозволяють оперативно реагувати на проблеми без необхідності аналізувати сирі дані.

2.2 Модель кіберфізичної системи для моніторингу бджолиних вуликів

Визначення 2.1. Нехай маємо множину вуликів:

$$H = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}. \quad (2.1)$$

Для кожного вулика H_i система вимірює наступні параметри у час $t \in \mathbb{R}_+$:

$T_i(t)$ - температура всередині вулика;

$H_i(t)$ - вологість;

$W_i(t)$ - вага вулика;

$B_i(t)$ - рівень активності бджіл (наприклад, зміна ваги/добу).

Визначення 2.2. Кожен сенсор j на вулику i реєструє вимірювання:

$$x_{i,j}(t) = T_{i,j}(t) + \varepsilon_{i,j}(t), \quad (2.2)$$

де:

$s_{i,j}(t)$ - реальне значення параметра;

$\varepsilon_{i,j}(t) \sim N(0, \sigma_j^2)$ – похибка вимірювання.

Визначення 2.3. Система формує вектор стану вулика:

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

Стан обробляється алгоритмом A , який визначає нормальний стан та аномалію.

Нормальним станом вважатимемо $A(\vec{x}_i(t)) = 0$.

Аномальний стан (тривога) - $A(\vec{x}_i(t)) = 1$.

Визначення 2.4. Детекція відбувається наступним чином:

$$A(\vec{x}_i(t)\vec{x}_i(t)) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } T_i(t) < 32^\circ\text{C} \\ 0, \text{ в іншому випадку.} \end{cases} \quad (2.4)$$

Визначення 2.5. Система має наступну мережу: сенсори \rightarrow мікроконтролер \rightarrow шлюз LoRa \rightarrow сервер S із затримкою τ :

$$D_i(t) = \vec{x}_i(t - \tau). \quad (2.5)$$

Визначення 2.6. Дані для кожного з N вуликів, які записуються до бази, виразимо наступним чином:

$$D_i = \{\vec{x}_i(t_k) \mid k = 1, 2, \dots, N\}. \quad (2.6)$$

Визначення 2.7. Сигнали тривоги подаються користувачеві у таких випадках:

$$\exists t \in [t_0, t_1]: A(\vec{x}_i(t)) = 1. \quad (2.7)$$

2.3 Вибір апаратних компонентів системи

При розробці системи моніторингу бджолиних вуликів важливим аспектом є вибір відповідних апаратних компонентів. Вибір апаратних складових має вплив на функціональність, ефективність та довговічність системи. Для створення системи моніторингу, що включає в себе датчики температури, вологості, ваги та

інших параметрів, необхідно забезпечити зручну і потужну платформу для збирання та обробки даних.

Апаратна архітектура системи моніторингу бджолиних вуликів побудована на базі ключових компонентів, які забезпечують точний збір даних, їх стабільну передачу та тривалу автономність. Основний акцент при виборі елементів зроблено на поєднанні енергоефективності, надійності та адаптивності до різноманітних умов експлуатації – від міських пасік зі стабільним інтернетом до віддалених локацій із обмеженим доступом до інфраструктури. До складу системи входять мікроконтролер для обробки даних, набір сенсорів для фіксації ключових параметрів середовища, модулі бездротового зв'язку та енергетична система, розроблені з урахуванням специфіки бджільництва. Кожен компонент обраний так, щоб забезпечити безперебійну роботу навіть у найсуворіших кліматичних умовах, мінімізуючи втручання людини та максимізуючи корисність отриманої інформації для прийняття оперативних рішень.

Важливим кроком у розробці такої системи є правильний вибір основних апаратних платформ, які будуть виконувати роль ядра системи. Вибір платформи для моніторингу та збору даних має критичне значення, оскільки від нього залежить ефективність збору даних, їх обробка та передача на віддалені сервери або мобільні пристрої для подальшого аналізу. Оскільки для побудови IoT-систем часто використовуються мікроконтролери або одноплатні комп'ютери, важливо порівняти різні варіанти з точки зору їх продуктивності, енергоспоживання, надійності та можливості інтеграції з іншими компонентами системи. У цьому контексті розглядаються різні варіанти апаратних платформ, після чого буде обрано найбільш відповідну для реалізації нашої кіберфізичної системи моніторингу бджолиних вуликів.

Arduino є однією з найпоширеніших платформ для розробки різноманітних електронних проектів. Вона має велику кількість доступних бібліотек та модулів для роботи з різними сенсорами. Однак для підключення до мережі Wi-Fi або Bluetooth, необхідно використовувати додаткові модулі, такі як ESP8266 або HC-05. Оскільки Arduino не має вбудованих можливостей для бездротового зв'язку, це

може створити певні труднощі в інтеграції та ускладнити систему, роблячи її менш компактною та енергоефективною порівняно з іншими варіантами.

Raspberry Pi – це одноплатний комп'ютер, який має значну обчислювальну потужність і можливість запускати повноцінні операційні системи, такі як Linux. Це дозволяє реалізувати складніші функціональні можливості, включаючи зберігання та обробку великих обсягів даних. Однак Raspberry Pi має більші розміри, вищу ціну та значне споживання енергії, що робить його менш підходящим для систем, що повинні працювати автономно на віддалених пасіках без постійного джерела живлення.

ESP8266 є дешевшим і менш потужним варіантом порівняно з ESP32, але також володіє вбудованим модулем Wi-Fi. Його основна перевага – доступність і простота використання для простих IoT-проектів, однак відсутність Bluetooth і менша потужність процесора можуть обмежити його використання в складніших системах. Водночас, для проектів, які не потребують значної обчислювальної потужності, ESP8266 може бути хорошим варіантом.

ESP32 є одним з найбільш популярних мікроконтролерів для розробки IoT-систем. Цей мікроконтролер володіє двоядерним процесором, що забезпечує високу продуктивність і можливість паралельної обробки даних з численних сенсорів. Однією з основних переваг ESP32 є наявність вбудованих модулів для бездротового зв'язку: Wi-Fi та Bluetooth. Це дозволяє без зайвих додаткових компонентів організувати передачу даних на віддалені сервери або мобільні додатки. Завдяки низькому енергоспоживанню, ESP32 також є хорошим вибором для проектів, що працюють від акумуляторів. Окрім того, наявність широкого спектру периферійних інтерфейсів, таких як I2C, SPI та UART, дозволяє підключати до нього різноманітні сенсори для моніторингу різних параметрів бджолиних вуликів.

Основним апаратним компонентом системи моніторингу є чіп ESP32, розроблений компанією Espressif Systems. Цей чіп поєднує потужність, енергоефективність та вбудовані бездротові технології, що робить його ідеальним рішенням для IoT-систем. Однією з ключових переваг ESP32 є його

універсальність: він оснащений модулями Wi-Fi та Bluetooth, що дозволяє забезпечити бездротову передачу даних без потреби в додаткових пристроях. Це особливо важливо для нашої системи, оскільки вона повинна працювати як у міських умовах із стабільним інтернет-зв'язком, так і в віддалених місцях, де для передачі даних використовуватиметься технологія LoRa для великої дальності. Мікроконтролер ESP-32 зображено на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – ESP-32 [91]

ESP32 був обраний за його здатність ефективно керувати енергоспоживанням. Завдяки режиму глибокого сну, чіп споживає лише кілька мікроампер, що дає змогу акумулятору 18650 забезпечувати автономну роботу системи на довгий час. Цей режим активується між циклами збору даних, коли чіп «прокидається» лише для збору інформації з сенсорів (температури, вологості, ваги) і її передачі. Для обробки даних ESP32 використовує двоядерний процесор з тактовою частотою до 240 МГц, що дозволяє паралельно виконувати різні задачі, зокрема фільтрацію шуму з аналогових сигналів, форматування даних у JSON-формат і управління зв'язком.

В системі ESP32 виконує роль центрального вузла, до якого підключені всі датчики. Наприклад, сенсор BME280 передає дані про температуру та вологість через інтерфейс I2C, а тензодатчик ваги HX711 передає дані про масу вулика через аналого-цифровий перетворювач. Зібрані дані аналізуються і надсилаються на

сервер через Wi-Fi або через LoRa-шлюз, якщо пасіка знаходиться поза зоною покриття інтернету. Для забезпечення безпеки передача даних захищена алгоритмом AES-256, що виключає можливість перехоплення інформації.

Ще однією важливою перевагою ESP32 є його здатність працювати в екстремальних умовах. Чіп може функціонувати при температурах від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$, що є важливим для використання вуликів у різних кліматичних умовах, включаючи зимові холоди або спекотні літні дні. Крім того, герметичний корпус з полікарбонату захищає ESP32 від вологи, пилу та механічних пошкоджень.

Таким чином, ESP32 є оптимальним вибором для цієї системи завдяки своїй потужності, енергоефективності та здатності адаптуватися до різних умов. Цей чіп не тільки забезпечує точний моніторинг, але й дозволяє масштабувати систему, додаючи нові датчики або змінюючи конфігурацію без значних витрат.

У системах моніторингу для вимірювання температури та вологості використовується кілька популярних сенсорів, кожен з яких має свої особливості, переваги та обмеження. Для вибору оптимального датчика для моніторингу вуликів важливо враховувати точність вимірювань, енергоспоживання, можливість інтеграції з іншими компонентами системи та здатність працювати в різних умовах.

Один із популярних сенсорів – DHT22 (або AM2302). Цей сенсор широко використовується в різноманітних проектах для вимірювання температури та вологості. DHT22 має досить хороший діапазон вимірювань: температура від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$, вологість від 0% до 100%. Однак точність вимірювань у нього дещо нижча, ніж у інших сенсорів – температура може бути точно виміряна з помилкою до $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, а вологість з помилкою до $\pm 2-5\%$. Додатково, DHT22 має повільний час відгуку і не підходить для швидко змінних умов. Він також потребує значної енергії для роботи, що може бути недоліком для автономних систем.

Інший часто використовуваний сенсор – SHT31. Це більш точний сенсор порівняно з DHT22, з точністю до $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ для температури та $\pm 2\%$ для вологості. SHT31 також має швидший час реакції на зміни параметрів, що робить його більш підходящим для динамічних умов. Однак цей датчик дорожчий, а його

енергоспоживання вищі порівняно з іншими варіантами, що може бути проблемою для систем, що працюють від акумуляторів або мають обмежені ресурси.

Ще одним варіантом є HTU21D. Цей сенсор також має хорошу точність вимірювань, з помилкою $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ для температури і $\pm 2-3\%$ для вологості. HTU21D – це економічніший вибір порівняно з SHT31, але його точність і швидкість не досягають рівня кращих моделей. Окрім цього, він також не має такого низького споживання енергії, як деякі інші варіанти.

Для моніторингу кліматичних умов всередині та ззовні вулика було обрано два типи сенсорних конфігурацій: BME280 для зовнішнього середовища та комбінацію BMP280 + AHT20 для внутрішнього простору. Такий підхід дозволяє забезпечити надійний збір даних про температуру, вологість та атмосферний тиск, враховуючи специфіку умов у різних частинах системи.

BME280 є надійним і популярним сенсором, що вимірює температуру, вологість та атмосферний тиск. Він забезпечує високу точність ($\pm 1^{\circ}\text{C}$ для температури, $\pm 3\%$ RH для вологості), має низьке енергоспоживання, підтримує інтерфейси I2C та SPI, а також працює у широкому температурному діапазоні. Його компактність і зручність у використанні роблять його оптимальним вибором для встановлення на зовнішній частині конструкції, де важливо враховувати мікроклімат навколишнього середовища, що може впливати на стан вулика. Сенсор BME 280 зображено на рисунку 2.2.

Завдяки стабільності показників та здатності до тривалої роботи в умовах змінного клімату, BME280 є придатним для безперервного моніторингу параметрів навколишнього середовища.

Його широке застосування у проектах Інтернету речей (IoT) свідчить про довіру до цього сенсора з боку розробників і дослідників. Завдяки поєднанню точності, надійності та енергоефективності, BME280 значно підвищує ефективність системи моніторингу в реальних умовах експлуатації. Простота інтеграції BME280 з мікроконтролерами дозволяє швидко налаштувати систему збору даних та забезпечити її стабільну роботу у довготривалому режимі.

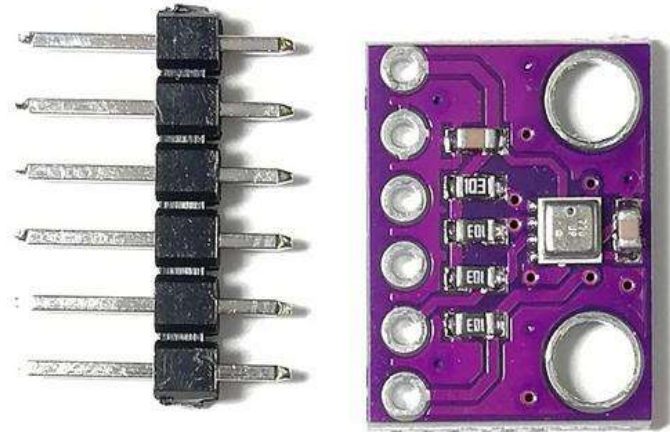


Рисунок 2.2 – VME 280 [92]

Для внутрішнього моніторингу було застосовано комбінацію VMP280 та АНТ20. Такий вибір обумовлений прагненням до вищої точності та надійності в умовах підвищеної вологості, характерної для внутрішнього простору вулика. АНТ20 – сучасний цифровий сенсор температури та вологості, що демонструє стабільну роботу навіть у складних умовах. Він має високу точність, швидкий відгук та добру повторюваність результатів, що важливо для безперервного моніторингу стану мікроклімату. VMP280 у цьому випадку, використовується переважно для порівняння показників із зовнішнім датчиком та калібрування вимірювань, що дозволяє підвищити загальну достовірність зібраних даних. Сенсор VMP 280+АНТ20 зображений на рисунку 2.3.

Варіант з роздільними сенсорами дозволяє більш гнучко керувати параметрами вимірювання, зменшити вплив вологи на стабільність роботи та полегшує обслуговування в разі виходу з ладу одного з модулів. Крім того, розміщення двох сенсорів на одній платі сприяє компактності системи та зменшує складність монтажу. Така архітектура поєднує в собі економічність, надійність та точність, що є ключовими факторами для побудови ефективної системи моніторингу бджолиних вуликів. Завдяки цьому підходу можна одночасно контролювати як зовнішні, так і внутрішні умови вулика, що дозволяє отримати більш повну картину мікроклімату.



Рисунок 2.3 – BME 280+АНТ20 [93]

Температура є основним показником здоров'я бджолиної родини. Різкі коливання можуть сигналізувати про захворювання або нестачу корму. Вологість впливає на розвиток личинок та консервацію меду: надлишок води призводить до запліснявіння, а недостатня – до загибелі бджіл від зневоднення.

Важливу роль відіграє енергоефективність BME 280: у режимі сну споживання падає до 0,1 мкА, що критично для тривалої автономної роботи системи. Таким чином, вибір датчика обґрунтований його універсальністю, точною калібровкою, низьким енергоспоживанням та можливістю отримувати мультипараметричні дані для глибокого аналізу стану вулика.

Для вимірювання ваги в системах моніторингу, таких як система для спостереження за бджолиними вуликами, важливо вибрати точний і надійний тензодатчик, здатний забезпечити точні вимірювання маси навіть при невеликих змінах. У нашій системі для цієї мети був обраний HX711 – один з найбільш популярних і широко використовуваних тензометричних підсилювачів для таких застосувань

Тензодатчики – це пристрої для вимірювання механічних деформацій, які працюють на основі зміни електричного опору тензорезисторів. Принцип їхньої дії базується на тому, що при розтягуванні або стисненні провідникових або напівпровідникових матеріалів змінюється їх опір.

На зображенні представлена схема балкового тензодатчика, де до поверхні балки прикріплені чотири тензорезистори (R_1 , R_2 , R_3 , R_4). Коли до балки прикладається сила F , вона вигинається: верхня частина розтягується, а нижня – стискається. Це призводить до того, що тензорезистори R_1 і R_4 , які знаходяться зверху, піддаються розтягуванню, що збільшує їх опір, а R_2 і R_3 , розташовані знизу, стискаються, що зменшує їх опір. Принцип роботи тензодатчика зображений на рисунку 2.4.

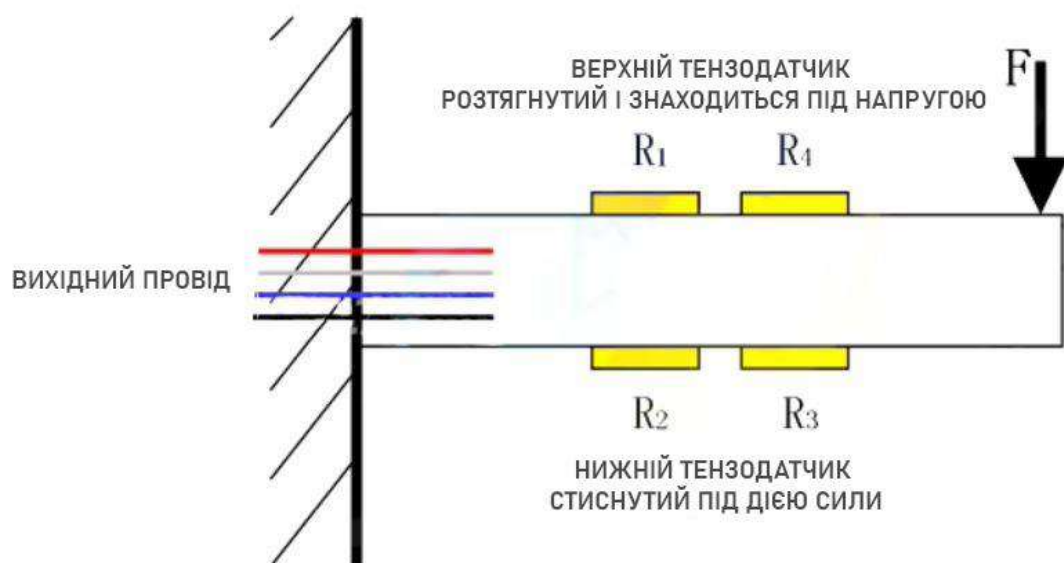


Рисунок 2.4 – Принцип роботи тензодатчика

Ці чотири тензорезистори з'єднані в мостову схему Уїтстона, що дозволяє перетворити зміну опору в електричний сигнал. При відсутності деформації вихідна напруга мосту дорівнює нулю, оскільки зміни опорів не відбувається. Однак при згині балки баланс схеми порушується, і на виході мосту з'являється напруга, яка прямо пропорційна прикладеній силі F . Ця напруга може бути підсилена і передана на електронний пристрій, що її аналізує та перетворює у вимірюване значення навантаження.

Таким чином, тензодатчики використовуються для точного вимірювання сил, ваги та механічних напруг у різних конструкціях. Вони широко застосовуються у

промисловості, будівництві, машинобудуванні та навіть у медичних приладах для моніторингу фізичних навантажень.

Формула для розрахунку вихідної напруги визначається зміною опору в мості, що дозволяє перетворювати механічні деформації в електричний сигнал. В результаті цих змін можна отримати точні вимірювання сили, ваги або іншої механічної деформації, що відображається на зміні вихідної напруги.

Зазначений вихідний сигнал, що виходить зазвичай дуже малий, тому його потрібно підсилювати за допомогою підсилювача, як, наприклад, HX711, щоб зробити цей сигнал достатньо сильним для подальшої обробки та аналізу.

Сенсор складається з силіконової подушки, пластикової основи, самого тензодатчика та кріпильного тримача. Силіконова подушка рівномірно розподіляє силу натискання або вагу, передаючи її на сенсор через пластикову основу. Сам тензодатчик реагує на деформацію, змінюючи свій електричний опір або генеруючи сигнал, який передається по проводах для подальшої обробки. Кріплення фіксує всі компоненти, забезпечуючи точність вимірювань. Такий тензодатчик використовується в електронних вагах, вимірювальних системах і тактильних сенсорах. На рисунку 2.5 зображено конструкцію тензодатчика в корпусі.

Існує кілька альтернатив HX711, кожна з яких має свої переваги та обмеження. Однак серед них саме HX711 є одним з найбільш оптимальних рішень для цієї системи.

Одним з конкурентів є ADS1231. Цей тензометричний підсилювач має високу точність і може працювати при більшому діапазоні вхідних сигналів. Однак він значно дорожчий порівняно з HX711 і має складнішу настройку, що робить його менш підходящим для проектів, де важлива баланс між ціною та простотою використання. Крім того, ADS1231 вимагає додаткових компонентів для налаштування та стабільності роботи, що збільшує складність системи.

ADS1231 також має більші габарити, що може бути критичним для компактних пристроїв. Його використання доцільне переважно в промислових системах, де точність важливіша за вартість і простоту інтеграції.

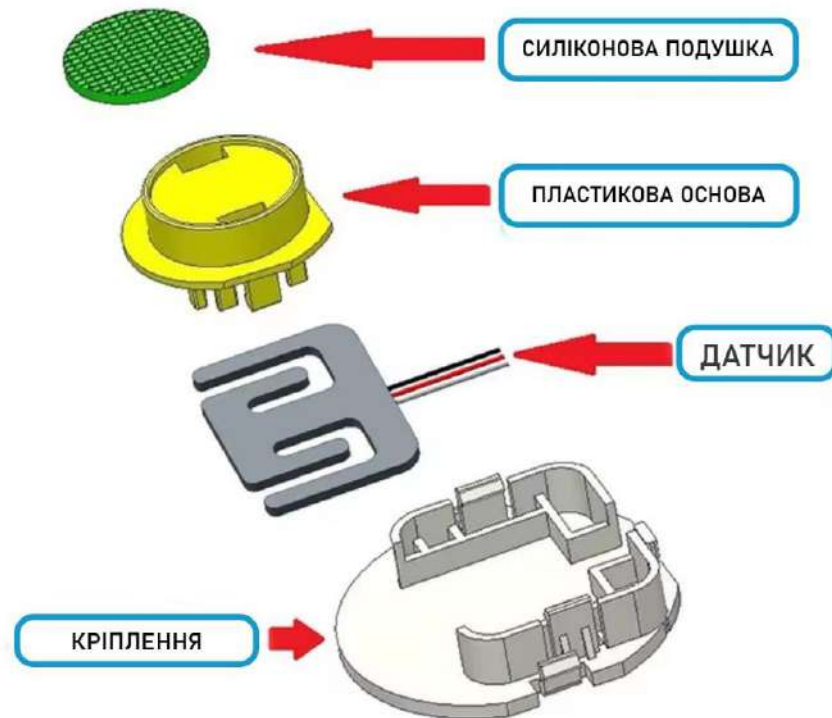


Рисунок 2.5 – Конструкція тензодатчика в корпусі

Іншим варіантом є INA333, який також є тензодатчиком для вимірювання малих сигналів. Він забезпечує високу точність, але має дещо більше енергоспоживання порівняно з HX711, що може бути важливим при розробці автономних систем з обмеженими джерелами енергії, наприклад, батареями. Крім того, INA333 має обмежену можливість підключення до простих мікроконтролерів без додаткових компонентів, що ускладнює інтеграцію в проекти на базі ESP32.

HX711 обраний для вимірювання ваги вулика завдяки своїй спеціалізації у роботі з тензометричними навантажувальними модулями. Він є 24-бітним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) з інтегрованим підсилювачем, що забезпечує високу точність ($\pm 0,1\%$ від максимального навантаження) навіть при мінімальних змінах маси. У системі використовуються чотири тензодатчики на 50 кг кожен, підключені через HX711, що дозволяє розподілити навантаження на каркас вулика та зменшити похибку за рахунок усереднення показань. Тензометричний підсилювач HX711 з тензодатчиками зображений на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Тензометричний підсилювач HX711 з тензодатчиками [94]

Головною перевагою HX711 є його здатність обробляти сигнали від низькоомних тензодатчиків (наприклад, 1 кОм), які генерують мілівольтові різниці напруги під навантаженням. Вбудований підсилювач з коефіцієнтом посилення 128 разів забезпечує стабільність вимірювань, що критично для відстеження динаміки ваги: збільшення маси може свідчити про активний збір нектару, а різке зменшення – про викрадення меду, витрату корму або напад шершнів.

Оскільки HX711 працює від логічних рівнів 5 В, а мікроконтролер ESP 32 використовує 3,3 В для цифрових входів/виходів, у схему додано перетворювач логічних рівнів TXS0108E. Цей компонент виконує двонаправлену конвертацію напруг між HX711 та ESP 32, запобігаючи пошкодженню мікроконтролера через перенапругу. TXS0108E також усуває ризик виникнення перешкод на лініях зв'язку, що особливо важливо при передачі даних на великі відстані через модулі LoRa або Wi-Fi. Перетворювач логічних рівнів TXS0108E зображений на рисунку 2.7. Завдяки своїй універсальності, TXS0108E підтримує до восьми каналів, що дозволяє масштабувати систему без необхідності додаткових компонентів. Його

використання сприяє стабільній та надійній роботі всієї системи в умовах змінного електричного середовища.

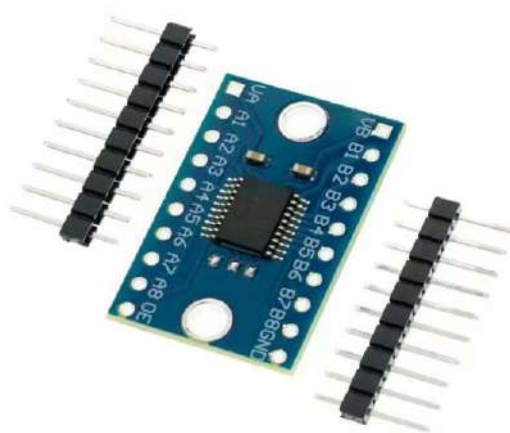


Рисунок 2.7 – Перетворювач логічних рівнів TXS0108E [95]

HX711 інтегрується з ESP 32 за допомогою протоколу SPI, а його програмна реалізація спрощується завдяки спеціалізованим бібліотекам (наприклад, HX711_ADC). Калібрування датчика виконується один раз на етапі встановлення системи, після чого покази автоматично коректуються з урахуванням температури та механічного напруження. Для оптимізації енергоспоживання HX711 переводиться у режим зниженої потужності між вимірами, що суттєво збільшує автономність системи при роботі від акумулятора 18650.

Таким чином, вибір HX711 обґрунтований його високою точністю, можливістю підключення множинних тензодатчиків та ефективною взаємодією з ESP 32 через перетворювач рівнів. Це дозволяє створювати масштабовані системи моніторингу, де вага є ключовим параметром для аналізу продуктивності бджолиної родини та прийняття оперативних рішень у бджільництві.

Для зручного візуального відображення даних, що передаються від сенсорів на приймач, було вирішено додати OLED-дисплей. Цей дисплей дозволяє оперативно відображати інформацію про температуру, вологість та вагу вулика без необхідності звертатися до зовнішніх пристроїв. Було обрано модель 128x64 на базі SSD1306, оскільки вона має компактний розмір і високу контрастність, що

дозволяє чітко читати інформацію в будь-яких умовах. SSD1306 також забезпечує ефективне використання ресурсів приймача і легко інтегрується з ESP32, що дозволяє спростити налаштування та управління відображенням даних. На рисунку 2.8 зображено дисплей SSD1306 128x64.

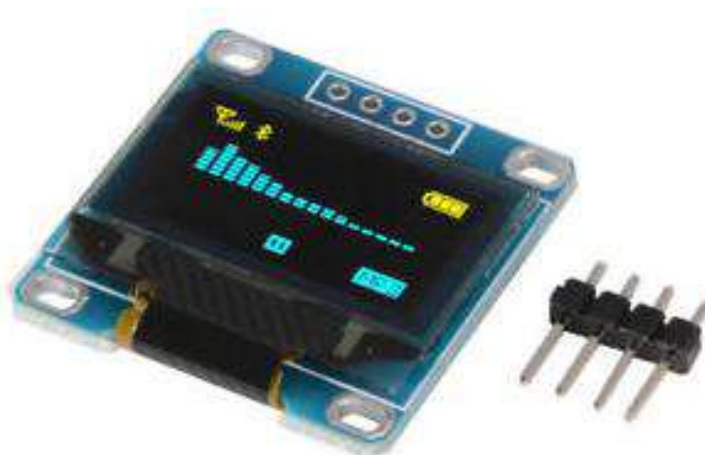


Рисунок 2.8 – Диспей SSD1306 128x64 [96]

У системах моніторингу IoT для передачі даних можуть використовуватися різні технології зв'язку, кожна з яких має свої переваги та недоліки. Одним із найпоширеніших варіантів є Wi-Fi, який забезпечує високу швидкість передачі даних і можливість підключення до інтернету безпосередньо, проте його головним недоліком є обмежена дальність зв'язку та високе енергоспоживання, що робить його малопридатним для автономних систем у віддалених регіонах. Інший популярний варіант – мобільні мережі, такі як 3G, 4G та 5G, які дозволяють передавати дані на будь-які відстані, проте їх використання пов'язане з необхідністю підключення до операторів зв'язку, наявністю покриття та регулярними витратами на обслуговування SIM-карт. Крім того, мобільний зв'язок також є досить енерговитратним, що обмежує тривалість автономної роботи пристрою. Ще одним рішенням є Zigbee та Z-Wave, які ефективні для локальних мереж із малими відстанями зв'язку, проте вони не підходять для передачі даних на великі відстані.

Оптимальним рішенням для нашого проекту стало використання технології LoRa, яка забезпечує передачу даних на великі відстані при мінімальному енергоспоживанні. LoRa (Long Range) – це бездротова технологія, яка дозволяє передавати невеликі пакети даних на відстань до кількох десятків кілометрів у відкритій місцевості, використовуючи вузькосмугову модуляцію. Основна перевага LoRa полягає в її здатності працювати у віддалених районах без доступу до традиційних мереж зв'язку, що робить її ідеальним рішенням для систем моніторингу пасік. Також LoRa відрізняється наднизьким енергоспоживанням, дозволяючи пристроям працювати на одній батареї протягом багатьох місяців або навіть років, що є критично важливим для автономних IoT-систем.

Для реалізації бездротового зв'язку було обрано LoRa RA-01 SX1278 є ключовими компонентами для організації бездротового зв'язку між вуликами та центральним шлюзом у системі моніторингу. Вони засновані на чипі SX1278, який реалізує технологію LoRa з модуляцією CSS (Chirp Spread Spectrum), що забезпечує стабільну передачу даних на значні відстані – до 10–15 км у відкритому просторі та 1–3 км у місцевості з перешкодами. Ця характеристика робить їх ідеальними для сільського господарства, де пасіки часто розташовані далеко від інфраструктури, а покриття Wi-Fi або GSM відсутнє.

Модулі LoRa RA-01 SX1278 працюють у частотному діапазоні 410–525 МГц, що дозволяє гнучко адаптувати їх до місцевих законодавчих норм та умов експлуатації. Для системи моніторингу вуликів обрано робочу частоту 433 МГц, яка є частиною цього діапазону та широко використовується в IoT-рішеннях через низький рівень перешкод і доступність для некомерційного застосування в багатьох країнах. Ця частота оптимальна для сільської місцевості, де відсутня щільна міська інфраструктура, а сигнал має ефективно долати перешкоди, такі як ліси або пагорби.

Висока чутливість прийому (-148 dBm) дозволяє їм детектувати слабкі сигнали навіть при мінімальній потужності передачі, що знижує енергоспоживання. Один модуль встановлюється на вулику разом з ESP 32 і функціонує як передавач, пакуючи дані з датчиків (температура, вологість, вага) у

компактні пакети та відправляючи їх до шлюзу. Для оптимізації автономності він активується лише на час передачі, після чого переходить у режим глибокого сну, споживаючи менше 1 мкА. На рисунку 2.9 зображено модуль бездротового зв'язку Ra-01 SX1278.



Рисунок 2.9 – Ra-01 SX1278 [97]

Важливою перевагою RA-01 SX1278 є стійкість до перешкод завдяки технології CSS, яка "розмазує" сигнал по широкому діапазону, роблячи його нечутливим до вузькосмугових завад. Це критично в умовах сільської місцевості, де можливі перешкоди від рослинності, будівель або інших радіопристроїв. Додаткова безпека досягається за рахунок AES-128 шифрування, що запобігає перехопленню даних або маніпуляціям з боку зловмисників.

Модулі також підтримують масштабованість – один шлюз може обслуговувати десятки вуликів, що важливо для великих пасік. Використання зовнішніх антен (наприклад, штирьових) покращує дальність зв'язку, а захист корпусу від вологи та пилу (IP67) забезпечує довговічність навіть у несприятливих умовах. У разі перевантаження мережі модулі автоматично перемикаються на резервні канали, зберігаючи стабільність передачі.

Обґрунтованість вибору цих модулів полягає в їхній збалансованості між енергоефективністю, дальністю зв'язку та вартістю. Вони дозволяють створити автономну систему, здатну працювати місяцями без заміни акумуляторів, що є вирішальним фактором для бджолярів, які потребують надійного та економічного рішення. Інтеграція RA-01 SX1278 у архітектуру на базі ESP 32 робить систему гнучкою, масштабованою та готовою до впровадження в реальних умовах.

У системі моніторингу вуликів датчики та комунікаційні модулі відіграють ключову роль у зборі та передачі інформації. Основний вузол збору даних розміщується безпосередньо у вулику, де встановлено мікроконтролер ESP32 разом із датчиками температури, вологості та ваги. Ці сенсори постійно зчитують параметри навколишнього середовища, після чого дані передаються на центральний вузол для подальшої обробки.

Акумулятор 18650 обраний як основний джерело живлення системи моніторингу через його високу енергоемність, надійність та придатність до тривалої автономної роботи. Цей тип літій-іонного акумулятора є стандартом для портативних пристроїв і IoT-рішень завдяки оптимальному співвідношенню розмірів до ємності (зазвичай 2000–3500 мА·год). Для системи моніторингу вуликів, де критичною є можливість працювати місяцями без заміни батареї, 18650 стає ідеальним варіантом. Його ємності достатньо, щоб забезпечити живлення ESP32, датчика BME280 та тензодатчика ваги навіть при активному зборі даних кожні 5–10 хвилин. Ключовою перевагою є здатність акумулятора працювати в широкому температурному діапазоні (-20°C до $+60^{\circ}\text{C}$), що дозволяє використовувати систему як влітку, так і взимку без ризику швидкого розряду або пошкодження.

Для подовження терміну служби в схему інтегровано режим глибокого сну ESP32, який зменшує споживання енергії до мінімуму між циклами вимірювань. Наприклад, якщо мікроконтролер активний лише 10 секунд кожні 5 хвилин, загальне споживання системи становить менше 1 мА·год на добу, що дозволяє акумулятору 3000 мА·год забезпечити автономність до 3–4 місяців. Додатково, для пасік у сонячних регіонах передбачено можливість підключення компактної

сонячної панелі потужністю 2–5 Вт, яка через схему контролю заряду відновлює енергію акумулятора, роблячи систему повністю самозабезпеченою.

Безпека експлуатації також врахована: акумулятор 18650 поміщений у захисний корпус із термодатчиком, який блокує зарядку/розрядку при перегріві або критичному падінні напруги. Це запобігає коротким замиканням, перерозряду та іншим аварійним ситуаціям, що особливо важливо в умовах підвищеної вологості або контакту з металевими елементами вулика. На рисунку 2.10 зображено акумулятор 18650.



Рисунок 2.10 – акумулятор 18650 [98]

Таким чином, акумулятор 18650 є оптимальним вибором для забезпечення енергетичних потреб системи. Його довговічність, стабільність та можливість інтеграції з альтернативними джерелами живлення роблять його ключовим компонентом для створення масштабованої та екологічно стійкої IoT-платформи.

2.4 Вибір середовища програмної розробки

Для розробки програмного забезпечення для збору та обробки даних у системі моніторингу вуликів розглядалися кілька варіантів середовищ розробки, серед яких Arduino IDE, PlatformIO, MicroPython, а також інші спеціалізовані інструменти. Однак, в результаті аналізу було обрано Arduino IDE як основне середовище для розробки, що обґрунтовується кількома вагомими перевагами.

Arduino IDE є одним з найпопулярніших та доступних інструментів для програмування мікроконтролерів, зокрема ESP32. Він має простий і зрозумілий інтерфейс, що дозволяє знизити поріг входу для розробників. Це особливо важливо для швидкого прототипування та налаштування, адже багато з компонентів системи мають бути адаптовані та протестовані в умовах реального середовища.

Однією з ключових переваг Arduino IDE є наявність величезної кількості бібліотек для різних типів датчиків, комунікаційних модулів та мікроконтролерів. Це значно скорочує час на написання коду, оскільки багато бібліотек уже оптимізовані та готові до використання. Також Arduino IDE підтримує велику кількість плат, що дозволяє легко працювати з різними мікроконтролерами, такими як ESP32, що використовуються в нашій системі.

Ще однією важливою перевагою є інтеграція з великою спільнотою користувачів та наявність численних прикладів коду, форумів та документації. Це дозволяє швидко знаходити рішення для різних проблем, з якими можна зіткнутися під час розробки, що знижує ризики та скорочує час на налаштування.

Хоча інші середовища, такі як PlatformIO та MicroPython, також мають свої переваги, вони вимагають більш глибоких знань в області програмування та налаштування. PlatformIO, наприклад, є потужнішим інструментом, що дозволяє використовувати розширені функції, однак його складність може бути зайвою для даного проекту, де важливими є простота налаштування та швидкість прототипування.

MicroPython може бути використаний для роботи з мікроконтролерами, однак він вимагає додаткових налаштувань і, можливо, не має такої великої кількості бібліотек для специфічних датчиків та модулів, як Arduino IDE.

Arduino IDE є одним із найбільш популярних інструментів для розробки програмного забезпечення для мікроконтролерів, зокрема таких, як ESP32, що використовуються в нашій системі моніторингу вуликів. Однією з основних переваг цього середовища розробки є його доступність і простота у використанні, що є важливим фактором при роботі з новачками та для швидкої реалізації проекту. Завдяки великій кількості доступних навчальних матеріалів, статей, відеоуроків та

курсів, будь-хто може швидко освоїти програмування на базі Arduino, що значно полегшує процес навчання. Крім того, Arduino IDE підтримує велику кількість бібліотек для різних комунікаційних протоколів, таких як Wi-Fi, LoRa, Bluetooth, I2C, SPI, що дозволяє швидко налаштувати з'єднання між елементами системи і забезпечує безперервну передачу даних з датчиків до центрального серверу через різні канали зв'язку. Це особливо важливо для адаптації системи до різних умов роботи. Інтеграція з різними хмарними сервісами для зберігання та обробки даних робить Arduino IDE ще більш зручним вибором для створення кіберфізичних систем, таких як наша, де необхідно ефективно керувати великими обсягами даних і забезпечити доступ до них в режимі реального часу. Легкість тестування та відлагодження коду за допомогою вбудованих інструментів, таких як серійний монітор, дозволяє швидко перевіряти коректність роботи системи і оперативно виявляти помилки в роботі датчиків. Додатково, велика спільнота розробників Arduino надає численні ресурси для вирішення проблем та обміну досвідом, що значно полегшує розробку та підтримку проєктів. Саме через ці фактори Arduino IDE є оптимальним вибором для розробки програмного забезпечення для нашої системи моніторингу вуликів.

З урахуванням вищезазначених факторів, Arduino IDE є оптимальним вибором для розробки програмного забезпечення нашої системи моніторингу вуликів. Це дозволяє швидко налаштувати та протестувати систему, зберігаючи високу надійність і простоту в використанні.

2.5 Хмарні сервіси для зберігання та аналізу даних

На ринку існує безліч хмарних сервісів для зберігання та аналізу даних, і вибір відповідної платформи залежить від багатьох факторів, таких як складність інтеграції, підтримка необхідних протоколів, вартість та надійність. Ось кілька основних варіантів, які використовуються для IoT-проєктів:

Google Cloud Platform (GCP) – одна з найпопулярніших платформ для обробки великих даних та машинного навчання. Вона надає потужні інструменти

для зберігання, обробки і аналізу даних, зокрема BigQuery для аналізу великих наборів даних та Firebase для інтеграції з мобільними додатками. Проте, для невеликих IoT-проектів, таких як моніторинг вуликів, Google Cloud може бути занадто складним і дорогим у використанні. Налаштування та управління ресурсами потребує значних знань і досвіду, а також високих витрат на використання платформи, що робить її менш оптимальною для простих та малобюджетних рішень.

Для менш масштабованих і більш доступних проектів хорошим вибором є ThingSpeak – спеціалізована платформа для роботи з IoT-датчиками. ThingSpeak підтримує інтеграцію з MATLAB, що дозволяє здійснювати аналіз даних і створювати алгоритми машинного навчання. Крім того, ThingSpeak має спрощений інтерфейс і дозволяє безкоштовно зберігати та обробляти дані з обмеженою кількістю запитів, що робить його привабливим для стартапів та малих підприємств. Однак його функціональність обмежена у порівнянні з більш великими платформами, такими як AWS чи GCP

Amazon Web Services (AWS) – інша велика хмарна платформа, яка надає широкий набір інструментів для обробки даних, зокрема Amazon Kinesis для потокової обробки та AWS IoT для підключення і управління IoT-пристроями. AWS має потужні можливості для масштабування і обробки великих обсягів даних, що робить її відмінним вибором для великих комерційних проектів. Однак, AWS також має високу складність налаштування і потребує значних витрат на підтримку, що може бути неефективно для маленьких або середніх проектів.

Microsoft Azure – ще одна потужна платформа для зберігання і обробки даних, яка часто використовується для інтеграції з іншими продуктами Microsoft. Azure пропонує інструменти для створення IoT-рішень, зокрема Azure IoT Hub та Azure Stream Analytics, що дозволяє обробляти дані в реальному часі. Хоча ця платформа має багато переваг у плані інтеграції з іншими корпоративними системами, для невеликого проекту вулика її використання може бути надто складним і затратним.

Blynk – це платформа, яка була вибрана для системи моніторингу вуликів, оскільки вона ідеально підходить для IoT-проектів середнього та малого масштабу.

Blynk пропонує простий інтерфейс для інтеграції з різними мікроконтролерами та датчиками, а також зручний мобільний додаток для візуалізації даних в реальному часі. Цей сервіс дозволяє розробникам швидко створювати системи моніторингу та управління, не потребуючи великих знань у програмуванні та налаштуванні серверів. Оскільки Blynk має відкриту архітектуру, це дозволяє інтегрувати різні типи пристроїв і використовувати протоколи, такі як Wi-Fi та LoRa, що особливо важливо для нашого проєкту, де дані мають передаватися з віддалених вуликів, де можливий доступ до Wi-Fi є обмеженим. Також Blynk підтримує роботу з хмарними сервісами та базами даних, що дозволяє безперешкодно зберігати та обробляти дані, що надходять від датчиків. Це дозволяє створити гнучку систему моніторингу, яку можна адаптувати до змінних умов експлуатації на пасіці.

З точки зору зручності та вартості, Blynk є ідеальним рішенням для нашої системи. Платформа дозволяє налаштувати всю необхідну інфраструктуру для збору і обробки даних з мінімальними витратами на технічну підтримку. Вона також надає гнучкість у виборі мікроконтролерів, що дозволяє підключати різні датчики і модулі, такі як ESP32, що використовуються в нашій системі. Blynk має підтримку мобільних додатків для перегляду даних в реальному часі, що дозволяє бджолярам зручно моніторити стан своїх вуликів з будь-якого місця.

Вибір Blynk був обумовлений його простотою у використанні, можливістю гнучкої інтеграції з різними пристроями, а також надійністю в обробці даних і збереженні інформації. Це забезпечує нам можливість створити ефективну та доступну систему моніторингу для бджолярів, що дозволяє безперешкодно відслідковувати стан вуликів та отримувати точні дані про навколишнє середовище.

2.6 Розробка алгоритму функціонування системи

Розробка алгоритму функціонування системи моніторингу є ключовим етапом у створенні кіберфізичної IoT-системи, що забезпечує злагоджену взаємодію між апаратною та програмною частинами. Алгоритм визначає

послідовність дій мікроконтролера від моменту запуску до обробки отриманих даних та передачі їх на хмарний сервер чи мобільний додаток.

Передбачено два варіанти передачі даних, що дозволяють адаптувати систему під різні умови експлуатації. Перший варіант передбачає використання Wi-Fi-з'єднання для прямої передачі зібраної інформації на віддалений сервер. Такий підхід є ефективним у випадку, якщо вулик знаходиться в зоні покриття бездротової мережі, забезпечуючи оперативне оновлення даних.

Другий варіант комунікації застосовується в умовах віддаленого розташування пасіки, де доступ до Wi-Fi відсутній або нестабільний. У цьому випадку використовується технологія LoRa для передачі даних на другий ESP32, який розташований у будинку та виконує роль проміжного вузла. Цей ESP32 приймає сигнали від віддалених вузлів, обробляє їх і передає на сервер через Wi-Fi або дротове підключення. Така дворівнева архітектура дозволяє значно збільшити дальність передачі даних, зберігаючи при цьому енергоефективність пристроїв у полі. На рисунку 2.12 зображено передачу даних між передавачем і приймачем системи моніторингу.



Рисунок 2.11 – Передача даних за допомогою технології LoRa

Подібна організація системи дозволяє гнучко налаштовувати роботу мережі моніторингу, адаптуючи її під умови конкретної пасіки. Використання LoRa забезпечує передачу інформації на значні відстані при низькому енергоспоживанні, що критично важливо для автономних пристроїв. У той же час наявність альтернативного варіанту передачі даних через Wi-Fi дозволяє скоротити затримки та забезпечити швидкий доступ до інформації, якщо це можливо. Завдяки такій конфігурації система моніторингу стає надійною та ефективною незалежно від зовнішніх умов.

Розроблений алгоритм кіберфізичної системи моніторингу бджолиних вуликів передбачає послідовну та ефективну обробку даних від сенсорів до кінцевого користувача. Спершу відбувається ініціалізація передавального модуля, який включає підключення сенсорів (для вимірювання температури, вологості та ваги) та налаштування LoRa-зв'язку для подальшої передачі даних. Далі здійснюється зчитування інформації з сенсорів, після чого дані проходять обробку – калібрування ваги, корекція температури та вологості для підвищення точності вимірювань. Наступним кроком формується повідомлення з обробленими даними, яке передається через LoRa-зв'язок. Після передачі передавальний модуль переходить у режим *deep sleep* на визначений проміжок часу (від 10 до 60 секунд залежно від налаштувань) для економії енергії, що є критично важливим для автономної роботи системи в польових умовах. Алгоритм роботи КФС зображений у додатку Г.

Приймальний модуль, який ініціалізується з підтримкою Wi-Fi, Blynk та LoRa, отримує LoRa-повідомлення та здійснює їх парсинг і перевірку коректності даних. Якщо дані виявляються валідними, вони відображаються на OLED-дисплеї, після чого проводиться перевірка меж вологості та температури.

У разі виходу показників за допустимі межі користувач отримує попередження, що дає можливість вчасно вжити заходів, таких як зміна розташування вулика або покращення термоізоляції. Усі коректні дані також надсилаються у додаток Blynk, де відбувається їх візуалізація для подальшого

моніторингу. Якщо ж дані не є валідними, система переходить до очікування наступного повідомлення без подальшої обробки.

Такий послідовний алгоритм забезпечує надійність збору та передачі даних, енергозбереження пристроїв і своєчасне інформування користувача про потенційні проблеми, що є ключовими факторами для ефективного управління умовами в бджолиних вуликах.

Завдяки використанню технологій LoRa та Blynk, система залишається ефективною навіть у віддалених місцевостях з обмеженим доступом до Інтернету. Розроблений алгоритм можна легко адаптувати до інших сфер моніторингу, де потрібне бездротове передавання даних у режимі реального часу, система легко доповнюється новими сенсорами.

Вибір саме такого підходу зумовлений необхідністю поєднати автономність пристроїв, стабільність зв'язку на великі відстані та інтеграцію із сучасними мобільними технологіями для зручності користувача.

2.7 Висновки

У даному розділі було проведено комплексний аналіз та обґрунтування вибору компонентів для розробки кіберфізичної системи моніторингу вуликів. На основі вивчення сучасних технологій та аналізу ринку IoT-рішень було запропоновано архітектуру системи, яка враховує ключові вимоги до точності вимірювань, енергоефективності, надійності та безпеки даних.

Апаратна частина системи базується на мікроконтролері ESP32, який був обраний завдяки оптимальному поєднанню продуктивності, енергоефективності та наявності вбудованих бездротових інтерфейсів (Wi-Fi та Bluetooth). Його здатність працювати в режимі глибокого сну дозволить значно продовжити автономну роботу системи. Для вимірювання ключових параметрів середовища запропоновано використовувати мультисенсор BME280, який забезпечує точні вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску. Вимірювання ваги

планується реалізувати за допомогою тензодатчика HX711, що відрізняється високою точністю та стабільністю показань.

Для організації бездротового зв'язку в умовах віддалених пасік запропоновано використання технології LoRa на базі модулів RA-01 SX1278, які забезпечують передачу даних на значні відстані при мінімальному енергоспоживанні. У випадку наявності стабільного підключення до мережі Інтернет передбачено можливість використання вбудованого Wi-Fi модуля ESP32.

Програмне забезпечення системи планується розробляти у середовищі Arduino IDE, яке було обране через простоту використання, велику спільноту користувачів та наявність численних бібліотек для роботи з обраними апаратними компонентами. Для зберігання та візуалізації даних запропоновано використання хмарного сервісу Blynk, який пропонує зручний інтерфейс для моніторингу та налаштування сповіщень.

Розроблено алгоритм функціонування кіберфізичної системи моніторингу бджолиних вуликів. Алгоритм забезпечує послідовну роботу сенсорів, збір і передачу даних, а також стабільну взаємодію між апаратними та програмними компонентами системи.

Перспективи реалізації запропонованого рішення включають можливість подальшого масштабування системи, інтеграції додаткових датчиків (наприклад, для вимірювання рівня шуму або якості повітря), а також вдосконалення алгоритмів аналізу даних для передбачення аномальних ситуацій. Окремо варто відзначити потенціал для адаптації системи під інші завдання в галузі точного сільського господарства.

Таким чином, проведений аналіз та обґрунтування вибору компонентів створюють міцну теоретичну основу для подальшої практичної реалізації системи моніторингу вуликів. Запропонована архітектура враховує всі ключові аспекти функціонування сучасних кіберфізичних систем і може служити основою для розробки ефективного інструменту для бджолярів.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ АПАРАТНОЇ ТА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ

3.1 Розробка апаратної частини системи

Розробка апаратної частини системи моніторингу бджолиних вуликів передбачає складання та інтеграцію всіх вибраних компонентів у єдину функціональну систему. Основними завданнями цього етапу є підключення датчиків до мікроконтролера, забезпечення живлення, організація бездротового зв'язку та розміщення пристроїв у вулику з урахуванням захисту від зовнішніх факторів.

Апаратна частина системи моніторингу бджолиних вуликів включає набір датчиків, мікроконтролер ESP32, модуль бездротового зв'язку LoRa RA-01 SX1278, модуль живлення на базі акумулятора 18650 та перетворювач логічних рівнів TXS0108E. Система підтримує два способи передачі даних: через Wi-Fi-з'єднання, коли є доступ до мережі, здійснюється безпосередня передача даних на сервер, або через LoRa-зв'язок, при якому інформація надсилається на інший мікроконтролер ESP32, розміщений у будинку та підключений до Wi-Fi, що виконує функцію шлюзу. Конструктивно система складається з двох основних вузлів: сенсорного модуля, встановленого безпосередньо у вулику, який включає мікроконтролер ESP32, датчики BME280 та HX711, модуль LoRa та автономний блок живлення, а також базової станції в будинку, яка приймає дані через LoRa та передає їх на сервер за допомогою Wi-Fi-з'єднання.

ESP32 – це потужний мікроконтролер з вбудованим Wi-Fi та Bluetooth, що робить його ідеальним для IoT-проектів. Він має двоядерний процесор Tensilica LX6 із тактовою частотою до 240 МГц та велику кількість GPIO-портів, які можна використовувати для підключення датчиків, дисплеїв, модулів зв'язку тощо. Загалом ESP32 має 34 загальнодоступні GPIO, але не всі з них можна використовувати вільно, оскільки деякі зарезервовані для внутрішніх функцій. Його порти можуть працювати у режимі входу та виходу, підтримують аналогові сигнали (ADC), широтно-імпульсну модуляцію (PWM) та різні комунікаційні

інтерфейси, зокрема I2C, SPI та UART. На рисунку 3.1 зображено структуру виводів мікроконтролера ESP32

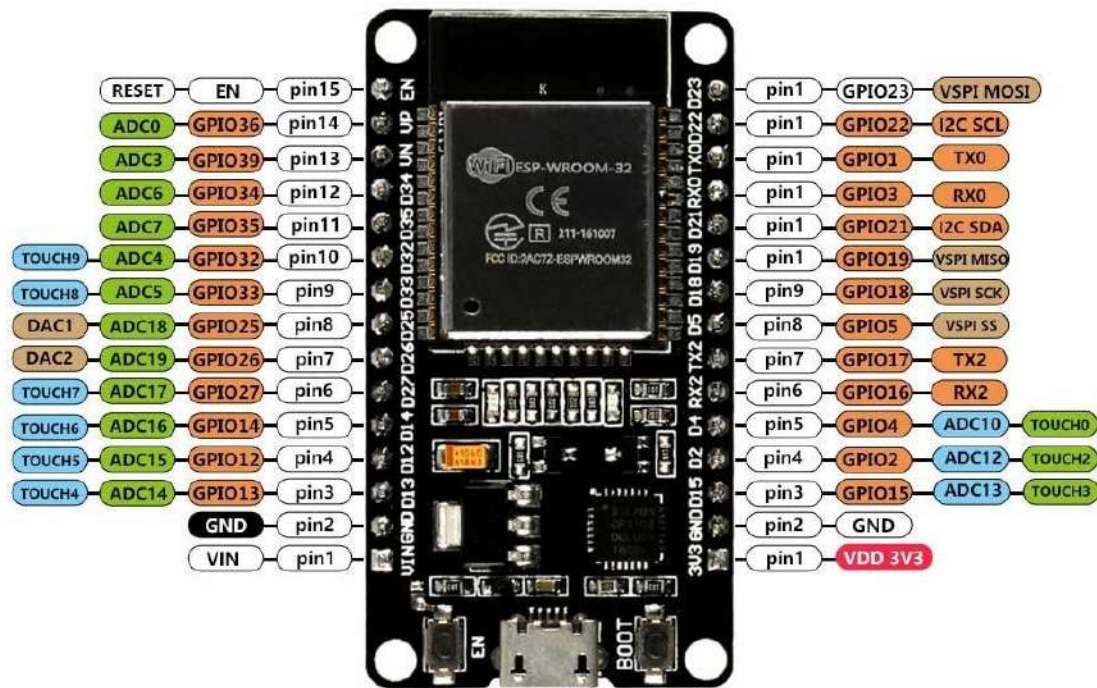


Рисунок 3.1 – структура виводів мікроконтролера ESP32 [99]

Для живлення пристроїв передбачені пін 3V3 (3.3V), VIN (5V) та GND (земля). Аналогові входи ESP32 представлені каналами ADC1 та ADC2, де ADC1 використовується під час роботи Wi-Fi, а ADC2 не функціонує під час його активності. До ADC1 входять порти GPIO36, GPIO39, GPIO34, GPIO35, GPIO32, GPIO33, які дозволяють отримувати аналогові сигнали, наприклад, від датчиків температури або фоторезисторів. ШІМ (PWM) сигнали можна генерувати на будь-якому GPIO, що робить його придатним для керування світлодіодами, двигунами та іншими пристроями.

ESP32 підтримує кілька комунікаційних протоколів, серед яких I2C, що дозволяє підключати безліч пристроїв через два дроти (SDA - GPIO21, SCL - GPIO22), наприклад, датчик BME280 для вимірювання температури, вологості та тиску або OLED-дисплеї. SPI (GPIO19 - MISO, GPIO23 - MOSI, GPIO18 - SCK, GPIO5 - CS) використовується для підключення швидкісних пристроїв, таких як

LoRa RA-01 SX1278, SD-карти чи TFT-дисплеї. Також ESP32 має три UART-інтерфейси для послідовного зв'язку (UART0, UART1, UART2), що дозволяє підключати GSM-модулі, GPS-трекери або RFID-зчитувачі

3.1.1 Схема підключення датчиків

Для забезпечення коректної роботи системи всі компоненти підключаються до мікроконтролера ESP32 з урахуванням їхніх електричних характеристик та вимог до живлення. Зокрема, датчик BME280, який використовується для вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску, підключається через I2C-інтерфейс, що забезпечує простоту з'єднання та ефективний обмін даними з мікроконтролером. На рисунку 3.2 зображено структуру виводів датчика BME280.

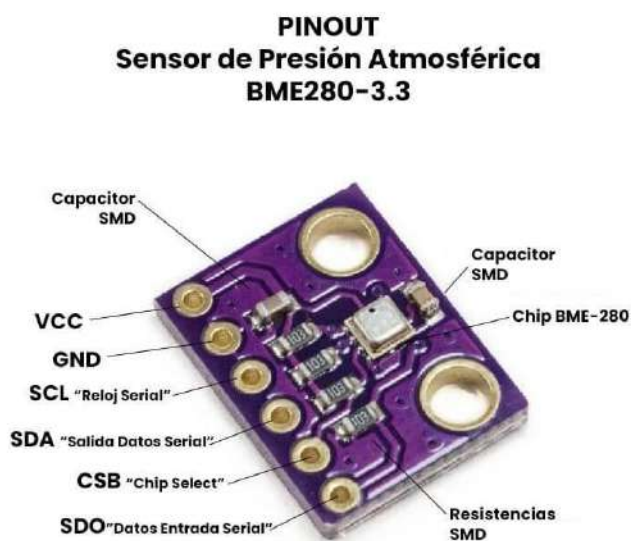


Рисунок 3.2 – структура виводів датчика BME280 [100]

По краях плати датчика BME280 розташовані монтажні отвори та шість контактів (пінів), призначених для підключення: VCC (живлення 3.3V або 5V),

GND (земля), SCL (лінія тактового сигналу для інтерфейсів I²C або SPI), SDA (лінія передачі даних для I²C або MOSI для SPI), CSB (контакт вибору інтерфейсу: при підключенні до VCC активується I²C, до GND – SPI), а також SDO (у режимі SPI виконує функцію MISO, у режимі I²C визначає адресу датчика: GND – 0x76, VCC – 0x77). У проєктованій системі BME280 підключений до ESP32 через інтерфейс I²C, що дозволяє зчитувати параметри температури, вологості й атмосферного тиску, використовуючи лише два сигнальні дроти. Лінія SDA з'єднана з GPIO21, а SCL – з GPIO22. Оскільки ESP32 функціонує з робочою напругою 3.3V, живлення датчика здійснюється від відповідного виходу контролера, при цьому контакт GND датчика під'єднано до загальної шини живлення ESP32.

Передача даних відбувається через стандартний I²C-протокол, який дозволяє звертатися до датчика за його унікальною адресою в шині. У цьому випадку BME280 використовується з типовою адресою 0x76 (або 0x77, якщо змінена конфігурація). Обмін інформацією між ESP32 і BME280 відбувається на рівні апаратного I²C-контролера, що дозволяє забезпечити стабільну передачу даних навіть у разі підключення інших I²C-пристроїв до тієї ж шини.

Для коректної роботи BME280 у коді контролера використовується бібліотека, яка ініціалізує пристрій, встановлює потрібні режими вимірювання та опитує його з необхідною частотою. Після отримання цифрових значень вони можуть бути передані далі в систему аналізу або збережені для подальшої обробки.

Додатковий модуль із сенсорами BMP280 та АНТ20 було підключено до тієї ж шини I²C, що і BME280, з метою зменшення кількості необхідних виводів на мікроконтролері ESP32 та спрощення схеми загального з'єднання. Інтерфейс I²C дозволяє підключати кілька пристроїв до однієї пари ліній SDA та SCL за умови, що кожен з них має унікальну адресу. Враховуючи обмеження кількості доступних пінів на ESP32 та потребу підключення інших компонентів, рішення використати спільну I²C-шину забезпечує оптимальний баланс між апаратною простотою, стабільністю з'єднання та розширюваністю системи. До того ж, наявність обох внутрішніх сенсорів на одній платі дозволяє значно зменшити кількість проводів, покращити надійність підключення та зменшити габарити конструкції всередині

вулика. Усі три сенсори працюють із живленням 3.3V, що дозволяє уникнути необхідності використання окремих стабілізаторів напруги або перетворювачів рівнів для ліній I2C, а адреси пристроїв не конфліктують між собою, що забезпечує стабільний обмін даними на спільній шині. На рисунку 3.3 зображено схему підключення BME280.

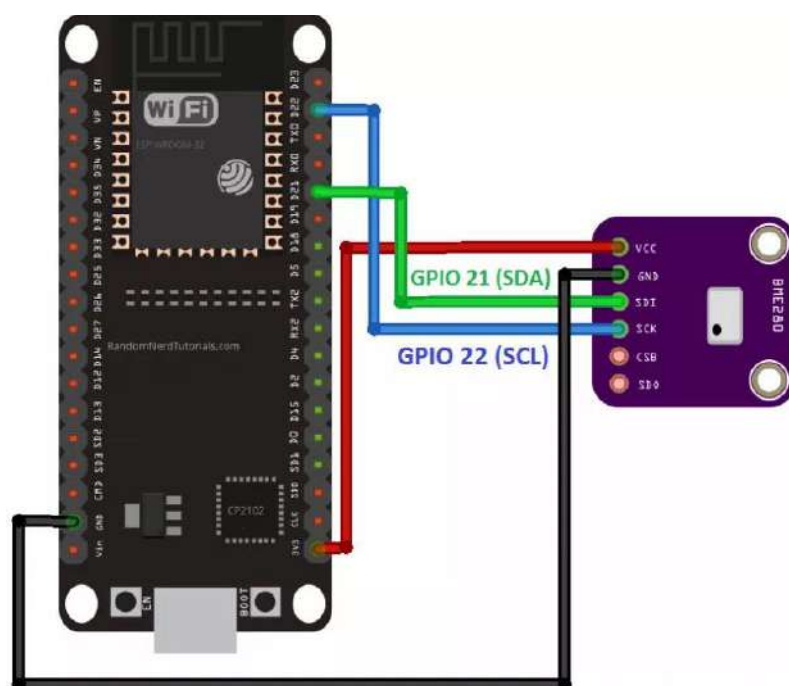


Рисунок 3.3 – Схема підключення BME280 [101]

Підключення чотирьох тензометричних датчиків до модуля HX711 здійснено за мостовою схемою Уїтстона. Кожен з чотирьох датчиків має дві пари проводів: сигнальні та живлення. Два датчики розміщені по діагоналі з'єднуються таким чином, що їх сигнальні виводи утворюють пари A+ та A-, а інші два – пари E+ та E-. Це дозволяє компенсувати температурні та механічні похибки, покращуючи точність вимірювань. На рисунку 3.4 зображено схему підключення тензодатчиків до модуля HX711.

Датчики маси підключаються до плати HX711 через відповідні контакти: E+ (Excitation +), який забезпечує живлення для тензорного моста; E- (Excitation -), що виступає як загальний мінусовий контакт живлення; A+ (Signal +), через який передається позитивний вихідний сигнал з моста; та A- (Signal -), що відповідає за

передачу негативного сигналу. Така схема підключення дозволяє точно зчитувати дані з тензодатчика та передавати їх на мікроконтролер ESP32 через цифровий інтерфейс HX711. На рисунку 3.4 зображено схему підключення тензодатчиків до HX711.

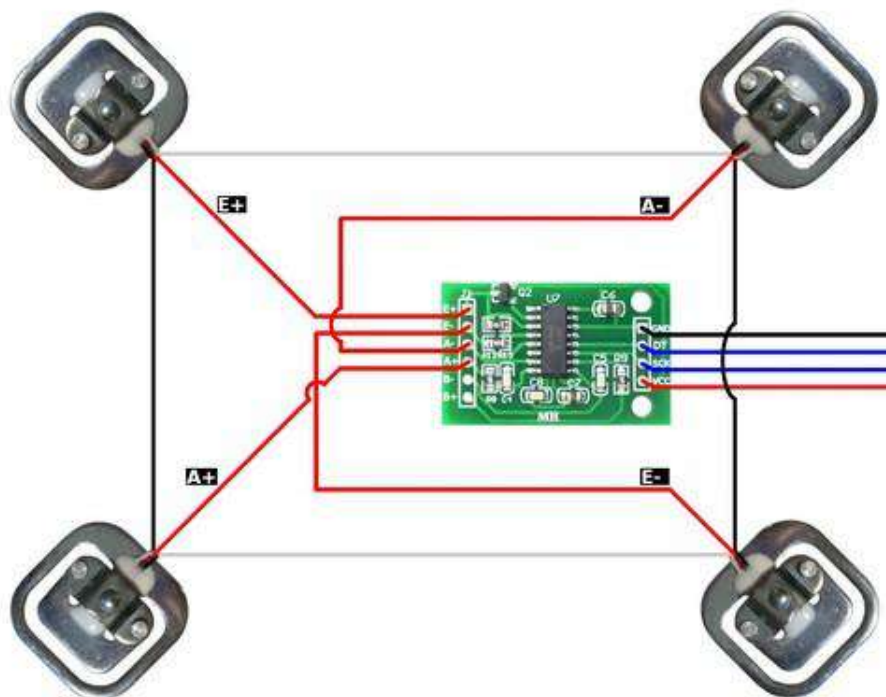


Рисунок 3.4 – Схема підключення тензодатчиків до HX711 [102]

У цій схемі підключення використовується мікроконтролер ESP32, модуль HX711 для роботи з тензодатчиком і рівнеперетворювач TXS0108E. Основна причина використання рівнеперетворювача – це різниця в робочих напругах між компонентами: ESP32 працює на 3.3V, а HX711 – на 5V.

Для забезпечення стабільної роботи цифрового перетворювача HX711, його підключено до джерела живлення 5V, тоді як мікроконтролер ESP32 працює на 3.3V. Оскільки пряме підключення вихідних сигналів з HX711 до ESP32 неможливе через різницю в логічних рівнях, що може призвести до пошкодження контролера, у системі використовується перетворювач рівнів TXS0108E. Цей модуль знижує сигнали 5V до 3.3V і забезпечує безпечний та коректний обмін даними між пристроями. Передача даних здійснюється за допомогою двох основних ліній: DT (Data), яка несе цифрові дані з HX711, та SCK (Clock), що синхронізує передачу.

Обидва сигнали проходять через TXS0108E, де вони адаптуються до безпечного рівня 3.3V, після чого надходять на ESP32 через порти GPIO4 та GPIO16. Живлення компонентів організовано наступним чином: HX711 отримує 5V і GND, ESP32 працює на 3.3V і має спільний загальний провід (GND), а TXS0108E живиться одночасно від 5V (для сторони, підключеної до HX711) та 3.3V (для сторони, підключеної до ESP32). Контакт OE (Output Enable) TXS0108E з'єднаний із лінією 3.3V, що активує роботу перетворювача. Така схема підключення забезпечує точне зчитування даних з вагового датчика без ризику пошкодження електронних компонентів системи. Схема підключення тензодатчиків до HX711 зображена на рисунку 3.5.

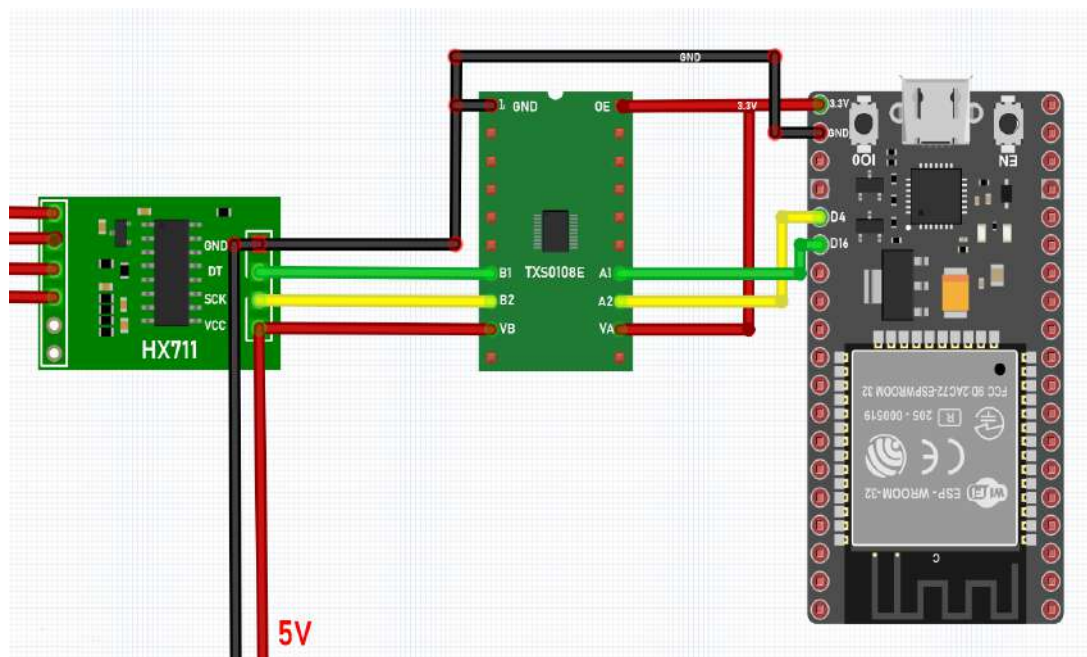


Рисунок 3.5 – Схема підключення тензодатчиків до HX711

OLED-дисплей 128x64 на базі SSD1306 розміщений на корпусі приймача для виведення основної інформації, що надходить від сенсорів. Хоча всі дані передаються через хмарний сервіс Blynk, дисплей використовується як допоміжний інтерфейс для оперативного відображення ключових показників, що дозволяє користувачеві швидко оцінити поточний стан системи без необхідності доступу до зовнішнього пристрою.

Дисплей підключений до мікроконтролера ESP32 через шину I2C, що дозволяє мінімізувати кількість проводів та забезпечити стабільну передачу даних. Для цього використовуються лінії SDA і SCL, які підключені до GPIO21 і GPIO22 відповідно. Живлення подається через шину I2C від 3.3V виходу ESP32. Така конфігурація дозволяє ефективно використовувати дисплей для візуалізації важливої інформації, зберігаючи при цьому мінімальні вимоги до енергоспоживання та підключення. Схема підключення OLED-дисплея зображена на рисунку 3.6.

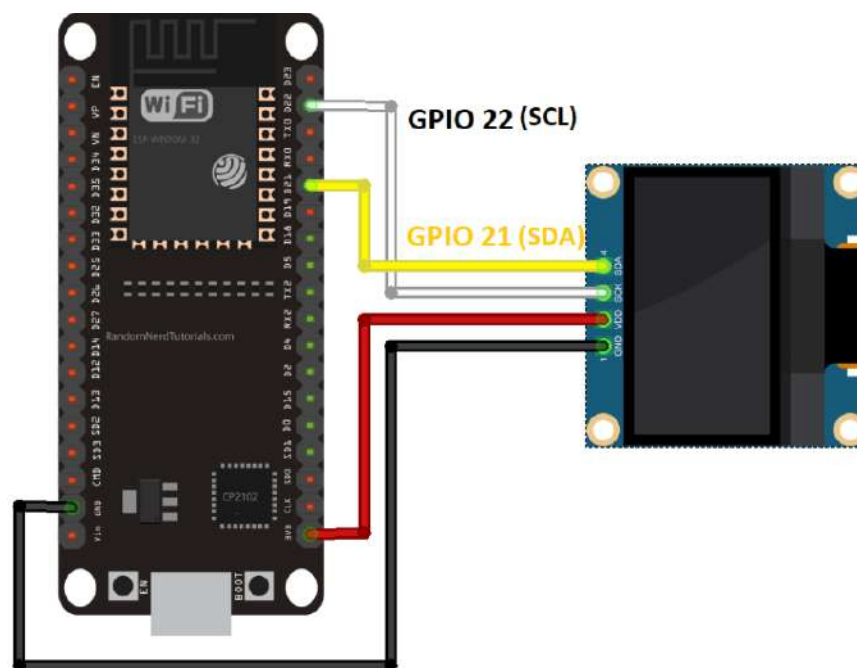


Рисунок 3.6 – Схема підключення OLED-дисплея [103]

Підключення модуля LoRa RA-01 SX1278 до мікроконтролера ESP32 здійснюється за допомогою SPI-інтерфейсу, який забезпечує надійну і швидку передачу даних між пристроями.

Контакт MOSI LoRa підключається до GPIO23 ESP32 і використовується для передачі даних від ESP32 до LoRa, MISO підключається до GPIO19 для отримання даних з LoRa до ESP32, а SCK з'єднується з GPIO18 і забезпечує тактовий сигнал, що синхронізує передачу по SPI. Контакт NSS (або CS) підключається до GPIO5, щоб вибрати LoRa як активний пристрій на шині SPI. RST підключається до

GPIO14, цей пін використовується для скидання модуля, а DIO0 підключається до GPIO26, щоб генерувати переривання та повідомляти ESP32 про завершення прийому або передачі даних. Живлення модуля здійснюється через контакт 3V3, а контакт GND підключається до землі GND на ESP32, що забезпечує спільну землю між мікроконтролером та LoRa-модулем. Це підключення дозволяє ефективно здійснювати обмін даними через LoRa для побудови системи моніторингу вуликів. На рисунку 3.7 зображено схему підключення модуля LoRa.

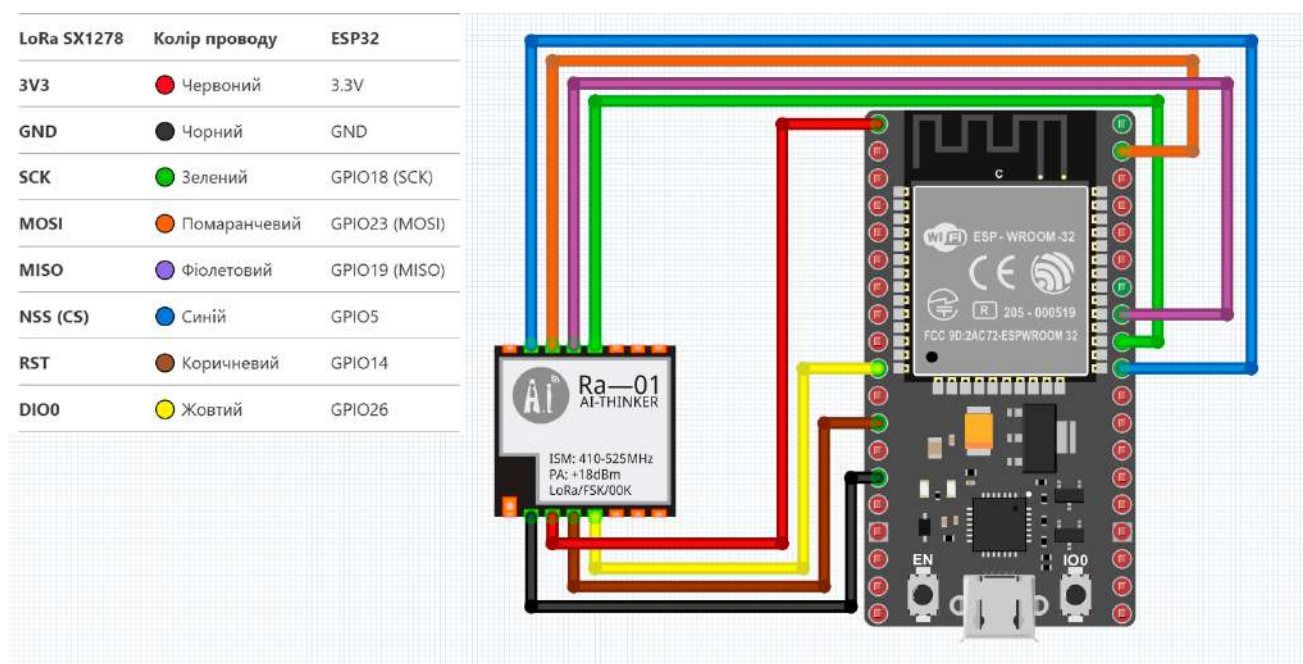


Рисунок 3.7 – Схема підключення модуля LoRa

На рисунку 3.8 представлено готовий передавач, зібраний на базі мікроконтролера ESP32. До нього підключені сенсори температури, вологості та тиску (BME280, BMP280, АНТ20), тензодатчики з підсилювачем HX711, а також модуль бездротового зв'язку LoRa RA-01 (SX1278), який забезпечує передачу даних на приймальний пристрій. До схеми також включено перетворювач логічних рівнів TXS0108E, який використовується для забезпечення сумісності між мікроконтролером ESP32 та тензодатчиками з підсилювачем HX711, оскільки тензодатчики працюють на логічному рівні 5 В, а ESP32 оперує на рівні 3,3 В. Це дозволяє безпечно та ефективно передавати дані між компонентами. Живлення

подається від акумулятора 18650 через плату керування зарядом. Усі компоненти змонтовані на макетній платі та розміщені в корпусі для захисту від зовнішніх впливів. Така конструкція забезпечує надійну роботу пристрою в умовах пасіки та дозволяє легко проводити модернізацію або обслуговування при потребі.

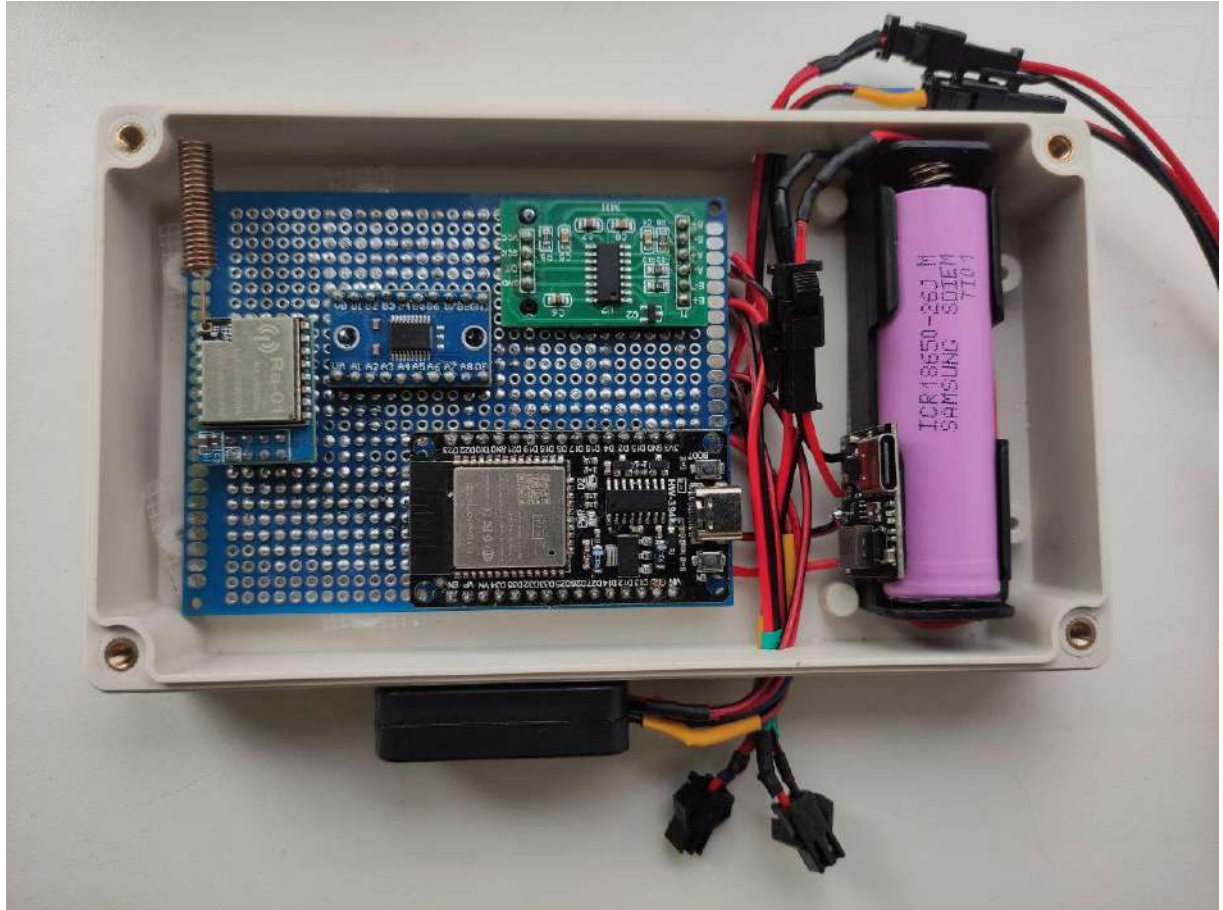


Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд передавача системи моніторингу

Корпус виготовлений з удароміцного ABS-пластику, стійкого до ультрафіолету та екстремальних температур (-30°C до $+60^{\circ}\text{C}$). Для запобігання потраплянню вологи всі з'єднання обладнані гумовими ущільнювачами, а вентиляційні отвори закриті мелкопористою сіткою, що забезпечує повітрообмін без ризику проникнення води. Місця введення кабелів додатково герметизовані силіконовими заглушками.

Особливу увагу приділено захисту від механічних пошкоджень та комах. На рисунку 3.9 зображено датчики вологості та температури в захисному корпусі.



Рисунок 3.9 – Датчики температури та вологості в захисному корпусі з сіткою

На рисунку 3.10 представлено готовий приймач, який отримує дані від передавача через модуль LoRa RA-01 (SX1278). Приймач побудований на базі мікроконтролера ESP32, що забезпечує обробку отриманої інформації та передачу її на платформу Blynk для подальшого моніторингу. Для виведення даних використовується OLED-дисплей, що дозволяє в реальному часі відобразити показники температури, вологості, тиску та ваги з сенсорів, а також забезпечує зручний інтерфейс для користувача. Зібрані дані передаються на сервер через Wi-Fi, забезпечуючи дистанційний доступ до інформації. Пристрій також оснащений вбудованим LED-індикатором для візуального відображення стану роботи. Всі

компоненти вмонтувані в захисний корпус для запобігання пошкодженню при використанні в умовах зовнішнього середовища.

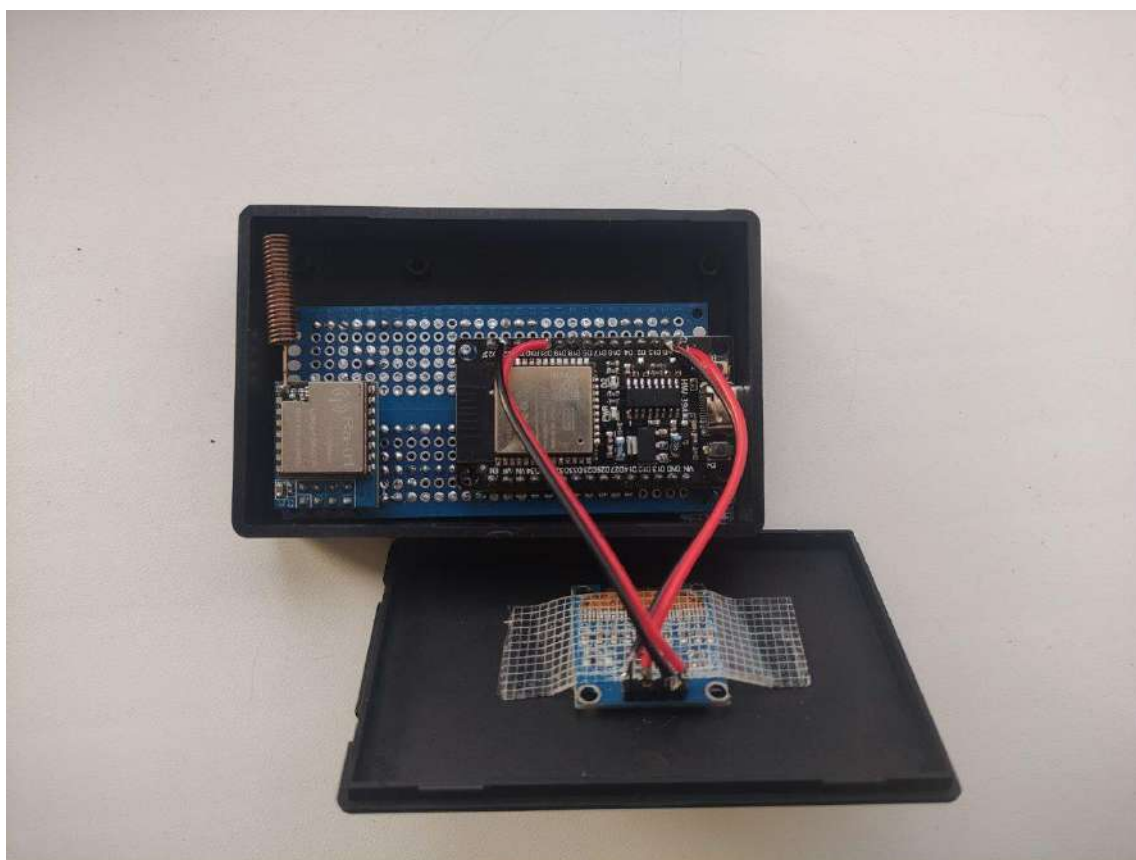


Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд приймача системи моніторингу

3.2 Розробка програмної частини

Програмна реалізація кіберфізичної системи моніторингу бджолиних вуликів базується на використанні двох взаємопов'язаних модулів, створених на платформі мікроконтролерів ESP32, які забезпечують повноцінний збір, обробку, передавання та віддалений моніторинг ключових параметрів стану вуликів. Система побудована за принципом поділу функцій між передавальним і приймальним пристроями, що взаємодіють через енергоефективний бездротовий зв'язок LoRa у режимі точка-точка на частоті 433 МГц. Такий підхід дозволяє досягти високої стабільності комунікації та автономності навіть в умовах обмеженого доступу до інфраструктури.

Передавальний модуль виконує функцію збору мікрокліматичних та масових показників за допомогою набору сенсорів, до якого входять BME280, BMP280, АНТ20 – для вимірювання температури, відносної вологості та атмосферного тиску, а також тензодатчик з підсилювачем HX711, що дає змогу фіксувати масу вулика. Зчитування даних здійснюється через I2C-шину, яка дозволяє підключати декілька цифрових сенсорів до однієї пари контактів ESP32, що спрощує апаратну схему та зменшує кількість необхідних з'єднань. Дані з тензодатчиків зчитуються через HX711 за допомогою спеціального калібрувального коефіцієнта CALIBRATION_FACTOR та зсуву OFFSET, які задаються у коді вручну відповідно до еталонних вимірювань. Значення маси, менші за 1 кг, автоматично фільтруються як нерелевантні, що дозволяє усунути хибні показники, спричинені шумами або вагою пусого вулика. У свою чергу, показники вологості з датчика BME280, який відомий своєю схильністю до заниження значень, програмно коригуються на +4% (константа BME_HUMIDITY_CORRECTION), що забезпечує вищу точність та надійність результатів.

Після успішного збору та попередньої обробки усі параметри формуються у структуроване текстове повідомлення. Повідомлення має уніфікований формат із чітко позначеними мітками (наприклад, “TEMP: 34.7C | HUM: 58% | PRES: 990 hPa | WEIGHT: 18760g” або “BME280: T=24.3C H=45.2% P=1005.1hPa”), що значно полегшує парсинг і аналіз на стороні приймача. Щоб зменшити ризик втрати пакета або його пошкодження, кожне повідомлення передається п'ять разів підряд із короткою затримкою між передачами. LoRa-модуль RA-01 на базі чипа SX1278, який використовується у передавальному модулі, працює через SPI-інтерфейс з параметрами, підібраними для оптимального балансу між дальністю зв'язку та енергоспоживанням, включаючи spreading factor, bandwidth і потужність сигналу. Після передачі система переходить у режим глибокого сну (Deep Sleep), який забезпечує мінімальне енергоспоживання.

Перед переходом у сон система послідовно виконує низку критичних операцій: завершує всі активні процеси передачі даних через LoRa, коректно відключає периферійні інтерфейси (I2C для датчиків, SPI для радіомодуля) та

зупиняє серійний порт для уникнення втрати даних. Особливу увагу приділено вимкненню LoRa-модуля через спеціальну команду `LoRa.sleep()`, що запобігає його переходу в невизначений стан після пробудження.

Таймер глибокого сну налаштований на інтервал 60 хвилин (3 600 000 000 мікросекунд), що забезпечує оптимальний баланс між частотою оновлення даних та енергоефективністю. Під час сну ESP32 повністю припиняє виконання коду, зберігаючи лише мінімальний функціонал RTC-таймера для майбутнього пробудження. Всі дані з оперативної пам'яті (RAM) втрачаються, тому кожен новий цикл роботи починається з повної реініціалізації системи, що гарантує стабільність після тривалого періоду бездіяльності.

Для запобігання витoku струму через периферію всі GPIO-порти автоматично переводяться у високоімпедансний стан, а напруга на них фіксується на рівні 3.3V. Це особливо важливо для підключених датчиків, які можуть продовжувати споживати енергію через підтягуючі резистори. Додатковий захист забезпечується фізичним роз'єднанням живлення датчиків через MOSFET-ключі у критичних випадках, хоча в стандартній конфігурації вони залишаються під напругою для швидкого старту після пробудження.

Пробудження відбувається виключно по таймеру, що усуває випадкові збої через зовнішні перешкоди.

Таймер пробудження запрограмовано на фіксований інтервал після якого мікроконтролер автоматично активується, виконує повторне зчитування, обробку та відправку даних, формуючи замкнутий цикл автономної роботи. Завдяки використанню літєвого акумулятора формату 18650 зі стабілізацією напруги до 5V система здатна функціонувати автономно протягом кількох тижнів або навіть місяців без необхідності ручного втручання.

Приймальний модуль, також реалізований на ESP32, виконує функції безпосереднього прийому LoRa-повідомлень, локального відображення інформації та відправлення ключових параметрів до мобільного додатку через платформу Blynk. Програма після запуску ініціалізує інтерфейси SPI (для LoRa-модуля), I2C (для OLED-дисплея) та Wi-Fi, після чого підключається до Blynk-сервера. При

отриманні нового повідомлення спеціальна функція `parseLoRaData()` виконує синтаксичний аналіз вхідного рядка, знаходить потрібні маркери, вилучає значення та зберігає їх у структурі `SensorData`. Така форма обробки дозволяє виявляти неповні або пошкоджені пакети – якщо будь-який параметр відсутній, програма не оновлює відповідне поле, запобігаючи поширенню хибних значень. Успішний прийом сигналізується короткочасною активацією вбудованого світлодіода ESP32, що виконує роль індикатора активності.

Інформація виводиться на OLED-дисплей з роздільною здатністю 128×64 пікселі у трьох циклічних режимах, які змінюються автоматично кожні 5 секунд: мікроклімат усередині вулика, зовнішні умови та технічні параметри (напруга, рівень сигналу тощо). Завдяки використанню бібліотеки Adafruit SSD1306 вдалося реалізувати лаконічний графічний інтерфейс з чітким поділом на рядки, що полегшує візуальне сприйняття навіть при короткому погляді на дисплей. Візуальний інтерфейс приймача зображений на рисунку 3.11.



Рисунок 3.11 – Візуальний інтерфейс приймача

Він забезпечує комплексне відображення інформації за допомогою трьох автоматично змінюваних екранів, кожен з яких активний протягом 5 секунд (константа `slideInterval`). Верхня 16-піксельна смуга дисплея постійно відображає фірмову назву "Melissa" у білому прямокутнику з чорним текстом (реалізовано через функцію `drawStaticElements`), що створює чітку візуальну ідентифікацію пристрою.

Перший інформаційний екран (`drawInsideSlide`) детально відображає критично важливі параметри мікроклімату всередині вулика. Він включає точні показники температури (з точністю до 0.1°C) та відносної вологості (з точністю до 0.1%) з високоточного датчика АНТ20. Ці дані розміщені під чіткими мітками "Temp" та "Humidity" у стандартних одиницях виміру. Другий екран (`drawOutsideSlide`) демонструє зовнішні умови навколишнього середовища, використовуючи дані з датчика ВМЕ280, з такою ж точністю вимірювань. Особливістю відображення є те, що значення вологості автоматично коригуються на $+4\%$ для компенсації систематичної похибки датчика.

Третій технічний екран (`drawInfoSlide`) містить спеціалізовані показники: вагу вулика у грамах (ціле число), рівень сигналу LoRa у dBm (ціле число з позначкою RSSI) та час останньої синхронізації з Blynk у хвилинах і секундах. Для ваги реалізовано спеціальну обробку - значення менше 1000 г автоматично фільтруються. Час синхронізації відображається у зручному форматі "Xm Ys ago" завдяки функції `formatTime`, яка перетворює мілісекунди у зрозумілий часовий формат.

Система візуалізації інтегрована з механізмом отримання даних через LoRa (функція `receiveLoRaData`). При отриманні нового пакета даних відбувається миттєве оновлення дисплею через функцію `updateDisplay`, що гарантує актуальність інформації. Для візуального підтвердження прийому даних використовується вбудований світлодіод (`BUILTIN_LED`), який спалахує при кожному успішному отриманні повідомлення.

Надсилання даних до Blynk реалізовано через бібліотеку `BlynkSimpleEsp32`, яка дозволяє передавати параметри на віртуальні пін-коди (V1–V8) з фіксованим

інтервалом оновлення у 5 хвилин, незалежно від частоти прийому. Це знижує навантаження на мережу Wi-Fi та зменшує споживання енергії. Функція `updateBlynk()` перевіряє час останнього оновлення, готує нові дані та надсилає їх у додаток лише тоді, коли всі умови виконані.

Процес оновлення даних реалізований у функції `updateBlynk()`, яка виконує точне відображення всіх критичних параметрів на відповідних віртуальних пінах платформи Blynk. Температурні показники з внутрішнього (АHT20) та зовнішнього (BME280) датчиків передаються на віртуальні піни V1 та V4 відповідно, з точністю до одного знаку після коми. Показники вологості, що надходять з цих же датчиків, направляються на піни V2 та V7, забезпечуючи повноцінний моніторинг мікрокліматичних умов. Атмосферний тиск з обох барометричних датчиків (BME280 та BMP280) передається на піни V3 та V5, що дозволяє аналізувати зміни погодних умов. Вага вулика, отримана з тензодатчиків через HX711, відправляється на пін V8 у вигляді цілого числа у грамах.

Кожен цикл передачі даних супроводжується логуванням у послідовний порт (Serial) з позначкою "[Blynk] Data sent to Blynk (5min interval)", що дозволяє контролювати процес обміну даними при налагодженні системи.

Для запобігання надмірного навантаження на мережу та сервер Blynk, система використовує прапор `newDataAvailable`, який встановлюється в `true` лише при отриманні нових даних через LoRa-з'єднання.

Це забезпечує, що оновлення у хмарі відбувається лише при наявності актуальних змін у показниках.

Особливістю реалізації є стабільність з'єднання - система автоматично відновлює зв'язок з сервером Blynk у разі його втрати, про що свідчить наявність циклу очікування `while (WiFi.status() != WL_CONNECTED || !Blynk.connected())` у функції `setup()`.

Всі передані дані зберігаються на платформі Blynk і доступні для візуалізації через мобільний додаток, що дозволяє проводити тривалий моніторинг тенденцій зміни параметрів.

Для кожного параметру можна налаштувати індивідуальні графіки, інформаційні панелі та межі допустимих значень безпосередньо в інтерфейсі Blynk.

Ключовим елементом системи є механізм аварійних сповіщень, що постійно аналізує критичні параметри, зокрема температуру та вологість. У коді встановлено порогові значення: для температури – від 10°C до 38°C, для вологості – від 30% до 80%. У разі перевищення цих меж система формує відповідне попередження, яке передається користувачу через `Blynk.logEvent()` у форматі, зручному для мобільного сприйняття, наприклад: “УВАГА: Висока температура всередині 39.5°C”.

Щоб уникнути надмірного надсилання повідомлень при коливаннях поблизу меж, реалізовано гістерезис – 2°C для температури та 5% для вологості. Статус кожного сповіщення відстежується через логічні змінні типу `highTempAlertSent`, що гарантує одноразове спрацювання на кожен інцидент. У разі нормалізації параметрів відповідні змінні скидаються, що дозволяє повторно сповіщати у майбутньому.

Загалом архітектура програмного забезпечення вирізняється чіткою модульністю та логічним розподілом функцій: окремі блоки коду відповідають за ініціалізацію, зчитування, обробку, передачу, відображення та енергозбереження. Такий підхід забезпечує зручність розширення функціональності – наприклад, у майбутньому можливе додавання модуля GPS, карти пам'яті microSD для локального збереження історичних даних або впровадження живлення від сонячної панелі. Весь програмний код написано мовою Arduino C++ з використанням перевірених бібліотек, зокрема `Adafruit_Sensor`, `HX711`, `LoRa.h`, `BlynkSimpleEsp32`, що забезпечує надійну інтеграцію з апаратними модулями та стабільну роботу системи в реальних умовах.

3.3 Налаштування хмарного сервісу та інтерфейсу користувача

Для забезпечення зручного доступу до телеметричних даних та можливості їх оперативного аналізу, у системі моніторингу бджолиних вуликів реалізовано

хмарний сервіс із візуальним інтерфейсом користувача, що дозволяє відображати інформацію в режимі реального часу. У даній розробці використано платформу Blynk, яка надає можливість реалізувати інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс у вигляді мобільного застосунку. Передача даних на платформу здійснюється через приймальний пристрій, побудований на базі мікроконтролера ESP32. Після прийому повідомлення з модуля LoRa RA-01, мікроконтролер обробляє отримані значення сенсорів і надсилає їх у хмару за допомогою Wi-Fi-з'єднання. Передача здійснюється за допомогою офіційної бібліотеки Blynk, з використанням унікального токена аутентифікації, який зв'язує фізичний пристрій із віртуальним середовищем облікового запису користувача.

Інтерфейс мобільного додатку Blynk було спроектовано таким чином, щоб відображати основні параметри стану вулика у реальному часі. Зокрема, для кожного параметра – температури, вологості, атмосферного тиску та ваги – створено окремі віджети, які дозволяють відображати значення у цифровому форматі, а також у вигляді графіків. Це дає змогу не лише контролювати поточний стан, але й аналізувати динаміку змін за обраний часовий період. Усі дані надходять з передавача із заданою періодичністю, що відповідає інтервалу роботи пристрою, та автоматично оновлюються на екрані користувача.

Комунікація з платформою Blynk побудована на використанні віртуальних пінів, які забезпечують гнучке налаштування структури передачі даних і полегшують адаптацію інтерфейсу в разі змін у конфігурації пристрою або оновлення програмного забезпечення.

У процесі налаштування було створено окремий проєкт у мобільному застосунку Blynk, після чого згенеровано токен, що інтегрується в прошивку приймального пристрою. Кожен віджет інтерфейсу було прив'язано до відповідного віртуального піну, що дає змогу синхронізувати значення з показниками, які надсилаються з приймача. Завдяки цьому реалізовано повноцінний користувацький інтерфейс, який забезпечує безперервний моніторинг стану вулика з будь-якого місця, де є доступ до Інтернету, і не потребує додаткових

спеціальних знань для користування. Візуальний інтерфейс додатку зображено на рисунку 3.12.

Однією з ключових функцій є надсилання критичних повідомлень при виявленні перевищення допустимих меж температури або вологості у вулику. Після обробки отриманих даних на приймальному модулі здійснюється порівняння фактичних значень з встановленими граничними параметрами. У разі виявлення порушення система автоматично формує подію і надсилає її на сервер Blynk.

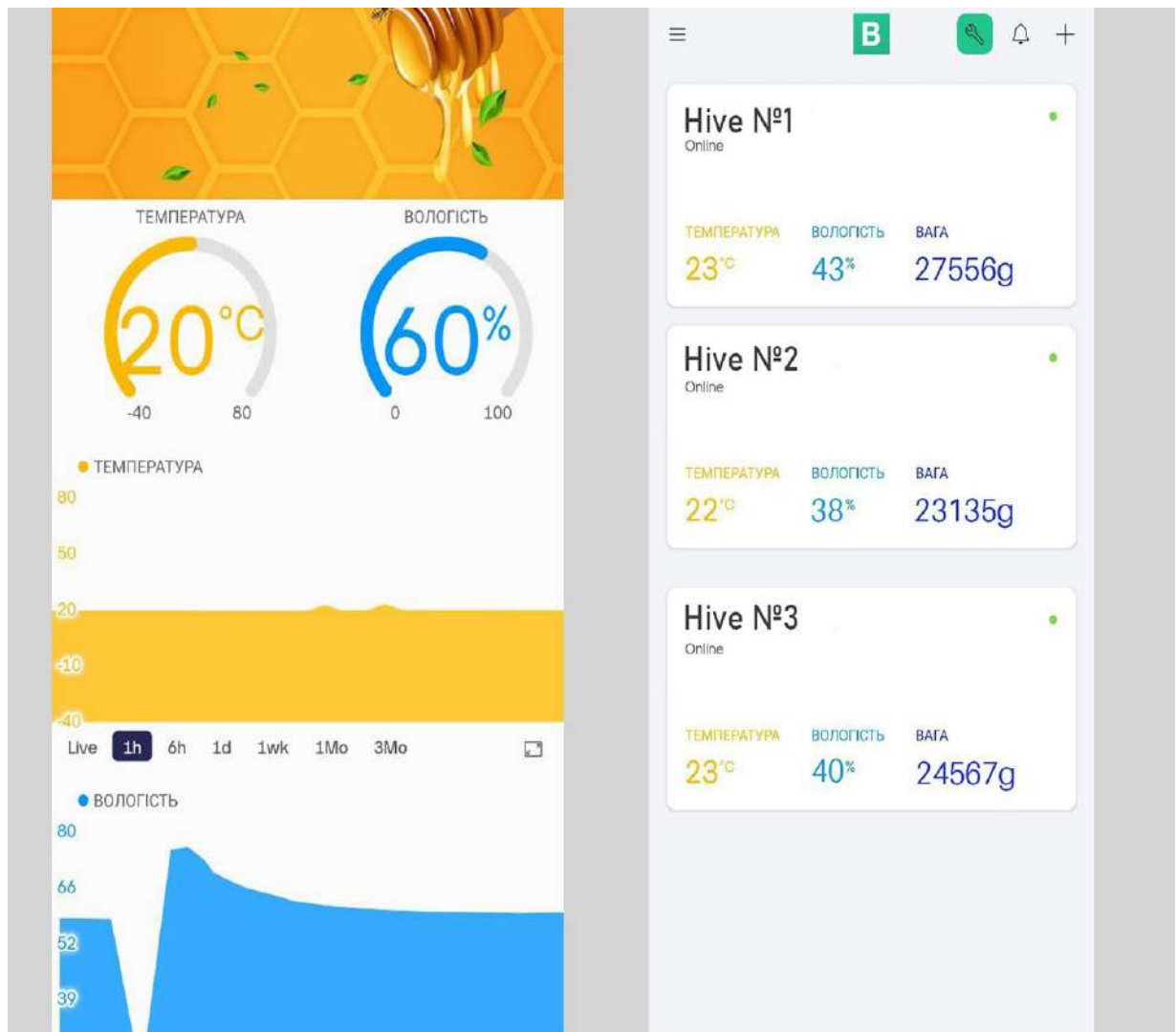


Рисунок 3.12 – Візуалізація даних з вулика у мобільному застосунку

Користувач, який має підключений до системи мобільний застосунок, отримує push-сповіщення у реальному часі. Крім того, автоматично відправляється

лист на електронну пошту. Це забезпечує оперативне інформування пасічника про потенційно небезпечні зміни мікроклімату в середині вулика та дозволяє вчасно вжити необхідних заходів.

Система демонструє стабільну роботу в реальному часі та дозволяє здійснювати контроль навіть за значної віддаленості від пасіки, що особливо актуально для сучасного бджільництва. На рисунку 3.13 зображено візуалізацію критичного повідомлення у додатку.

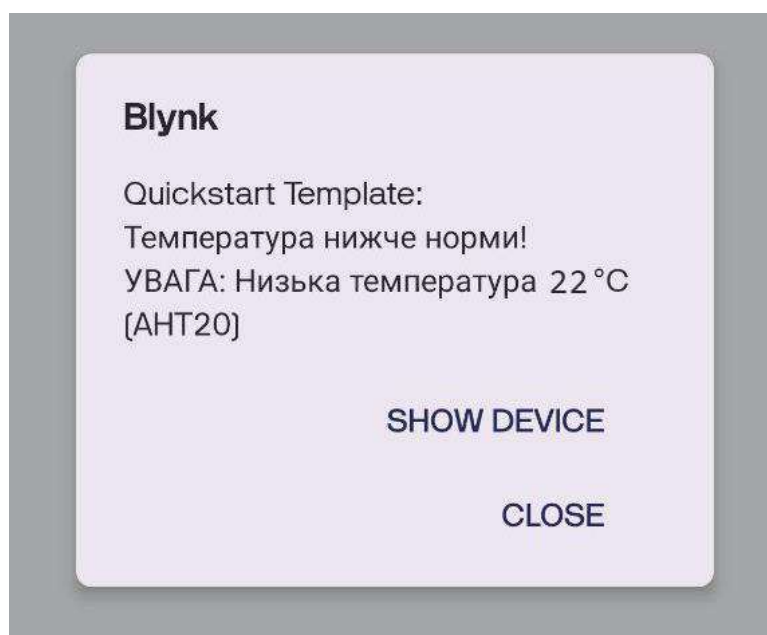


Рисунок 3.13 – Візуалізація критичного повідомлення в додатку

3.4 Висновки

У даному розділі було повністю розроблено апаратну та програмну частину системи моніторингу бджолиних вуликів, а також налаштовано хмарний сервіс для віддаленого спостереження.

Апаратна частина базується на мікроконтролері ESP32, до якого підключено набір датчиків (BME280, BMP280, АНТ20 для вимірювання температури, вологості та тиску, а також тензодатчики з HX711 для контролю ваги). Для стабільного зв'язку на відстані використано модуль LoRa RA-01, а передача даних у локальну

мережу здійснюється через Wi-Fi. Окрім того, для захисту компонентів від зовнішніх впливів розроблено спеціальні корпуси з вентиляційними отворами.

Програмна реалізація передбачає два основних модулі: передавач (зчитує дані з датчиків і відправляє їх через LoRa) та приймач (отримує інформацію, обробляє її і передає на сервер). Для стабільної роботи написано алгоритми фільтрації даних, корекції показників (наприклад, вологості з ВМЕ280) та циклічного сну для енергозбереження. Дані передаються у структурованому вигляді з мітками, що спрощує їх подальший аналіз.

Хмарний сервіс побудовано на платформі Blynk, яка дозволяє візуалізувати дані у реальному часі через мобільний додаток. Налаштовано віджети для відображення температури, вологості, тиску та ваги, а також автоматичні сповіщення у разі критичних відхилень.

4 ТЕСТУВАННЯ ТА ПЕРЕВІРКА ЕФЕКТИВНОСТІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

4.1 Тестування системи в реальних умовах

4.1.1 Умови проведення тестування

Тестування системи моніторингу бджолиних вуликів проводилося в реальних умовах на приватній пасіці. Передавач із встановленими датчиками температури, вологості та ваги було закріплено безпосередньо на вулику. Зовнішній датчик температури (BME280) розміщувався на зовнішній стороні вулика у спеціальному захисному корпусі з вентиляційною сіткою, що дозволяє забезпечити точність вимірювання за рахунок циркуляції повітря. Внутрішній блок датчиків (BMP280+ATH20) було встановлено всередині вулика для постійного моніторингу мікроклімату в гніздовій зоні. Датчик ваги розташовано під дном вулика на платформі, яка фіксує зміну маси конструкції та дозволяє відслідковувати активність бджолосім'ї.

Приймач із дисплеєм було встановлено в приміщенні неподалік пасіки – в будинку, на відстані близько 600-700 метрів від вулика. Така конфігурація дозволила перевірити стабільність зв'язку між передавачем і приймачем, а також ефективність бездротової передачі даних у присутності природних перешкод – дерев, господарських споруд тощо. Зв'язок здійснюється по протоколу LoRa, що забезпечує високу дальність передачі та низьке енергоспоживання.

Приймач містить дисплей типу SSD1306 128x64 пікселі, який виводить ключові дані про температуру, вологість, тиск і вагу. Цей дисплей виконує допоміжну функцію – він дозволяє оперативно контролювати дані прямо з будинку, не заходячи в мобільний застосунок, що особливо зручно під час коротких візуальних перевірок або налагодження системи.

Тестування тривало впродовж 7 днів у різні пори доби з фіксацією змін навколишнього середовища. У цей період відзначалися як сонячні, так і похмурі дні, з коливаннями температури від +6°C до +22°C, що дозволило оцінити

стабільність вимірювань та передачі даних у змінних кліматичних умовах. Система безперервно працювала весь тестовий період, дані автоматично передавалися на хмарний сервіс Blynk, а також дублювалися на локальний дисплей приймача. На рисунку 4.1 зображений вулик з встановленим передавачем.



Рисунок 4.1 – Розміщення передавача на вулику

Тестування тривало впродовж 7 днів у різні пори доби з фіксацією змін навколишнього середовища. У цей період відзначалися як сонячні, так і похмурі дні, з коливаннями температури від $+6^{\circ}\text{C}$ до $+22^{\circ}\text{C}$, що дозволило оцінити стабільність вимірювань та передачі даних у змінних кліматичних умовах. Система безперервно працювала весь тестовий період, дані автоматично передавалися на хмарний сервіс Blynk, а також дублювалися на локальний дисплей приймача.

4.2 Перевірка стабільності бездротового зв'язку (LoRa)

Тестування бездротового зв'язку між передавачем, розташованим на вулику, та приймачем у будинку проводилося на відстанях до 700 м в умовах, наближених

до реальних. Метою тестування була перевірка стабільності та ефективності роботи протоколу LoRa в умовах з потенційними перешкодами. Протягом випробувань вимірювались затримки передачі даних, а також фіксувались випадки втрати пакетів за різних умов зв'язку.

У системі використовується модуль SX1278, що у відкритій місцевості теоретично дозволяє досягати дальності зв'язку до 10 км. Проте фактична відстань передачі значною мірою залежить від середовища – наявності дерев, будівель, рельєфу, висоти антен та інших факторів, що впливають на поширення радіосигналу.

Тестування на пасіці, де між модулями присутні типові перешкоди (дерева, споруди), показало, що зв'язок на відстані до 300 м був стабільним, без помітних втрат або затримок. При 500 м зв'язок залишався надійним, хоча з'являлися незначні затримки (до 1–2 секунд). На відстані 700 м, яка в реальних умовах вже є доволі критичною, спостерігались окремі втрати пакетів та затримки до 2–3 секунд – особливо в зонах з щільними перешкодами

На рисунку 4.2 зображено залежність затримки передачі даних від відстані між передавачем і приймачем у реальних умовах пасіки, де сигнал проходить крізь типові перешкоди, такі як дерева, кущі та господарські споруди. Аналіз отриманих даних показує, що на відстані до 300 метрів система демонструє стабільну роботу без значних затримок: середній час доставки повідомлення становить приблизно 0,5 секунди, що свідчить про ефективну роботу протоколу LoRa у межах такої відстані навіть за наявності природних перешкод. При збільшенні відстані до 500 метрів спостерігається незначне зростання затримки до 1,5 секунд, що пов'язано з більшим впливом фізичних об'єктів на якість сигналу та можливою адаптацією модуля до умов, зокрема переходом на більший Spreading Factor. На відстані 700 метрів, яка в умовах типової пасіки є вже досить критичною для зв'язку, затримка зростає в середньому до 2,5 секунд, що пояснюється збільшенням кількості перешкод, зниженням рівня сигналу та можливими втратами пакетів, які вимагають повторного надсилання даних. Зростання затримки є природним результатом роботи технології LoRa у режимі максимальної дальності, коли

система зменшує швидкість обміну даними для збереження стабільності зв'язку. Таким чином, графік демонструє, що навіть за умов щільної забудови і природних перешкод система на базі LoRa може забезпечувати передачу даних із прийнятною затримкою на відстанях до 700 метрів, а при сприятливіших умовах (наприклад, на відкритій місцевості) ця відстань може бути суттєво збільшена без суттєвих втрат у стабільності.

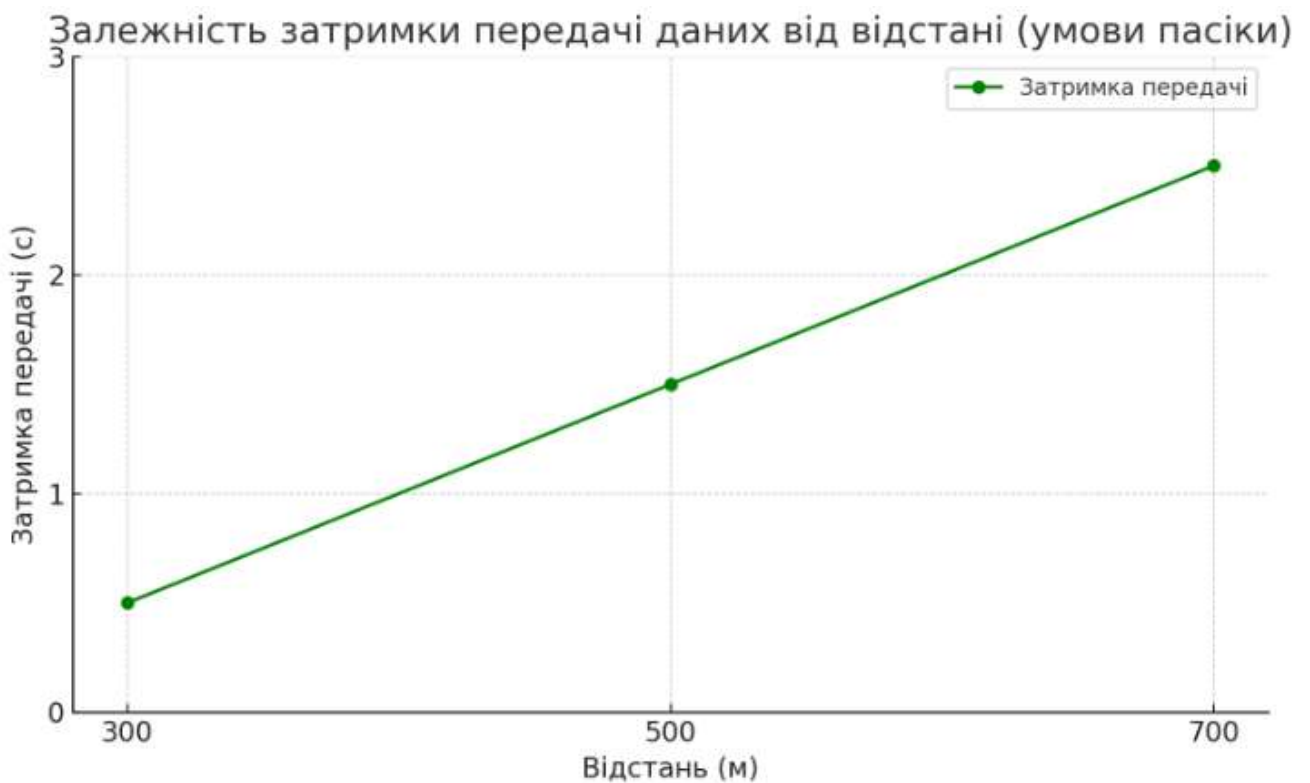


Рисунок 4.2 – Залежність затримки передачі даних від відстані

Загалом, навіть за наявності перешкод, протокол LoRa продемонстрував високу стабільність та придатність для використання в таких умовах. Слід враховувати, що при кращому розміщенні антен, меншій кількості перешкод або у відкритій місцевості – система здатна працювати на значно більших відстанях, аж до 10 км, що й відповідає заявленим характеристикам модуля

Це підтверджує доцільність використання даного протоколу в автономних системах моніторингу.

4.3 Тестування сенсорів

Тестування моніторингу температури та вологості всередині та ззовні вулика проводилось протягом 7 днів, з фокусом на відстеження змін цих параметрів у реальних умовах. Приймач з дисплеєм знаходився в будинку, а передавач із датчиками температури та вологості був розміщений на вулику. Це дозволяло здійснювати моніторинг як зовнішніх, так і внутрішніх умов вулика.

Датчик ВМЕ280, який розташований на зовнішній стороні вулика, вимірював температурні та вологісні показники навколишнього середовища, в той час як два інших датчики – ВМР280 і АНТ20 – перебували всередині вулика для точного відслідковування внутрішніх умов. Дані з усіх датчиків передавались на платформу Blynk, що дозволяло віддалено відслідковувати стан вулика. Одночасно, для візуалізації цих показників на місці, використовувався дисплей, підключений до приймача.

Температура всередині вулика протягом усього періоду тестування залишалася в стабільному діапазоні від 33 до 35 °С, що відповідає нормальним фізіологічним умовам для бджолоїної сім'ї. На рисунку 4.3 зображено графік температури.

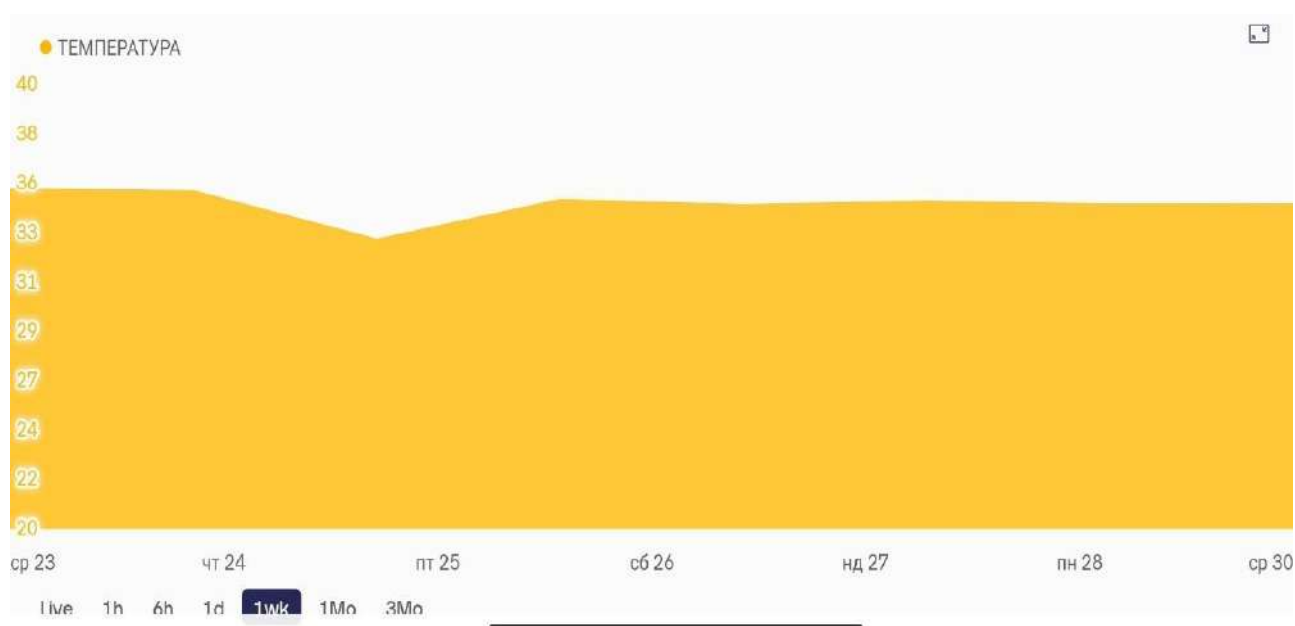


Рисунок 4.3 – Внутрішня температура вулика

Такий температурний режим є характерним для активної фази життєдіяльності бджіл, особливо під час вирощування розплоду, оскільки бджоли підтримують температуру в межах 34–35 °С у зоні розплоду для забезпечення правильного розвитку личинок. Стабільність цих показників свідчить про те, що вулик має достатню теплоізоляцію, а бджоли ефективно регулюють мікроклімат за допомогою власної терморегуляційної поведінки. Це також підтверджує справність сенсорів, які фіксували ці значення, а сама система показала високу чутливість до змін і водночас стабільність у зчитуванні критично важливих параметрів.

Вологість всередині вулика протягом усього періоду тестування переважно залишалася в межах 50–60 %, що є оптимальним діапазоном для забезпечення нормального функціонування бджолиної сім'ї. На рисунку 4.4 зображений графік вологості.

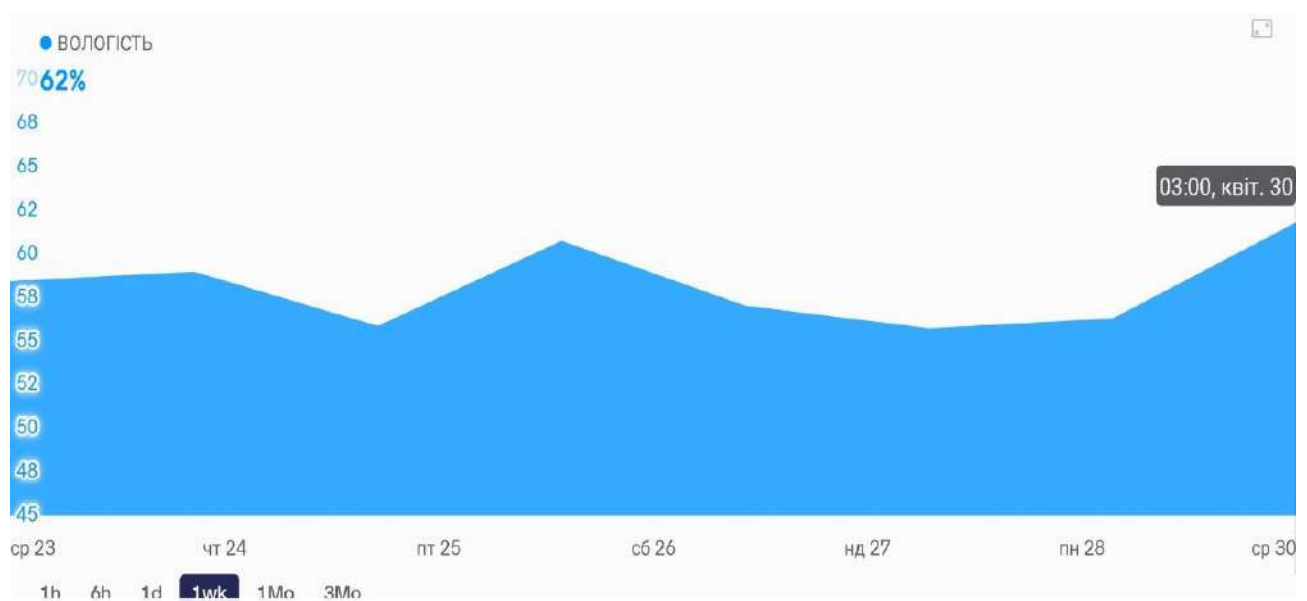


Рисунок 4.4 – Внутрішня температура вулика

Такий рівень вологості є важливим для збереження якості нектару, процесу дозрівання меду, а також для підтримки стабільного мікроклімату, необхідного для розвитку розплоду. Надмірно висока вологість може спричинити розвиток грибкових захворювань, тоді як надто низька – ускладнювати терморегуляцію та провокувати зневоднення розплоду. Таким чином, стабільні показники в межах 50–

60 % свідчать про ефективну вентиляцію всередині вулика, а також підтверджують, що бджолина сім'я знаходиться в сприятливому середовищі.

Однак у спекотні дні, особливо в обідній час, фіксувалося тимчасове зниження рівня вологості всередині вулика до 40 %, що пов'язано зі зростанням температури зовнішнього середовища та активною вентиляцією, яку здійснюють бджоли для охолодження гнізда. Таке явище є типовим у жарку погоду і не є критичним, якщо воно короткотривале. На рисунку 4.5 зображено графік тимчасового падіння вологості.

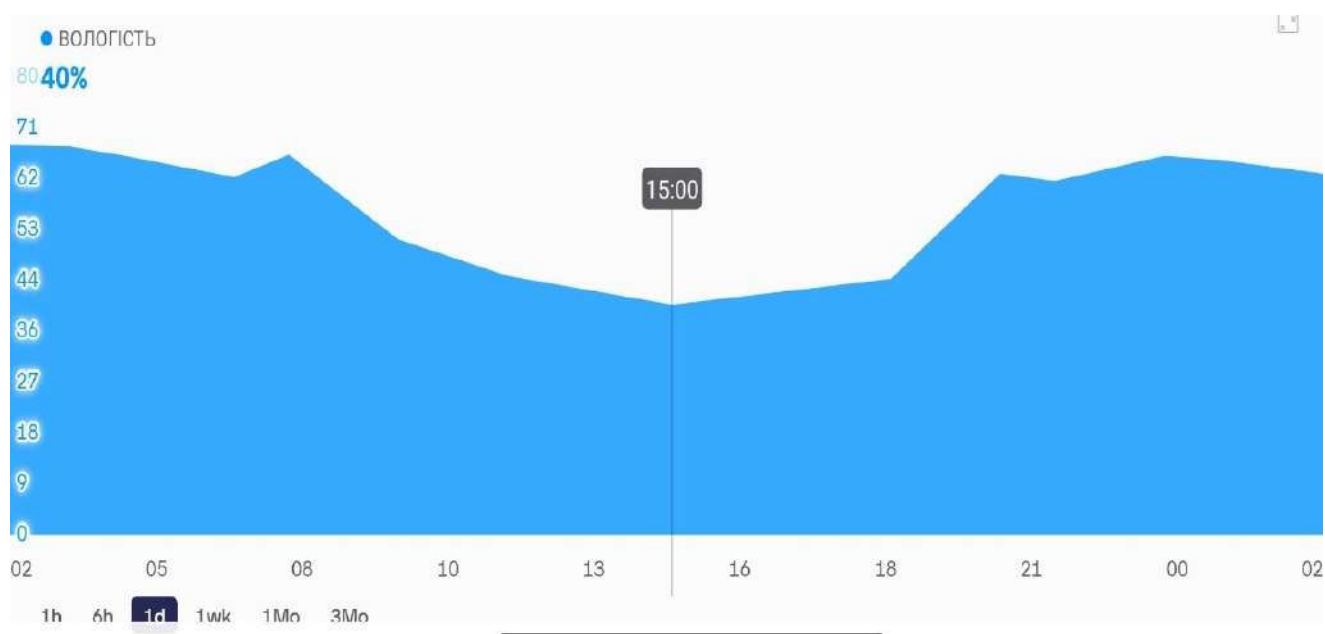


Рисунок 4.5 – Короткотривале падіння вологості

Це зниження свідчить про адаптивну поведінку бджіл, які шляхом обмахування крилами регулюють мікроклімат вулика, запобігаючи перегріву. Утримання вологості на рівні не нижче 40 % навіть у пікову спеку підтверджує, що система вентиляції та теплоізоляції вулика працює ефективно, а встановлені сенсори здатні фіксувати навіть короткотривалі коливання параметрів із високою точністю.

Тестування показало, що температура всередині вулика залишалася стабільно вищою за зовнішню, особливо вночі, коли температура знижувалася, що свідчить про ефективну теплоізоляцію вулика. Показники вологості також

демонстрували стабільність всередині вулика, що є важливим фактором для комфортних умов для бджіл.

Порівняння температури та вологості між зовнішнім середовищем і внутрішнім простором вулика показало, що температура всередині вулика змінювалася відповідно до погодних умов, однак коливання були незначними. Аналіз даних із зовнішніх датчиків засвідчив, що, незважаючи на помітні коливання температури та вологості в навколишньому середовищі протягом дня та під впливом погодних факторів, внутрішні показники залишалися відносно стабільними. Це свідчить про здатність вулика ефективно зберігати мікроклімат, необхідний для нормального функціонування бджолої сім'ї, а також про надійність розробленої системи моніторингу у фіксації та контролі параметрів, критичних для життєдіяльності бджіл.

На рисунку 4.6 представлено графік зміни ваги вулика протягом одного тижня, починаючи з початкової ваги 23 563 г. Загальний приріст маси за вказаний період склав 2 328 г. Приріст розподілений нерівномірно, що є типовим для реальних умов, оскільки активність бджіл та кількість принесеного нектару залежить від погодних умов, наявності медоносів та часу доби.



Рисунок 4.6 – Зміна ваги вулика

Загалом, система продемонструвала високу точність та надійність у вимірюванні та передачі даних, що підтверджує її ефективність для моніторингу параметрів вулика в реальних умовах.

4.4 Тестування роботи мобільного інтерфейсу (blynk)

Для моніторингу та управління системою було використано мобільний інтерфейс на базі платформи Blynk, що дозволяє віддалено отримувати дані з вулика, такі як температура, вологість та вага. Основною метою цього етапу тестування було перевірити стабільність з'єднання з ESP32, відображення актуальних даних на мобільному пристрої, а також оцінити зручність інтерфейсу для користувача.

Протягом тестування було перевірено з'єднання між ESP32 та мобільним додатком Blynk на різних етапах. З'єднання стабільно підтримувалося, і дані передавалися без значних затримок або втрат пакетів. Підключення до Wi-Fi мережі відбувалося без проблем, що забезпечило безперервний моніторинг даних.

Відображення актуальних даних на мобільному інтерфейсі здійснювалося в реальному часі. Температура, вологість і вага вулика автоматично оновлювались на екрані мобільного телефону з мінімальною затримкою. Інтерфейс надавав користувачу чітке уявлення про стан вулика, що дозволяло оперативно реагувати на зміни, такі як високі або низькі показники температури чи вологості.

Оцінка зручності для користувача показала, що інтерфейс Blynk є інтуїтивно зрозумілим і легким у використанні. Користувачі без особливих труднощів могли відстежувати показники і, за потреби, налаштовувати систему. Відображення даних було зручним і зрозумілим, а можливість швидко отримати доступ до інформації через мобільний додаток значно покращила взаємодію з системою. Також інтерфейс дозволяє легко масштабувати систему, додаючи нові сенсори або функції без значних змін у програмному забезпеченні. Це робить платформу гнучкою та адаптованою до майбутніх потреб користувача.

4.5 Перевірка автономності передавача

У цьому тестуванні оцінюється тривалість роботи передавача, що живиться від батареї 18650. Метою тестування є вимірювання споживання енергії, оцінка тривалості автономної роботи передавача при використанні батареї, а також визначення впливу частоти оновлення даних на час роботи передавача.

Першим етапом було вимірювання споживаної потужності передавачем. Для цього використовували спеціалізоване обладнання для вимірювання струму та напруги під час роботи модуля LoRa та ESP32.

У тестуванні автономності роботи передавача також було використано режим енергозбереження ESP32, зокрема режим глибокого сну (Deep Sleep). Це дозволяє значно зменшити споживану потужність під час періодів бездіяльності, що є важливим для забезпечення тривалої роботи системи на одній батареї.

Результати показали, що передавач споживає в середньому близько 50 мА в режимі активної передачі даних і менше ніж 1 мА в режимі очікування.

Другим етапом тестування була оцінка тривалості автономної роботи передавача на батареї 18650. Тест проводився протягом 7 днів при стандартних умовах роботи. Передавач був налаштований на оновлення даних кожні 10 хвилин. За цей період батарея не потребувала підзарядки і зберігала достатній рівень заряду, що підтвердило здатність системи працювати автономно протягом тривалого часу.

Додатково було проведено тестування для визначення впливу частоти оновлення на тривалість автономної роботи. Змінюючи інтервал передачі даних (від 5 до 60 хвилин), було виміряно, як це впливає на споживану потужність і час роботи системи. Результати показали, що зменшення частоти передачі даних значно знижує енергоспоживання, що дозволяє збільшити тривалість автономної роботи передавача.

Графік відображає залежність тривалості автономної роботи передавача від довжини періодів глибокого сну за умов живлення від літій-іонного акумулятора типу 18650 ємністю 2600 мА·год. Досліджувалася система, в якій мікроконтролер

періодично переходив з активного режиму тривалістю 3 секунди зі споживанням струму 50 мА до режиму глибокого сну зі споживанням 1 мА, при цьому тривалість сну варіювалася – 5, 10, 30 та 60 хвилин. Отримані результати свідчать про нелінійний характер зростання автономності: якщо при сні тривалістю 5 хвилин загальний час роботи становив 73 доби, то при 60 хвилинах – вже 104 доби, однак приріст із кожним подальшим збільшенням інтервалу сну стає все менш відчутним. Це зумовлено тим, що фіксовані витрати енергії в активному режимі – приблизно 0,0417 мА·год за цикл – відіграють меншу роль на фоні тривалого сну, однак їхній вплив повністю усунути неможливо. Поведінка графіка має асимптотичний характер: після позначки в 30 хвилин додаткове збільшення тривалості сну дає лише мінімальний ефект – приріст автономності становить усього 4 доби при подвоєнні періоду з 30 до 60 хвилин, що вказує на наближення системи до фізичної межі енергоефективності у цій конфігурації. На рисунку 4.7 представлено графік залежності тривалості автономної роботи передавача.

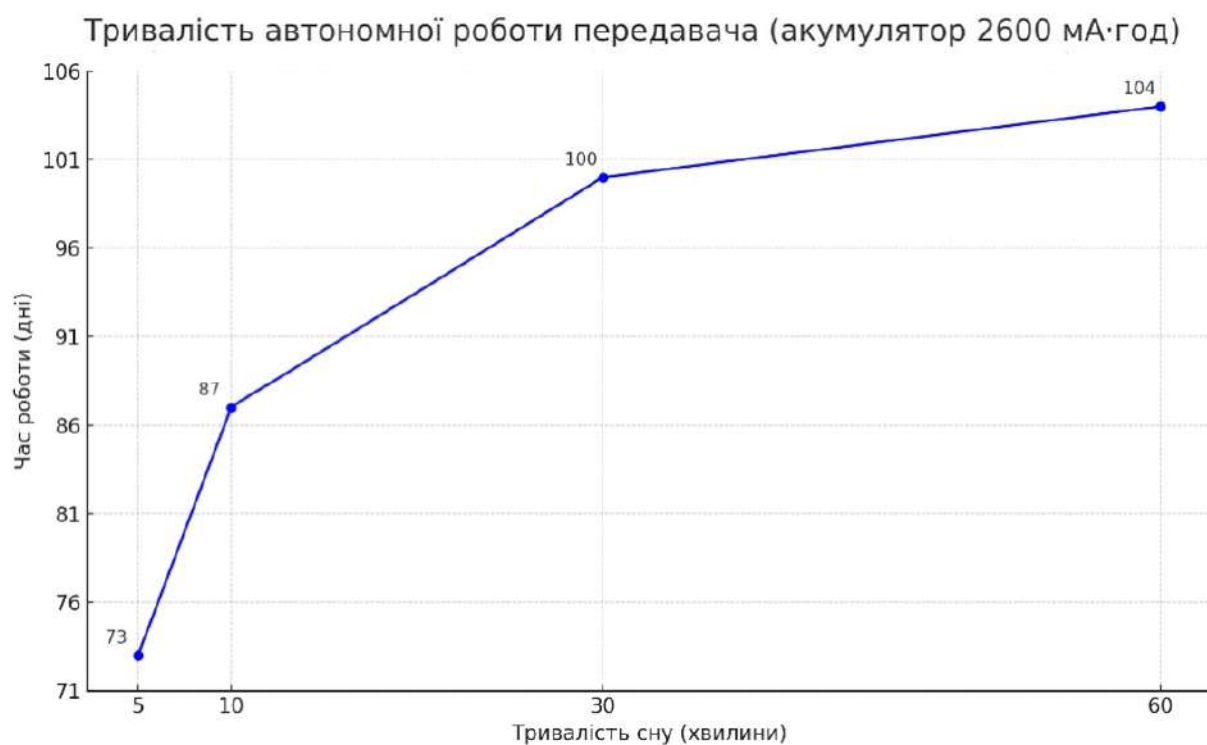


Рисунок 4.7 – Залежність тривалості автономної роботи передавача від довжини періодів глибокого сну

Це підтверджує високу ефективність використання енергозберігаючих режимів і оптимізації частоти передачі даних для досягнення максимальної тривалості автономної роботи системи.

4.6 Масштабованість розробленої системи та перспективи вдосконалення

Розроблена кіберфізична система моніторингу стану вуликів має потенціал для ефективного масштабування у межах як індивідуальних пасік, так і аграрних господарств із великою кількістю вуликів, розташованих на значних площах. Завдяки використанню бездротового зв'язку стандарту LoRa, забезпечується надійна передача даних на відстані до кількох сотень метрів навіть у складних умовах зовнішнього середовища. Це дозволяє розміщувати передавачі на віддалених ділянках без потреби в прокладанні кабельних ліній або створенні проміжних ретрансляторів, що значно спрощує процес інфраструктурного розгортання.

Кожен передавач функціонує автономно, маючи можливість реєстрації мікрокліматичних параметрів (температури, вологості) та ваги окремого вулика в реальному часі. Такий підхід дозволяє реалізувати одночасний моніторинг багатьох точок спостереження без перевантаження каналу зв'язку або зниження достовірності даних. Передбачена структура ідентифікації передавачів забезпечує коректну маршрутизацію даних до центрального приймача, що дає змогу збільшувати кількість пристроїв у системі без необхідності її переініціалізації.

Платформа Blynk, яка використовується для відображення інформації, підтримує роботу з великою кількістю пристроїв та сенсорів, що дозволяє акумулювати значні об'єми даних у межах єдиного інтерфейсу. У разі потреби в подальшій централізації або агрегації даних, можливе підключення до зовнішніх серверів або баз даних, що дозволяє проводити довгостроковий аналіз, прогнозування стану вуликів, автоматичне сповіщення користувача про аномальні умови тощо.

Гнучкість програмної логіки системи сприяє швидкому інтегруванню додаткових функціональних компонентів. Зокрема, можуть бути впроваджені нові сенсори для оцінки поведінки бджіл, вмісту газів у повітрі чи рівня звукового тиску, що надає системі мультидисциплінарного характеру. Важливим є те, що реалізація таких змін не потребує кардинального оновлення вже наявного апаратного забезпечення.

Енергетична автономність передавачів, що базується на використанні літій-іонних батарей формату 18650, дозволяє підтримувати стабільну роботу протягом тривалого періоду. Використання режимів енергозбереження в мікроконтролерах забезпечує зменшене споживання електроенергії в режимах очікування, що є критично важливим у випадках масштабного розгортання мережі сенсорів, особливо в умовах обмеженого доступу до електромережі.

Таким чином, побудована система може бути легко масштабована як кількісно (через додавання нових вузлів), так і функціонально (шляхом розширення набору вимірювальних параметрів і аналітичних інструментів). Це робить її універсальним рішенням як для малих пасік, так і для промислового бджільництва, орієнтованого на цифрову трансформацію та інтеграцію з системами інтелектуального аналізу даних.

Система моніторингу стану вуликів, реалізована в межах даного проєкту, має значний потенціал для подальшого вдосконалення. Одним із перспективних напрямів є розширення набору сенсорів для збору більш детальної інформації про стан вулика. Зокрема, можна інтегрувати мікрофони для акустичного аналізу активності бджолосім'ї, газові сенсори для оцінки рівня вуглекислого газу або летких органічних сполук, а також акселерометри для виявлення зовнішніх впливів чи переміщення конструкції. Також доцільним є впровадження програмних методів обробки даних з використанням машинного навчання для виявлення аномалій у поведінці бджіл або змін мікроклімату. Окрім цього, перспективним виглядає автоматичне регулювання вентиляції у вулику на основі зібраних параметрів, що може позитивно вплинути на продуктивність бджолосім'ї. У контексті енергозбереження можливо дослідити адаптивні режими роботи

передавача залежно від часу доби чи рівня активності вулика. Додатково, підвищення автономності системи може бути досягнуто через використання сонячних панелей або енергозберігаючих алгоритмів у поєднанні з енергоефективними компонентами. Ще одним напрямом є розвиток веб-інтерфейсу або розширення можливостей мобільного додатку для більш гнучкого та наочного відображення даних, включно з аналітикою, історією змін та прогнозуванням. Важливо також враховувати можливість інтеграції системи до ширших платформ управління пасікою, що забезпечить масштабованість та централізоване керування кількома вуликами.

4.7 Висновки

Під час тестування системи моніторингу бджолиних вуликів у реальних умовах приватної пасіки було отримано вичерпні дані, що підтверджують її стабільну та надійну роботу. Передавальний модуль, оснащений датчиками ВМЕ280, ВМР280 та АНТ20, забезпечив точний моніторинг температури та вологості як всередині вулика (33-35°C, 50-60% вологості), так і в зовнішньому середовищі. Тензодатчики з підсилювачем НХ711 демонстрували стабільні показники ваги з чутливістю до 1 грама, що дозволило фіксувати динаміку змін маси вулика протягом тестового періоду.

Модуль бездротового зв'язку LoRa RA-01 SX1278 підтвердив свою ефективність на відстанях до 700 метрів, забезпечуючи стабільну передачу даних навіть за наявності природних перешкод. Середня затримка передачі становила 0,5 секунди на 300 метрах, 1,5 секунди на 500 метрах та до 2,5 секунд на максимальній тестовій відстані. Втрати пакетів не перевищували 5% навіть у найбільш складних умовах.

Приймальний модуль на базі ESP32 успішно обробляв вхідні дані, відображаючи їх на OLED-дисплеї SSD1306 (128x64 пікселів) та передаючи на хмарний сервіс Blynk через Wi-Fi з інтервалом оновлення 5 хвилин. Мобільний

додаток Wlynk демонстрував стабільну роботу, забезпечуючи віддалений доступ до всіх параметрів вулика в режимі реального часу.

Енергоспоживання системи було мінімізовано завдяки реалізації режиму глибокого сну (Deep Sleep) ESP32. При інтервалі передачі даних 60 хвилин автономність передавача на акумуляторі 18650 ємністю 2600 мА·год досягла 104 діб безпроблемної роботи. Середнє споживання струму склало 50 мА у активному режимі та менше 1 мА у режимі очікування.

Захисні корпуси для сенсорів з вентиляційними сітками ефективно захистили електронні компоненти від вологи, пилу та інших зовнішніх факторів, не впливаючи на точність вимірювань. Всі елементи системи продемонстрували високу стабільність роботи протягом 7-денного тестового періоду за різних погодних умов, що підтверджує їх готовність до тривалої експлуатації на пасіці.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень розроблено інноваційну кіберфізичну систему моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT-технологій, яка забезпечує безперервний дистанційний контроль за основними параметрами мікроклімату та стану вуликів у режимі реального часу.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану галузі бджільництва, виявлено основні проблеми, пов'язані з традиційними методами догляду за бджолами, а також досліджено існуючі підходи до моніторингу за допомогою IoT-рішень.

У другому розділі розроблено архітектуру та алгоритм кіберфізичної системи, визначено вимоги до точності, автономності та масштабованості системи, обґрунтовано вибір апаратного та програмного забезпечення.

У третьому розділі реалізовано апаратну частину системи на базі мікроконтролера ESP32 з інтегрованими сенсорами температури, вологості та ваги, а також здійснено розробку програмного забезпечення в середовищі Arduino IDE для збору, обробки та передачі даних. Система інтегрована з хмарним сервісом Blynk, що забезпечує візуалізацію даних та сповіщення користувача.

У четвертому розділі проведено комплексне тестування системи в реальних умовах пасіки, що підтвердило її точність (похибка температури $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, вологості $\pm 3\%$, ваги до $0,1\%$), стабільність зв'язку на базі LoRa, а також тривалу автономність роботи (до 3–4 місяців).

Набула подальшого розвитку інформаційна технологія моніторингу стану бджолиних вуликів з використанням IoT-компонентів, хмарних сервісів та мобільного інтерфейсу для візуалізації та аналізу даних у режимі реального часу.

Впровадження результатів роботи дозволило створити ефективне рішення для сучасного бджільництва, що зменшує трудомісткість догляду за вуликами, підвищує точність виявлення проблем та сприяє збереженню бджолиних популяцій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Blynk: офіційний сайт платформи для розробки IoT-додатків. URL: <https://www.blynk.cc/> (дата звернення: 16.04.2025).
2. ESP32 Forum: технічна підтримка і документація. URL: <https://www.esp32.com/> (дата звернення: 16.04.2025).
3. Raspberry Pi Foundation: офіційний сайт мікрокомп'ютерів Raspberry Pi. URL: <https://www.raspberrypi.org/> (дата звернення: 18.04.2025).
4. IoT For All: новини, аналітика та освітні матеріали з тематики IoT. URL: <https://www.iotforall.com/> (дата звернення: 16.04.2025).
5. Arduino – What is it and why use it? Wired. URL: <https://www.wired.com/2008/04/just-what-is-an/> (дата звернення: 16.05.2025).
6. GeekDad Arduino Guide: Introduction. Wired. URL: <https://www.wired.com/2012/02/arduino-introduction/> (дата звернення: 16.05.2025).
7. Farmers are using IoT to take the guesswork out of growing. Business Insider. URL: <https://www.businessinsider.com/iot-technology-precision-agriculture-transforming-farming-2025-5> (дата звернення: 20.04.2025).
8. Arduino: офіційна сторінка проекту Arduino. URL: <https://www.arduino.cc/> (дата звернення: 20.04.2025).
9. MDPI. Development and Validation of Data Acquisition System for Real-Time Monitoring. URL: <https://www.mdpi.com/2624-7402/7/2/45> (дата звернення: 20.04.2025).
10. ScienceDirect. Intelligent Beehive Monitoring System Based on Internet of Things. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375524001898> (дата звернення: 20.04.2025).
11. PubMed. Self-Powered Smart Beehive Monitoring and Control System. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34069366/> (дата звернення: 20.04.2025).
12. Lifewire. 5 Intermediate to Advanced Arduino Project Ideas. URL: <https://www.lifewire.com/arduino-project-ideas-2495311> (дата звернення: 20.04.2025).

13. Arduino. Getting Started with Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/learn/starting-guide/getting-started-arduino/> (дата звернення: 20.04.2025).

14. Hackster.io. Smart Beehive Monitoring Systems. URL: <https://www.hackster.io/vishwasnavada/smart-beehive-monitoring-systems-4b2732> (дата звернення: 20.04.2025).

15. Beehive Smart Detector Device for the Detection of Critical Apiary Events. MDPI. URL: https://www.researchgate.net/publication/377370846_IoT-Based_Beehive_Monitoring_System_for_Real-Time_Monitoring_of_Apis_cerana_indica_Colonies (дата звернення: 20.04.2025).

16. Cyber-Physical Systems (CPS) Explained. URL: https://www.splunk.com/en_us/blog/learn/cyber-physical-systems.html (дата звернення: 20.04.2025).

17. Machine Learning, ML - Машинне навчання. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/> (дата звернення: 20.04.2025).

18. What Is a Machine Learning Algorithm? URL: <https://www.ibm.com/think/topics/machine-learning-algorithms> (дата звернення: 23.04.2025).

19. Raspberry Pi 5 Single Board Computer with 2.4GHz. URL: <https://rees52.com/products/raspberry-pi-5-single-board-computer-with-2-4ghz-quad-core-64-bit-arm-cortex-a76-and-lpddr4x-4267-sdram-rs5682> (дата звернення: 23.04.2025).

20. The Best Raspberry Pi Cases 2025 - Tom's Hardware. URL: <https://www.tomshardware.com/best-picks/best-raspberry-pi-cases> (дата звернення: 23.04.2025).

21. Kuch O., Lahun I. Apiary Monitoring and Automation IoT System. *Інформаційні системи та технології в моделюванні та управлінні* : матеріали наук.-техн. конф., м. Львів, 15 трав. 2022 р. Львів, 2022. С. 24–29.

22. Dsouza A. P., Hegde S. HiveLink, an IoT based Smart Bee Hive Monitoring System. *Internet of Things Conference* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Бенгалуру, 21 верес. 2023 р. Бенгалуру, 2023. С. 112–115.
23. Smerkol M. Smart beehive monitoring system for identification of relevant beehive events. *2024 International Conference on Intelligent Environments (IE), IEEE*. 2024. p. 97–100.
24. Alifieris C. IOHIVE: architecture and infrastructure of an IoT system for beehive monitoring and an interactive journaling wearable device for beekeepers. *International Conference on Computational Science and Its Applications*. 2023. P. 133–149.
25. Karan I. BeeSense – A Smart Beehive Monitoring System for Sustainable Apiculture. *2024 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning Applications Theme: Healthcare and Internet of Things (AIMLA)*. 2024. P. 1–6.
26. Liyanage N. IoT-Based Smart Beehive Monitoring System. *2024 6th International Conference on Advancements in Computing (ICAC)*. 2024. P. 247–252.
27. Salama R. Internet of intelligent things (IoT) – An overview. *2023 International Conference on Computational Intelligence, Communication Technology and Networking (CICTN)*. 2023. P. 801–805.
28. HiveLink, an IoT based Smart Bee Hive Monitoring System. URL: <https://arxiv.org/abs/2309.12054> (дата звернення: 23.04.2025).
29. From Primitive to Cyber-Physical Beekeeping. URL: <https://www.eventiotic.com/eventiotic/library/paper/270> (дата звернення: 23.04.2025).
30. Digital Transformation of Beekeeping through the Use of a Decision Making Architecture. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/21/11179> (дата звернення: 23.04.2025).
31. IoT Enabled Bee Hive Monitoring System. URL: https://www.researchgate.net/publication/375707527_IoT_Enabled_Bee_Hive_Monitoring_System (дата звернення: 23.04.2025).

32. Real-Time Monitoring System of a Beehive Through IoT. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5187027 (дата звернення: 23.04.2025).
33. Analysis of Energy Consumption in a Precision Beekeeping System. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.14934> (дата звернення: 23.04.2025).
34. IoT-Based Beehive Monitoring System for Real-Time Monitoring of *Apis cerana indica* Colonies. URL: https://www.researchgate.net/publication/377370846_IoT-Based_Beehive_Monitoring_System_for_Real-Time_Monitoring_of_Apis_cerana_indica_Colonies (дата звернення: 23.04.2025).
35. Data Management System of IoT for Stingless Bee Monitoring. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2795/1/030004/2893013/Data-management-system-of-IoT-for-stingless-bee> (дата звернення: 23.04.2025).
36. BeSafeBeeHoney (BEEkeeping Products Valorization and Traceability). URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0005772X.2024.2434330> (дата звернення: 23.04.2025).
37. IoT based beehive monitoring system. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3606305.3606316> (дата звернення: 10.04.2025).
38. Analysis of energy consumption in a precision beekeeping system. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3410992.3411010> (дата звернення: 10.04.2025).
39. Digital Transformation of Beekeeping through the Use of a Decision Making Architecture. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/21/11179> (дата звернення: 10.04.2025).
40. Precision Beekeeping Systems: State of the Art, Pros and Cons, and Future Directions. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/14/1/70> (дата звернення: 10.04.2025).
41. Machine Learning and Computer Vision Techniques in Continuous Beehive Monitoring Applications: A survey. URL: <https://arxiv.org/abs/2208.00085> (дата звернення: 10.04.2025).
42. Automated monitoring of bee colony movement in the hive during winter season. URL: <https://arxiv.org/abs/2501.01170> (дата звернення: 10.04.2025).

43. IntelliBeeHive: An Automated Honey Bee, Pollen, and Varroa Destructor Monitoring System. URL: <https://arxiv.org/abs/2309.08955> (дата звернення: 10.04.2025).
44. A framework for better sensor-based beehive health monitoring. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169923002946> (дата звернення: 10.04.2025).
45. IoT Monitoring and Prediction Modeling of Honeybee Activity with Alarm. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/5/783> (дата звернення: 10.04.2025).
46. Integration of LoRa IoT with Cloud Platform in a Stingless Beehive Remote Monitoring System. URL: <https://journals.iium.edu.my/ejournal/index.php/iiumej/article/view/3531> (дата звернення: 08.04.2025).
47. An AI-powered bee monitoring system in development. URL: <https://urbanicebelar.si/en/a-prototype-ai-powered-bee-monitoring-system-in-development> (дата звернення: 08.04.2025).
48. Bee colony remote monitoring based on IoT using ESP-NOW protocol. URL: <https://peerj.com/articles/cs-1363/> (дата звернення: 08.04.2025).
49. Non-intrusive Remote Apiculture Monitoring System. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-3604-1_11 (дата звернення: 08.04.2025).
50. The intelligent beehive IoT system with the ability to measure bee activity and honey production. URL: <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/icp.2023.3258> (дата звернення: 08.04.2025).
51. Design and Implementation of Sustainable Smart Beehive Monitoring. URL: <https://escholarship.org/uc/item/761614r4> (дата звернення: 08.04.2025).
52. Developing an AI-based Integrated System for Bee Health Evaluation. URL: <https://arxiv.org/abs/2401.09988> (дата звернення: 08.04.2025).
53. IoT-Based Beehive Monitoring System for Real-Time Monitoring of Apis cerana indica Colonies. URL: https://www.researchgate.net/publication/377370846_IoT-

Based Beehive Monitoring System for Real-

Time Monitoring of Apis cerana indica Colonies (дата звернення: 08.04.2025).

54. Bee and Hive Monitoring Conference - University of Montana. URL: https://www.umt.edu/bee/monitoringconference_2020/ (дата звернення: 08.04.2025).

55. Bee Health Conference Info TBD. URL: <https://ciber.ucr.edu/bee-health-conference-info-tbd> (дата звернення: 08.04.2025).

56. Gobuzzr – IoT-based beehive monitoring system. URL: <https://www.gobuzzr.com/> (дата звернення: 08.04.2025).

57. Save the Bees – IoT Bee Hive Monitor – blog 1. URL: <https://community.element14.com/challenges-projects/design-challenges/save-the-bees-design-challenge/b/blog/posts/save-the-bees---iot-bee-hive-monitor---blog-1> (дата звернення: 08.04.2025).

58. BeeLive: The IoT platform of Beemon monitoring and alerting system. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375523001600> (дата звернення: 08.04.2025).

59. A real-time imaging system for multiple honey bee tracking and activity monitoring. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169919301498> (дата звернення: 08.04.2025).

60. BeeWare: An IoT-based Bee Monitoring System for Early Disease Detection. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9449837> (дата звернення: 08.04.2025).

61. Development of a Low-Cost Wireless Sensor Network for Beehive Monitoring. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920311349> (дата звернення: 08.04.2025).

62. Smart Beehive Monitoring Using LoRaWAN Technology. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/13/3713> (дата звернення: 08.04.2025).

63. Application of IoT and Machine Learning for Honeybee Colony Health Monitoring. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.651321/full> (дата звернення: 08.04.2025).
64. Remote Monitoring of Beehive Conditions Using IoT and Cloud Services. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9199151> (дата звернення: 08.04.2025).
65. Intelligent Beehive Monitoring System Based on Internet of Things. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4329508 (дата звернення: 08.04.2025).
66. Self-Powered Smart Beehive Monitoring and Control System (SBMaCS). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/10/3522> (дата звернення: 02.04.2025).
67. The intelligent beehive IoT system with the ability to measure bee colony health. URL: <https://digital-library.theiet.org/doi/abs/10.1049/icp.2023.3258> (дата звернення: 02.04.2025).
68. Wireless Sensor Networks for Beehive Monitoring: A Review. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/5/2/55> (дата звернення: 02.04.2025).
69. Design and Implementation of a Smart Beehive Monitoring System Using Arduino and IoT. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9385627> (дата звернення: 17.05.2025).
70. IoT-based Precision Agriculture System for Monitoring Beehives and Environmental Conditions. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221431732100134X> (дата звернення: 02.04.2025).
71. Energy-Efficient IoT Solutions for Monitoring Bee Colony Health. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9472036> (дата звернення: 02.04.2025).
72. Real-Time Monitoring of Beehives Using NB-IoT Technology. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/3/1712> (дата звернення: 02.04.2025).
73. A review of IoT applications in smart agriculture and precision farming. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938519300840> (дата звернення: 02.04.2025).

74. Energy Harvesting Technologies for IoT Sensors in Remote Environmental Monitoring. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1332> (дата звернення: 02.04.2025).
75. Cyber-Physical Systems: A Comprehensive Review of Emerging Technologies and Applications. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0164121220303114> (дата звернення: 02.04.2025).
76. Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring: A Review. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/15/4336> (дата звернення: 02.04.2025).
77. LoRaWAN-based IoT Network for Precision Agriculture: Design and Deployment. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X19302606> (дата звернення: 02.04.2025).
78. IoT-based Environmental Monitoring System for Smart Farming. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9211234> (дата звернення: 02.04.2025).
79. Design and Evaluation of IoT-Enabled Cyber-Physical Systems for Agriculture. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/6/678> (дата звернення: 13.03.2025).
80. Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN) for Smart Agriculture: A Survey. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/43> (дата звернення: 13.03.2025).
81. A Cyber-Physical Approach for Monitoring and Controlling Agricultural Environments. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919303726> (дата звернення: 13.03.2025).
82. Blockchain and IoT Integration in Agriculture: A Systematic Review. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620301282> (дата звернення: 22.04.2025).
83. Fog Computing for IoT-based Smart Agriculture: Architecture and Challenges. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/12/2052> (дата звернення: 22.04.2025).

84. Machine Learning and IoT for Precision Agriculture: A Comprehensive Survey. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352914821000143> (дата звернення: 22.04.2025).

85. IoT-Enabled Real-Time Monitoring System for Environmental Parameters in Agriculture. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9057747> (дата звернення: 22.04.2025).

86. Cyber-Physical Systems for Environmental and Agricultural Monitoring. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/3/316> (дата звернення: 22.04.2025).

87. Energy-Efficient Protocols for Wireless Sensor Networks in Smart Farming. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870520301311> (дата звернення: 22.04.2025).

88. Гуцал Б., А., Лисий А. М., Дрозд А. І. Кіберфізична система моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій / Збірник наукових праць за матеріалами XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024». Хмельницький, 2024, С. 164-166.

89. Рисунок системи моніторингу crop x . URL: <https://cropx.com/2022/10/04/data-helps-farmers-to-get-a-better-understanding-of-the-soil/> (дата звернення: 22.04.2025).

90. Рисунок системи моніторингу Broodminder URL: <https://www.foxhoundbeecompany.com/products/broodminder-wifi-receiver> (дата звернення: 22.04.2025).

91. Рисунок мікроконтролера ESP-32 URL: <https://diyshop.com.ua/ua/kontroller-esp-32-wifiblueetooth-type-c> (дата звернення: 22.04.2025).

92. Рисунок сенсора BME 280 URL: <https://ledplus.com.ua/ua/p1627863397-barometr-datchik-davleniya.html> (дата звернення: 22.04.2025).

93. Рисунок сенсора BMP 280 разом з АНТ20 URL: <https://arduino.ua/ru/prod6017-modul-datchikiv-temperatyrivologostitisky-ahnt20bmp280> (дата звернення: 22.04.2025).

94. Рисунок тензодатчика HX711 URL: <https://grabcad.com/library/orbiterv2-3d-printer-extruder-1> (дата звернення: 22.04.2025).
95. Рисунок перетворювача логічних рівнів TXS0108E URL: https://fpga.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=54 (дата звернення: 22.04.2025).
96. Рисунок OLED Display SSD1306 URL: <https://stm32withoutfear.blogspot.com/2018/04/stm32-oled-display-ssd1306-i2c.html> (дата звернення: 22.04.2025).
97. Рисунок модуля Ra-01 SX1278 URL: <https://www.ebay.co.uk/itm/323987984654> (дата звернення: 22.04.2025).
98. Рисунок акумулятора 18650 URL: <https://flagma.ua/uk/akkumulyator-18650-li-ion-samsung-inr18650-25r-2500mah-20a-423625v-cena-za-sht-o11229305.html> (дата звернення: 22.04.2025).
99. Рисунок мікроконтролера esp32 URL: <https://www.amazon.in/ESP-WROOM-32-Development-Microcontroller-Integrated-Compatible/dp/B08D5ZD528> (дата звернення: 22.04.2025).
100. Рисунок сенсора BMP 280 URL: <https://voron.ua/uk/catalog/039802--modul-datchik-davleniya-vozdruha-i-temperatur-gy-bmp280-33> (дата звернення: 22.04.2025).
101. Рисунок схеми підключення датчиків BME280 URL: <https://microcontrollerslab.com/telegram-esp32-esp8266-display-bme280-sensor-readings-arduino-ide/> (дата звернення: 22.04.2025).
102. Рисунок схеми підключення тензодатчиків HX711 URL: <https://espeasy.readthedocs.io/en/latest/Plugin/P067.html> (дата звернення: 22.04.2025).
103. Рисунок схеми підключення OLED Display SSD1306 URL: <https://microcontrollerslab.com/telegram-esp32-esp8266-display-bme280-sensor-readings-arduino-ide/> (дата звернення: 22.04.2025).

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

**ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЕРЕДАВАЧА ДАНИХ ДЛЯ
КІБЕРФІЗИЧНОЇ ІoT-СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВУЛИКІВ**

Модуль «Передача та попередня обробка даних сенсорів до центрального вузла системи моніторингу»

```
#include <SPI.h>

#include <LoRa.h>

#include <Wire.h>

#include <Adafruit_BME280.h>

#include <Adafruit_BMP280.h>

#include <Adafruit_AHTX0.h>

#include <HX711.h>

#include <esp_sleep.h>

// Налаштування пінів для LoRa

#define LORA_SS 5 // GPIO5 (NSS/CS)

#define LORA_RST 14 // GPIO14 (RST)

#define LORA_DIO0 26 // GPIO26 (DIO0)

// Налаштування I2C датчиків

#define I2C_SDA 21 // GPIO21 (SDA)

#define I2C_SCL 22 // GPIO22 (SCL)

// Конфігурація пінів для HX711

const int LOADCELL_DOUT_PIN = 16;

const int LOADCELL_SCK_PIN = 4;
```

```
// Калібрувальні параметри

const float CALIBRATION_FACTOR = -10.10f;

const long OFFSET = 8482L;

const float BME_HUMIDITY_CORRECTION = 4.0f; // Поправка вологості BME280 (+4%)

// Об'єкти датчиків

Adafruit_BME280 bme; // BME280 (0x76)

Adafruit_BMP280 bmp; // BMP280 (0x77)

Adafruit_AHTX0 aht; // AHT20 (0x38)

HX711 scale; // Датчик ваги HX711

// Час між вимірюваннями (60 хвилин)

const uint64_t MEASUREMENT_INTERVAL = 60 * 60 * 1000000ULL; // у мікросекундах

void setup() {

  Serial.begin(115200);

  while (!Serial);

  // Ініціалізація I2C

  Wire.begin(I2C_SDA, I2C_SCL);

  // Ініціалізація датчиків

  bme.begin(0x76); // BME280

  bmp.begin(0x77); // BMP280

  aht.begin(); // AHT20

  scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);

  scale.set_scale(CALIBRATION_FACTOR);

  scale.set_offset(OFFSET);
```

```
scale.tare();
```

```
// Ініціалізація LoRa
```

```
LoRa.setPins(LORA_SS, LORA_RST, LORA_DIO0);
```

```
if (!LoRa.begin(433E6)) {
```

```
    Serial.println("Помилка ініціалізації LoRa!");
```

```
    while (1);
```

```
}
```

```
Serial.println("Старт системи...");
```

```
performMeasurement(); // Виконати вимірювання та відправку
```

```
goToSleep(); // Перехід у сон
```

```
}
```

```
void loop() {} // Не використовується (глибокий сон)
```

```
void performMeasurement() {
```

```
    // Зчитування даних (або 0, якщо датчик відсутній)
```

```
    float bme_temp = bme.begin(0x76) ? bme.readTemperature() : 0.0f;
```

```
    float bme_humidity = bme.begin(0x76) ? (bme.readHumidity() + BME_HUMIDITY_CORRECTION) : 0.0f;
```

```
    float bme_pressure = bme.begin(0x76) ? (bme.readPressure() / 100.0F) : 0.0f;
```

```
    float bmp_temp = bmp.begin(0x77) ? bmp.readTemperature() : 0.0f;
```

```
    float bmp_pressure = bmp.begin(0x77) ? (bmp.readPressure() / 100.0F) : 0.0f;
```

```
sensors_event_t aht_humidity, aht_temp;
```

```
float aht_temp_val = aht.begin() ? (aht.getEvent(&aht_humidity, &aht_temp), aht_temp.temperature) : 0.0f;
```

```
float aht_humidity_val = aht.begin() ? aht_humidity.relative_humidity : 0.0f;
```

```

float weight = scale.wait_ready_timeout(1000) ? scale.get_units(5) : 0.0f;

if (weight < 1000) weight = 0; // Якщо вага < 1 кг → 0

// Формування повідомлення (вага без десяткових знаків)

String loraMessage =

  "BME280: T=" + String(bme_temp, 1) + "C, H=" + String(bme_humidity, 1) + "%, P=" + String(bme_pressure,
1) + "hPa | " +

  "BMP280: T=" + String(bmp_temp, 1) + "C, P=" + String(bmp_pressure, 1) + "hPa | " +

  "AHT20: T=" + String(aht_temp_val, 1) + "C, H=" + String(aht_humidity_val, 1) + "% | " +

  "Вага: " + String(weight, 0) + "г";

// Відправлення 5 разів з інтервалом 1 секунда

for (int i = 0; i < 5; i++) {

  LoRa.beginPacket();

  LoRa.print(loraMessage);

  bool result = LoRa.endPacket();

  if (result) {

    Serial.println "[" + String(millis()) + "] Відправлено " + String(i+1) + "/5: " + loraMessage);

  } else {

    Serial.println "[" + String(millis()) + "] Помилка відправки " + String(i+1) + "/5";

  }

  if (i < 4) delay(1000); // Пауза 1 сек (крім останньої ітерації)

}

}

void goToSleep() {

```

```
Serial.println("Перехід у режим глибокого сну на 60 хвилин...");  
Serial.flush();  
esp_sleep_enable_timer_wakeup(MEASUREMENT_INTERVAL);  
LoRa.sleep(); // Вимкнення LoRa для енергозбереження  
Wire.end(); // Вимкнення I2C  
Serial.end(); // Вимкнення UART  
esp_deep_sleep_start(); // Засинання  
}
```

ДОДАТОК Б

ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИЙМАЧА ДАНИХ ДЛЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ ІoT-СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВУЛИКІВ

Модуль «Прийом та обробка даних від передавача на центральному вузлі системи моніторингу»

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL4dqcfiOtH"

#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Quickstart Template"

#define BLYNK_AUTH_TOKEN "P4m4dfO35qMfb3yfnmJ7ZmwjGHZN4-5s"

#define BLYNK_PRINT Serial

#include <SPI.h>

#include <LoRa.h>

#include <WiFi.h>

#include <WiFiClient.h>

#include <BlynkSimpleEsp32.h>

#include <Wire.h>

#include <Adafruit_GFX.h>

#include <Adafruit_SSD1306.h>

// Налаштування Wi-Fi

char ssid[] = "Netip2050";

char pass[] = "78751583";

// Налаштування LoRa

#define LORA_SS 5

#define LORA_RST 14

#define LORA_DIO0 26

#define BUILTIN_LED 2
```

```
// Налаштування OLED

#define SCREEN_WIDTH 128

#define SCREEN_HEIGHT 64

#define OLED_RESET -1

#define YELLOW_PART_HEIGHT 16

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);

// Структура даних

struct SensorData {

    float bme_temp;

    float bme_humidity;

    float bme_pressure;

    float bmp_temp;

    float bmp_pressure;

    float aht_temp;

    float aht_humidity;

    float weight;

    int lora_rssi;

};

SensorData lastData;

unsigned long lastBlynkUpdate = 0;

const unsigned long blynkUpdateInterval = 300000; // 5 хвилин

unsigned long lastSlideChange = 0;

const unsigned long slideInterval = 5000; // 5 секунд

bool newDataAvailable = false;

int currentSlide = 0;
```

```
// Порогові значення для сповіщень
const float HIGH_TEMP_THRESHOLD = 38.0;
const float LOW_TEMP_THRESHOLD = 30.0;
const float HIGH_HUMIDITY_THRESHOLD = 80.0;
const float LOW_HUMIDITY_THRESHOLD = 35.0;
const float HYSTERESIS = 2.0;

// Стани сповіщень
bool highTempAlertSent = false;
bool lowTempAlertSent = false;
bool highHumidityAlertSent = false;
bool lowHumidityAlertSent = false;

// Прототипи функцій
float extractValue(String data, String prefix, String suffix, String context = "");
void drawStaticElements();
void updateDisplay();
void updateBlynk();
bool parseLoRaData(String data);
void receiveLoRaData();
void drawInsideSlide();
void drawOutsideSlide();
void drawInfoSlide();
String formatTime(unsigned long milliseconds);
void checkThresholds();
void sendAlert(const String& eventName, const String& message);
```

```
void setup() {  
  Serial.begin(115200);  
  pinMode(BUILTIN_LED, OUTPUT);  
  
  // Ініціалізація OLED  
  if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {  
    Serial.println("OLED init failed!");  
    while(1);  
  }  
  display.clearDisplay();  
  
  // Ініціалізація LoRa  
  LoRa.setPins(LORA_SS, LORA_RST, LORA_DIO0);  
  if (!LoRa.begin(433E6)) {  
    Serial.println("LoRa init failed!");  
    while (1);  
  }  
  
  // Підключення до Blynk  
  Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass);  
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED !Blynk.connected()) {  
    delay(500);  
    Serial.print(".");  
  }  
  Serial.println("\nSystem ready!");  
  
  // Початковий вивід на OLED  
  drawStaticElements();  
  display.display();  
}
```

```
}

void loop() {

  Blynk.run();

  receiveLoRaData();

  if (millis() - lastBlynkUpdate >= blynkUpdateInterval && newDataAvailable) {

    updateBlynk();

    checkThresholds();

    lastBlynkUpdate = millis();

    newDataAvailable = false;

    Serial.println("[Blynk] Data sent to Blynk (5min interval)");

  }

  if (millis() - lastSlideChange >= slideInterval) {

    currentSlide = (currentSlide + 1) % 3;

    lastSlideChange = millis();

    updateDisplay();

  }

  delay(100);

}

float extractValue(String data, String prefix, String suffix, String context) {

  int start = data.indexOf(prefix, context == "" ? 0 : data.indexOf(context));

  if (start == -1) return 0.0;

  start += prefix.length();
```

```
int end = data.indexOf(suffix, start);

if (end == -1) return 0.0;

return data.substring(start, end).toFloat();
}

void drawStaticElements() {

    display.fillRect(0, 0, SCREEN_WIDTH, YELLOW_PART_HEIGHT, SSD1306_WHITE);

    display.setTextColor(SSD1306_BLACK);

    display.setTextSize(2);

    display.setCursor(SCREEN_WIDTH/2 - 40, 1);

    display.print("Melissa");

}

void drawInsideSlide() {

    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);

    display.setTextSize(1);

    display.setCursor(SCREEN_WIDTH/2 - 30, YELLOW_PART_HEIGHT + 5);

    display.print("Inside");

    display.setCursor(5, YELLOW_PART_HEIGHT + 20);

    display.print("Temp: ");

    display.print(lastData.aht_temp, 1);

    display.print("C");

    display.setCursor(5, YELLOW_PART_HEIGHT + 35);

    display.print("Humidity: ");

    display.print(lastData.aht_humidity, 1);
```

```
display.print("%");  
}  
  
void drawOutsideSlide() {  
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);  
    display.setTextSize(1);  
    display.setCursor((SCREEN_WIDTH/2 - 30), YELLOW_PART_HEIGHT + 5);  
    display.print("Outside");  
  
    display.setCursor(5, YELLOW_PART_HEIGHT + 20);  
    display.print("Temp: ");  
    display.print(lastData.bme_temp, 1);  
    display.print("C");  
  
    display.setCursor(5, YELLOW_PART_HEIGHT + 35);  
    display.print("Humidity: ");  
    display.print(lastData.bme_humidity, 1);  
    display.print("%");  
}  
  
String formatTime(unsigned long milliseconds) {  
    if (milliseconds == 0) return "never";  
  
    unsigned long seconds = milliseconds / 1000;  
    unsigned long minutes = seconds / 60;  
    seconds %= 60;  
    return String(minutes) + "m " + String(seconds) + "s ago";  
}
```

```
void drawInfoSlide() {  
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);  
    display.setTextSize(1);  
  
    display.setCursor(5, YELLOW_PART_HEIGHT + 10);  
    display.print("Weight: ");  
    display.print(lastData.weight, 1);  
    display.print("g");  
  
    display.setCursor(5, YELLOW_PART_HEIGHT + 25);  
    display.print("RSSI: ");  
    display.print(lastData.lora_rssi);  
    display.print(" dBm");  
  
    display.setCursor(5, YELLOW_PART_HEIGHT + 40);  
    display.print("Last send: ");  
    display.print(formatTime(millis() - lastBlynkUpdate));  
}
```

```
void updateDisplay() {  
    display.clearDisplay();  
    drawStaticElements();  
  
    switch(currentSlide) {  
        case 0: drawInsideSlide(); break;  
        case 1: drawOutsideSlide(); break;  
        case 2: drawInfoSlide(); break;
```

```

}

display.display();
}

bool parseLoRaData(String data) {
  if (data.indexOf("BME280:") == -1 data.indexOf("BMP280:") == -1
      data.indexOf("AHT20:") == -1 data.indexOf("Bara:") == -1) {
    return false;
  }

  lastData.bme_temp = extractValue(data, "BME280: T=", "C");
  lastData.bme_humidity = extractValue(data, "H=", "%", "BME280:");
  lastData.bme_pressure = extractValue(data, "P=", "hPa", "BME280:");

  lastData.bmp_temp = extractValue(data, "BMP280: T=", "C");
  lastData.bmp_pressure = extractValue(data, "P=", "hPa", "BMP280:");

  lastData.aht_temp = extractValue(data, "AHT20: T=", "C");
  lastData.aht_humidity = extractValue(data, "H=", "%", "AHT20:");

  lastData.weight = extractValue(data, "Bara: ", "r");
  lastData.lora_rssi = LoRa.packetRssi();

  return true;
}

void updateBlynk() {
  Blynk.virtualWrite(V1, lastData.bme_temp);
}

```

```

Blynk.virtualWrite(V2, lastData.bme_humidity);
Blynk.virtualWrite(V3, lastData.bme_pressure);
Blynk.virtualWrite(V4, lastData.bmp_temp);
Blynk.virtualWrite(V5, lastData.bmp_pressure);
Blynk.virtualWrite(V6, lastData.aht_temp);
Blynk.virtualWrite(V7, lastData.aht_humidity);
Blynk.virtualWrite(V8, lastData.weight);
}

void receiveLoRaData() {
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize > 0) {
    String data = "";
    while (LoRa.available()) {
      data += (char)LoRa.read();
    }

    Serial.print("LoRa RSSI: ");
    Serial.print(LoRa.packetRssi());
    Serial.println(" dBm | Received: " + data);

    if (parseLoRaData(data)) {
      digitalWrite(BUILTIN_LED, HIGH);
      delay(100);
      digitalWrite(BUILTIN_LED, LOW);
      newDataAvailable = true;
      updateDisplay();
      Serial.println("New data received and parsed");
    }
  }
}

```

```
    }  
  }  
}  
  
void checkThresholds() {  
  // Перевірка температури всередині (АHT20)  
  if (lastData.aht_temp > HIGH_TEMP_THRESHOLD && !highTempAlertSent) {  
    showAlert("high_temp", "УВАГА: Висока температура всередині " + String(lastData.aht_temp, 1) + "°C");  
    highTempAlertSent = true;  
  } else if (lastData.aht_temp < (HIGH_TEMP_THRESHOLD - HYSTERESIS)) {  
    highTempAlertSent = false;  
  }  
  
  if (lastData.aht_temp < LOW_TEMP_THRESHOLD && !lowTempAlertSent) {  
    showAlert("low_temp", "УВАГА: Низька температура всередині " + String(lastData.aht_temp, 1) + "°C");  
    lowTempAlertSent = true;  
  } else if (lastData.aht_temp > (LOW_TEMP_THRESHOLD + HYSTERESIS)) {  
    lowTempAlertSent = false;  
  }  
  
  // Перевірка вологості всередині (АHT20)  
  if (lastData.aht_humidity > HIGH_HUMIDITY_THRESHOLD && !highHumidityAlertSent) {  
    showAlert("high_humidity", "УВАГА: Висока вологість всередині " + String(lastData.aht_humidity, 1) + "%");  
    highHumidityAlertSent = true;  
  } else if (lastData.aht_humidity < (HIGH_HUMIDITY_THRESHOLD - HYSTERESIS)) {  
    highHumidityAlertSent = false;  
  }  
}
```

```
if (lastData.aht_humidity < LOW_HUMIDITY_THRESHOLD && !lowHumidityAlertSent) {  
    sendAlert("low_humidity", "УВАГА: Низька вологість всередині " + String(lastData.aht_humidity, 1) + "%");  
    lowHumidityAlertSent = true;  
} else if (lastData.aht_humidity > (LOW_HUMIDITY_THRESHOLD + HYSTERESIS)) {  
    lowHumidityAlertSent = false;  
}  
  
}  
  
void sendAlert(const String& eventName, const String& message) {  
    Blynk.logEvent(eventName, message);  
    Serial.println("[Alert] " + message);  
}
```

ДОДАТОК В
(обов'язковий)

НАУКОВА ПРАЦЯ ЗДОБУВАЧА

Сертифікат № 2024-043-1



Міністерство освіти і науки України
Хмельницький національний університет

СЕРТИФІКАТ



Гуцал Богдан Вікторович

учасник XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції
«Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024»
24 години участі (0,8 ECTS credits)

Голова оргкомітету АПКН-2024

Олег СИНЮК

проректор Хмельницького національного
університету з наукової роботи,
доктор технічних наук, професор

м. Хмельницький
15-16 листопада 2024

E-mail: apkt.khnu@gmail.com

УДК 004.4

Гуцал Б.В.

*Хмельницький національний університет***КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ БДЖОЛИНИХ ВУЛИКІВ НА ОСНОВІ ІОТ ТЕХНОЛОГІЙ**

Розглянуто прикладні аспекти розробки кіберфізичної системи моніторингу для відстеження стану бджолиних вуликів на основі IoT-технологій. Запропонована система забезпечує постійний контроль за основними показниками, такими як температура, вологість, рівень CO₂, що є важливими для підтримання оптимальних умов у вулику. Система призначена для зменшення ризиків, пов'язаних з втратами бджолиних колоній через несприятливі умови.

The applied aspects of the development of a cyber-physical system for monitoring the state of beehives based on IoT technologies are considered. The proposed system provides constant control over the main parameters, such as temperature, humidity, and CO₂ levels, which are crucial for maintaining optimal conditions in the hive. The system is designed to reduce risks associated with the loss of bee colonies due to unfavorable conditions.

Розглянуто проблему зменшення чисельності бджолиних колоній та необхідність своєчасного моніторингу умов у вуликах. Застосування кіберфізичних IoT-систем дозволяє відстежувати параметри середовища в режимі реального часу, що сприяє зниженню ризиків загибелі бджіл і підтримці екологічного балансу.

Досліджено сучасні рішення в області IoT-моніторингу у сфері сільського господарства та підтримки бджолиних колоній, що демонструють ефективність автоматизованих систем збору даних для моніторингу умов у вуликах.

Існуючі системи здебільшого зосереджені на окремих аспектах моніторингу й не завжди інтегрують всі ключові параметри (температура, вологість, CO₂). Мета дослідження — розробка цілісної кіберфізичної системи для моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT, що забезпечить точний контроль основних параметрів.

З ростом зацікавленості в захисті екології та стабілізації чисельності бджолиних колоній проблема автоматизованого моніторингу та контролю за умовами у вуликах набуває особливого значення.

Метою роботи є розробка кіберфізичної системи для автоматизованого моніторингу стану бджолиних вуликів, що дозволить спростити контроль за умовами у вуликах та підвищити ефективність догляду за бджолами, забезпечуючи вчасне втручання у разі відхилень показників від норми.

Система моніторингу передбачає збір даних з декількох датчиків, інтегрованих у вулики, які надсилають інформацію про ключові показники в реальному часі. Система забезпечує збір даних і їх зберігання в хмарі, що дозволяє зручну віддалену візуалізацію та доступ до інформації.

Запропонована кіберфізична система моніторингу бджолиних вуликів дозволяє збирати дані про зміну параметрів середовища всередині вулика протягом різних сезонів, що сприяє підтримці оптимальних умов для бджолиних колоній. Представлено графік, що демонструє зміну рівня вологості всередині вулика протягом зимового періоду, коли контроль цього параметра особливо важливий для забезпечення здоров'я бджіл. Цей показник дозволяє оперативнo виявляти відхилення та приймати своєчасні заходи для уникнення ризиків, пов'язаних з умовами зимівлі (рисунок 1).

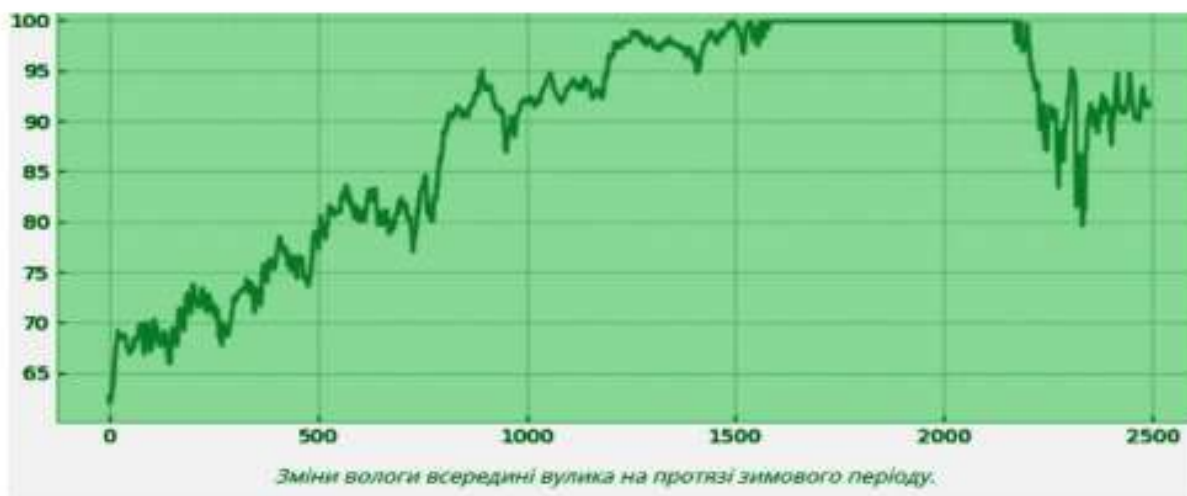


Рисунок 1 – Зміни вологості всередині вулика

Існуючі методи моніторингу бджолиних вуликів, включаючи періодичні візуальні перевірки, мають низку обмежень, таких як висока трудомісткість та потенційний стрес для бджіл. У порівнянні з ними, системи на основі IoT дозволяють автоматизувати процес збору даних, знизивши ризики і забезпечивши більш точну та своєчасну інформацію.

Ключовими факторами, що впливають на здоров'я бджіл, є температурний режим, рівень вологості та концентрація CO₂ у вуликах. Різкі зміни цих параметрів можуть негативно вплинути на життєздатність колонії, зокрема під час зимівлі. Встановлення датчиків для відстеження цих факторів допомагає вчасно визначати і коригувати умови, сприятливі для бджіл.

Кіберфізичні системи не лише допомагають бджолярам, але й роблять важливий внесок у збереження екологічної рівноваги, оскільки бджоли є ключовими запилювачами. Запобігання втратам колоній за допомогою автоматизованих систем моніторингу підтримує баланс екосистеми, сприяючи збереженню біорізноманіття.

Завдяки інтуїтивному інтерфейсу IoT-системи, бджолярі отримують доступ не лише до сирих даних, а й до аналітики, що дозволяє легко оцінити стан вулика. Розумна аналітика у вигляді графіків та індикаторів полегшує ухвалення рішень, надаючи можливість оперативно коригувати умови для здоров'я колонії.

Параметри, такі як рівень вуглекислого газу або мікроклімат усередині вулика, можуть бути невидимими для людини, але життєво важливими для бджіл. IoT-система виявляє ці "невидимі" загрози, що забезпечує вищий рівень безпеки для колонії і дозволяє бджолярам діяти на випередження потенційних ризиків.

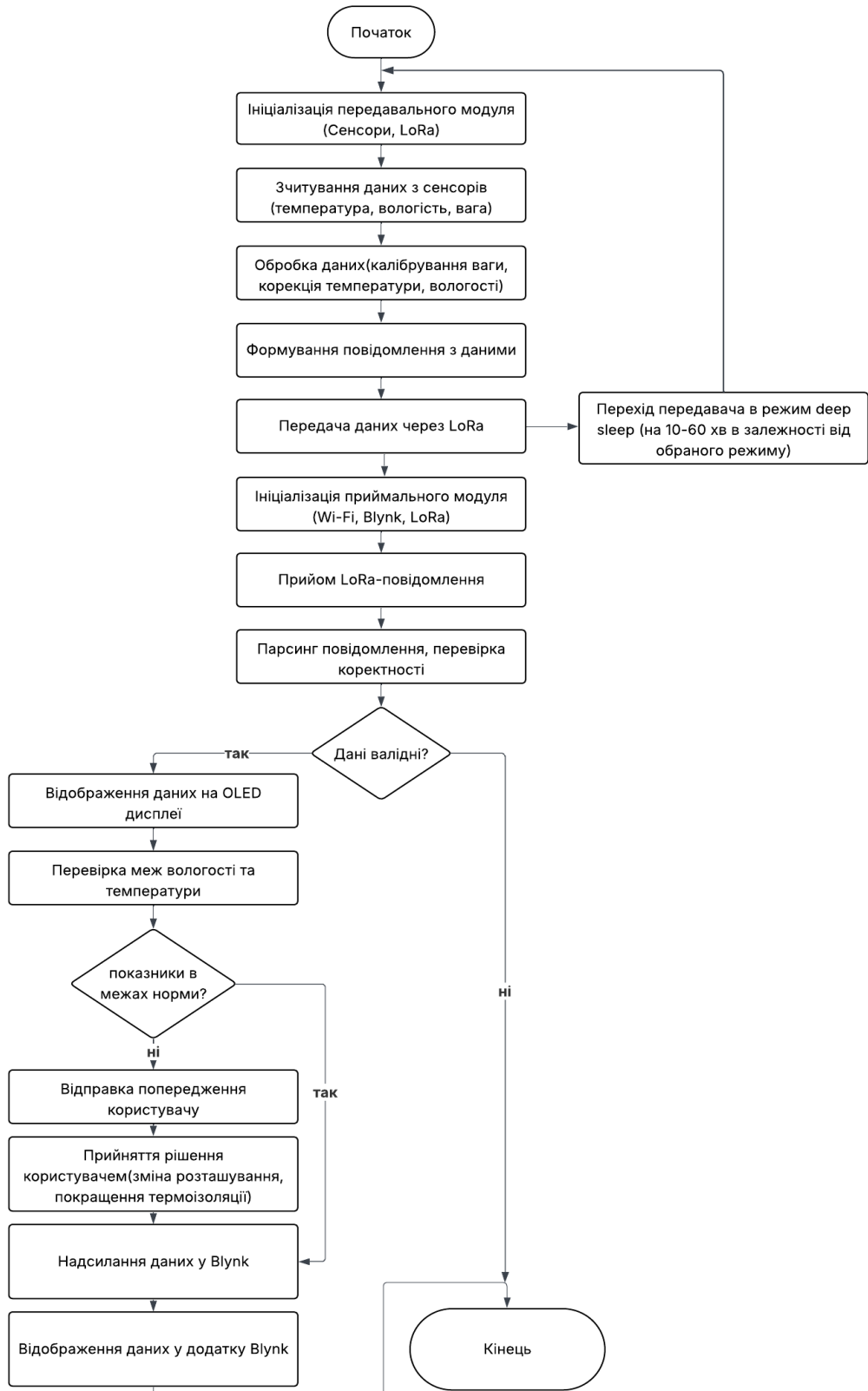
Розроблена система може стати важливим інструментом для підтримки здоров'я бджолиних колоній. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розширенні функціональності системи, додаванні аналізу даних з використанням машинного навчання для прогнозування стану вуликів.

Перелік посилань

1. Beemon: An IoT-based beehive monitoring system URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169921004440>
2. HiveLink – IoT based Smart Bee Hive Monitoring System URL: <https://arxiv.org/pdf/2309.12054>
3. Fighting Honey-Bee Colony Mortality through IoT URL: <https://io-bee.eu/>

ДОДАТОК Г

АЛГОРИТМ РОБОТИ КФС



ДОДАТОК Д
(обов'язковий)

ПРЕЗЕНТАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Кваліфікаційна робота

**Тема: Кіберфізична система
моніторингу бджолиних вуликів
на основі IoT технологій**

Науковий керівник: Капустян М.В. к.т.н., доцент

Здобувач освіти магістерського рівня: Гуцал Б.В. КІ2М-23-1



1

Мета, об'єкт та предмет дослідження

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розробка кіберфізичної системи Моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій, що дозволяє здійснювати автоматизований дистанційний контроль стану вуликів у режимі реального часу.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу стану бджолиних вуликів із використанням сучасних технологій.

Предметом дослідження є кіберфізична система на основі IoT для автоматизованого збору, обробки та аналізу даних про стан вуликів.

2

Наукова новизна дослідження

Наукова новизна полягає в розробці енергоефективної IoT-системи моніторингу вуликів з автоматичним оповіщенням про критичні умови через Blynk, використанням LoRa-зв'язку та реалізацією режиму сну передавача для зниження енергоспоживання.

3

Задачі дослідження

- Проаналізувати існуючі методи моніторингу стану бджолиних вуликів.
- Розробити архітектуру та алгоритм кіберфізичної системи моніторингу.
- Реалізувати функціонал збору, передачі, обробки даних та оповіщення користувача.
- Забезпечити енергоефективність системи шляхом використання режиму сну передавача.
- Протестувати систему в реальних умовах і оцінити її ефективність.

4

1 розділ

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану галузі бджільництва, виявлено основні проблеми, пов'язані з традиційними методами догляду за бджолами, а також досліджено існуючі підходи до моніторингу за допомогою IoT-рішень.

5

2 розділ

У другому розділі розроблено архітектуру та алгоритм кіберфізичної системи, визначено вимоги до точності, автономності та масштабованості системи, обґрунтовано вибір апаратного та програмного забезпечення.

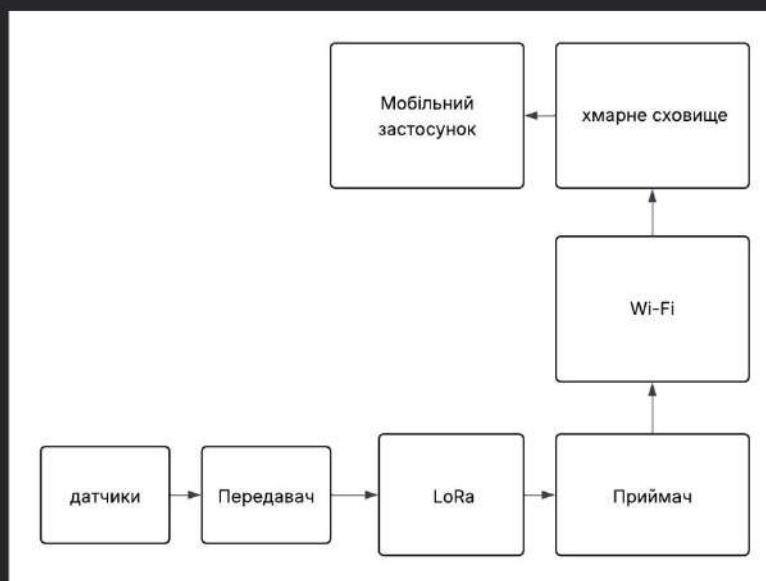
6

Архітектура кіберфізичних систем

Система складається з двох модулів на базі ESP32: передавального та приймального. Передавальний модуль вимірює зовнішню і внутрішню температуру і вологість та вагу, передає їх через LoRa та переходить у режим глибокого сну для енергозбереження. Приймальний модуль приймає та обробляє дані, візуалізує їх на екрані, надсилає у мобільний застосунок та генерує сповіщення у разі перевищення граничних значень.

7

Архітектура кіберфізичних систем



8

Математична модель

2.2 Модель кіберфізичної системи для моніторингу бджолиних вуликів

. Система формує вектор стану вулика:

Нехай маємо множину вуликів:

$$H = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}. \tag{2.1}$$

$$\bar{x}_i(t) = \begin{bmatrix} T_i(t) \\ H_i(t) \\ W_i(t) \end{bmatrix}. \tag{2.3}$$

Для кожного вулика H_i система вимірює наступні параметри у час $t \in \mathbb{R}_+$:

$T_i(t)$ - температура всередині вулика;

$H_i(t)$ - вологість;

$W_i(t)$ - вага вулика;

$B_i(t)$ - рівень активності бджіл (наприклад, зміна ваги/добу).

Кожен сенсор j на вулику i реєструє вимірювання:

$$x_{i,j}(t) = T_{i,j}(t) + \varepsilon_{i,j}(t), \tag{2.2}$$

де:

$s_{i,j}(t)$ - реальне значення параметра;

$\varepsilon_{i,j}(t) \sim N(0, \sigma^2)$ - похибка вимірювання.

Стан обробляється алгоритмом A , який визначає нормальний стан та аномалію.

Нормальним станом вважатимемо $A(\bar{x}_i(t)) = 0$.

Аномальний стан (тривога) - $A(\bar{x}_i(t)) = 1$.

Детекція відбувається наступним чином:

$$A(\bar{x}_i(t)) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } T_i(t) < 32^\circ\text{C} \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \tag{2.4}$$

Система має наступну мережу: сенсори \rightarrow мікроконтролер \rightarrow шлюз LoRa \rightarrow сервер S із затримкою τ :

$$D_i(t) = \bar{x}_i(t - \tau). \tag{2.5}$$

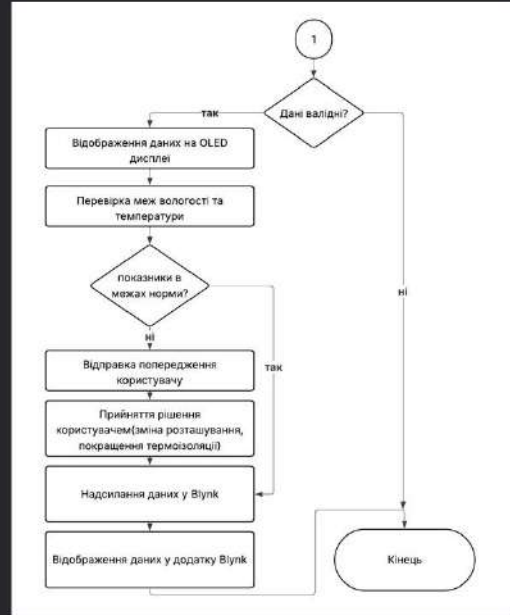
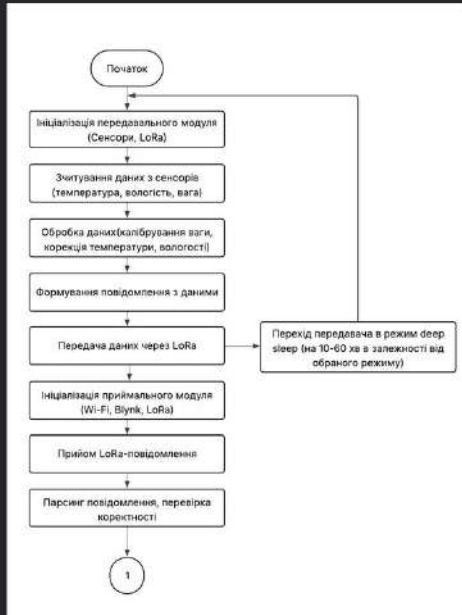
Дані для кожного з N вуликів, які записуються до бази, виразимо наступним чином:

$$D_i = \{\bar{x}_i(t_k) \mid k = 1, 2, \dots, N\}. \tag{2.6}$$

Сигнали тривоги подаються користувачеві у таких випадках:

$$\exists t \in [t_0, t_1]: A(\bar{x}_i(t)) = 1. \tag{2.7}$$

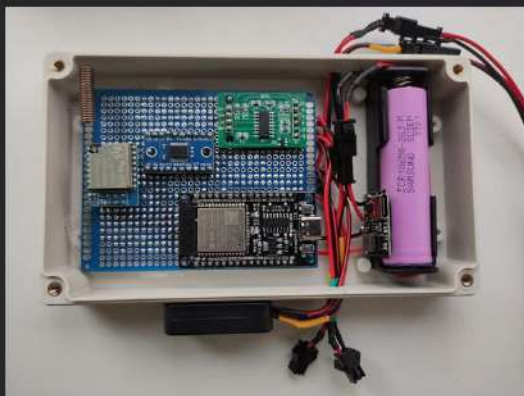
Алгоритм роботи



3 розділ

У третьому розділі реалізовано апаратну частину системи на базі мікроконтролера ESP32 з інтегрованими сенсорами температури, вологості та ваги, а також здійснено розробку програмного забезпечення в середовищі Arduino IDE для збору, обробки та передачі даних. Система інтегрована з хмарним сервісом, що забезпечує візуалізацію даних та сповіщення користувача

Апаратна реалізація



Передавач



Приймач

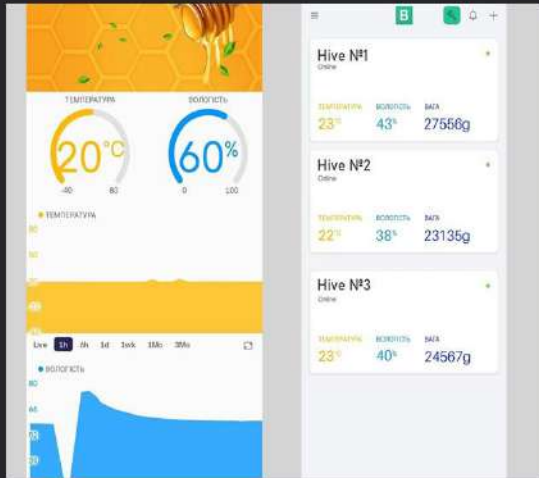
13

4 розділ

У четвертому розділі проведено тестування системи моніторингу бджолиних вуликів у реальних умовах, що підтвердило її стабільну та надійну роботу. Перевірено точність вимірювання температури, вологості та ваги, ефективність передачі даних через LoRa, а також успішну інтеграцію з хмарним сервісом. Реалізація режиму глибокого сну забезпечила автономну роботу до 104 діб.

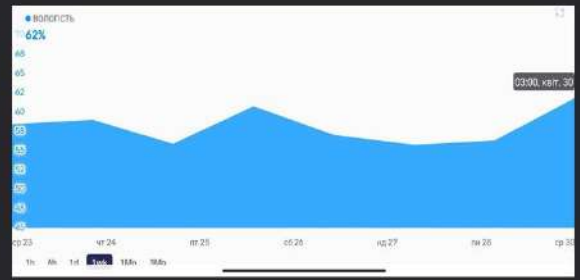
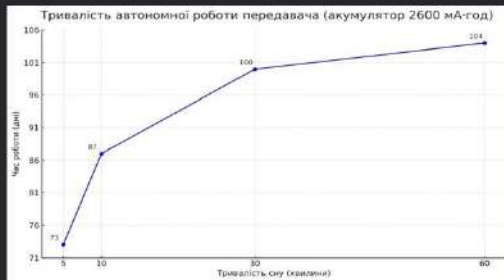
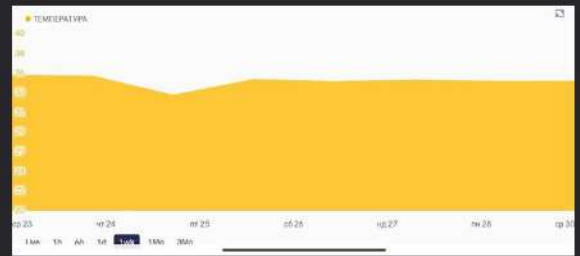
14

Реалізація інтерфейсу



15

Тестування



16

Висновки

У роботі внаслідок виконаних практичних та теоретичних досліджень розроблено кіберфізичну IoT-систему для моніторингу бджолиних вуликів, яка забезпечує автоматизований контроль температури та вологості з передачею даних у режимі реального часу та сповіщенням користувача про критичні відхилення, що сприяє підвищенню ефективності догляду за вуликами.



17

Дякую за увагу

18

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 ГУЦАЛ

Співавтор:

Назва: Гуцал_Кіберфізична система моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1:2.2%

Коефіцієнт подібності 2:0.3%

Мікропробіли: 7

Заміна букв: 5

Інтервали: 0

Білі знаки: 1

Дата створення звіту: 2025-05-19 06:00:12.0

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:

2025-05-19



Доцент Андрій Нічепорук

Дата

експерт

Anti-Plagiarism v-15.274 Educational

The maximum coincidence with one document 0.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 11%

ID: 241314 Title: МКР Кіберфізична система моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій Added in a DB: 2025-05-19 Authors: Богдан ГУЦАЛ Heads: Марія КАПУСТЯН Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	131223	1920	1473 (1%)	26 (1%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes



Дата звіту 5/19/2025
 Дата редагування 5/19/2025

Документ прийнятий

Звіт подібності

метадані

Назва організації
Khmelnytskyi National University
 Заголовок
Гуцал_Кіберфізична система моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій
 Автор
Богдан ГУЦАЛ Науковий керівник / Експерт
 підрозділ
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



25
 Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2



19435 **148929**
 Кількість слів Кількість символів

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Богдан ГУЦАЛ

Тема: Кіберфізична система моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 86

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі запропоновано кіберфізичну систему для дистанційного моніторингу бджолиних вуликів з використанням LoRa та мобільного застосунку

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 розглянуто проблеми сучасного бджільництва та можливості застосування IoT-технологій для моніторингу вуликів. У другому – представлено архітектуру та модель кіберфізичної системи моніторингу, здійснено вибір компонентів і розроблено алгоритм її роботи. У третьому розділі запропоновано апаратну і програмну реалізацію системи, а також налаштування хмарного сервісу. У четвертому розділі проведено тестування системи в реальних умовах та оцінено її ефективність.

4. Позитивні сторони роботи: Запропонована кіберфізична система моніторингу бджолиних вуликів дозволяє виявляти відхилення температури, вологості та ваги у реальному часі, що забезпечує своєчасне реагування на потенційні загрози для бджолосімей і сприяє підвищенню ефективності бджільництва.

5. Негативні сторони роботи: _____

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: =

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

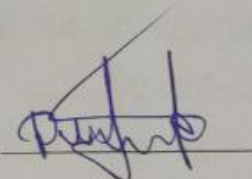
8. Інші зауваження: =

9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «задовільно» 3.50 (D)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Макаришин Денис Анатолійович, доцент, к.т.н., кафедри АКСТ та Р

“ 1 травня ” _____ 2025р.



Завідувачу кафедри КПС
доктору філософії, доценту
Ользі ПАВЛОВІЙ

Богдан ГУЦАЛ

ГІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-23-1

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 цілях 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 бджолиних вуликів на основі IoT технологій

Автор: Богдан ГУЦАЛ

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Марія КАПУСТЯН, 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.	

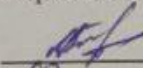
Підтвердження:

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

- 1) запозичення розміщені в розділах є збіг зі звітом з науково-дослідної практики автора Віталіни Сахнюк "Метод синтезу апаратно-програмних засобів забезпечення стійкості корпоративної комп'ютерної мережі", який було додано в репозитраїї ХНУ 21 березня 2023 року;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 4) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.

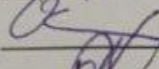
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 2.17% і адресується до 28 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи



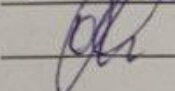
Марія КАПУСТЯН

Гарант ОП



Олег САВЕНКО

Завідувач кафедри КІС



Ольга ПАВЛОВА