

Міністерство освіти і науки України
Державний заклад
«Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»

Навчально-науковий інститут математики та інформаційних технологій

Кафедра інформаційних технологій та систем

Уманець Артем Сергійович

**СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ БДЖОЛИНИХ ВУЛИКІВ НА ОСНОВІ ІoT
ТЕХНОЛОГІЙ**

кваліфікаційна робота

здобувача вищої освіти другого (магістерського) рівня

освітньої програми «Комп'ютерні мережі»

за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

Особистий підпис _____



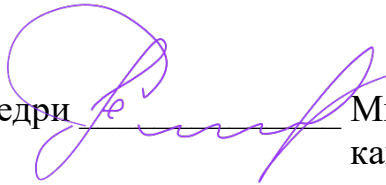
Артем УМАНЕЦЬ

Науковий керівник _____



Володимир ДОНЧЕНКО,
старший викладач кафедри
інформаційних технологій та систем

Завідувач кафедри _____



Микола СЕМЕНОВ,
кандидат педагогічних наук, доцент
кафедри інформаційних технологій
та систем

Лубни – 2026

АНОТАЦІЯ

Уманець А. С.

Тема: Система моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT технологій.

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія».

Установа: ЛНУ імені Тараса Шевченка, 2026 р.

Магістерська робота містить: 107 с., 48 рис., 9 табл., 2 додат., 37 джерел.

Об'єктом дослідження – процес моніторингу стану бджолиних вуликів із використанням сучасних інформаційних та цифрових технологій.

Предмет дослідження – комп'ютеризована IoT-орієнтована система моніторингу стану бджолиних вуликів, призначена для автоматизованого збору, оброблення та аналізу даних про параметри функціонування вуликів.

Мета дослідження – розробка IoT-системи моніторингу бджолиних вуликів, яка забезпечує автоматизований дистанційний контроль їхнього стану в режимі реального часу.

Результати роботи. У ході виконання магістерської роботи розроблено та експериментально перевірено систему моніторингу стану пасіки з використанням IoT-технологій. На основі аналізу сучасного стану галузі бджільництва визначено основні недоліки традиційних методів утримання бджіл, зокрема відсутність оперативного контролю мікрокліматичних параметрів та складність своєчасного виявлення критичних змін у стані бджолосімей. Запропоновано архітектуру апаратно-програмного комплексу, що забезпечує безперервний моніторинг температури, вологості та маси вуликів з урахуванням вимог до точності вимірювань, автономності та масштабованості системи. Обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32, сенсорів та бездротового каналу зв'язку LoRa як оптимального рішення для роботи в умовах віддалених пасік. Реалізовано апаратну частину системи та розроблено програмне забезпечення для збору, обробки і передавання даних з використанням середовища Arduino IDE. Інтеграція з хмарною платформою Blynk забезпечила зручну візуалізацію показників у режимі реального часу та автоматичне формування сповіщень у разі відхилення параметрів від заданих норм.

Ключові слова. КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА, БДЖІЛЬНИЦТВО, МОНІТОРИНГ БДЖОЛОСІМЕЙ, LORA, ESP32, БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ПАСІКИ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IOT), ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ, СЕНСОРИ ВАГИ, АВТОНОМНА СИСТЕМА, ВІДДАЛЕНИЙ МОНІТОРИНГ, ХМАРНІ СЕРВІСИ.

ABSTRACT

Umanets Artem

Theme: Bee hive monitoring system based on IoT technologies.

Speciality: 123 "Computer Engineering"

Institution: Luhansk Taras Shevchenko National University (LTSNU), 2026.

Master's work of: 107 pages, 48 Fig., 9 Table, 2 adj., 37 source.

A research object is the process of monitoring the condition of beehives using modern information and digital technologies.

The article of research is computerized IoT-oriented bee hive condition monitoring system designed for automated collection, processing and analysis of data on hive functioning parameters.

An aim of work is development of an IoT system for monitoring beehives, which provides automated remote monitoring of their condition in real time.

Job performances. In the course of the master's thesis, an apiary condition monitoring system using IoT technologies was developed and experimentally tested. Based on an analysis of the current state of the beekeeping industry, the main shortcomings of traditional beekeeping methods were identified, in particular, the lack of operational control of microclimatic parameters and the difficulty of timely detection of critical changes in the state of bee colonies.

The architecture of a hardware-software complex was proposed, which provides continuous monitoring of temperature, humidity and mass of hives, taking into account the requirements for measurement accuracy, autonomy and scalability of the system. The choice of the ESP32 microcontroller, sensors and LoRa wireless communication channel as the optimal solution for working in remote apiaries was justified.

The hardware part of the system was implemented and software was developed for collecting, processing and transmitting data using the Arduino IDE environment. Integration with the Blynk cloud platform provided convenient visualization of indicators in real time and automatic generation of notifications in case of deviation of parameters from the specified norms.

Keywords. COMPUTERIZED SYSTEM, BEEKEEPING, BEE HOUSING MONITORING, LORA, ESP32, WIRELESS SENSOR NETWORKS, APARY AUTOMATION, INTERNET OF THINGS (IOT), ENERGY SAVING, TEMPERATURE SENSORS, WEIGHT SENSORS, AUTONOMOUS SYSTEM, REMOTE MONITORING, CLOUD SERVICES.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ	
МОНІТОРИНГУ БДЖОЛИНИХ ВУЛИКІВ	9
1.1. Значення бджільництва та проблеми сучасних пасік	9
1.2. Огляд необхідності врахування різних параметрів в бджолиних вуликах	14
1.3. Огляд існуючих методів моніторингу вуликів	18
1.4. Огляд існуючих рішень для моніторингу бджолиних вуликів	22
Висновки до розділу	35
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ТА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ	
БДЖОЛИНИХ ВУЛИКІВ НА ОСНОВІ ІОТ ТЕХНОЛОГІЙ	37
2.1. Вимоги до системи	37
2.2. Математична модель системи для моніторингу бджолиних вуликів	38
2.3. Вибір апаратних компонентів системи	39
2.4. Вибір середовища програмної розробки	56
2.5. Хмарні сервіси для зберігання та аналізу даних	62
2.6. Розробка алгоритму функціонування системи	66
Висновки до розділу	71
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-	
АПАРATНОЇ СИСТЕМИ	73
3.1. Проєктування та реалізація апаратної частини системи	73
3.1.1. Схема підключення датчиків	77
3.3. Налаштування хмарного сервісу та інтерфейсу користувача	94
3.4. Тестування системи	97
3.4.1. Умови проведення тестування	97
3.4.2. Перевірка стабільності бездротового зв'язку (LoRa)	98
3.4.3. Тестування сенсорів	99
3.4.4. Тестування мобільного інтерфейсу (Blynk)	100
3.4.5. Перевірка автономності передавача	100
3.4.6. Масштабованість системи та перспективи вдосконалення	101

Висновки до розділу	101
ВИСНОВКИ.....	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	104
ДОДАТОК А	108
ДОДАТОК Б	112

ВСТУП

Україна стабільно входить до п'ятірки світових лідерів та посідає перше місце в Європі за обсягами виробництва меду. Бджільництво є не лише важливою експортно-орієнтованою галуззю національної економіки, але й фундаментом продовольчої безпеки держави завдяки запиленню сільськогосподарських культур.

Однак вітчизняні пасічники стикаються з серйозними викликами. По-перше, це високий рівень загибелі бджолосімей під час зимівлі, що зумовлено мінливістю клімату в помірних широтах України (різкі перепади температур, підвищена вологість у вулику). По-друге, масові отруєння бджіл пестицидами під час обробки полів агрохолдингами вимагають від пасічника оперативного реагування та мобільності. Традиційні методи догляду, що вимагають фізичної присутності на пасіці (яка часто віддалена від місця проживання господаря), стають економічно не вигідними та малоефективними.

На ринку існують закордонні системи моніторингу вуликів, проте їх широке впровадження в Україні стримується високою вартістю та складністю сервісного обслуговування. Тому розробка вітчизняної, доступної та енергоефективної системи на основі IoT-технологій («Розумний вулик»), яка здатна працювати в умовах нестабільного покриття мобільної мережі, є надзвичайно актуальним науково-прикладним завданням.

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

Предметом дослідження є комп'ютеризована IoT-орієнтована система моніторингу стану бджолиних вуликів, призначена для автоматизованого збору, оброблення та аналізу даних про параметри функціонування вуликів.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка IoT-системи моніторингу бджолиних вуликів, яка забезпечує автоматизований дистанційний контроль їхнього стану в режимі реального часу.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких основних завдань:

- дослідити сучасні підходи до моніторингу бджолиних вуликів із застосуванням технологій Інтернету речей;
- сформулювати технічні вимоги до системи моніторингу вуликів;
- спроектувати архітектуру IoT-системи, що охоплює сенсорні модулі, мікроконтролери, засоби бездротового зв'язку та хмарні сервіси;
- розробити програмне забезпечення для збору, передавання, зберігання та візуалізації даних про стан бджолиних вуликів;
- виконати тестування розробленої системи в реальних умовах експлуатації та оцінити її стабільність, автономність і ефективність.

У роботі використано методи аналізу та синтезу (для обґрунтування структури системи), схемотехнічного проектування, прототипування, програмування мікроконтролерів, а також статистичні методи обробки результатів експериментальних вимірювань.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні методу комплексного моніторингу стану бджолосім'ї шляхом інтеграції різнорідних даних (мікроклімат та вага) в єдину хмарну екосистему з адаптивним алгоритмом енергозбереження, що дозволяє забезпечити тривалу автономність пристрою в умовах української зимівлі.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено діючий прототип системи, який за вартістю значно доступніший за іноземні аналоги, що робить його привабливим для дрібних та середніх фермерських господарств.
2. Підтверджено технічні характеристики системи: точність вимірювання ваги (похибка до 0,1 %), температури ($\pm 0,5$ °C) та вологості (± 3 %).
3. Забезпечено автономність роботи системи до 3–4 місяців, що повністю покриває критичний період зимівлі бджіл в Україні без необхідності заміни джерел живлення.

У першому розділі здійснено аналіз сучасного стану галузі бджільництва, визначено ключові проблеми, зумовлені використанням традиційних методів

утримання та догляду за бджолами, а також розглянуто наявні підходи до моніторингу пасік із застосуванням IoT-технологій.

Другий розділ присвячено розробці архітектури та алгоритму функціонування системи. У ньому сформульовано вимоги до точності вимірювань, автономності та масштабованості, а також обґрунтовано вибір апаратних і програмних засобів реалізації системи.

У третьому розділі реалізовано апаратну частину системи на основі мікроконтролера ESP32 з інтегрованими сенсорами температури, вологості та ваги, а також розроблено програмне забезпечення у середовищі Arduino IDE для збору, обробки та передавання даних. Систему інтегровано з хмарною платформою Blynk, що забезпечує візуалізацію показників і формування сповіщень для користувача. Проведене комплексне тестування в реальних умовах пасіки підтвердило точність вимірювань (похибка температури $\pm 0,5$ °C, вологості ± 3 %, ваги до 0,1 %), стабільність LoRa-зв'язку та тривалу автономність роботи системи (до 3–4 місяців).

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОНІТОРИНГУ БДЖОЛИНИХ ВУЛИКІВ

1.1. Значення бджільництва та проблеми сучасних пасік

Бджільництво відіграє важливу роль у структурі агропромислового комплексу України, поєднуючи економічну доцільність, екологічну значущість та соціальну стабільність. Україна традиційно входить до числа провідних світових виробників і експортерів натурального меду, а галузь характеризується високою часткою малих та середніх форм господарювання. Високий рівень розвитку цієї галузі обумовлений сприятливими природно-кліматичними умовами, наявністю значних площ медоносних культур та багатовіковими традиціями ведення пасічного господарства.

Таблиця 1.1

Основні показники бджільництва в Україні на 2024 р.

Показник	Значення
Кількість бджолосімей	2,6–2,8 млн
Річне виробництво меду	53–71 тис. тон
Частка домогосподарств у виробництві	≈ 99 %
Місце України у світі за експортом меду	4–5
Обсяг експорту меду (2024 р.)	понад 40 тис. тон
Частка експорту до країн ЄС	65–75 %
Основні ринки збуту	ЄС, США, Канада

Джерела: Державна служба статистики України, FAO, Європейська комісія (DG AGRI)

Продукція бджільництва, зокрема мед, віск, прополіс, пилок та маточне молочко, є цінною сировиною для харчової, фармацевтичної та косметичної промисловості. Експорт українського меду забезпечує стабільні валютні надходження та підвищує конкурентоспроможність аграрного сектору на міжнародному ринку. Крім того, бджільництво є джерелом доходу для малих і

середніх фермерських господарств, особливо у сільських регіонах, сприяючи розвитку локальної економіки та зайнятості населення.

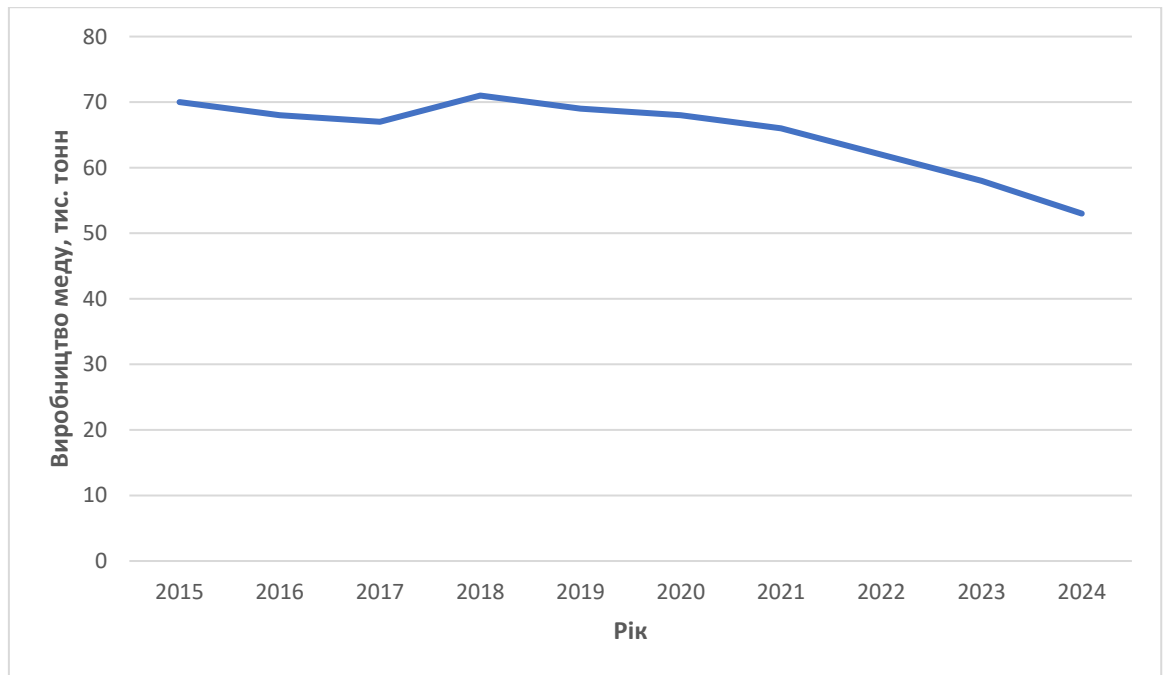


Рис. 1.1. Динаміка виробництва меду в Україні (2015–2024 рр.)

Водночас економічна цінність бджільництва не обмежується лише виробництвом меду. Запилювальна діяльність бджіл забезпечує приріст урожайності сільськогосподарських культур у середньому на 20–40 %, а для окремих культур (соняшник, ріпак, плодови) — до 60 %. За оцінками FAO, економічний ефект від запилення у кілька разів перевищує вартість всієї продукції бджільництва.

Бджоли відіграють ключову роль у збереженні біорізноманіття та стабільності екосистем. Вони забезпечують природне відтворення рослин, підтримують баланс між видами та сприяють збереженню природних ландшафтів. Скорочення чисельності бджолиних сімей може призвести до деградації екосистем, зменшення врожаїв і порушення екологічної рівноваги.

Соціальне значення бджільництва полягає у збереженні традиційного укладу життя, передачі професійних знань між поколіннями та формуванні екологічної культури населення. Для багатьох родин пасіка є не лише джерелом прибутку, а й способом самозайнятості та підвищення рівня життя в сільській місцевості.

Отримані статистичні дані та аналіз динаміки виробництва меду в Україні за період 2015–2024 років (рис. 1.1) свідчать про стійку тенденцію до зниження обсягів виробництва. Незважаючи на важливу роль галузі, українські пасіки зіштовхуються з низкою серйозних викликів та обмежень:

1. Зниження виробництва меду

У 2024 році обсяг виробництва меду в Україні склав приблизно 53,5 тис. тон, що на 7,6 % менше, ніж у попередньому році, що свідчить про тенденцію до зниження виробництва.

2. Висока частка домашнього виробництва та неофіційного ринку

Велика частина меду виробляється господарствами населення та реалізується без офіційної сертифікації, що ускладнює контроль якості, облік виробленої продукції та доступ до міжнародних ринків зі строгими вимогами щодо походження продукції.

3. Вплив війни та логістичні труднощі

Продовження військового конфлікту на сході України негативно вплинуло на доступ до частини пасік, логістичні ланцюги та можливість сезонної роботи. У деяких регіонах пасічники зазнають значних збитків через ризики переміщення техніки та обладнання в умовах воєнних дій.

4. Недостатній рівень автоматизації

Традиційні методи контролю стану вуликів та здоров'я бджолиних сімей залишаються ручними, неефективними та трудомісткими. Це створює ризики пізнього виявлення проблем (хвороби, паразити, екстремальні кліматичні умови), що може призводити до втрат продукції й погіршення стану бджолосімей.

5. Нестача сучасних технологій моніторингу та аналізу даних

Відсутність широкого впровадження цифрових IoT-рішень ускладнює отримання оперативних даних про стан вуликів, що знижує ефективність управління пасіками та адаптації до змінних умов.

Однією з ключових причин скорочення виробництва є несвоєчасне виявлення негативних факторів, що впливають на стан вуликів, зокрема: різкі

коливання температури та вологості, розвиток хвороб, паразитарні ураження, отруєння пестицидами та стресові фактори, пов'язані з кліматичними змінами. Традиційні методи контролю, які базуються переважно на періодичних оглядах пасіки, не забезпечують безперервного спостереження та оперативного реагування на критичні зміни.

У цьому контексті впровадження систем моніторингу бджолиних вуликів на основі IoT-технологій є логічною та обґрунтованою відповіддю на виявлені тенденції. IoT-рішення дозволяють здійснювати безперервний збір даних у реальному часі щодо ключових параметрів мікроклімату вулика (температура, вологість, вага, акустичні характеристики), що створює передумови для раннього виявлення відхилень від оптимальних умов утримання бджолиних сімей.

Таким чином, застосування IoT-моніторингу дає змогу перейти від реактивного до превентивного управління пасікою, зменшити втрати бджолиних сімей, підвищити продуктивність медозбору та стабілізувати виробничі показники галузі. Це особливо актуально в умовах зниження обсягів виробництва меду, зафіксованого статистичними даними, та підтверджує доцільність подальших досліджень у напрямі розробки інтелектуальних систем моніторингу на основі IoT-технологій.

У зв'язку з цим розробка кіберфізичних систем, здатних здійснювати дистанційний контроль параметрів навколишнього середовища та внутрішнього стану бджолиних вуликів, є актуальним і перспективним напрямом підвищення ефективності сучасного бджільництва [15].

Однією з ключових проблем, які можуть бути вирішені за допомогою запропонованої системи, є обмежені можливості оперативного моніторингу стану вуликів [16]. Традиційні підходи до контролю передбачають регулярну фізичну присутність бджоляра на пасіці, що у випадку середніх і великих господарств суттєво ускладнює своєчасне отримання інформації. Як наслідок, критичні ситуації, такі як перегрів або переохолодження вулика, порушення вентиляції чи небажані зміни рівня вологості, виявляються із запізненням.

Зазначені фактори безпосередньо впливають на фізіологічний стан бджолої сім'ї, її продуктивність та рівень виживаності.

Окремої уваги потребує проблема контролю маси вуликів. На практиці зважування зазвичай здійснюється вручну, що не дає змоги фіксувати добову та сезонну динаміку змін. У результаті втрачається важлива інформація щодо інтенсивності медозбору, можливих втрат кормових запасів або несанкціонованого відбору меду. Крім того, відсутність автоматизованого контролю маси унеможливорює точне визначення оптимальних строків відкачування меду та проведення підгодівлі бджолиних сімей.

Ще однією суттєвою проблемою є відсутність централізованого збору, зберігання та аналітичної обробки даних. У більшості випадків облік показників здійснюється у вигляді ручних записів або розрізнених електронних таблиць, що ускладнює виявлення довгострокових тенденцій, прогнозування розвитку ситуації та прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Особливо гостро ця проблема проявляється у великих пасічних господарствах, де кількість вуликів може перевищувати кілька десятків або сотень [21–25].

Додаткові труднощі пов'язані з відсутністю систем раннього попередження про критичні стани бджолиних сімей. Такі явища, як підготовка до роїння, напади хижих комах або розвиток захворювань, часто фіксуються на пізніх стадіях, коли запобігання негативним наслідкам є ускладненим. Водночас більшість таких процесів супроводжується характерними змінами фізичних або поведінкових параметрів, які можуть бути виявлені за допомогою сучасних сенсорних засобів.

Таким чином, саме недостатній рівень моніторингу, відсутність автоматизованого збору та аналізу даних, а також неможливість оперативного реагування на критичні події визначають коло проблем, на вирішення яких спрямована дана робота. Впровадження кіберфізичної системи на основі IoT-технологій дозволить створити ефективний інструмент для їх подолання, що сприятиме підвищенню продуктивності пасік, зменшенню втрат бджолиних сімей та оптимізації трудових витрат бджолярів [26–28].

1.2. Огляд необхідності врахування різних параметрів в бджолиних вуликах

Актуальність задачі контролю стану та управління процесами життєдіяльності бджолиних сімей зумовлена високою трудомісткістю традиційних методів бджільництва, а також сталим скороченням чисельності сільського населення. У сучасних умовах виробництва продуктів харчування дедалі активніше використовуються досягнення науки й інформаційних технологій, спрямовані на зниження фізичних і часових витрат праці. Водночас навколо великих міст сформувалася значна кількість дачних і приміських поселень, у межах яких можливе утримання пасік, що створює додатковий попит на технологічні рішення для дистанційного управління.

Сьогодні у практиці бджільництва застосовуються різні технологічні підходи. Перший ґрунтується на глибокому знанні біології бджіл і високій кваліфікації бджоляра, проте потребує значних витрат часу та постійної фізичної присутності на пасіці. Другий підхід характерний для так званого «дачного бджільництва» або бджільництва вихідного дня, яким займаються мешканці міст, поєднуючи догляд за бджолами з основною професійною діяльністю. Для обох підходів актуальною є проблема нестачі часу та ресурсів для регулярного контролю стану вуликів.

Бджільництво належить до найбільш трудомістких галузей сільського господарства, оскільки потребує постійного спостереження за станом вуликів, поведінкою бджолиних сімей та впливом погодних умов протягом усього року. Самостійне виконання всього комплексу робіт є складним, а залучення найманої праці знижує економічну ефективність господарства. У зв'язку з цим інтеграція інформаційних систем у процеси бджільництва є перспективним напрямом, що дозволяє автоматизувати збір даних, підвищити інформованість бджоляра про стан окремих колоній і спростити управління пасікою.

Необхідність регулярного обстеження значної кількості вуликів, які часто розміщені на великій відстані один від одного, суттєво обмежує можливість масштабування індивідуальних пасік понад 150–200 вуликів. Використання

автоматизованих систем збору та передачі даних дає змогу скоротити кількість фізичних перевірок, що створює умови для розширення пасіки та збільшення обсягів виробництва продуктів бджільництва, зокрема меду, прополісу, перги та воску.

Найбільш ефективною вважається стратегія управління пасікою, заснована на інформаційному моніторингу окремих бджолиних сімей, що дозволяє оптимізувати споживання ресурсів і підвищити продуктивність колоній. Таку стратегію доцільно реалізовувати у вигляді інформаційної системи, яка функціонує за трьома основними етапами: автоматизований збір даних, аналіз і обробка інформації, а також формування управлінських рішень. На першому етапі здійснюється отримання даних із сенсорів, встановлених у вуликах, та з навколишнього середовища. На другому етапі, із застосуванням алгоритмів аналізу даних, математичних моделей і експертних правил, визначаються стан бджолиних сімей і тенденції їхньої активності. На основі результатів аналізу формуються рекомендації або керувальні дії для підвищення ефективності роботи пасіки.

Для реалізації зазначеної стратегії необхідна розробка програмно-апаратних засобів реального часу, які забезпечують безперервний моніторинг бджолиних сімей протягом усього їх життєвого циклу. Такі засоби мають мінімізувати додатковий стрес для бджіл і зменшувати кількість непродуктивних втручань. Інформаційна система при цьому не замінює бджоляра, а виступає інструментом підтримки прийняття рішень. У період зимівлі особливо важливим є автоматичне виявлення загибелі бджолиної сім'ї, оцінка стану розплоду та контролю споживання кормів. У літній період актуальним є виявлення передроєвого стану, втрати матки, загибелі розплоду та інших критичних змін у функціонуванні колонії.

Сучасні системи моніторингу дозволяють безперервно вимірювати низку параметрів, що характеризують стан бджолиних сімей. Одним із ключових є температура всередині вулика, яка реєструється за допомогою температурних датчиків або засобів інфрачервоної візуалізації. Температурний режим є

важливим індикатором фізіологічного стану бджіл, оскільки він впливає на всі біохімічні та біофізичні процеси в їх організмі. Аналіз просторового розподілу температурних полів дозволяє дистанційно оцінювати формування бджолиного клубу та наявність розплоду.

Важливим параметром також є вологість повітря всередині вулика, значення якої змінюється залежно від сезону, часу доби та стану сім'ї. Рівень вологості безпосередньо впливає на якість вирощування розплоду, тривалість життя бджіл і ймовірність виникнення захворювань. Надмірна вологість призводить до погіршення теплового режиму вулика та зниження його теплоізоляційних властивостей, що має бути враховано в алгоритмах аналізу даних.

Окремим інформативним джерелом даних є акустичний моніторинг, який передбачає запис і подальший аналіз звукової картини вулика. За характеристиками шуму можна визначати нормальний стан сім'ї, відсутність матки, нестачу корму або повітря, наявність шкідників чи загибель колонії. Для забезпечення надійності такого аналізу доцільно використовувати спеціалізовані сенсорні пристрої та методи цифрової обробки сигналів.

Додатково в інформаційних системах застосовується контроль маси вулика, який дозволяє оцінювати інтенсивність медозбору, визначати наявність і тривалість взятку, а також готовність меду до відкачування. Такі дані є особливо важливими для кочового бджільництва. Для забезпечення безпеки пасіки використовуються охоронні підсистеми, що включають датчики цілісності, акселерометри, сенсори руху та GPS-модулі для контролю місцезнаходження вуликів.

Перспективним напрямом є також автоматизований підрахунок кількості бджіл, що вилітають і повертаються до вулика, що дозволяє оцінювати продуктивність сімей і своєчасно виявляти ознаки захворювань. Загалом впровадження автоматизованих систем моніторингу в поєднанні з методами збору та аналізу великих обсягів даних сприяє зниженню трудовитрат,

зменшенню собівартості продукції та створює основу для подальших наукових досліджень у сфері бджільництва.

Таблиця 1.2

Ключові параметри моніторингу

Параметр	Пристрої моніторингу	Значення та Користь
Температура	Температурні датчики, інфрачервона візуалізація	Ключовий індикатор фізіологічного стану, дозволяє оцінити формування клубу та наявність розплоду (важливо для зимівлі).
Вологість	Датчики вологості	Впливає на якість розплоду, тривалість життя бджіл та ймовірність захворювань. Надмірна вологість погіршує тепловий режим.
Акустичний моніторинг	Спеціалізовані мікрофони	За характеристиками шуму можна визначити нормальний стан, відсутність матки, нестачу корму, ройовий стан, наявність шкідників або загибель сім'ї.
Маса вулика	Вагові сенсори	Оцінка інтенсивності медозбору, тривалості взятку та готовності меду до відкачування

Параметр	Пристрої моніторингу	Значення та Користь
		(особливо для кочового бджільництва).
Лічильник бджіл	Оптичні/інші сенсори	Оцінка продуктивності сім'ї та виявлення ознак захворювань за інтенсивністю вильоту/повернення.
Охоронні функції	GPS-модулі, акселерометри, датчики руху	Контроль місцезнаходження, цілісності та безпеки вуликів.

1.3. Огляд існуючих методів моніторингу вуликів

Моніторинг стану бджолиних вуликів є прикладною задачею збору та аналізу біометричних і середовищних даних, яка історично реалізовувалася переважно ручними методами, проте з розвитком інформаційних технологій набула ознак кіберфізичних систем. Традиційні підходи до моніторингу базуються на періодичному ручному зборі даних, що включає візуальний огляд вуликів, використання локальних аналогових вимірювальних приладів (термометрів, гігromетрів) та фіксацію результатів у паперових журналах [18]. З позицій теорії інформаційних систем такі методи характеризуються низькою частотою дискретизації, відсутністю автоматизованої валідації даних і високою залежністю від людського фактора. Крім того, необхідність фізичного доступу до вулика призводить до порушення мікроклімату та створення додаткового стресу для бджолиних сімей, а отримані дані не дозволяють реалізувати моніторинг у режимі реального часу [29–30].

Сучасні методи моніторингу ґрунтуються на використанні розподілених сенсорних мереж у межах концепції Internet of Things (IoT). Типова IoT-система моніторингу вуликів складається з рівня збору даних (сенсорні вузли), рівня передачі інформації (бездротові мережі зв'язку) та рівня обробки і зберігання

даних (серверні або хмарні платформи). На рівні сенсорних вузлів застосовуються температурні, вологісні, вагові, акустичні, інфрачервоні та візуальні датчики, інтегровані з мікроконтролерними платформами. Температурні та гігromетричні сенсори забезпечують безперервний контроль мікрокліматичних параметрів, які є критичними для стабільного функціонування бджолої сім'ї. Вагові датчики дозволяють отримувати часові ряди маси вулика, що використовується для оцінки інтенсивності медозбору та виявлення аномальних втрат маси. Акустичні сенсори формують цифрові сигнали, які піддаються спектральному аналізу з метою ідентифікації стресових або патологічних станів колонії.

Передача даних від сенсорних вузлів до центрального сховища реалізується за допомогою бездротових технологій зв'язку, зокрема Wi-Fi, GSM та LPWAN-рішень, таких як LoRaWAN. Використання LPWAN-мереж є доцільним для віддалених пасік завдяки їх низькому енергоспоживанню та великій дальності передачі. Отримані дані надходять до хмарних або локальних серверів, де здійснюється їх зберігання, попередня обробка та аналітичний аналіз. Для роботи з великими обсягами телеметричної інформації застосовуються бази даних часових рядів та платформи потокової обробки даних. На цьому рівні можливе впровадження алгоритмів машинного навчання для класифікації станів вуликів, виявлення аномалій і прогнозування потенційних ризиків [26–28].

Окремі комерційні рішення демонструють практичну реалізацію зазначених підходів. Наприклад, система HiveGenius використовує багатоканальний сенсорний модуль із передачею даних через мережу LoRaWAN, що забезпечує масштабованість і придатність до використання у віддалених локаціях. Система ApisProtect спеціалізується на обробці акустичних даних, застосовуючи алгоритми цифрової обробки сигналів і машинного навчання для діагностики стану бджолиних сімей.

Дані з датчиків, встановлених у вуликах, передаються через бездротові мережі (Wi-Fi, LoRaWAN, GSM) на хмарні платформи для зберігання та аналізу. Бджоляр отримує інформацію через мобільні або веб-додатки (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3

Принципи та компоненти

Тип датчика	Параметр моніторингу	Користь для бджоляра	Приклади
Температурні/Гігрометричні	Мікроклімат усередині вулика	Виявлення аномалій, пов'язаних із хворобами або перегріванням.	HiveGenius (Німеччина)
Вагові	Зміна маси вулика	Оцінка кількості меду, інтенсивності медозбору, виявлення крадіжок.	HiveGenius
Акустичні	Звукові вібрації бджіл	Виявлення хвороб, ройового стану, відсутності матки, стресу.	ApisProtect (Ірландія)
Інфрачервоні/Камери	Активність біля льотка	Показник здоров'я, продуктивності та виявлення хижаків (наприклад,	BeeSecure (Франція)

Тип датчика	Параметр моніторингу	Користь для бджоляра	Приклади
		азійських шершнів).	

Незважаючи на технічні переваги, IoT-рішення для моніторингу вуликів мають низку обмежень. До них належать висока вартість апаратних компонентів, потреба в енергоефективному живленні сенсорних вузлів, складність масштабування та залежність від стабільності мережевої інфраструктури. Крім того, експлуатація таких систем потребує наявності базових знань у галузі вбудованих систем, мережевих технологій та програмної інженерії, що обмежує їх масове впровадження [36–40].

Таблиця 1.4

Порівняльний аналіз традиційних методів та IoT-системи

Критерій	Традиційні методи	IoT-системи
Точність та об'єктивність	Низька, залежить від бджоляра	Висока, на основі безперервних даних
Оперативність	Низька, інформація із запізненням	Висока, дані в реальному часі (проактивний підхід)
Глибина аналітики	Обмежена	Глибока, з прогнозуванням ризиків (AI/ML)
Вплив на бджіл	Високий стрес через огляд	Мінімальний стрес, неінвазивний моніторинг
Масштабування	Обмежене	Високе, дозволяє керувати віддаленими пасіками

Порівняльний аналіз ручних і автоматизованих методів моніторингу з позицій інформаційних технологій свідчить про перевагу IoT-підходів за

показниками точності, частоти оновлення даних та можливостей аналітичної обробки. Автоматизований збір даних дозволяє реалізувати проактивні стратегії управління, за яких система виявляє потенційні проблеми на ранніх етапах, наприклад, за допомогою аналізу трендів температури або зниження активності бджіл. Водночас традиційні методи можуть використовуватися як резервний або верифікаційний інструмент у гібридних системах моніторингу [41].

Подальший розвиток методів моніторингу вуликів пов'язаний з інтеграцією IoT-архітектур із технологіями штучного інтелекту та комп'ютерного зору. Аналіз відеопотоків із камер, встановлених біля льотків, дозволяє автоматично класифікувати поведінкові патерни бджіл і виявляти зовнішні загрози. Нейромережеві моделі забезпечують прогнозування таких подій, як роїння або розвиток захворювань, на основі багатовимірних часових рядів. Додатково перспективним є поєднання даних із вуликів із супутниковою та геоінформаційною інформацією для оптимізації кочового бджільництва.

Таким чином, сучасні методи моніторингу бджолиних вуликів можна розглядати як складні інформаційні системи реального часу, що поєднують апаратні сенсорні мережі, телекомунікаційні технології та інтелектуальні алгоритми обробки даних. Подальші дослідження у цьому напрямі мають бути спрямовані на підвищення надійності, масштабованості та доступності таких систем, а також на розробку стандартів безпеки й захисту даних [42–47].

1.4. Огляд існуючих рішень для моніторингу бджолиних вуликів

Системи моніторингу бджолиних вуликів ґрунтуються на інтеграції сенсорних технологій, концепції Інтернету речей (Internet of Things, IoT) та методів обробки даних у режимі реального часу. Застосування таких систем забезпечує безперервний контроль ключових фізичних і акустичних параметрів, зокрема температури, вологості, маси та звукових характеристик вулика, які є визначальними індикаторами фізіологічного стану бджолосім'ї та її продуктивності. У цьому підрозділі проаналізовано сучасні програмно-апаратні рішення для моніторингу вуликів, їх функціональні можливості та специфіку практичного використання в галузі бджільництва.

Одним із найбільш поширених комерційних рішень у цій сфері є система BroodMinder, що реалізує підхід дистанційного збору даних за допомогою бездротових сенсорів для вимірювання температури, вологості та ваги вуликів. Компоненти системи BroodMinder наведено на рисунку 1.2. Характерною особливістю даного рішення є простота інсталяції та експлуатації, що досягається завдяки використанню технології Bluetooth Low Energy (BLE) для передачі даних на мобільний застосунок або серверну платформу. Система оснащена зручним користувацьким інтерфейсом і вбудованими аналітичними інструментами, які дають змогу візуалізувати динаміку параметрів та оперативно виявляти відхилення від нормального стану вулика. Водночас до суттєвих обмежень BroodMinder належить невеликий радіус дії BLE-з'єднання, що знижує ефективність застосування системи на великих пасіках, а також залежність від наявності мобільного пристрою для збору та передачі даних, оскільки автоматична передача інформації на значні відстані не передбачена [86–87].

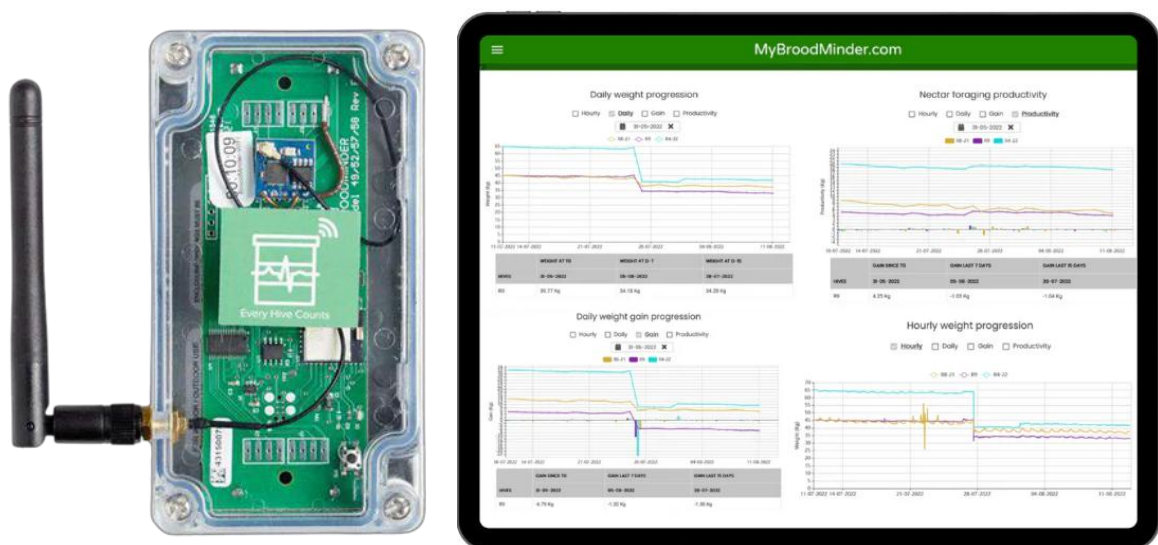


Рис. 1.2. Компоненти системи BroodMinder

Ще одним поширеним комерційним рішенням є система Arnia, яка позиціонується як комплексна платформа для віддаленого моніторингу стану бджолиних вуликів. Дане рішення поєднує багатоканальну сенсорну підсистему, що забезпечує вимірювання температури, відносної вологості, маси вулика, рівня активності бджіл, а також акустичних параметрів внутрішнього середовища. Використання стільникового GSM-зв'язку дає змогу здійснювати

безпосередню передачу зібраних даних на центральний сервер без необхідності локального шлюзу або проміжного з'єднання з мобільними пристроями.



Рис. 1.3. Система віддаленого моніторингу вулика «Arnia Hive Scale»

Однією з ключових функціональних переваг системи Arnia є реалізація алгоритмів аналізу акустичних сигналів у вулику, що дозволяє своєчасно ідентифікувати процеси роїння або ознаки погіршення стану бджолосім'ї на ранніх етапах їх розвитку. Водночас до обмежень даного підходу належать висока вартість апаратного забезпечення, а також необхідність регулярної сплати абонентської плати за використання каналів стільникового зв'язку, що може суттєво обмежувати доступність системи для малих і середніх пасік.

Система Beehive Monitoring є ще одним прикладом IoT-рішення для контролю стану бджолиних колоній, у якому застосовуються датчики температури, вологості, маси та акустичного фону. Передача даних здійснюється за допомогою GSM- або Wi-Fi-з'єднання на серверну платформу, де інформація обробляється в режимі реального часу. Визначальною перевагою Beehive Monitoring є наявність механізмів автоматизованого сповіщення, які інформують користувача про критичні відхилення контрольованих параметрів. Це забезпечує оперативне реагування пасічника на потенційні загрози для бджолиних сімей. Разом з тим, вартість впровадження та експлуатації даного рішення залишається відносно високою, особливо у випадках розміщення пасік у регіонах із нестабільним або слабким покриттям мобільних мереж.

У сегменті рішень на основі технології LoRaWAN широкого поширення набула система HiveMind, яка забезпечує моніторинг бджолиних вуликів у тому числі в умовах віддалених або важкодоступних територій. Застосування низькоенергетичної мережі LoRaWAN зумовлює високу енергоефективність системи та можливість передавання даних на значні відстані без потреби у постійному підключенні до мережі Інтернет. Платформа HiveMind здійснює збір інформації щодо температури, вологості, маси вулика та рівня активності бджіл, після чого дані передаються на серверну частину через базову станцію LoRaWAN. Водночас суттєвим обмеженням цього рішення є необхідність розгортання власної базової станції або підключення до вже існуючої LoRaWAN-інфраструктури, що може потребувати додаткових фінансових витрат і спеціалізованих технічних компетенцій [79–85].

Серед систем із відкритою архітектурою доцільно виокремити HiveMonitor, який реалізований на основі відкритого програмного забезпечення та апаратних платформ Raspberry Pi або ESP32. Дане рішення надає можливість самостійного проєктування IoT-системи для моніторингу стану бджолиних вуликів із використанням датчиків температури, вологості, маси та акустичних характеристик. Ключовою перевагою HiveMonitor є висока гнучкість і можливість адаптації функціоналу до специфіки конкретної пасіки. Разом із тим, впровадження та експлуатація такої системи передбачає наявність ґрунтовних технічних знань, зокрема у сфері електроніки та програмування, що може суттєво обмежувати її використання широким колом практикуючих пасічників.

Ще одним прикладом відкритого проєкту є OpenHive, який пропонує комплекс апаратних і програмних компонентів для побудови індивідуалізованої системи моніторингу бджолиних сімей. Платформа підтримує передачу даних як через Wi-Fi, так і через LoRaWAN, що забезпечує гнучкість вибору комунікаційної технології залежно від умов експлуатації та потреб користувача. Суттєвою перевагою OpenHive є наявність активної спільноти розробників, яка сприяє регулярному оновленню та вдосконаленню функціональних можливостей системи. Водночас, подібно до HiveMonitor, ефективно

використання OpenHive потребує значних часових витрат на налаштування та відповідного рівня технічної підготовки користувача.

Система Veebot була розроблена молодю болгарською стартап-командою Pollenity у 2013 році (рис. 1.4) та є одним із ранніх прикладів застосування сенсорних технологій для діагностики стану бджолиних сімей. Пристрій встановлюється на одну з центральних рамок вулика та здійснює періодичний збір даних про зміну температури й вологості внутрішнього середовища, а також виконує акустичний аналіз, який проводиться з інтервалом один раз на годину. Отримана інформація агрегується у звітні пакети та передається до хмарного середовища тричі на добу. Живлення системи забезпечується автономним акумулятором із тривалістю роботи в межах 3–6 місяців.



Рис. 1.4. Діагностична станція Veebot

Агреговані дані передаються бездротовими каналами зв'язку, при цьому обсяг одного пакета становить 8 байт, з яких 6 байт відводиться для параметрів акустичного сигналу, а по 1 байту — для значень температури та вологості. Передача інформації здійснюється з використанням протоколу Zigbee, який забезпечує енергоефективну комунікацію на малих і середніх відстанях.

Система Veebot є показовим прикладом рішення для аналізу базових параметрів стану бджолиних сімей завдяки можливості дистанційного контролю та простоті інтеграції у конструкцію вулика. Усі зібрані дані відображаються у спеціалізованому програмному застосунку з доступом через персональний обліковий запис користувача. Водночас система має низку обмежень. Зокрема, моніторинг стану вулика можливий лише в межах локальної зони покриття радіоканалу, яка не перевищує 150 м. Використання протоколу Zigbee ускладнює застосування системи на пасіках, розташованих у відкритій місцевості під час

періоду запилення, або потребує розгортання додаткових вузлів мережі, що істотно підвищує собівартість рішення. Крім того, система оснащена лише одним датчиком температури та вологості, який встановлюється на одну рамку, що є недостатнім для коректного моніторингу великих вуликів із неоднорідним мікрокліматом. Вартість однієї діагностичної станції Veebot становить близько 189 доларів США [9].

Одним із найбільш відомих сучасних рішень у сфері цифрового бджільництва є система HiveGenie, яка реалізує комплексний підхід до моніторингу стану бджолиних вуликів на основі сенсорних та мережевих технологій. Платформа забезпечує збір і аналіз даних із датчиків температури, вологості, маси вулика, а також використовує GPS-модуль для геопросторового контролю розміщення пасіки. Зібрана інформація передається на хмарну інфраструктуру, де користувачі мають можливість здійснювати її перегляд та аналіз у режимі реального часу за допомогою мобільного застосунку. Додатковою функціональною перевагою HiveGenie є інтеграція сервісів прогнозування погодних умов, що сприяє підвищенню ефективності планування догляду за бджолиними сім'ями та оптимізації пасічних робіт. Загалом система є показовим прикладом практичного впровадження концепції Інтернету речей у галузі бджільництва, орієнтованого на автоматизацію процесів і підвищення зручності експлуатації [12].



Рис. 1.5. Система HiveGenie

Апаратна частина системи HiveGenie базується на мікроконтролері ESP32, який здійснює попередню обробку даних, отриманих із датчиків температури (DS18B20), відносної вологості (DHT22), ваги (модуль HX711), а також із GPS-модуля. Програмне забезпечення включає хмарну платформу з серверною логікою та мобільний застосунок із інтуїтивно зрозумілим користувацьким інтерфейсом, що забезпечує візуалізацію поточних показників і прогнозів погодних умов. На рисунку 1.6 наведено приклад інтерфейсу мобільного застосунку HiveGenie, який дає змогу пасічникам аналізувати графіки зміни температури та маси вулика в динаміці. Система підтримує передачу даних через канали Wi-Fi та 4G, однак її ефективне функціонування залежить від наявності стабільного доступу до мережі Інтернет, що може становити певне обмеження під час експлуатації у віддалених або слабо покритих регіонах [20].

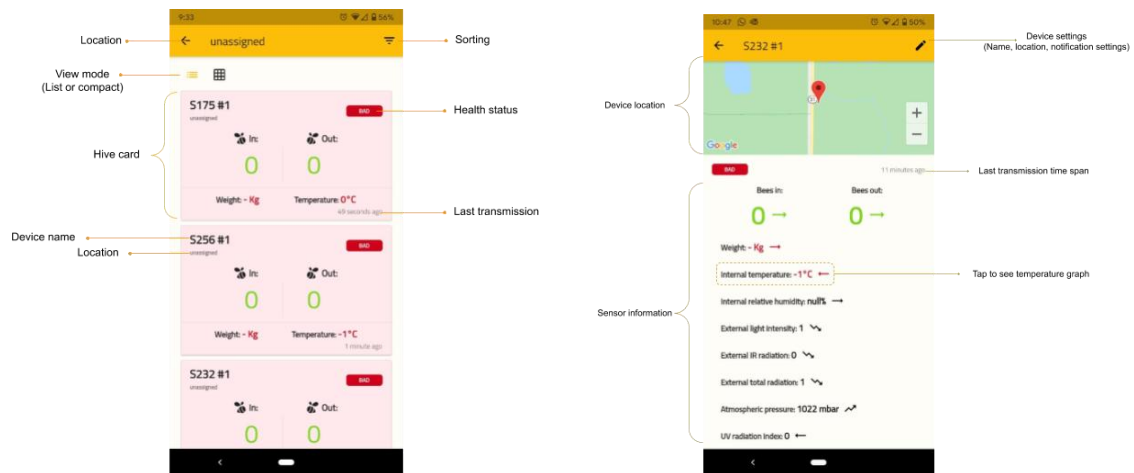


Рис. 1.6. Інтерфейс мобільного застосунку HiveGenie

Ще одним відомим комерційним рішенням у сфері цифрового бджільництва є система 3Bee Hive-tech, розроблена в Італії та орієнтована на комплексний моніторинг стану бджолиних сімей. Апаратна частина платформи побудована на мікроконтролері STM32 і включає набір сенсорів для вимірювання температури, відносної вологості, маси вулика та акустичних характеристик внутрішнього середовища. Програмне забезпечення системи інтегрує алгоритми машинного навчання для аналізу звукових патернів, що дає змогу автоматично ідентифікувати аномальні стани, зокрема втрату матки або порушення нормальної активності колонії. Передача зібраних даних здійснюється через стільникові мережі на веб-платформу, де користувачам

надається розширена аналітика та рекомендації щодо подальших дій з утримання вуликів. Окрему практичну цінність має функція контролю маси вулика, яка дозволяє оцінювати динаміку медозбору та загальну продуктивність бджолоосім'ї [13]. Інтерфейс веб-платформи 3Bee Hive-tech, представлений на рисунку 1.7, відображає результати аналітичної обробки даних у зручній для сприйняття формі. Використання мобільних мереж забезпечує надійну передачу інформації, однак водночас зумовлює зростання експлуатаційних витрат, пов'язаних із необхідністю використання SIM-карт [13].



Рис. 1.7. Інтерфейс веб-платформи 3Bee Hive-tech

Система SolutionBee представляє собою спрощене та економічно доступне рішення для базового моніторингу бджолиних вуликів. Апаратна реалізація ґрунтується на мікроконтролері Arduino Uno з підключеними датчиками маси (HX711) та температури (DS18B20). Програмне забезпечення обмежується функціоналом мобільного застосунку, який відображає основні контрольовані параметри в режимі реального часу (рис. 1.3). Передача даних у системі здійснюється за допомогою бездротових технологій Bluetooth та Wi-Fi, що робить рішення придатним для використання на невеликих пасіках, однак істотно обмежує дальність і масштабованість зв'язку. Загалом SolutionBee можна розглядати як приклад бюджетної IoT-системи, орієнтованої на мінімальні

витрати та простоту експлуатації без потреби у складному технічному обслуговуванні [14].



Рис. 1.8. Інтерфейс мобільного застосунку SolutionBee

Функціональність системи SolutionBee зосереджена на контролі маси вулика та температурного режиму з подальшою інтеграцією з мобільним застосунком, який забезпечує інформування бджолярів про критичні відхилення контрольованих параметрів. Такий підхід дає змогу своєчасно реагувати на потенційні загрози для бджолиної сім'ї без застосування складних аналітичних механізмів. Завдяки простоті архітектури та відносно низькій вартості, SolutionBee є доцільним варіантом для пасічників, які орієнтуються на базовий моніторинг і шукають доступні за ціною рішення для практичного використання [4].

Система Beehive Monitoring System являє собою модульний програмно-апаратний комплекс, який передбачає можливість гнучкого вибору сенсорних модулів залежно від потреб користувача. До складу системи можуть входити датчики температури, відносної вологості, маси вулика та акустичних параметрів. Апаратна платформа реалізована на базі мікроконтролера ESP32 з підтримкою бездротових технологій Wi-Fi та LoRa, що розширює можливості передачі даних у різних умовах експлуатації. Програмне забезпечення включає веб-платформу з відкритим програмним інтерфейсом (API), яка забезпечує інтеграцію з зовнішніми інформаційними системами та сервісами. На рисунку 1.9 наведено приклад інтерфейсу веб-платформи Beehive Monitoring, де відображаються графіки динаміки параметрів та система сповіщень. Застосування технології LoRa забезпечує передачу даних на значні відстані, що є суттєвою перевагою для моніторингу пасік, розташованих у віддалених або слабо інфраструктурно забезпечених районах [15].



Рис. 1.9. Інтерфейс веб-платформи Beehive Monitoring

У таблиці 1.5 наведено порівняльний аналіз основних технічних та функціональних характеристик розглянутих систем моніторингу бджолиних вуликів.

Таблиця 1.5

**Порівняльна характеристика існуючих систем моніторингу
бджолиних вуликів**

Назва системи	Контрольовані параметри	Технології передавання даних	Інтерфейс користувача	Ключові функціональні особливості
HiveGenie	Температура, вологість, маса вулика, геолокація (GPS)	Wi-Fi, 4G	Мобільний застосунок, веб-інтерфейс	Інтеграція IoT, хмарна платформа, прогнозування погодних умов
3Bee Hive-tech	Температура, вологість, маса вулика, акустичні параметри	Стільникові мережі	Веб-платформа, мобільний застосунок	Аналіз звукових патернів, алгоритми машинного навчання, рекомендаційна система

Назва системи	Контрольовані параметри	Технології передавання даних	Інтерфейс користувача	Ключові функціональні особливості
SolutionBee	Температура, маса вулика	Bluetooth, Wi-Fi	Мобільний застосунок	Простота реалізації, низька вартість, базовий моніторинг
Beehive Monitoring System	Температура, вологість, маса вулика, акустичні параметри	Wi-Fi, LoRa	Веб-платформа, відкритий API	Модульна архітектура, масштабованість, інтеграція з іншими системами

У таблиці 1.6 наведено порівняльну характеристику програмно-апаратних комплексів за основними характеристиками моніторингу вуликів.

Таблиця 1.6

Порівняльна характеристика програмно-апаратних комплексів моніторингу бджолиних вуликів

Назва комплексу	Обчислювальна платформа (мікроконтролер)	Сенсорні модулі	Програмне забезпечення	Технології передавання даних	Основні переваги	Основні обмеження
HiveGenie	ESP32	Температура, відносна вологість, маса вулика, GPS	Мобільний застосунок, веб-платформа	Wi-Fi, 4G	Інтеграція IoT, прогнозування погодних умов, хмарна аналітика	Висока вартість впровадження та експлуатації
3Bee Hive-tech	STM32	Температура, відносна вологість, маса вулика,	Веб-платформа, мобільний застосунок	Стільникові мережі	Інтелектуальний аналіз звукових сигналів, рекомендації	Додаткові витрати на SIM-карти та мобільний трафік

Назва комплексу	Обчислювальна платформа (мікроконтролер)	Сенсорні модулі	Програми забезпечення	Технології передавання даних	Основні переваги	Основні обмеження
		акустичні параметри	ок, алгоритми машинного навчання		ійна система	
Solution Bee	Arduino Uno	Температура, маса вулика	Мобільний застосунок	Bluetooth, Wi-Fi	Економічність, простота реалізації та обслуговування	Обмежена дальність і масштабованість зв'язку
Beehive Monitoring System	ESP32	Температура, відносна вологість, маса вулика, акустичні параметри	Веб-платформа, відкритий API	Wi-Fi, LoRa	Модульна архітектура, велика дальність передавання даних	Підвищена складність налаштування та інтеграції API

Узагальнення результатів проведеного огляду свідчить, що сучасні системи моніторингу бджолиних вуликів характеризуються широким спектром функціональних можливостей, однак рівень їх практичної ефективності значною мірою визначається відповідністю конкретним умовам експлуатації. До ключових чинників належать масштаб бджільницького господарства, фінансові можливості користувача та технічні вимоги до системи. Зокрема, рішення на кшталт HiveGenie та 3Bee Hive-tech є доцільними для великих комерційних пасік завдяки розширеному функціоналу та аналітичним можливостям, тоді як SolutionBee більшою мірою орієнтована на малі господарства з обмеженим бюджетом. Водночас більшість проаналізованих систем потребують стабільного

доступу до мережі Інтернет, що може суттєво ускладнювати їх застосування в сільській місцевості України. Таким чином, під час проєктування власної системи моніторингу доцільно враховувати локальні умови експлуатації, інфраструктурні обмеження та економічну доцільність упровадження [11].

Розглянуті програмно-апаратні комплекси демонструють стійку тенденцію до інтеграції концепції Інтернету речей, що забезпечує безперервний збір даних у режимі реального часу та підтримку процесу прийняття обґрунтованих управлінських рішень у бджільництві. Разом із тим значна частина таких рішень орієнтована передусім на західні ринки, що може ускладнювати їх адаптацію до специфічних умов українського аграрного сектору. Зокрема, висока вартість апаратного забезпечення та сервісної підписки часто є економічно недоцільною для невеликих пасік. Крім того, існуючі системи не завжди враховують особливості місцевих кліматичних умов, зокрема різкі коливання температури та підвищену вологість, характерні для більшості регіонів України [13].

Для формування обґрунтованих підходів до подальших досліджень доцільно враховувати не лише комерційні продукти, але й результати наукових розробок. Так, система Terezi реалізує мультисенсорну платформу, що об'єднує датчики температури, вологості, маси вулика та концентрації CO₂. Її апробація в реальних умовах експлуатації продемонструвала високу точність виявлення змін функціонального стану бджолиних сімей, що робить подібні підходи перспективною основою для створення доступних і адаптованих до українських умов систем моніторингу [12]. Аналогічно, платформа ApisProtect, яка використовує сенсори для контролю активності бджіл, підтверджує можливість отримання інформативних показників навіть за рахунок застосування відносно простих датчиків [18].

Загальний аналіз існуючих рішень засвідчує, що більшість систем спрямовані на автоматизацію процесів збору та обробки даних з метою мінімізації впливу людського фактора. Водночас їх ефективність значною мірою залежить від обґрунтованого вибору параметрів моніторингу та рівня адаптації до локальних умов функціонування. У наступних підрозділах буде здійснено

детальний аналіз технічних засобів, параметрів моніторингу та порівняльну оцінку програмно-апаратних комплексів з метою визначення оптимальних підходів до розробки власної системи моніторингу бджолиних вуликів.

Висновки до розділу

Дослідження актуальних підходів до моніторингу бджолиних вуликів дало змогу визначити основні виклики, з якими стикається бджільництво у ХХІ столітті. Значне скорочення чисельності бджіл у світі, зумовлене кліматичними змінами, застосуванням агрохімікатів і поширенням паразитарних захворювань, актуалізує потребу у впровадженні інноваційних рішень для забезпечення сталого розвитку галузі. Традиційні методи контролю стану вуликів, зокрема візуальні огляди та використання аналогових засобів вимірювання, характеризуються низкою обмежень, таких як суб'єктивність оцінок, значні трудові витрати та відсутність можливості отримання оперативних даних. У сучасних умовах погіршення стану бджолиних сімей і зростання екологічних загроз це суттєво знижує ефективність таких підходів.

Перспективною альтернативою є сучасні IoT-системи, що базуються на застосуванні цифрових датчиків, бездротових каналів зв'язку та хмарних сервісів [19–20]. Такі рішення забезпечують автоматизований процес збору, передавання та обробки даних, що дозволяє бджолярам своєчасно реагувати на зміни у вуликах, здійснювати прогнозування потенційних ризиків і підвищувати ефективність виробничої діяльності. З огляду на специфіку українських реалій, доцільним є використання енергоощадних систем, здатних функціонувати за відсутності стабільного доступу до мережі Інтернет, зокрема на основі технології LoRa [10]. Хоча комерційні платформи, такі як HiveGenius чи ApisProtect, демонструють високу результативність у великих пасічних господарствах, їхня висока вартість обмежує можливості впровадження на малих і середніх пасіках.

Результати порівняльного аналізу IoT-рішень свідчать, що вибір конкретної технології визначається масштабами господарства, фінансовими можливостями та функціональними вимогами користувача. Бюджетні рішення на базі мікроконтролерів Arduino або ESP32 є доцільними для невеликих пасік і

ентузіастів, тоді як комплексні системи «під ключ» більше відповідають потребам великих або кочових пасік. Водночас важливими критеріями залишаються енергоефективність обладнання та його екологічна безпечність, що набуває особливої актуальності в контексті концепції сталого розвитку.

Разом із тим, впровадження IoT-технологій у бджільництві супроводжується низкою проблем, серед яких висока початкова вартість технічних засобів, потреба у кваліфікованому обслуговуванні, залежність від телекомунікаційної інфраструктури та етичні аспекти, пов'язані з обробкою і використанням даних. Подальший розвиток цього напрямку потребує зниження вартості компонентів, створення інтуїтивно зрозумілих користувацьких інтерфейсів і активного залучення бджолярів до процесу адаптації нових технологій шляхом освітніх і навчальних програм.

Загалом, системи моніторингу на основі IoT відкривають нові перспективи для розвитку бджільництва, переводячи його з традиційного ремесла у площину високоточної науково обґрунтованої діяльності [1–6]. Вони сприяють зменшенню втрат бджолиних сімей і водночас відіграють важливу роль у збереженні бджіл як ключового елемента екосистеми, що має вирішальне значення для продовольчої безпеки та протидії кліматичним змінам.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ТА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ БДЖОЛИНИХ ВУЛИКІВ НА ОСНОВІ ІОТ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1. Вимоги до системи

Проектування системи моніторингу бджолиних вуликів передбачає врахування комплексу ключових вимог, що визначають її ефективне функціонування в різних умовах експлуатації. Насамперед система повинна гарантувати високу точність вимірювання основних параметрів мікроклімату. Зокрема, допустима похибка вимірювання температури не має перевищувати $\pm 0,5$ °C, оскільки навіть незначні відхилення можуть свідчити про порушення теплового балансу у вулику, що часто є індикатором захворювань або стресового стану бджолиної сім'ї. Аналогічно, контроль вологості повинен здійснюватися з точністю в межах ± 3 %, аби запобігти хибним сигналам щодо утворення конденсату, який створює сприятливі умови для розвитку грибкових уражень.

Важливе значення має енергоощадність системи, особливо у випадку її використання на пасіках, розташованих у важкодоступних або віддалених місцевостях. Елементна база має забезпечувати автономну роботу від джерел живлення протягом щонайменше 6–12 місяців без необхідності обслуговування, що досягається шляхом застосування режимів зниженого енергоспоживання, зокрема циклічного «сну» датчиків та оптимізації періодичності передавання даних. Так, технології на основі LoRaWAN дозволяють здійснювати обмін інформацією на відстанях до 15 км із мінімальними витратами енергії завдяки короткочасним сеансам зв'язку.

Не менш важливою характеристикою є масштабованість системи, яка повинна забезпечувати можливість об'єднання в єдину мережу понад 100 вуликів із централізованим керуванням і збором даних. Такий підхід є особливо актуальним для великих пасік або об'єднань бджолярів, де необхідний узагальнений аналіз показників із різних точок. Водночас система має відзначатися високою надійністю: апаратні засоби повинні стабільно функціонувати за екстремальних температурних режимів — від -20 °C у зимовий період до $+50$ °C влітку — а також за умов підвищеної вологості.

Застосування герметичних корпусів для сенсорів і захисних покриттів для електронних компонентів дозволяє зменшити ризик корозії та механічних пошкоджень.

Окрім технічних характеристик, суттєве значення має зручність інтеграції розробленої системи з наявною інфраструктурою пасік. Користувацькі інтерфейси у вигляді вебплатформ або мобільних застосунків повинні бути зрозумілими та доступними для користувачів без спеціальної технічної підготовки. Зокрема, реалізація автоматизованих сповіщень про виявлені аномалії у форматі SMS або push-повідомлень забезпечує своєчасне реагування на потенційні проблеми без потреби у детальному аналізі первинних даних.

2.2. Математична модель 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;

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

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

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

Де:

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

$\epsilon_{i,j}(t) \sim N(0, \sigma_j^2)$ – 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:

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

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 вулика, які записуються до бази, виразимо наступним чином:

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

Визначення 1.7. 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 проєктуванні системи моніторингу бджолиних вуликів одним із ключових аспектів є обґрунтований вибір апаратних компонентів, оскільки від цього безпосередньо залежить функціональність, ефективність та надійність системи. Для забезпечення комплексного контролю параметрів середовища, таких як температура, вологість, маса вулика та інші, необхідно створити платформу, здатну до стабільного збору, обробки та передачі даних у режимі реального часу.

Апаратна архітектура системи будується на базі взаємопов'язаних компонентів, які забезпечують точність вимірювань, надійність передачі даних та автономність роботи. Основні критерії при виборі складових включають енергоефективність, стійкість до різноманітних умов експлуатації та адаптивність до різних сценаріїв використання – від пасік у містах із стабільним доступом до Інтернету до віддалених локацій із обмеженою інфраструктурою. До складу системи входять: мікроконтролер або одноплатний комп'ютер для обробки даних, набір сенсорів для фіксації ключових параметрів середовища,

модулі бездротового зв'язку та джерела живлення, оптимізовані для тривалої автономної роботи. Кожен компонент підбирається таким чином, щоб забезпечити безперебійну роботу системи навіть за екстремальних кліматичних умов, мінімізувати втручання людини та максимізувати корисність зібраної інформації для оперативного прийняття рішень.

Особливу увагу слід приділити вибору апаратної платформи, яка виконуватиме роль ядра системи моніторингу. Ефективність збору, обробки та передачі даних значною мірою визначається характеристиками обраного контролера чи комп'ютера. Для IoT-рішень зазвичай застосовують мікроконтролери або одноплатні комп'ютери, тому критеріями їх порівняння є продуктивність, енергоспоживання, надійність та можливість інтеграції з іншими компонентами системи. У результаті аналізу доступних апаратних платформ обирається оптимальна конфігурація, що забезпечує реалізацію високоефективної кіберфізичної системи моніторингу бджолиних вуликів.

Arduino є однією з найпопулярніших платформ для розробки електронних проектів та прототипів. Вона характеризується широким набором доступних бібліотек і модулів для роботи з різними сенсорами, що спрощує інтеграцію периферійних пристроїв.



Рис. 2.1. Види Arduino

Однак Arduino не має вбудованих можливостей для бездротового зв'язку, тому для підключення до мереж Wi-Fi або Bluetooth необхідно використовувати додаткові модулі, такі як ESP8266 або HC-05. Це ускладнює апаратну архітектуру системи, знижує її компактність та енергоефективність порівняно з іншими платформами.

Raspberry Pi – це одноплатний комп'ютер із високою обчислювальною потужністю, що дозволяє запускати повноцінні операційні системи (наприклад, Linux) та реалізовувати складніші функціональні можливості, включно з обробкою й зберіганням великих обсягів даних. Незважаючи на це, його значні розміри, висока вартість та підвищене енергоспоживання обмежують застосування в автономних системах моніторингу на віддалених пасіках без постійного джерела живлення.

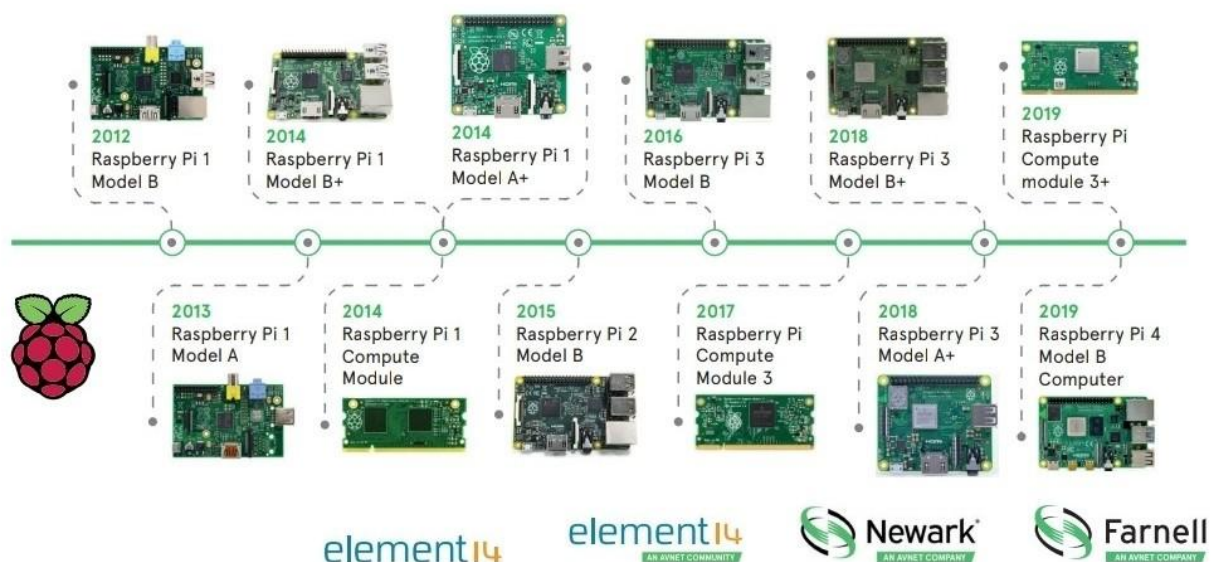


Рис. 2.2. Види Raspberry Pi

ESP8266 є економічним та менш потужним мікроконтролером у порівнянні з ESP32, однак володіє вбудованим модулем Wi-Fi, що робить його зручним для простих IoT-проектів. Основними перевагами є доступність та легкість інтеграції. Водночас відсутність Bluetooth та обмежена обчислювальна потужність знижують ефективність ESP8266 у складних системах, що потребують одночасної обробки даних із численних сенсорів.

ESP32 є однією з найпопулярніших платформ для розробки IoT-систем завдяки двоядерному процесору, що забезпечує високопродуктивну паралельну

обробку даних. Вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth дозволяють організувати бездротову передачу даних без необхідності додаткових компонентів, забезпечуючи інтеграцію з віддаленими серверами та мобільними додатками. Низьке енергоспоживання робить ESP32 оптимальним для автономних систем, що працюють від акумуляторів. Крім того, наявність різноманітних периферійних інтерфейсів (I2C, SPI, UART) дозволяє підключати широкий спектр сенсорів для моніторингу температури, вологості, ваги та інших параметрів бджолиних вуликів.

Основним апаратним компонентом розроблюваної системи моніторингу є мікроконтролер ESP32, створений компанією Espressif Systems. Цей чіп поєднує високопродуктивну обробку даних, енергоефективність та інтегровані бездротові модулі, що робить його оптимальним рішенням для IoT-систем. Однією з ключових переваг ESP32 є його універсальність: наявність вбудованих Wi-Fi та Bluetooth дозволяє організувати бездротову передачу даних без використання додаткових модулів. Така характеристика є критичною для нашої системи, яка має функціонувати як у міських умовах із стабільним доступом до Інтернету, так і в віддалених регіонах, де дані передаватимуться через LoRa для забезпечення великої дальності. Мікроконтролер ESP32 наведено на рисунку 2.3.

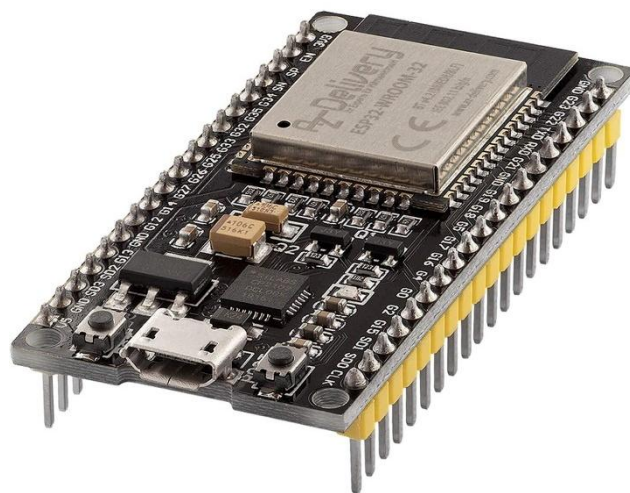


Рис. 2.3. ESP32

ESP32 був обраний також завдяки здатності ефективно керувати енергоспоживанням. Використання режиму глибокого сну дозволяє чіпу споживати лише декілька мікроампер між циклами збору даних, що забезпечує

тривалу автономну роботу системи від акумулятора типу 18650. У цьому режимі мікроконтролер «активується» лише для зчитування показників з сенсорів (температури, вологості, ваги) та передачі інформації на сервер або хмарну платформу.

Для обробки даних ESP32 оснащений двоядерним процесором із тактовою частотою до 240 МГц, що дозволяє паралельно виконувати кілька завдань, таких як фільтрація шуму з аналогових сигналів, форматування даних у JSON, а також управління бездротовим зв'язком. Така архітектура забезпечує надійну та ефективну роботу системи моніторингу в умовах реального часу.

У розроблюваній системі ESP32 виконує роль центрального вузла, до якого інтегровані всі сенсорні модулі. Зокрема, сенсор BME280 передає дані про температуру та вологість через інтерфейс I²C, тоді як тензодатчик ваги HX711 передає інформацію про масу вулика через аналогово-цифровий перетворювач. Зібрані дані обробляються на мікроконтролері та передаються на сервер або хмарну платформу через Wi-Fi, а у випадку віддалених пасік – через LoRa-шлюз, що забезпечує надійну передачу на великі відстані. Для гарантування конфіденційності та безпеки даних використовується шифрування AES-256, що мінімізує ризик несанкціонованого перехоплення інформації.

Ще однією важливою перевагою ESP32 є його здатність функціонувати в екстремальних умовах. Мікроконтролер зберігає працездатність при температурах від -40°C до +125°C, що є критично важливим для використання у різних кліматичних умовах, включно з зимовими морозами та спекотним літом. Крім того, герметичний корпус із полікарбонату забезпечує захист від вологи, пилу та механічних пошкоджень.

Завдяки високій обчислювальній потужності, енергоефективності та стійкості до суворих умов експлуатації, ESP32 є оптимальним апаратним рішенням для систем моніторингу бджолиних вуликів. Цей мікроконтролер не лише забезпечує точний збір і обробку даних, але й дозволяє масштабувати систему, підключати додаткові сенсори та змінювати конфігурацію без значних витрат.

У системах моніторингу бджолиних вуликів для оцінки температури та вологості застосовуються різноманітні сенсори, кожен із яких має специфічні характеристики, переваги та обмеження. При виборі оптимального датчика необхідно враховувати точність вимірювань, енергоспоживання, сумісність з іншими компонентами системи та здатність працювати в різних умовах експлуатації.

Одним із широко використовуваних сенсорів є DHT22 (AM2302), який характеризується діапазоном температур від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ та відотною вологістю 0–100%. Проте його точність дещо обмежена: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ для температури та $\pm 2\text{--}5\%$ для вологості. Крім того, DHT22 має повільний час відгуку, що знижує його придатність для умов із швидко змінюваними параметрами, а також характеризується відносно високим енергоспоживанням, що може бути критичним для автономних систем.

Більш точним варіантом є SHT31, який забезпечує точність $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ для температури та $\pm 2\%$ для вологості. Швидший час реакції робить його придатним для динамічних умов. Однак SHT31 є дорожчим і споживає більше енергії, що може обмежувати його застосування в автономних системах на акумуляторному живленні.

Сенсор HTU21D також демонструє високу точність: $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ для температури та $\pm 2\text{--}3\%$ для вологості. Він є економічно вигідним варіантом у порівнянні з SHT31, проте його точність та швидкодія нижчі, а енергоспоживання не завжди оптимальне для енергонезалежних систем.

Для комплексного моніторингу кліматичних умов було обрано два типи сенсорних конфігурацій: BME280 для зовнішнього середовища та комбінацію BMP280 + AHT20 для внутрішнього простору вулика. Такий підхід дозволяє забезпечити надійний збір даних про температуру, вологість та атмосферний тиск, враховуючи різні умови експлуатації.

Сенсор BME280 є популярним рішенням для зовнішнього моніторингу: він забезпечує високу точність вимірювань ($\pm 1^{\circ}\text{C}$ для температури та $\pm 3\%$ RH для вологості), низьке енергоспоживання та підтримує інтерфейси I²C і SPI. Діапазон

робочих температур та компактність роблять його оптимальним для встановлення на зовнішніх конструкціях, де необхідно враховувати вплив навколишнього мікроклімату на стан бджолиних сімей. На рисунку 2.4 представлено сенсор BME280.

Завдяки стабільності вимірюваних показників і здатності працювати у тривалому режимі за умов змінного клімату, сенсор BME280 є оптимальним рішенням для безперервного моніторингу параметрів навколишнього середовища. Його широке використання у проектах Інтернету речей (IoT) свідчить про високу довіру до цього пристрою з боку розробників і науковців. Поєднання точності, надійності та енергоефективності дозволяє BME280 значно підвищувати ефективність систем моніторингу в реальних умовах експлуатації. Простота інтеграції з мікроконтролерами забезпечує швидке налаштування збору даних та стабільну роботу системи у довготривалому режимі.

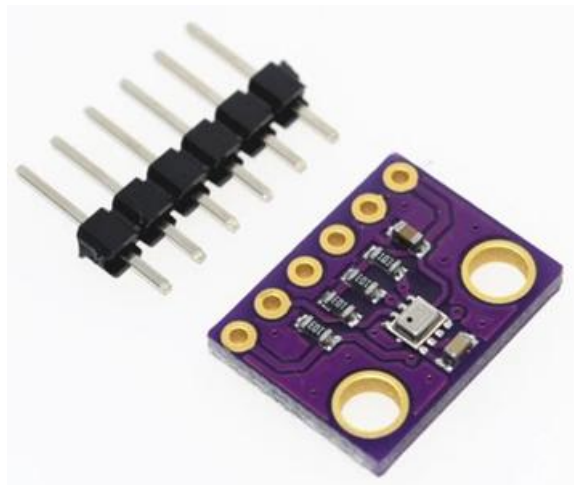


Рис. 2.4. BME280

Для внутрішнього моніторингу кліматичних параметрів у вулику було обрано комбінацію BMP280 та АНТ20, що забезпечує підвищену точність і надійність вимірювань у середовищі з високою вологістю. АНТ20 — сучасний цифровий сенсор температури та вологості, який демонструє стабільну роботу навіть у складних умовах. Він характеризується високою точністю, швидким часом відгуку та доброю повторюваністю результатів, що є критично важливим для безперервного моніторингу мікроклімату вулика. BMP280 у цій конфігурації використовується для калібрування показників та порівняння з даними зовнішнього сенсора, що підвищує загальну достовірність зібраної інформації.

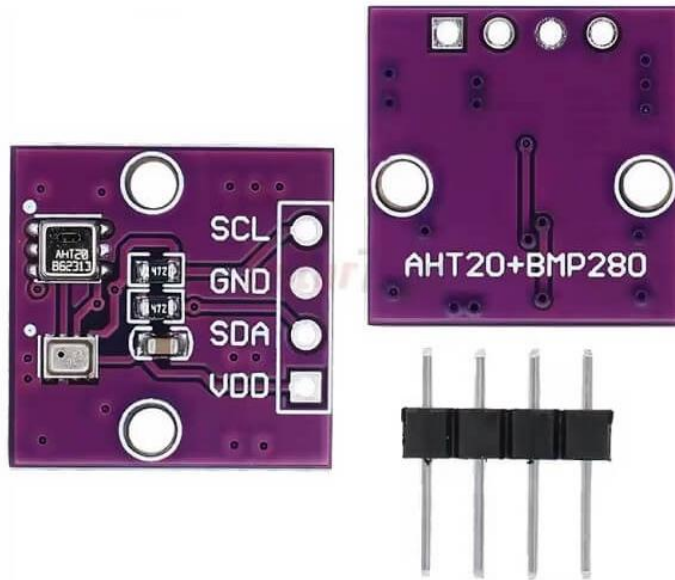


Рис. 2.5. Сенсор BMP280 + АНТ20

Використання роздільних сенсорів у системі моніторингу забезпечує гнучке керування параметрами вимірювань, мінімізує вплив підвищеної вологості на стабільність роботи та полегшує технічне обслуговування у разі виходу з ладу одного з модулів. Одночасне розміщення двох сенсорів на одній платі сприяє компактності конструкції та зменшує складність монтажу. Така архітектура поєднує економічність, надійність і високу точність, що є критично важливими факторами для створення ефективної системи моніторингу бджолиних вуликів. Завдяки цьому підходу можливо одночасно контролювати як зовнішні, так і внутрішні умови вулика, що дозволяє отримати комплексну оцінку мікроклімату. Температура виступає ключовим показником стану бджолиної родини, а різкі коливання можуть свідчити про захворювання або дефіцит корму. Вологість, у свою чергу, впливає на розвиток личинок та збереження меду: надмірна вологість може спричинити запліснявіння, тоді як її дефіцит загрожує загибеллю бджіл через зневоднення.

Енергоефективність сенсора BME280 є додатковою перевагою: у режимі сну споживання падає до 0,1 мкА, що критично для тривалої автономної роботи системи. Вибір цього датчика обґрунтований його універсальністю, високою точністю калібрування, низьким енергоспоживанням та здатністю отримувати мультипараметричні дані, необхідні для детального аналізу стану вулика.

Для вимірювання ваги у системах моніторингу важливо використовувати високоточні та надійні тензодатчики, здатні фіксувати навіть незначні зміни маси. У нашій системі для цієї мети обрано НХ711 – один із найпоширеніших і перевірених підсилювачів для тензометричних сенсорів. Тензодатчики функціонують на принципі зміни електричного опору тензорезисторів: при механічному розтягуванні або стисненні провідникових чи напівпровідникових матеріалів змінюється їхній опір, що дозволяє точно визначати величину деформації та відповідно масу навантаження.

На рисунку 2.6 представлено схему балкового тензодатчика, у якій до поверхні балки прикріплено чотири тензорезистори (R_1 , R_2 , R_3 , R_4). При прикладанні сили F балка деформується: верхня частина піддається розтягуванню, а нижня – стисненню. Внаслідок цього тензорезистори R_1 та R_4 , розташовані у верхній зоні балки, зазнають розтягування, що викликає збільшення їх опору, тоді як R_2 та R_3 , розміщені в нижній частині, стискаються, що призводить до зменшення їх опору.

Ці чотири тензорезистори інтегровані у міст Уїтстона, що забезпечує перетворення змін опору на електричний сигнал. У стані відсутності деформації вихідна напруга мосту дорівнює нулю, оскільки опори залишаються стабільними. При вигині балки порушується баланс мостової схеми, і на її виході виникає напруга, яка прямо пропорційна величині прикладеної сили F . Сигнал може бути підсилений та переданий на електронний модуль для подальшого аналізу й перетворення у числове значення навантаження.

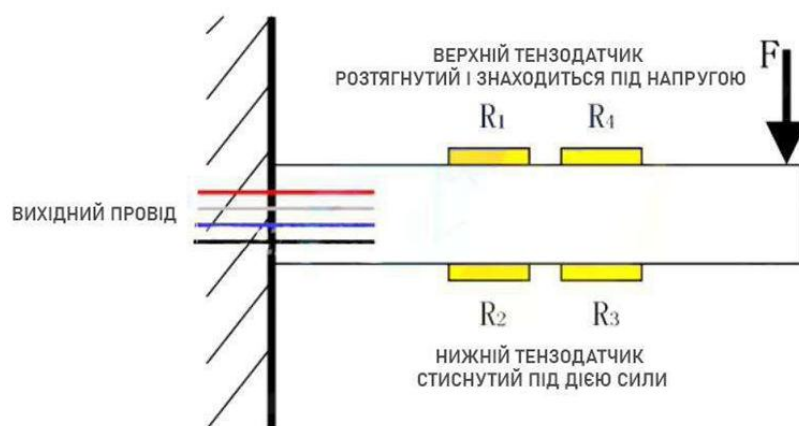


Рис. 2.6. Принцип дії балкового тензодатчика

Тензодатчики широко застосовуються для високоточного вимірювання механічних сил, ваги та напруг у різноманітних конструкціях. Вони знаходять застосування у промисловості, будівництві, машинобудуванні, а також у медичних пристроях для контролю фізичних навантажень. Вихідна напруга тензодатчика визначається зміною опору в мостовій схемі, що забезпечує перетворення механічної деформації в електричний сигнал. Такий підхід дозволяє отримувати точні вимірювання сили, ваги або інших механічних впливів, відображаючи їх у зміні вихідної напруги.

Оскільки амплітуда вихідного сигналу зазвичай невелика, його необхідно підсилювати за допомогою спеціалізованих підсилювачів, таких як NH711, що робить сигнал придатним для подальшої цифрової обробки та аналізу.

Конструкція тензодатчика включає силіконову подушку, пластикову основу, власне сенсор та кріпильний тримач. Силіконова подушка забезпечує рівномірний розподіл прикладеної сили або ваги на сенсор через пластикову основу. Тензодатчик реагує на деформацію зміною електричного опору, генеруючи сигнал, який передається для обробки. Кріпильний елемент забезпечує стабільність компонування та точність вимірювань. Така конструкція використовується в електронних вагах, вимірювальних системах та тактильних сенсорах (рис. 2.7).

Серед доступних підсилювачів для тензодатчиків NH711 є оптимальним варіантом завдяки простоті використання, економічності та достатній точності. Альтернативою є ADS1231 – тензометричний підсилювач високої точності з більшим діапазоном входних сигналів. Проте його застосування ускладнене вищою вартістю, необхідністю додаткових компонентів для стабільної роботи та більшими габаритами, що робить його менш придатним для компактних та економічних систем. Використання ADS1231 доцільне переважно у промислових рішеннях, де точність вимірювань важливіша за вартість та простоту інтеграції.

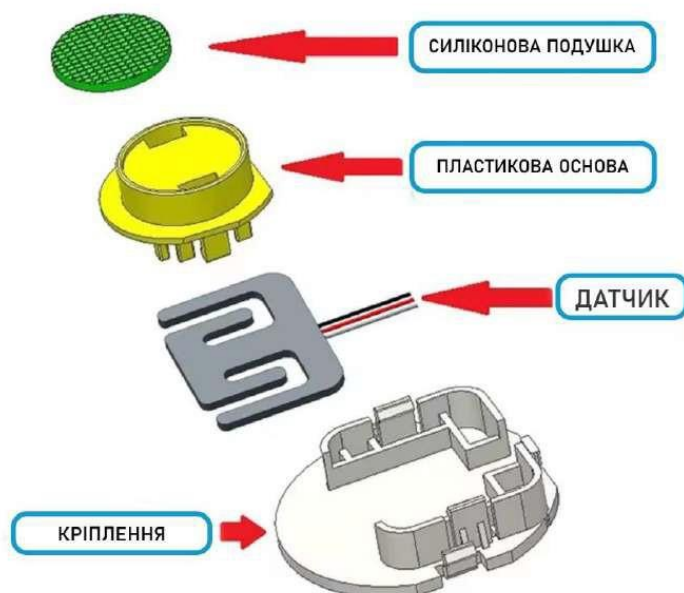


Рис. 2.7. Конструкція тензодатчика в корпусі

Альтернативним рішенням для вимірювання малих сигналів є INA333. Цей підсилювач забезпечує високу точність, проте його енергоспоживання дещо перевищує показники HX711, що може бути критично для автономних систем з обмеженими джерелами живлення, наприклад, акумуляторів. Крім того, INA333 має обмежені можливості прямого підключення до простих мікроконтролерів без додаткових компонентів, що ускладнює інтеграцію в IoT-проекти на базі ESP32.

HX711 було обрано для вимірювання ваги вулика через його спеціалізацію на роботі з тензометричними навантажувальними модулями. Цей пристрій є 24-бітним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) з інтегрованим підсилювачем, що забезпечує високу точність вимірювань ($\pm 0,1\%$ від максимального навантаження), навіть при мінімальних змінах маси. У представленій системі використано чотири тензодатчики з номіналом 50 кг кожен, підключені через HX711. Така конфігурація дозволяє рівномірно розподілити навантаження на каркас вулика та зменшити похибку шляхом усереднення сигналів з усіх сенсорів. Конфігурація HX711 з тензодатчиками наведена на рисунку 2.8.



Рис. 2.8. Тензометричний підсилювач HX711 з тензодатчиками

Головною перевагою HX711 є його здатність обробляти сигнали від низькоомних тензодатчиків (наприклад, 1 кОм), що генерують мілівольтові зміни напруги під навантаженням. Вбудований підсилювач із коефіцієнтом посилення 128 забезпечує високу стабільність та точність вимірювань, що критично для відстеження динаміки зміни маси вулика: поступове збільшення ваги може сигналізувати про активний збір нектару, тоді як різке зменшення – про викрадення меду, витрату корму або атаку шершнів.

Оскільки HX711 працює від логічних рівнів 5 В, а мікроконтролер ESP32 використовує 3,3 В на цифрових входах/виходах, у схему інтегровано двонаправлений перетворювач логічних рівнів TXS0108E. Цей компонент забезпечує безпечну конвертацію напруг між HX711 та ESP32, запобігаючи ризику пошкодження мікроконтролера через перенапругу. Крім того, TXS0108E зменшує ймовірність виникнення перешкод на лініях передачі даних, що особливо важливо при використанні бездротових технологій LoRa або Wi-Fi для віддаленого моніторингу. Перетворювач логічних рівнів TXS0108E наведено на рисунку 2.9.

Завдяки підтримці до восьми каналів, TXS0108E забезпечує масштабованість системи без потреби додаткових компонентів. Використання цього перетворювача сприяє стабільній та надійній роботі всієї системи навіть у

змінних електричних та кліматичних умовах, забезпечуючи безперервний і точний моніторинг параметрів вулика.

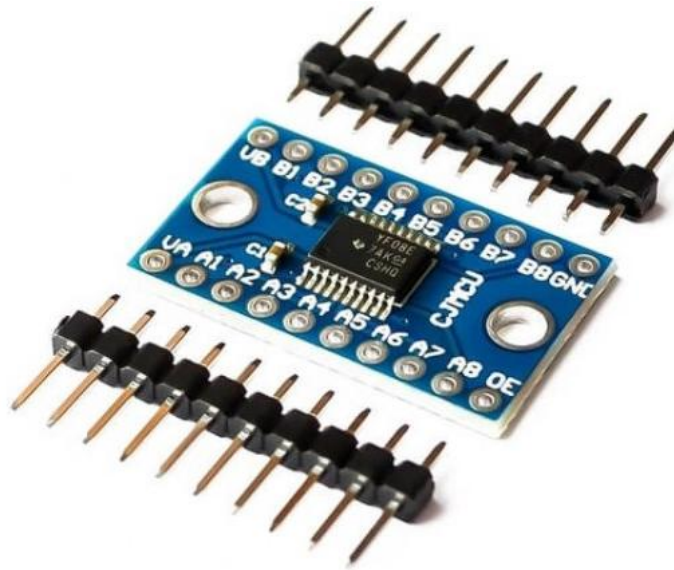


Рис. 2.9. Перетворювач логічних рівнів TXS0108E

Інтеграція HX711 із мікроконтролером ESP32 здійснюється через протокол SPI, а програмна реалізація значно спрощується завдяки використанню спеціалізованих бібліотек, таких як HX711_ADC. Калібрування датчика виконується одноразово на етапі встановлення системи, після чого вимірювання автоматично коригуються з урахуванням впливу температури та механічного напруження. Для зменшення енергоспоживання HX711 переводиться в режим зниженої потужності між вимірами, що суттєво підвищує автономність системи при роботі від акумулятора 18650.

Таким чином, вибір HX711 обґрунтований його високою точністю, можливістю підключення декількох тензодатчиків одночасно та ефективною взаємодією з ESP32 через перетворювач логічних рівнів. Це дозволяє формувати масштабовані системи моніторингу, де вимірювання ваги виступає ключовим параметром для оцінки продуктивності бджолої родини та прийняття оперативних управлінських рішень у бджільництві.

Для оперативного візуального відображення даних, отриманих від сенсорів, було інтегровано OLED-дисплей. Цей дисплей забезпечує миттєве відображення інформації про температуру, вологість та вагу вулика без необхідності підключення до зовнішніх пристроїв. Було обрано модель 128×64

на базі контролера SSD1306 через її компактні розміри, високу контрастність і чіткість відображення у різних умовах освітлення. SSD1306 також характеризується ефективним використанням ресурсів мікроконтролера та простою інтеграцією з ESP32, що спрощує налаштування та управління відображенням даних. На рисунку 2.10 представлено дисплей SSD1306 128×64.

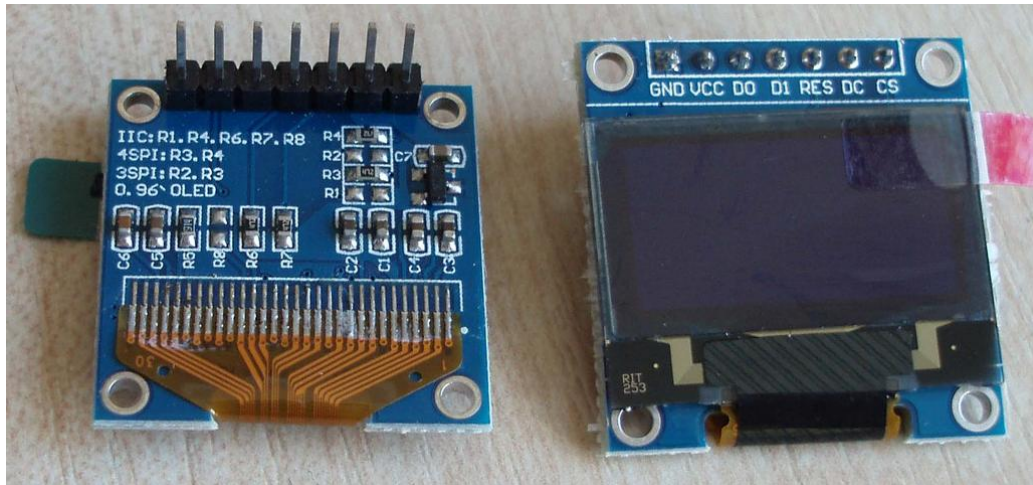


Рис. 2.10. Дисплей SSD1306 128×64

У системах моніторингу IoT для передачі даних застосовуються різні бездротові технології, кожна з яких характеризується специфічними перевагами та обмеженнями. Одним із найбільш поширених рішень є Wi-Fi, який забезпечує високу швидкість обміну даними та пряме підключення до інтернету. Проте основними його обмеженнями є невелика зона покриття та значне енергоспоживання, що обмежує застосування у віддалених автономних системах. Альтернативою можуть слугувати мобільні мережі 3G, 4G та 5G, які забезпечують передачу даних на великі відстані, але потребують підключення до операторів, наявності покриття та регулярних витрат на обслуговування SIM-карт. До того ж, використання мобільного зв'язку характеризується підвищеним енергоспоживанням, що обмежує тривалість автономної роботи пристроїв. Технології Zigbee та Z-Wave ефективні для побудови локальних мереж із невеликими відстанями передачі, проте вони не здатні забезпечити надійну передачу даних на великі відстані.

Для реалізації нашого проекту оптимальним рішенням стала технологія LoRa (Long Range), яка дозволяє передавати дані на значні відстані при мінімальному енергоспоживанні. LoRa використовує вузькосмугову модуляцію

для передачі невеликих пакетів інформації на відстань до кількох десятків кілометрів у відкритій місцевості. Головними перевагами цієї технології є можливість функціонування у віддалених районах без доступу до традиційних мереж зв'язку та наднизьке енергоспоживання, що дозволяє пристроям автономно працювати протягом місяців або навіть років на одній батареї. Це робить LoRa ідеальним рішенням для побудови систем моніторингу пасік, де надійність та тривала автономність є критичними параметрами.

Для організації бездротового зв'язку в системі моніторингу пасік обрано модулі LoRa RA-01 на базі чипа SX1278, які забезпечують стабільну комунікацію між окремими вуликами та центральним шлюзом. Чип SX1278 реалізує технологію LoRa з модуляцією CSS (Chirp Spread Spectrum), що дозволяє передавати дані на значні відстані – до 10–15 км у відкритій місцевості та 1–3 км у складному рельєфі з перешкодами. Така характеристика робить модулі RA-01 SX1278 оптимальними для сільськогосподарських застосувань, де пасіки розташовані віддалено, а покриття Wi-Fi чи GSM відсутнє.

Модулі працюють у частотному діапазоні 410–525 МГц, що дозволяє адаптувати їх під місцеві нормативні вимоги та умови експлуатації. Для даної системи моніторингу обрана робоча частота 433 МГц, яка широко використовується в IoT-рішеннях завдяки низькому рівню перешкод і доступності для некомерційного застосування в багатьох країнах. Ця частота є оптимальною для сільської місцевості, оскільки забезпечує надійну передачу сигналу через природні перешкоди, такі як ліси чи пагорби.

Висока чутливість прийому (-148 dBm) дозволяє детектувати слабкі сигнали навіть при мінімальній потужності передачі, що значно знижує енергоспоживання. Кожен модуль встановлюється на вулику разом із мікроконтролером ESP32 і функціонує як передавач, пакуючи дані з сенсорів (температура, вологість, вага) у компактні пакети та відправляючи їх на центральний шлюз. Для підвищення автономності модуль активується лише на час передачі та переходить у режим глибокого сну, споживаючи менше 1 мкА.

На рисунку 2.11 зображено модуль бездротового зв'язку RA-01 SX1278.

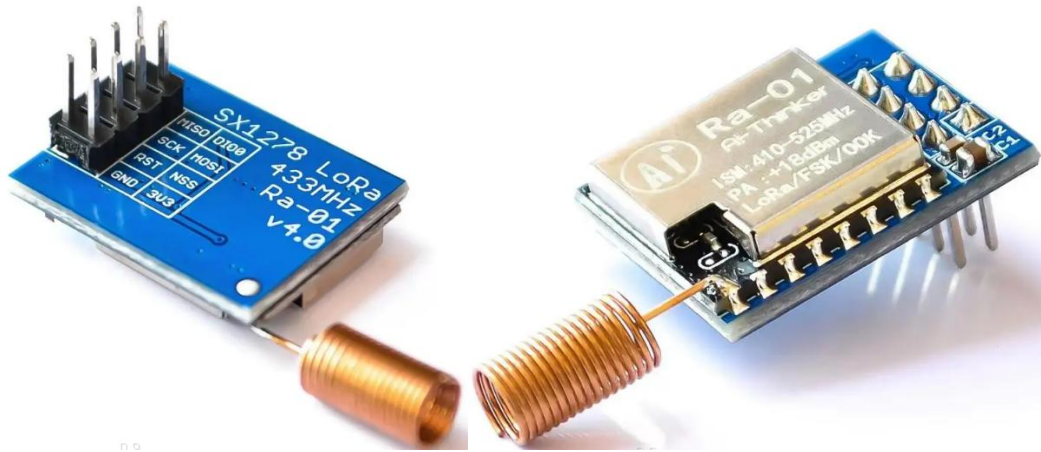


Рис. 2.11. Ra-01 SX1278

Однією з ключових переваг модулів RA-01 SX1278 є їх висока стійкість до радіоперешкод завдяки використанню технології Chirp Spread Spectrum (CSS), яка розподіляє сигнал по широкій смузі частот, роблячи його нечутливим до вузькосмугових завад. Це особливо важливо в умовах сільської місцевості, де перешкоди можуть виникати через рослинність, будівлі або інші радіопристрої. Додатковий рівень безпеки забезпечується AES-128 шифруванням, що запобігає несанкціонованому перехопленню даних та їх модифікації зловмисниками.

Модулі RA-01 SX1278 підтримують масштабованість системи: один центральний шлюз може обслуговувати десятки вуликів, що робить їх придатними для великих пасік. Використання зовнішніх антен, наприклад штирьових, підвищує дальність передачі, а захищений корпус за стандартом IP67 гарантує надійну експлуатацію навіть у складних кліматичних умовах. У разі перевантаження мережі модулі автоматично перемикаються на резервні канали, зберігаючи стабільність комунікації.

Вибір RA-01 SX1278 обґрунтований оптимальним співвідношенням енергоефективності, дальності зв'язку та вартості. Це дозволяє створити автономну систему, здатну працювати протягом кількох місяців без заміни акумуляторів, що є критично важливим для пасічників, які потребують надійного та економічного рішення. Інтеграція модулів RA-01 SX1278 у архітектуру на базі ESP32 забезпечує гнучкість, масштабованість та готовність системи до реального впровадження.

У системі моніторингу бджолиних вуликів датчики та комунікаційні модулі виконують центральну роль у зборі, обробці та передачі інформації. Основний вузол збору даних розташовується безпосередньо у вулику і включає мікроконтролер ESP32, а також датчики температури, вологості та ваги. Сенсори безперервно здійснюють вимірювання параметрів мікроклімату та маси, після чого отримані дані передаються на центральний шлюз для подальшої обробки і аналізу.

Як джерело живлення системи обрано літій-іонний акумулятор типу 18650, який відзначається високою ємністю, надійністю та здатністю забезпечувати тривалу автономну роботу. Завдяки оптимальному співвідношенню розмірів і ємності (зазвичай 2000–3500 мА·год), цей акумулятор є стандартним рішенням для портативних IoT-пристроїв. Для системи моніторингу вуликів, де критичною є тривала автономність без заміни батареї, 18650 забезпечує живлення ESP32, сенсора BME280 та тензодатчика ваги навіть при частоті зчитування даних кожні 5–10 хвилин. Додатковою перевагою є широкий робочий температурний діапазон (-20°C до $+60^{\circ}\text{C}$), що дозволяє стабільно функціонувати системі у різних кліматичних умовах.

Для оптимізації енергоспоживання ESP32 використовує режим глибокого сну, у якому витрати енергії знижуються до мінімуму між циклами вимірювань. Наприклад, при активності мікроконтролера лише 10 секунд кожні 5 хвилин загальне споживання системи становить менше 1 мА·год на добу, що дозволяє акумулятору ємністю 3000 мА·год забезпечувати автономну роботу протягом 3–4 місяців. Для пасік у сонячних регіонах передбачена можливість підключення компактної сонячної панелі потужністю 2–5 Вт через контролер заряду, що забезпечує підзарядку акумулятора та робить систему повністю енергонезалежною.

Безпека експлуатації гарантується завдяки захисному корпусу акумулятора, оснащеному термодатчиком, який блокує зарядку або розряд при перегріві або критичному падінні напруги. Це запобігає коротким замиканням, перерозряду та іншим аварійним ситуаціям, що особливо важливо у вологих

умовах або при контакті з металевими елементами вулика. На рисунку 2.12 представлено акумулятор 18650, інтегрований у систему.



Рис. 2.12. Акумулятор 18650

Отже, літій-іонний акумулятор типу 18650 є оптимальним рішенням для забезпечення енергетичних потреб системи моніторингу. Його висока ємність, стабільність роботи та здатність витримувати широкий температурний діапазон дозволяють гарантувати тривалу автономність навіть у складних кліматичних умовах. Додатковою перевагою є можливість інтеграції з альтернативними джерелами живлення, такими як компактні сонячні панелі, що робить систему незалежною від зовнішніх електромереж та підвищує її енергоефективність. Завдяки довговічності та надійності, 18650 сприяє створенню масштабованої IoT-платформи, здатної підтримувати безперервний моніторинг на великій кількості вузлів без частих втручань. Крім того, використання цього типу акумуляторів забезпечує екологічну стійкість системи, зменшуючи кількість одноразових батарей і сприяючи впровадженню енергоощадних технологій у сільському господарстві та інших віддалених галузях.

2.4. Вибір середовища програмної розробки

Arduino IDE - це інтегроване середовище розробки, призначене для створення програмного забезпечення для платформи ESP32. Воно надає зручний інтерфейс для написання коду, його компіляції та завантаження в мікроконтролер. Середовище підтримує широкий спектр платформ і містить бібліотеки функцій для роботи з різноманітними датчиками та виконавчими пристроями.

Особливості Arduino IDE:

1. Середовище розробки Arduino IDE має лаконічний дизайн, що дозволяє швидко освоїти його навіть новачкам в програмуванні.
2. Arduino IDE використовує спрощену версію мови C++, що робить процес написання коду більш доступним для широкого кола користувачів.
3. Arduino IDE включає в себе велику кількість стандартних бібліотек, які спрощують роботу з різноманітними сенсорами, актуаторами та іншими периферійними пристроями.
4. Arduino IDE підтримує широкий спектр платформи ESP32, що дозволяє використовувати єдине середовище розробки для різних проєктів.
5. Цей інструмент дозволяє відстежувати дані, що передаються між комп'ютером і платою ESP32, що значно спрощує процес налагодження програм.
6. Arduino IDE є проєктом з відкритим кодом, що дозволяє користувачам вносити зміни до його функціональності та розширювати його можливості.

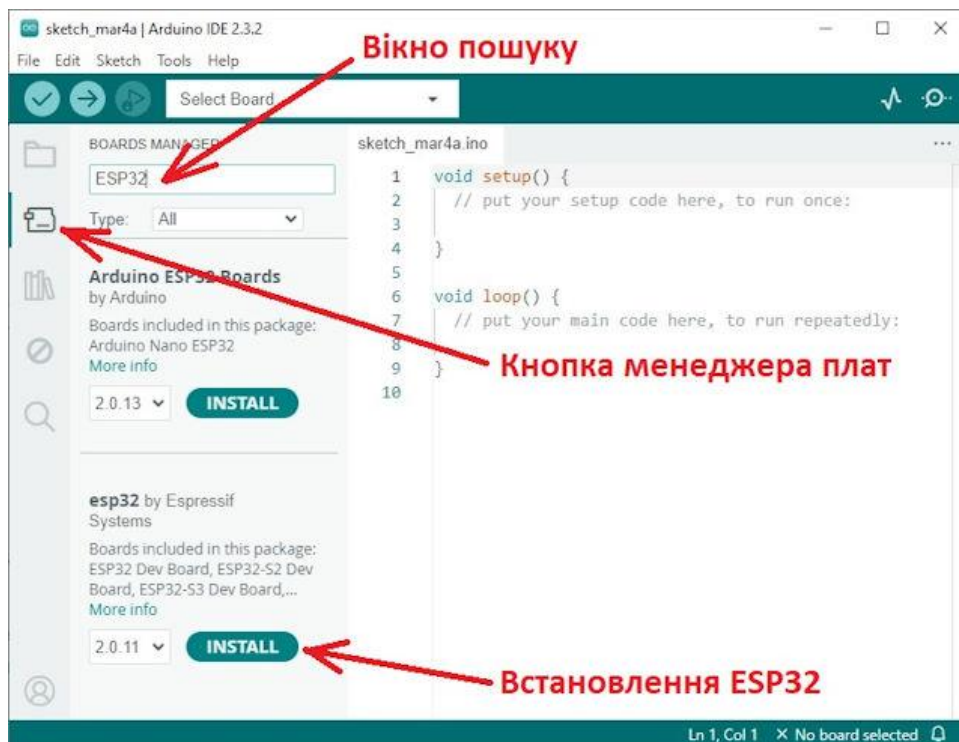


Рис. 2.13. Інтерфейс Arduino IDE

Скетчі, написані в середовищі розробки Arduino IDE, зберігаються у файлах з розширенням .ino. Редактор коду в IDE забезпечує стандартний набір функцій для роботи з текстом: копіювання, вставка, пошук і заміна. Інформація про хід виконання програми та можливі помилки відображається в області повідомлень. Вибір моделі плати ESP32 та послідовного порту здійснюється в нижній частині вікна програми. Панель інструментів надає швидкий доступ до основних функцій середовища розробки. На панелі інструментів знаходиться 6 кнопок (рис. 2.14):

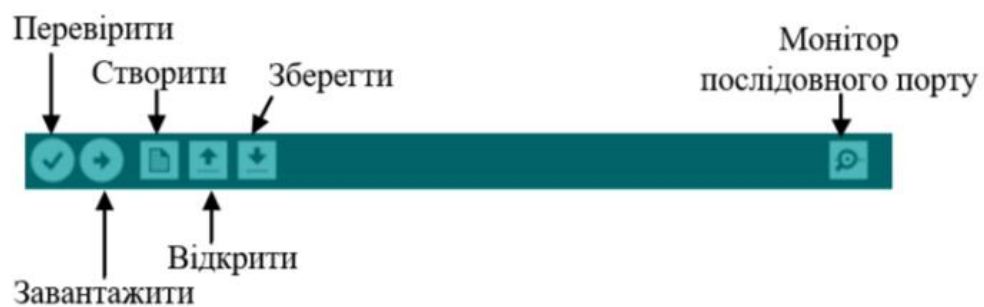


Рис. 2.14. Панель інструментів

Основні функції Arduino IDE

- Перевірити. Дана опція дозволяє перевірити синтаксис написаного коду. У разі виявлення помилок вони відображаються в області повідомлень.
- Завантажити. Використовується для компіляції програми та її завантаження у мікроконтролер ESP32.
- Створити. Дозволяє створити новий файл для написання скетчу.
- Відкрити. Призначена для відкриття існуючого файлу зі скетчем.
- Зберегти. Дозволяє зберегти поточний скетч у файл.
- Монітор послідовного порту. Використовується для відкриття програми Serial Monitor, яка відображає дані, що надходять від ESP32 на комп'ютер через послідовний інтерфейс. Монітор підтримує роботу як із USB-варіантами плати, так і зі звичайними версіями ESP32. Для передачі даних на зовнішній пристрій у вікні монітора вводиться текст, після чого натискається кнопка "Відправити" або клавіша Enter. Швидкість передачі даних потрібно налаштувати відповідно до параметрів, вказаних у функції `Serial.begin()` у вашому коді. Функція `Serial.print()` дозволяє виводити текст у вікно монітора.

Бібліотеки значно розширюють функціональність програм, надаючи додаткові можливості, такі як робота з апаратними засобами або обробка даних. Для додавання бібліотеки слід перейти до меню Sketch, вибрати опцію Include Library і обрати необхідну бібліотеку. Після цього в програму додається оператор `#include`, а бібліотека компілюється разом зі скетчем. Важливо зазначити, що кожна підключена бібліотека використовує частину пам'яті мікроконтролера.

Більшість бібліотек уже попередньо встановлені разом із програмним забезпеченням ESP32, однак додаткові бібліотеки можна завантажити з зовнішніх джерел.

Для завантаження скетчу необхідно вибрати відповідну плату та порт (див. рис.2.15), які використовуються для вашої операційної системи. Це здійснюється через меню Tools, де у розділі Board вибирається модель плати, а в розділі портів — відповідний COM-порт (наприклад, COM1, COM2, COM4, COM5, COM7 тощо) або USB-з'єднання.

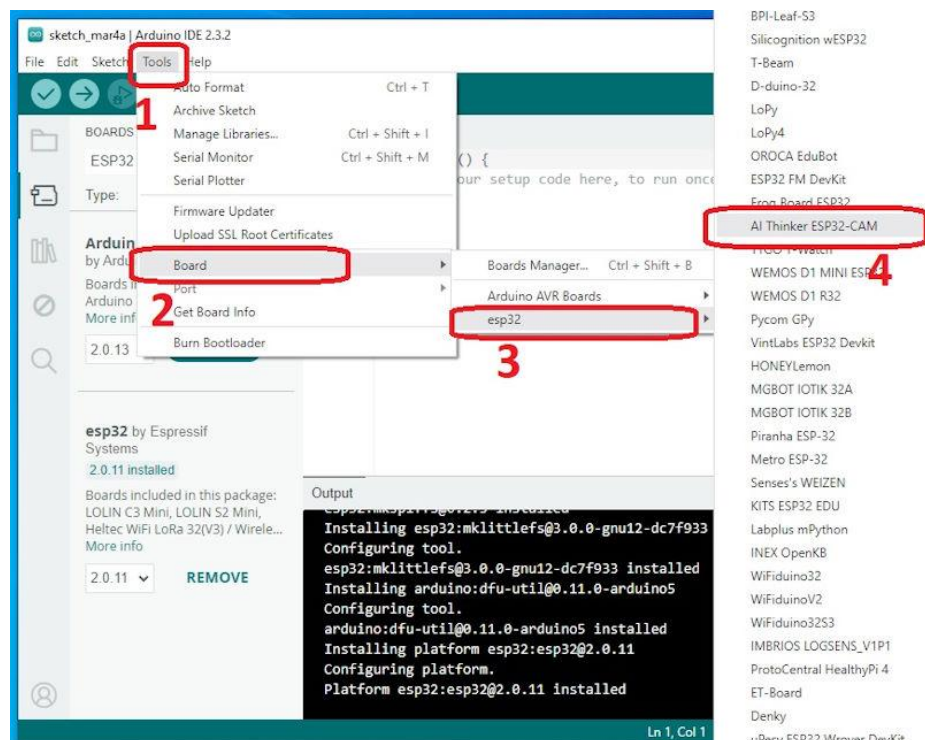


Рис. 2.15. Зображення вибору плати

Для завантаження програми в плату ESP32 необхідно встановити з'єднання між комп'ютером і платою за допомогою USB-кабелю. В середовищі розробки Arduino IDE слід вибрати відповідну модель плати та послідовний порт, до якого

підключено Arduino. Ця інформація необхідна для того, щоб комп'ютер міг правильно спілкуватися з платою.

Після вибору потрібних параметрів можна приступати безпосередньо до процесу прошивки.

Для цього необхідно скомпілювати написаний код. Компілятор перетворить ваш код, написаний на спрощеній версії C++, в машинний код, який розуміє мікроконтролер Arduino. Скомпільований код передається в буфер завантажувача - спеціальної програми, яка зашита в пам'ять мікроконтролера. Завантажувач, у свою чергу, переписує отриманий код в основну пам'ять мікроконтролера і запускає його на виконання.

Щоб завантажити код програми на плату ESP32, нам знадобиться адаптер USB-послідовний (адаптер FTDI) або адаптер програматора ESP32.

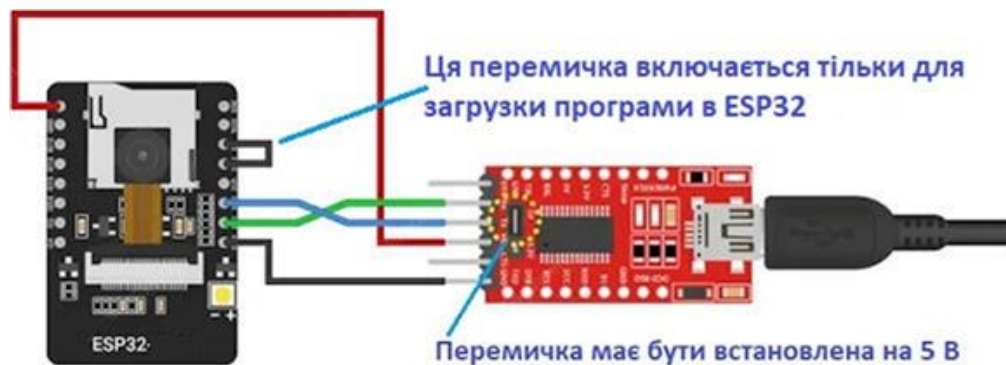


Рис. 2.16. Програмування та прошивка плати

Процес прошивки супроводжується скиданням мікроконтролера та миганням світлодіодів, що індикують активність передачі даних. Для забезпечення зручності користувача середовище розробки Arduino IDE надає інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та автоматизує більшість рутинних операцій.

Функції `setup()` та `loop()` є основою будь-якого скетчу для Arduino.

- `setup()` виконується один раз на початку програми і використовується для ініціалізації портів введення-виведення, встановлення початкових значень змінних та підключення бібліотек.

- `loop()` виконується циклічно і містить основний алгоритм програми. Все, що має повторюватися, розміщується саме тут.

Основні функції для роботи з портами введення-виведення:

- Цифрові порти: `pinMode()`, `digitalWrite()`, `digitalRead()`. Ці функції дозволяють керувати цифровими виходами (наприклад, світлодіодами) та зчитувати значення з цифрових входів (наприклад, кнопок).
- Аналогові порти: `analogWrite()`, `analogRead()`, `analogReference()`. Ці функції використовуються для роботи з аналоговими сигналами, такими як напруга.
- Спеціальні функції: `tone()`, `noTone()` для генерації звукових сигналів, `millis()` для вимірювання часу.

Легкість тестування та відлагодження програмного забезпечення в Arduino IDE значно спрощується завдяки вбудованим інструментам, таким як серійний монітор і серійний лог, які дозволяють у режимі реального часу контролювати роботу системи, оперативно відслідковувати сигнали від датчиків і виявляти потенційні помилки в алгоритмах обробки даних. Крім того, Arduino IDE підтримує інтеграцію з різноманітними відладчиками та емуляторами, що забезпечує додатковий рівень перевірки коду ще на етапі прототипування.

Важливою складовою ефективності розробки є глобальна спільнота Arduino, яка надає великий обсяг готових бібліотек, прикладів коду, форумів і документації. Це не лише скорочує час на розробку, але й дозволяє обмінюватися досвідом, отримувати рекомендації щодо оптимізації роботи з датчиками та комунікаційними модулями, а також швидко вирішувати технічні проблеми.

Завдяки поєднанню інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу, широких можливостей для відлагодження та доступу до ресурсів спільноти, Arduino IDE забезпечує надійну основу для розробки програмного забезпечення для нашої системи моніторингу вуликів. Використання цього середовища дозволяє не лише швидко налаштовувати і тестувати систему в польових умовах, але й підтримувати високу надійність роботи, гнучко адаптувати код до змін у конфігурації датчиків і масштабувати систему під різні умови експлуатації. Такий підхід забезпечує ефективну інтеграцію кіберфізичних компонентів та надійну обробку великих обсягів даних у режимі реального часу, що критично для сучасних IoT-рішень у бджільництві.

2.5. Хмарні сервіси для зберігання та аналізу даних

На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій існує значна кількість хмарних сервісів, призначених для зберігання, обробки та аналізу даних. Вибір відповідної хмарної платформи для реалізації IoT-системи зумовлюється низкою критеріїв, серед яких ключовими є рівень складності інтеграції з апаратними та програмними компонентами, підтримка необхідних протоколів обміну даними, економічна доцільність використання, а також показники надійності та масштабованості. У подальшому розглянуто основні хмарні платформи, що найбільш поширені у сфері розроблення IoT-рішень.

Google Cloud Platform (GCP) є однією з найбільш поширених хмарних платформ, орієнтованих на обробку великих обсягів даних та реалізацію алгоритмів машинного навчання. Вона пропонує розвинений набір сервісів для зберігання, обробки й аналітичної обробки інформації, зокрема інструмент BigQuery для роботи з великими масивами даних, а також платформу Firebase, що забезпечує інтеграцію з мобільними застосунками. Водночас застосування Google Cloud Platform у межах невеликих IoT-рішень, зокрема систем моніторингу бджолиних вуликів, може виявитися надмірно складним і економічно невиправданим. Процеси розгортання та адміністрування ресурсів вимагають високого рівня технічної підготовки й супроводжуються значними фінансовими витратами, що знижує доцільність використання цієї платформи для простих та бюджетно обмежених проєктів.

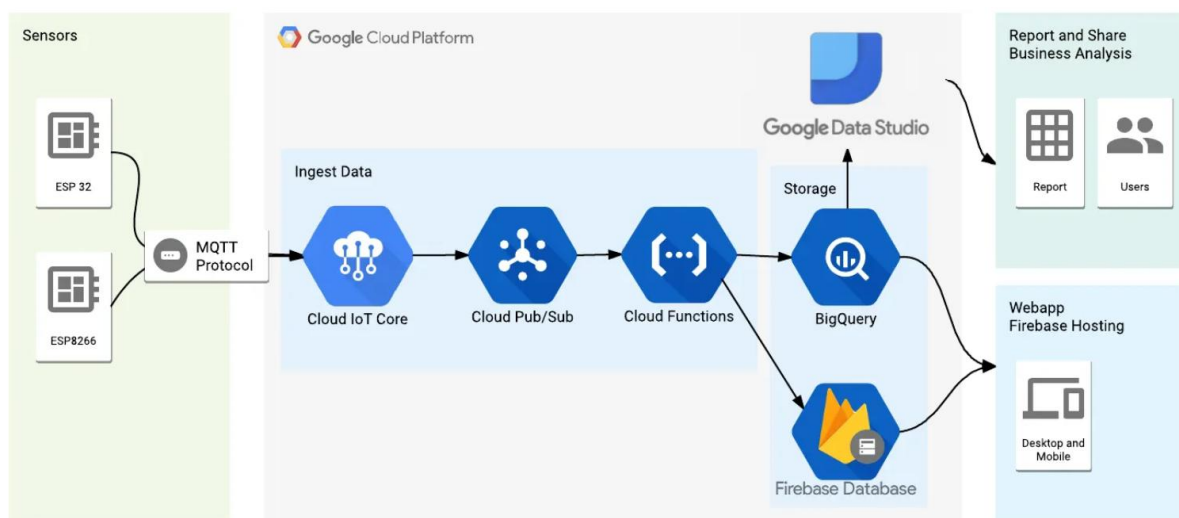


Рис. 2.17. Архітектура IoT проєкту в Google Cloud Platform

Для проєктів із невеликими вимогами до масштабованості та обмеженими фінансовими ресурсами доцільним рішенням є платформа ThingSpeak, орієнтована на роботу з даними IoT-датчиків. Вона забезпечує можливість інтеграції з середовищем MATLAB, що дозволяє виконувати аналітичну обробку даних та реалізовувати алгоритми машинного навчання. Додатковою перевагою ThingSpeak є спрощений користувацький інтерфейс, а також наявність безкоштовного тарифного плану з обмеженою кількістю запитів на зберігання та обробку інформації, що робить платформу привабливою для стартапів і малих підприємств. Водночас функціональні можливості ThingSpeak є більш обмеженими порівняно з універсальними хмарними платформами, зокрема такими як AWS або Google Cloud Platform.



Рис. 2.18. Шлюз та вузол LoRa на ESP32 для передачі показань датчика на Thingspeak

Blynk є хмарним сервісом, що забезпечує інтуїтивно зрозуміле створення графічних інтерфейсів для управління мікрокомп'ютерами та мікроконтролерами. Ця платформа значно спрощує збір інформації з датчиків, мінімізуючи потребу в розробці складних програмних рішень.

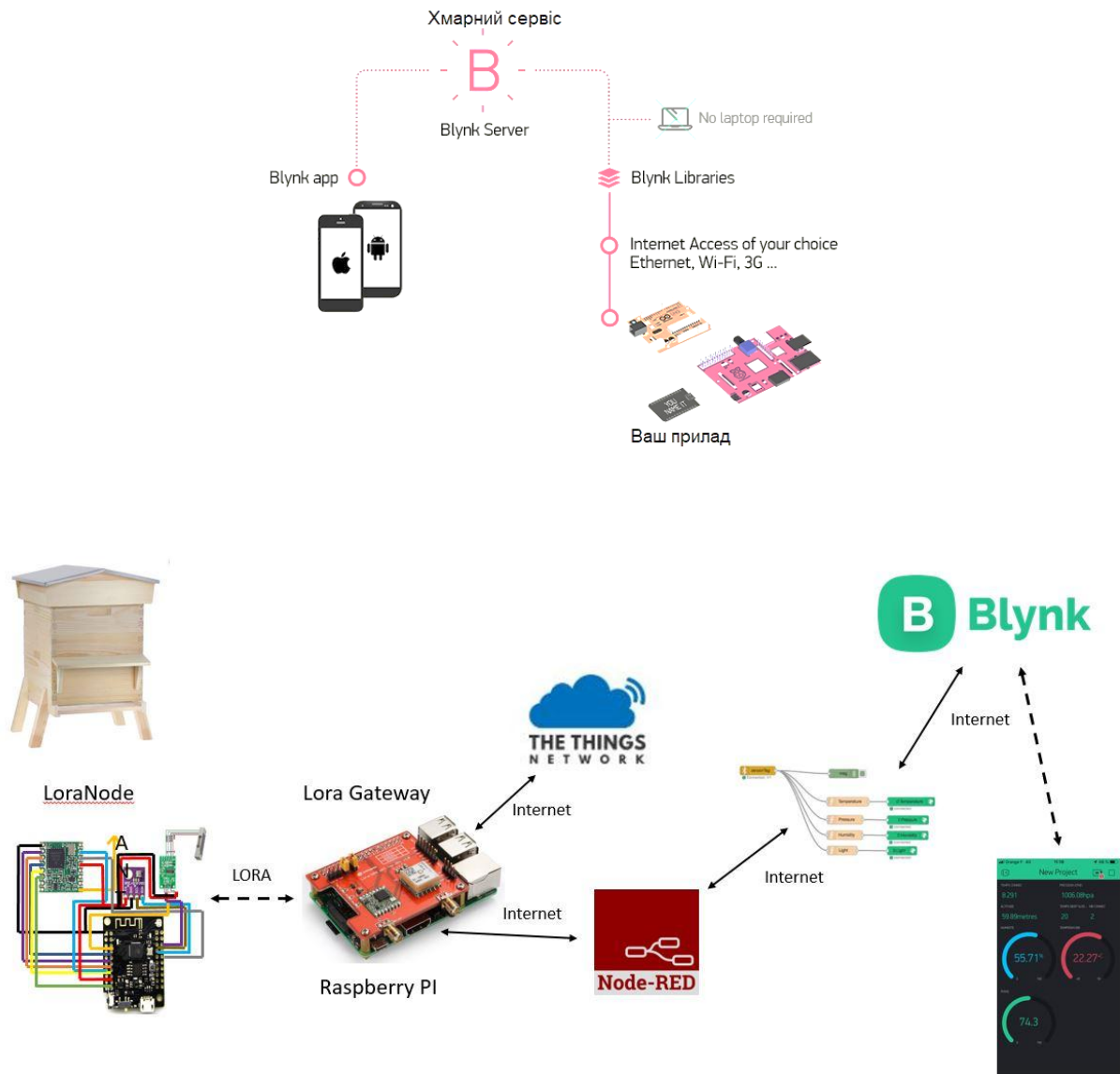


Рис. 2.19. Хмарний сервіс Blynk

Платформа складається з трьох ключових компонентів:

- Blynk App — це мобільний додаток, який дозволяє користувачам створювати інтуїтивно зрозумілі інтерфейси для своїх IoT-проектів за допомогою різноманітних віджетів.
- Blynk Server — цей сервер відповідає за всю комунікацію між смартфоном і апаратним забезпеченням. Користувачі можуть обирати між використанням хмарного сервера Blynk або розгортанням власного приватного сервера локально, залежно від своїх потреб.

- Blynk Libraries — ці бібліотеки, доступні для всіх популярних апаратних платформ (Arduino, Raspberry Pi, ESP8266, Energia, Particle та ін.), забезпечують зв'язок із сервером та обробляють всі вхідні й вихідні команди пристрою.

Для використання Blynk необхідно встановити мобільний додаток та пройти обов'язкову реєстрацію. Це пов'язано з хмарною архітектурою сервісу, що гарантує контрольований доступ до підключених пристроїв. Варто зазначити, що система передбачає можливість локального розгортання сервера, що виключає залежність від інтернет-з'єднання.

Платформа Blynk була обрана для реалізації системи моніторингу бджолиних вуликів з огляду на її відповідність вимогам IoT-проектів малого та середнього масштабу. Вона забезпечує прості та зручні засоби інтеграції з широким спектром мікроконтролерів і сенсорних модулів, а також надає мобільний застосунок для візуалізації показників у режимі реального часу. Використання Blynk дозволяє значно скоротити час розроблення систем моніторингу й керування без необхідності глибоких знань у сфері серверного програмування та адміністрування інфраструктури.

Завдяки відкритій архітектурі платформа підтримує інтеграцію різноманітних пристроїв і протоколів зв'язку, зокрема Wi-Fi та LoRa, що є особливо важливим у контексті розроблюваної системи, призначеної для збору даних з віддалених вуликів в умовах обмеженого доступу до інтернет-мережі. Крім того, Blynk забезпечує взаємодію з хмарними сервісами та базами даних, що дозволяє організувати надійне зберігання й обробку інформації, отриманої від сенсорів. Такий підхід сприяє створенню гнучкої системи моніторингу, здатної адаптуватися до змінних умов експлуатації на пасіці.

З позицій економічної доцільності та зручності використання платформа Blynk є оптимальним рішенням для розроблюваної системи. Вона надає можливість розгортання повної інфраструктури збору та обробки даних з мінімальними витратами на технічну підтримку, а також забезпечує свободу вибору апаратних платформ, зокрема мікроконтролерів сімейства ESP32, які

застосовуються в даному проєкті. Наявність мобільних застосунків для перегляду даних у реальному часі дозволяє бджолярам здійснювати постійний контроль стану вуликів незалежно від місця перебування.

Таким чином, вибір платформи Blynk зумовлений її простотою у використанні, широкими можливостями інтеграції з апаратними засобами та стабільною роботою з даними. Це створює передумови для розроблення ефективної й доступної системи моніторингу, яка забезпечує оперативне відстеження стану бджолиних вуликів і отримання достовірної інформації про параметри навколишнього середовища.

2.6. Розробка алгоритму функціонування системи

Розроблення алгоритму функціонування системи моніторингу є одним із визначальних етапів створення кіберфізичної IoT-системи, оскільки саме він забезпечує узгоджену взаємодію апаратних і програмних компонентів. Алгоритм задає логіку роботи мікроконтролера, визначаючи послідовність операцій від ініціалізації системи до зчитування сенсорних даних, їх обробки та подальшої передачі на хмарний сервер або в мобільний застосунок.

У системі передбачено два режими передавання інформації, що забезпечує її адаптивність до різних умов експлуатації. Перший режим ґрунтується на використанні Wi-Fi-з'єднання для безпосереднього надсилання зібраних даних на віддалений сервер. Такий підхід є доцільним у разі розміщення вуликів у зоні стабільного покриття бездротової мережі та дозволяє здійснювати оновлення інформації в режимі, близькому до реального часу.

Другий режим обміну даними призначений для роботи в умовах віддалених пасік, де доступ до Wi-Fi є відсутнім або нестабільним. У цьому випадку для передавання інформації використовується технологія LoRa, за допомогою якої дані надсилаються на окремий мікроконтролер ESP32, розташований у будинку та виконуючий функції проміжного вузла або шлюзу. Прийнята інформація обробляється та передається на сервер через Wi-Fi або дротове мережеве підключення. Застосування такої дворівневої архітектури дозволяє суттєво збільшити радіус дії системи зв'язку, одночасно забезпечуючи

низьке енергоспоживання віддалених сенсорних модулів. На рисунку 2.20 представлено схему обміну даними між передавачем та приймачем системи моніторингу.



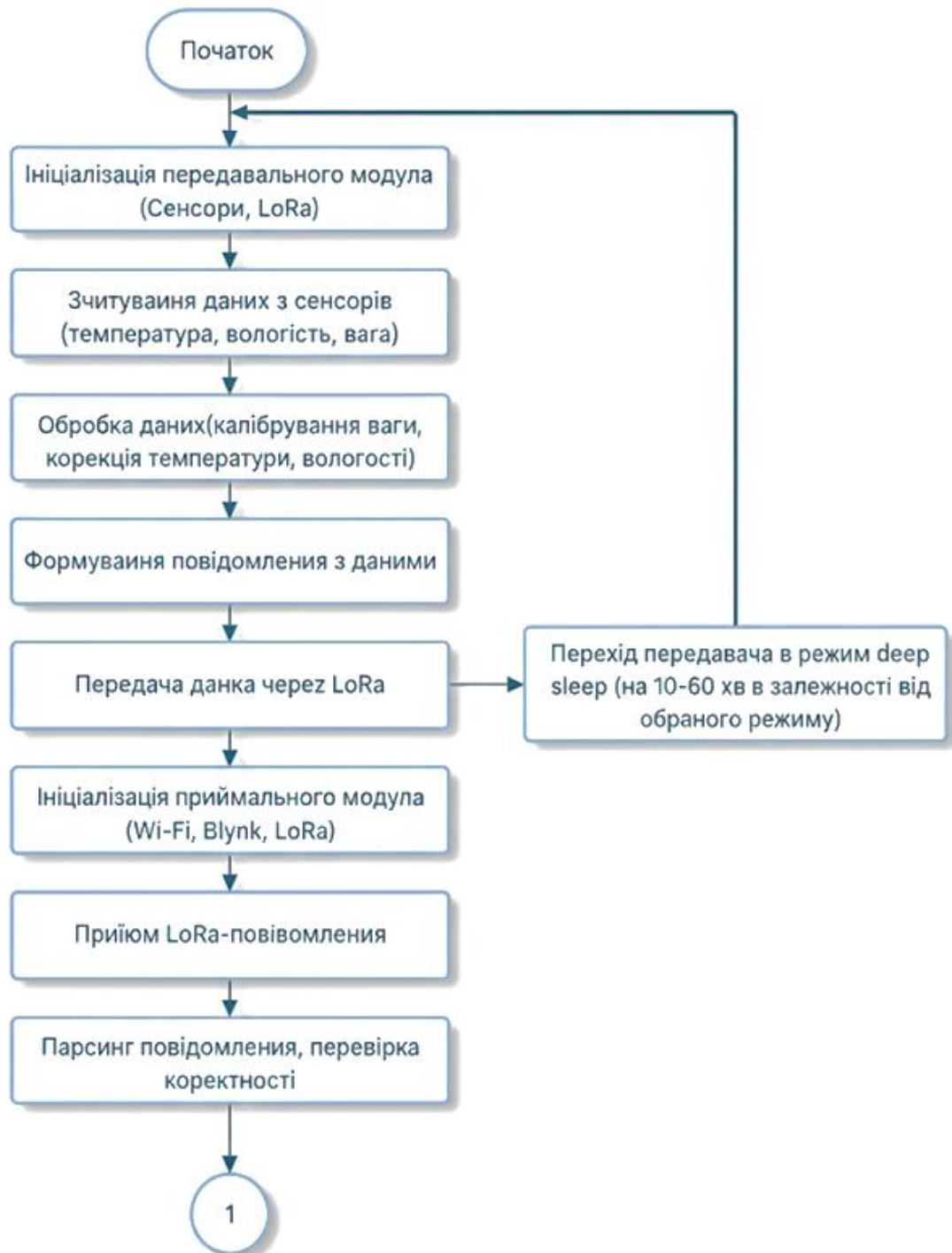
Рис. 2.20. Схема передавання даних із використанням технології LoRa

Подібна структура системи забезпечує гнучке налаштування роботи мережі моніторингу відповідно до умов конкретної пасіки. Використання технології LoRa дозволяє передавати дані на великі відстані при мінімальному енергоспоживанні, що є критично важливим для автономних вузлів. Водночас наявність альтернативного каналу передачі через Wi-Fi забезпечує зниження затримок і оперативний доступ до інформації у разі наявності мережі. Така конфігурація підвищує надійність і ефективність системи моніторингу незалежно від зовнішніх умов експлуатації.

Розроблений алгоритм функціонування системи моніторингу бджолиних вуликів забезпечує послідовну та ефективну обробку даних від сенсорів до кінцевого користувача. Спершу відбувається ініціалізація передавального модуля, що включає підключення сенсорів для вимірювання температури, вологості та ваги, а також налаштування LoRa-зв'язку для подальшої передачі даних. Наступним етапом здійснюється зчитування даних із сенсорів, після чого вони проходять обробку, що включає калібрування ваги та корекцію показників температури і вологості для підвищення точності вимірювань. Після цього формується повідомлення з обробленою інформацією, яке передається через LoRa-зв'язок. Після завершення передачі передавальний модуль переходить у режим *deep sleep* на визначений проміжок часу (від 10 до 60 секунд залежно від

налаштувань) з метою економії енергії, що є критично важливим для автономної роботи системи в польових умовах.

Алгоритм роботи системи моніторингу бджолиних вуликів зображений на рисунку 2.21.



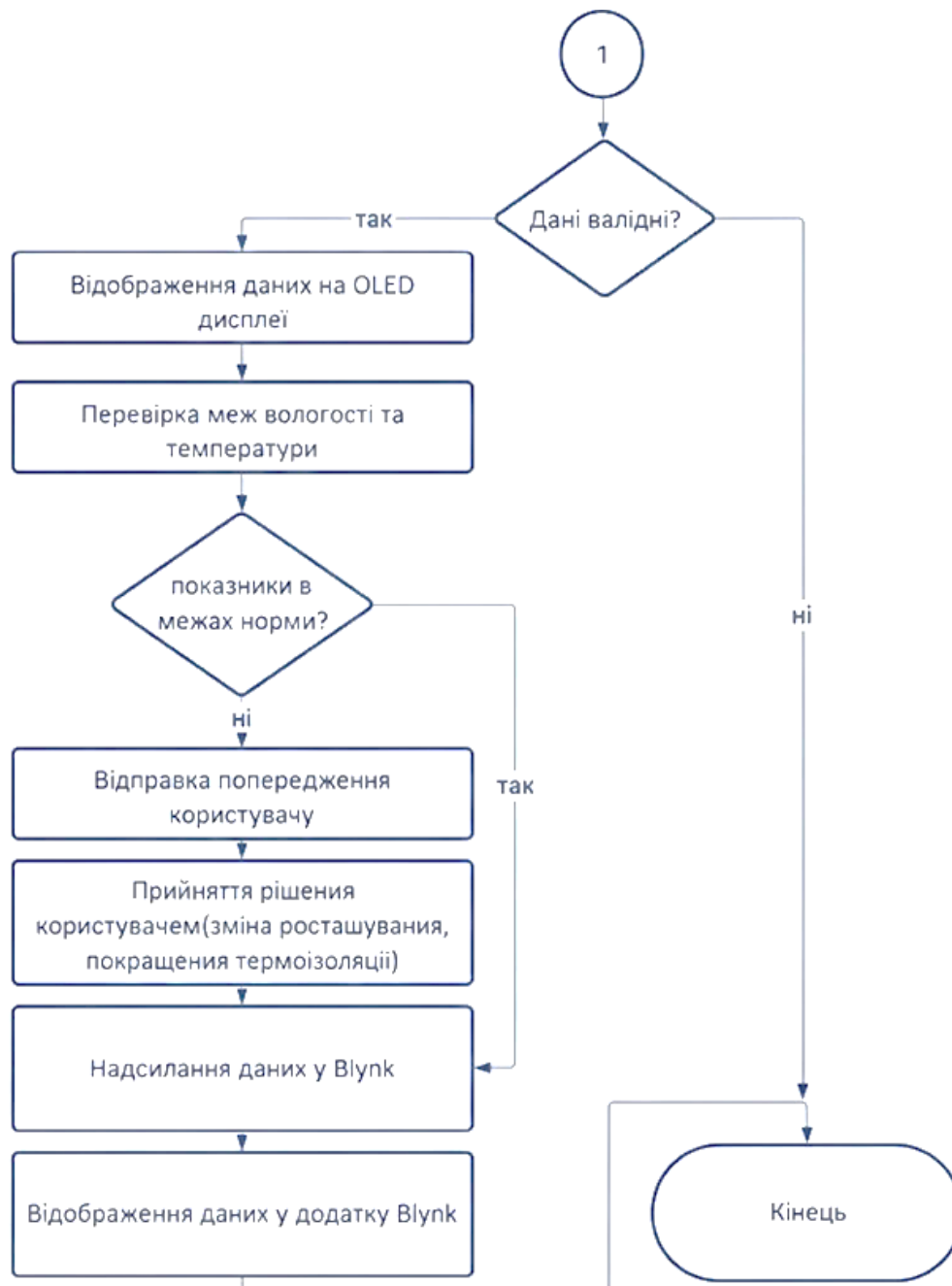


Рис. 2.21. Алгоритм роботи системи моніторингу бджолиних вуликів

Приймальний модуль, який ініціалізується з підтримкою Wi-Fi, Blynk та LoRa, приймає LoRa-повідомлення та виконує їх парсинг із перевіркою коректності даних. У разі валідності отриманих показників інформація відображається на OLED-дисплеї, після чого проводиться контроль значень вологості та температури.

Якщо параметри виходять за допустимі межі, користувач отримує попередження, що дозволяє вчасно вжити необхідних заходів, наприклад, змінити розташування вулика або покращити його термоізоляцію. Всі коректні

дані додатково надсилаються до мобільного додатка Blynk, де здійснюється їх візуалізація для подальшого моніторингу. У разі отримання некоректних даних система переходить в режим очікування наступного повідомлення без подальшої обробки.

Такий послідовний алгоритм забезпечує надійність збору та передачі даних, економію енергії пристроїв та своєчасне інформування користувача про потенційні проблеми, що є критично важливим для ефективного управління умовами в бджолиних вуликах.

Завдяки інтеграції технологій LoRa та Blynk система залишається ефективною навіть у віддалених місцевостях із обмеженим доступом до Інтернету. Розроблений алгоритм легко адаптується до інших сфер моніторингу, де необхідна передача даних у реальному часі, і дозволяє розширювати систему шляхом підключення додаткових сенсорів.

Вибір даного підходу зумовлений потребою поєднати автономність пристроїв, стабільність зв'язку на великі відстані та інтеграцію з сучасними мобільними технологіями для підвищення зручності користувача.

На рисунку 2.22 представлено структуру комп'ютеризованої системи моніторингу, що включає датчики, мікроконтролер, модуль зв'язку, джерело живлення та хмарну платформу.

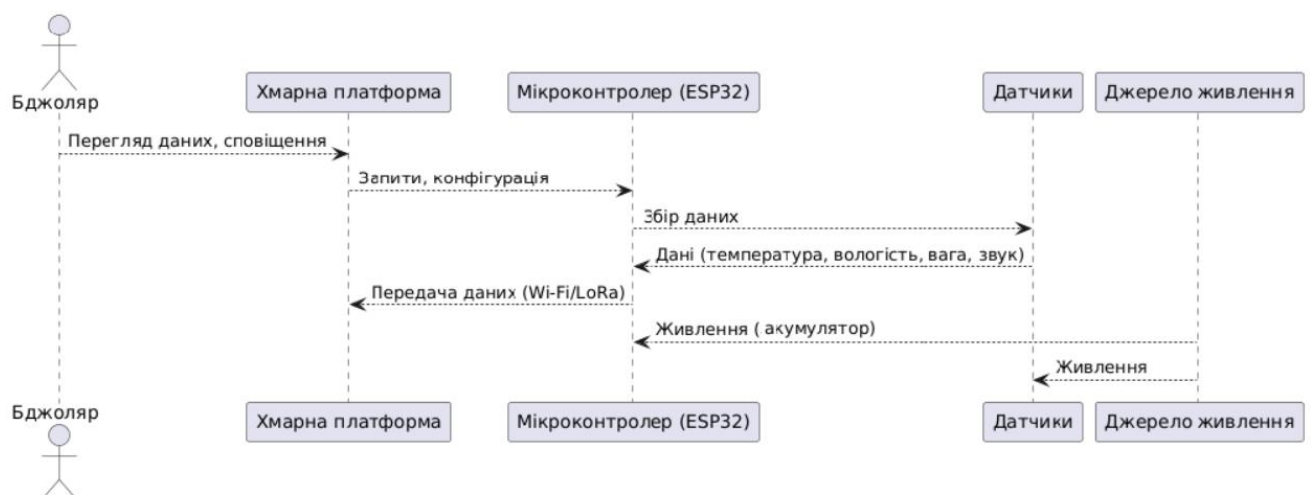


Рис. 2.22. Структура комп'ютеризованої системи моніторингу

Розроблена структура має модульну архітектуру, що забезпечує можливість додавання нових сенсорів або зміни типу комунікаційного модуля

відповідно до конкретних потреб. Наприклад, у великих бджільницьких господарствах може використовуватися 4G-зв'язок, тоді як для невеликих пасік доцільним є застосування Bluetooth. Конструкція також враховує особливості локальних умов в Україні, зокрема обмежений доступ до Інтернету та сезонні коливання кліматичних параметрів, що робить її економічно ефективною та практичною.

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок, що запропонована структура забезпечує комплексний моніторинг бджолиних вуликів із можливістю адаптації до різних експлуатаційних умов.

Висновки до розділу

У цьому розділі було здійснено комплексний аналіз та обґрунтовано вибір компонентів для створення системи моніторингу бджолиних вуликів. На основі вивчення сучасних технологій і ринку IoT-рішень запропоновано архітектуру системи, яка враховує ключові вимоги до точності вимірювань, енергоефективності, надійності та безпеки даних.

Апаратна частина системи базується на мікроконтролері ESP32, обраному завдяки оптимальному поєднанню продуктивності, енергоефективності та наявності вбудованих бездротових інтерфейсів (Wi-Fi і Bluetooth). Його здатність працювати в режимі deep sleep дозволяє значно продовжити автономність системи. Для вимірювання основних параметрів середовища використовується мультисенсор BME280, що забезпечує точне визначення температури, вологості та атмосферного тиску. Вагові показники контролюються за допомогою тензодатчика HX711, який характеризується високою точністю та стабільністю вимірювань.

Для організації бездротового зв'язку у віддалених пасіках передбачено застосування технології LoRa на базі модулів RA-01 SX1278, що дозволяє передавати дані на великі відстані при мінімальному енергоспоживанні. У разі наявності стабільного доступу до Інтернету можлива передача даних через вбудований Wi-Fi модуль ESP32.

Програмне забезпечення розробляється у середовищі Arduino IDE, обраному завдяки простоті використання, широкій підтримці користувацької спільноти та наявності бібліотек для обраних апаратних компонентів. Для зберігання та візуалізації даних використовується хмарний сервіс Blynk, що забезпечує зручний інтерфейс для моніторингу та налаштування сповіщень.

Розроблений алгоритм функціонування системи забезпечує послідовну роботу сенсорів, збір та передачу даних, а також стабільну взаємодію між апаратними та програмними компонентами.

Перспективи розвитку запропонованого рішення включають можливість масштабування системи, інтеграції додаткових датчиків (наприклад, для вимірювання рівня шуму чи якості повітря), а також удосконалення алгоритмів аналізу даних для прогнозування аномальних ситуацій. Крім того, система має потенціал для адаптації до інших завдань у сфері точного сільського господарства.

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

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРATНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Проєктування та реалізація апаратної частини системи

Реалізація апаратної складової системи моніторингу бджолиних вуликів передбачає поетапне складання, підключення та інтеграцію обраних електронних компонентів у єдину цілісну технічну систему. Ключовими завданнями цього етапу є коректне з'єднання сенсорних елементів з мікроконтролером, організація стабільного живлення, забезпечення надійного бездротового обміну даними, а також фізичне розміщення пристроїв у вулику з урахуванням захисту від впливу зовнішніх чинників, зокрема вологи, пилу та температурних коливань.

Апаратна частина системи моніторингу включає мікроконтролер ESP32, набір сенсорів для вимірювання температури, вологості та маси, модуль бездротового зв'язку LoRa RA-01 SX1278, автономний блок живлення на базі літій-іонного акумулятора формату 18650, а також перетворювач логічних рівнів TXS0108E. Архітектура системи передбачає підтримку двох режимів передавання даних. У разі наявності доступу до мережі Інтернет передача інформації здійснюється безпосередньо через Wi-Fi-з'єднання. За відсутності такого доступу використовується LoRa-канал, через який дані надсилаються на окремий мікроконтролер ESP32, розміщений у житловому приміщенні та підключений до Wi-Fi, який виконує функцію шлюзу між сенсорним вузлом і серверною частиною системи.

З конструктивної точки зору система складається з двох основних функціональних вузлів. Перший — сенсорний модуль, встановлений безпосередньо у вулику, який об'єднує мікроконтролер ESP32, сенсори BME280 і HX711, модуль LoRa та автономне джерело живлення. Другий — базова станція, розташована у приміщенні, яка приймає дані через LoRa-канал, здійснює їх первинну обробку та передає на віддалений сервер за допомогою Wi-Fi-з'єднання.

Центральним елементом апаратної частини є мікроконтролер ESP32 — високопродуктивна платформа з інтегрованими модулями Wi-Fi та Bluetooth, що широко використовується в системах Інтернету речей. ESP32 оснащений двоядерним процесором Tensilica LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, що забезпечує достатню обчислювальну потужність для паралельної обробки даних, керування периферійними пристроями та організації мережевих з'єднань. Мікроконтролер має до 34 доступних GPIO-виводів, однак частина з них зарезервована для внутрішніх функцій, що необхідно враховувати під час проєктування апаратної схеми.

Виводи ESP32 підтримують роботу в режимах цифрового введення та виведення, мають вбудовані аналого-цифрові перетворювачі (ADC), можливість формування широтно-імпульсної модуляції (PWM), а також забезпечують реалізацію основних комунікаційних інтерфейсів, зокрема I2C, SPI та UART. Така функціональна гнучкість дозволяє ефективно інтегрувати різноманітні сенсори, модулі зв'язку та допоміжні пристрої в межах єдиної апаратної платформи.

Блок схема мікроконтролера ESP32 наведена на рисунку 3.1 а структура виводів мікроконтролера ESP32 наведена на рисунку 3.2.

Для живлення периферійних компонентів та самого мікроконтролера передбачено використання виводів 3V3 (номінальна напруга 3,3 В), VIN (вхід живлення 5 В) та GND (загальна шина). Аналого-цифрове перетворення в ESP32 реалізоване за допомогою двох груп каналів — ADC1 та ADC2, особливістю яких є обмеження сумісної роботи з бездротовими інтерфейсами. Зокрема, під час активного використання Wi-Fi задіюється виключно модуль ADC1, тоді як канали ADC2 стають недоступними. До групи ADC1 належать виводи GPIO36, GPIO39, GPIO34, GPIO35, GPIO32 та GPIO33, які забезпечують приймання аналогових сигналів від різних сенсорів, зокрема температурних датчиків, фоторезисторів або інших вимірювальних елементів.

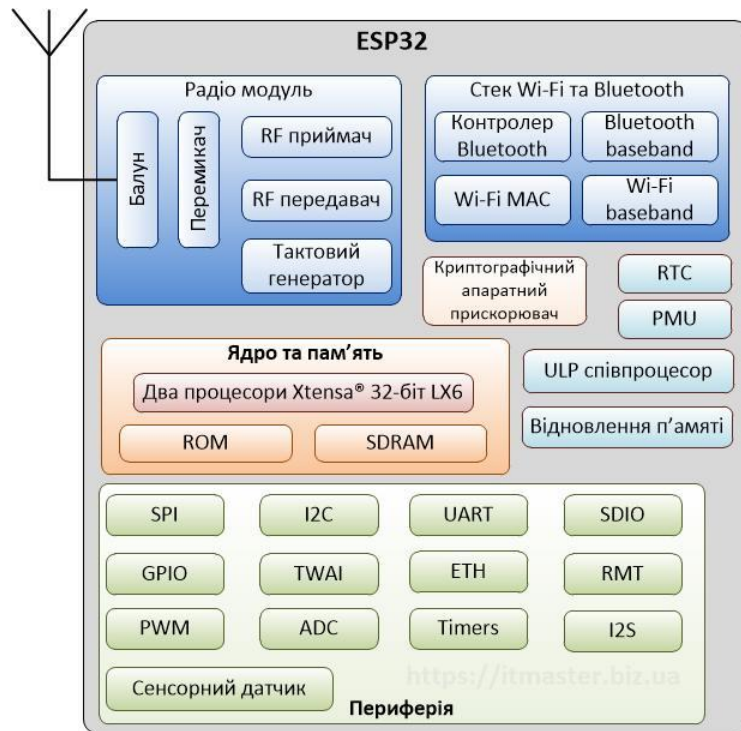


Рис. 3.1. Блок схема мікроконтролера ESP32

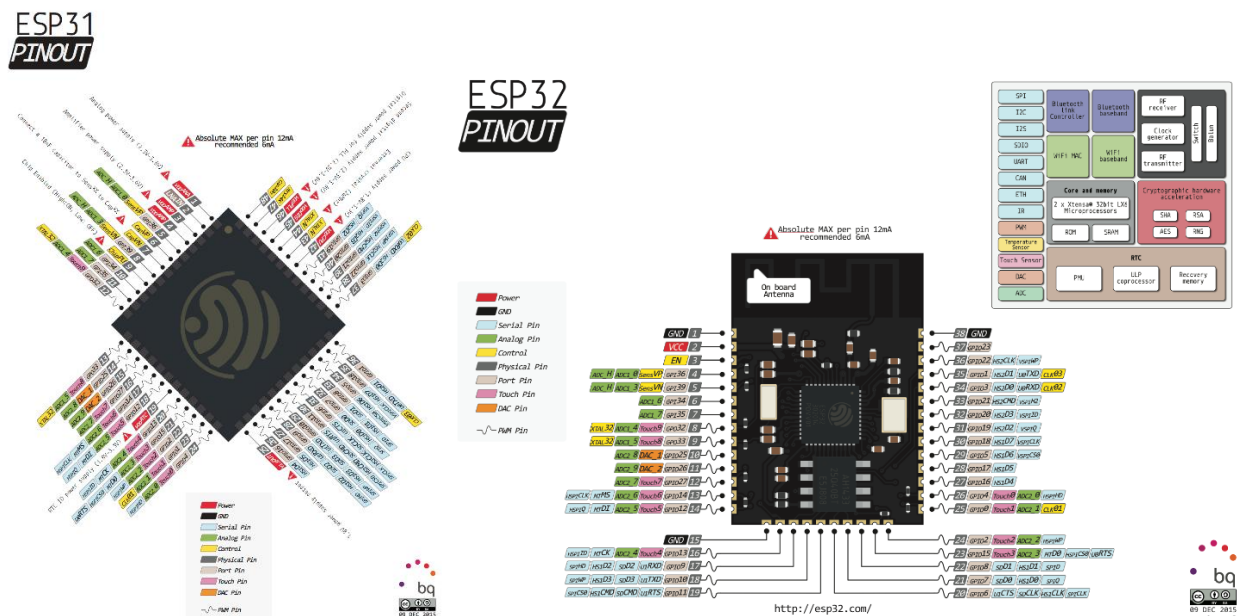


Рис. 3.2. Структура виводів мікроконтролера ESP32

Формування широтно-імпульсних сигналів (PWM) у мікроконтролері ESP32 може бути реалізоване практично на будь-якому GPIO-виводі, що надає значну гнучкість під час керування виконавчими пристроями, такими як світлодіоди, сервоприводи, двигуни постійного струму або інші елементи керування.

3.1.1. Схема підключення датчиків

З метою забезпечення стабільної та коректної роботи системи всі сенсорні та допоміжні компоненти підключаються до мікроконтролера ESP32 з урахуванням їхніх електричних параметрів, логічних рівнів та вимог до живлення. Особливу увагу приділено вибору інтерфейсів обміну даними, що дозволяє мінімізувати апаратну складність та підвищити надійність системи.

Зокрема, датчик BME280, який використовується для вимірювання температури, відносної вологості та атмосферного тиску, підключається до ESP32 за допомогою інтерфейсу I2C. Такий підхід забезпечує простоту апаратної реалізації, стабільний обмін даними та можливість подальшого розширення системи додатковими I2C-пристроями без суттєвих змін у схемі. Структура виводів датчика BME280 наведена на рисунку 3.4.

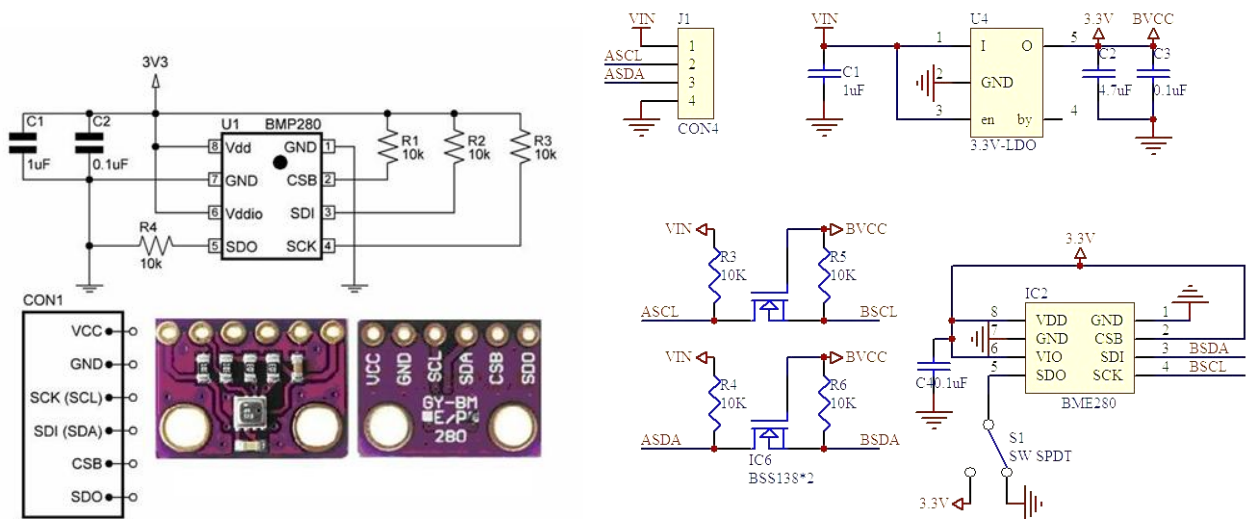


Рис. 3.4. Структура виводів датчика BME280

На периферії плати датчика BME280 розміщені монтажні отвори та шість контактних виводів, призначених для підключення до мікроконтролера. До них належать: VCC — вхід живлення з робочою напругою 3,3 В або 5 В, GND — загальна шина (земля), SCL — лінія тактового сигналу для інтерфейсів I²C або SPI, SDA — лінія передачі даних для інтерфейсу I²C або сигнал MOSI у режимі SPI, CSB — контакт вибору інтерфейсу зв'язку (підключення до VCC активує режим I²C, до GND — режим SPI), а також SDO — багатофункціональний вивід, який у режимі SPI виконує роль лінії MISO, а в режимі I²C визначає адресу пристрою в шині (GND — 0x76, VCC — 0x77).

У проєктованій системі моніторингу датчик BME280 підключений до мікроконтролера ESP32 за допомогою інтерфейсу I²C, що забезпечує зчитування параметрів температури, відносної вологості та атмосферного тиску з використанням мінімальної кількості сигнальних ліній. Зокрема, лінія SDA з'єднана з виводом GPIO21, а лінія SCL — з GPIO22. Оскільки ESP32 функціонує з логічними рівнями напруги 3,3 В, живлення датчика здійснюється безпосередньо від відповідного виходу мікроконтролера, при цьому контакт GND сенсора підключено до спільної шини живлення системи.

Обмін даними між ESP32 та BME280 реалізується відповідно до стандарту I²C, який передбачає адресацію пристроїв у межах спільної шини. У даній конфігурації використовується типова I²C-адреса датчика 0x76 (або 0x77 у разі альтернативного підключення контакту SDO). Застосування апаратного контролера I²C, інтегрованого в ESP32, забезпечує надійний та стабільний обмін даними навіть за умови одночасного підключення кількох пристроїв до однієї шини.

Для забезпечення коректної роботи датчика у програмному забезпеченні використовується спеціалізована бібліотека, яка відповідає за ініціалізацію BME280, налаштування режимів вимірювання, частоти опитування та обробку отриманих цифрових значень. Зчитані дані надалі передаються до підсистеми аналізу або зберігаються для подальшої обробки та візуалізації.

Додатковий модуль, що містить сенсори BMP280 та АНТ20, підключений до тієї ж шини I²C, що і BME280, з метою зменшення кількості задіяних виводів мікроконтролера ESP32 та спрощення загальної електричної схеми. Інтерфейс I²C дозволяє підключати кілька пристроїв до спільних ліній SDA та SCL за умови використання унікальних адрес, що у даному випадку повністю дотримується, оскільки адреси сенсорів не конфліктують між собою.

З урахуванням обмеженої кількості доступних GPIO-виводів ESP32 та необхідності підключення інших периферійних компонентів, використання єдиної I²C-шини забезпечує оптимальний баланс між апаратною простотою, стабільністю передачі даних та можливістю подальшого масштабування

системи. Крім того, інтеграція кількох сенсорів на одній платі дозволяє зменшити кількість з'єднувальних проводів, підвищити надійність монтажу та мінімізувати габаритні розміри конструкції, що є особливо важливим для розміщення електронних компонентів безпосередньо всередині бджолиного вулика. Усі задіяні сенсори працюють від напруги живлення 3,3 В, що усуває потребу у використанні додаткових стабілізаторів напруги або перетворювачів логічних рівнів для ліній I²C.

Схему підключення датчика BME280 до мікроконтролера ESP32 наведено на рисунку 3.5.

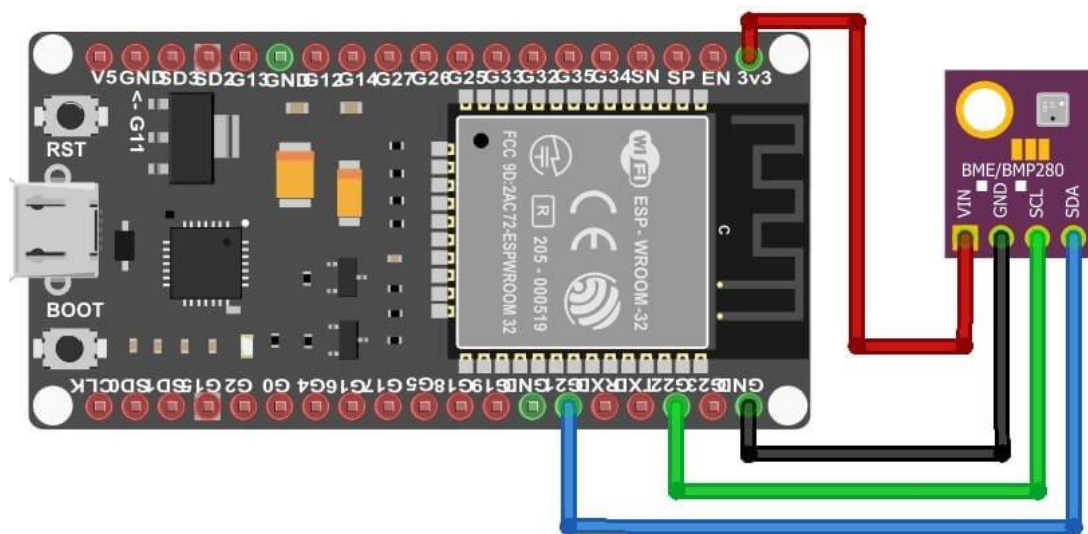


Рис. 3.5. Схема підключення BME280

Підключення чотирьох тензометричних датчиків до аналогово-цифрового перетворювача NX711 реалізовано за класичною мостовою схемою Уїтстона, яка широко застосовується у ваговимірювальних системах. Кожен тензодатчик має дві пари провідників: лінії живлення та сигнальні виводи. Для формування повноцінного тензорного моста датчики розміщуються симетрично, при цьому два з них, встановлені по діагоналі, з'єднуються таким чином, що їх сигнальні виходи формують пари A⁺ та A⁻, тоді як інші два датчики утворюють пари E⁺ та E⁻.

Така конфігурація підключення забезпечує ефективну компенсацію температурних впливів, механічних перекосів та паразитних деформацій конструкції, що суттєво підвищує точність і стабільність вимірювання маси. Завдяки балансуванню мостової схеми зміни опору, викликані зовнішніми

чинниками, взаємно компенсуються, а на виході формується диференційний сигнал, пропорційний прикладеному навантаженню. Схему підключення тензометричних датчиків до модуля HX711 наведено на рисунку 3.6.

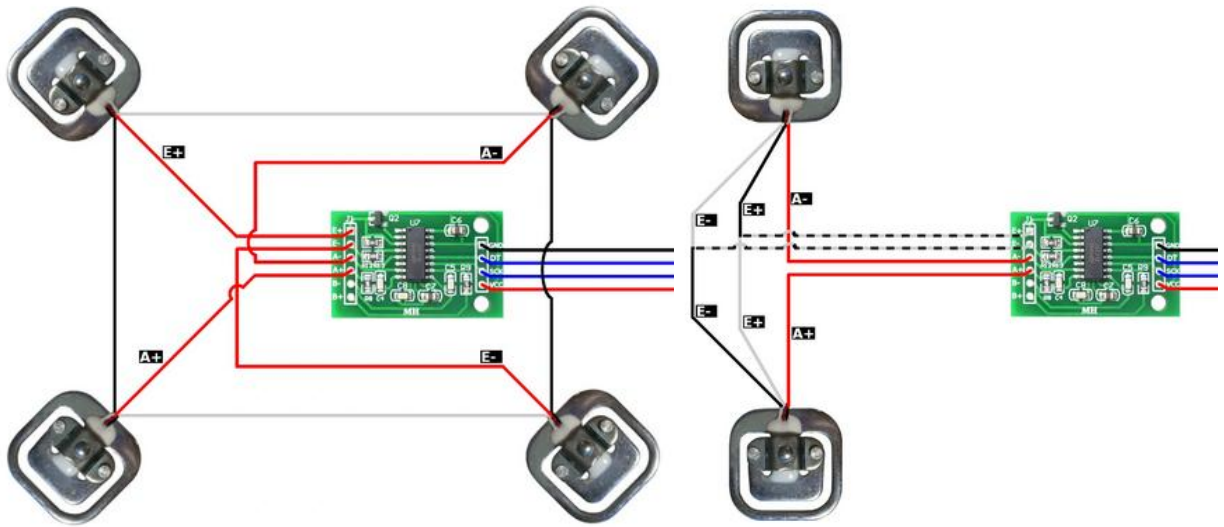


Рис. 3.6. Схема підключення тензодатчиків до модуля HX711

Підключення датчиків маси до плати HX711 здійснюється через відповідні контактні виводи: E+ (Excitation +), який забезпечує живлення тензорного моста; E- (Excitation -), що виконує функцію загального мінусового провідника; A+ (Signal +), через який передається позитивна складова диференційного сигналу; та A- (Signal -), що відповідає за передачу негативної складової. Така схема дозволяє з високою точністю зчитувати мікрровольтові зміни напруги на виході мосту та перетворювати їх у цифровий сигнал, придатний для подальшої обробки мікроконтролером ESP32.

У складі вимірювального вузла використовується мікроконтролер ESP32, цифровий перетворювач HX711 та перетворювач логічних рівнів TXS0108E. Необхідність застосування рівнеперетворювача зумовлена різницею в робочих напругах компонентів: ESP32 функціонує з логічними рівнями 3,3 В, тоді як модуль HX711 живиться від напруги 5 В. Пряме підключення цифрових ліній HX711 до входів ESP32 у такій конфігурації є неприпустимим, оскільки може призвести до пошкодження мікроконтролера внаслідок перенапруги.

Для забезпечення коректного та безпечного обміну даними між пристроями в систему інтегровано перетворювач логічних рівнів TXS0108E, який здійснює двонапрямну адаптацію сигналів між рівнями 5 В і 3,3 В. Передача

інформації від HX711 до ESP32 реалізується за допомогою двох цифрових ліній: DT (Data), що передає виміряні дані, та SCK (Serial Clock), яка відповідає за синхронізацію обміну. Обидві лінії проходять через TXS0108E, де їх рівень напруги знижується до безпечного для ESP32 значення, після чого сигнали подаються на відповідні входи мікроконтролера (GPIO4 та GPIO16).

Організація живлення системи виконана з урахуванням електричних характеристик кожного компонента: модуль HX711 отримує живлення 5 В та GND, мікроконтролер ESP32 працює від стабілізованої напруги 3,3 В, при цьому всі елементи мають спільну загальну шину заземлення. Перетворювач рівнів TXS0108E живиться одночасно від двох джерел: 5 В — для сторони, підключеної до HX711, та 3,3 В — для сторони, підключеної до ESP32. Контакт OE (Output Enable) підключено до лінії 3,3 В, що переводить перетворювач у активний режим роботи.

Застосування такої схеми підключення забезпечує надійне, точне та безпечне зчитування даних з тензометричних датчиків, мінімізує вплив електричних завад і повністю усуває ризик пошкодження електронних компонентів системи моніторингу. Загальний вигляд схеми підключення тензодатчиків до модуля HX711 наведено на рисунку 3.7.

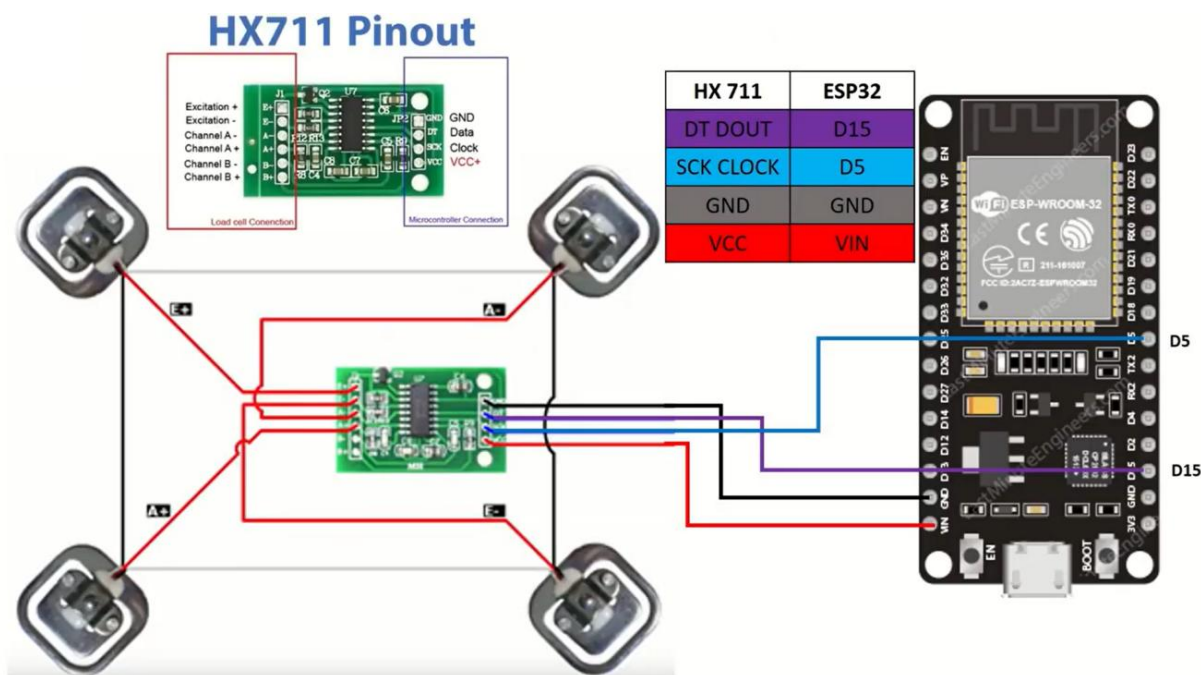


Рис. 3.5. Схема підключення тензодатчиків до HX711

OLED-дисплей з роздільною здатністю 128×64 пікселі на базі контролера SSD1306 інтегрований у корпус приймального модуля системи та використовується для локального відображення основних параметрів, що надходять від сенсорних вузлів. Незважаючи на те, що передача та візуалізація всіх даних здійснюється через хмарний сервіс Blynk, наявність дисплея виконує функцію допоміжного інтерфейсу оперативного контролю, що дає змогу користувачеві швидко оцінити поточний стан системи без необхідності використання мобільного пристрою або комп'ютера.

Застосування локального дисплейного модуля підвищує надійність експлуатації системи в умовах нестабільного або відсутнього доступу до мережі Інтернет, забезпечуючи автономний візуальний контроль ключових показників, зокрема температури, вологості та маси вулика. Це особливо важливо для використання системи в польових умовах або віддалених пасіках.

Підключення OLED-дисплея до мікроконтролера ESP32 реалізовано за допомогою інтерфейсу I2C, що дозволяє суттєво скоротити кількість з'єднувальних провідників і спростити загальну схему підключення. Для обміну даними використовуються стандартні лінії SDA та SCL, які з'єднані відповідно з виводами GPIO21 та GPIO22 мікроконтролера. Живлення дисплея здійснюється від виходу 3,3 В ESP32, що повністю відповідає електричним вимогам контролера SSD1306 та виключає необхідність застосування додаткових стабілізаторів або перетворювачів рівнів.

Завдяки низькому енергоспоживанню OLED-технології та оптимізованому інтерфейсу обміну даними, дисплей практично не впливає на загальний енергетичний баланс системи, що є критично важливим для автономних IoT-рішень. Схему підключення OLED-дисплея на базі SSD1306 до мікроконтролера ESP32 наведено на рисунку 3.6.

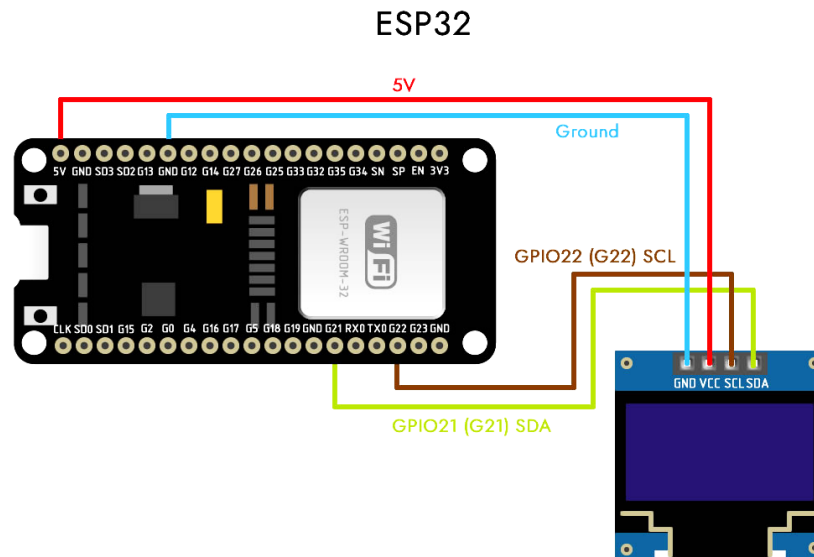


Рис. 3.6. Схема підключення OLED-дисплея

Інтеграція модуля бездротового зв'язку LoRa RA-01 на базі чипа SX1278 з мікроконтролером ESP32 реалізується за допомогою інтерфейсу SPI, який забезпечує стабільний, високошвидкісний та синхронізований обмін даними між пристроями. Використання SPI є доцільним для роботи з радіомодулями, оскільки він дозволяє ефективно керувати передачею інформації та мінімізувати затримки.

Лінія MOSI (Master Out Slave In) модуля LoRa підключена до виводу GPIO23 ESP32 і використовується для передавання даних від мікроконтролера до радіомодуля. Лінія MISO (Master In Slave Out), з'єднана з GPIO19, забезпечує приймання даних у зворотному напрямку — від LoRa-модуля до ESP32. Тактовий сигнал SPI формується через лінію SCK, підключену до GPIO18, яка відповідає за синхронізацію процесу обміну даними.

Для вибору активного пристрою на шині SPI використовується контакт NSS (Chip Select), з'єднаний з GPIO5 мікроконтролера. Керування апаратним скиданням модуля здійснюється через лінію RST, підключену до GPIO14, що дозволяє ініціалізувати або перезапускати LoRa-модуль у разі потреби. Контакт DIO0 з'єднано з GPIO26 та використовується для формування апаратних переривань, сигналізуючи ESP32 про завершення операцій приймання або передавання даних.

Живлення модуля LoRa RA-01 здійснюється від виходу 3,3 В мікроконтролера ESP32, а контакт GND підключений до спільної шини заземлення, що забезпечує коректну роботу всієї системи та стабільність логічних рівнів сигналів. Запропонована схема підключення забезпечує надійний та енергоефективний бездротовий обмін даними, що є критично важливим для реалізації системи дистанційного моніторингу бджолиних вуликів. Схему підключення модуля LoRa наведено на рисунку 3.7.

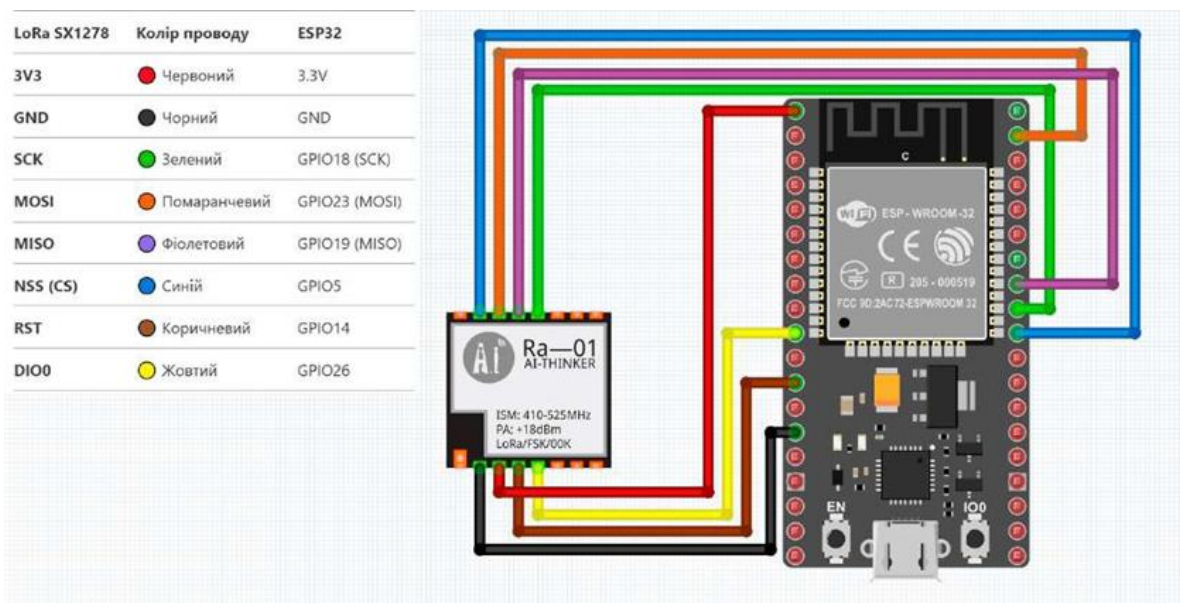


Рис. 3.7. Схема підключення модуля LoRa

На рисунку 3.8 наведено зібраний передавальний модуль системи моніторингу, реалізований на базі мікроконтролера ESP32. До складу пристрою інтегровані сенсори параметрів мікроклімату, зокрема температури, відносної вологості та атмосферного тиску (BME280, BMP280, АНТ20), а також вагові тензометричні датчики, підключені через високоточний підсилювач HX711. Передавання вимірянних даних до приймального вузла здійснюється за допомогою бездротового модуля LoRa RA-01 на базі чипа SX1278, що забезпечує стабільний зв'язок на значних відстанях при мінімальному енергоспоживанні.

Для узгодження логічних рівнів сигналів між мікроконтролером ESP32, який працює з напругою 3,3 В, та тензометричним модулем HX711, що використовує рівень 5 В, у схемі застосовано двонапрямний перетворювач логічних рівнів TXS0108E. Використання цього компонента гарантує коректний

і безпечний обмін даними між пристроями, запобігаючи пошкодженню елементів електронної схеми. Живлення передавального вузла здійснюється від літій-іонного акумулятора типу 18650 через плату керування зарядом та захисту, що забезпечує стабільну та автономну роботу системи.

Усі електронні компоненти змонтовані на макетній платі та розміщені в захисному корпусі, призначеному для експлуатації в польових умовах. Така конструкція підвищує надійність роботи пристрою на пасіці, а також спрощує процедури технічного обслуговування та подальшої модернізації системи за потреби.

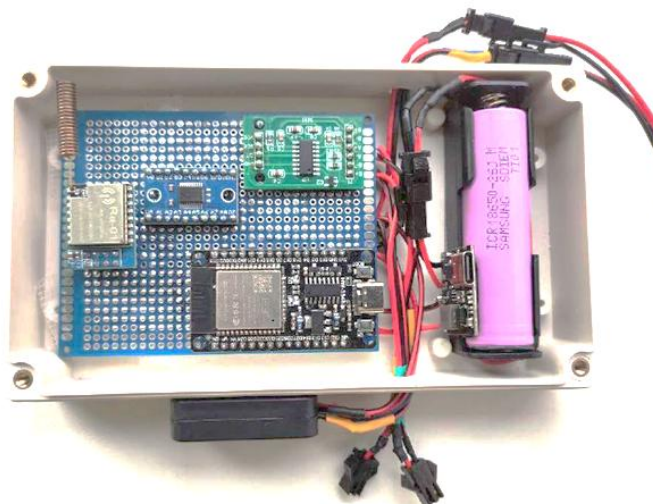


Рис. 3.8. Зовнішній вигляд передавача системи моніторингу

Корпус пристрою виготовлено з ударостійкого ABS-пластику, який характеризується підвищеною стійкістю до ультрафіолетового випромінювання та температурних коливань у діапазоні від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для запобігання проникненню вологи всі з'єднання оснащені гумовими ущільнювачами, а вентиляційні отвори закриті дрібнопористою захисною сіткою, що забезпечує необхідний повітрообмін без ризику потрапляння води всередину корпусу. Місця введення кабелів додатково герметизовані за допомогою силіконових ущільнювальних елементів.

Окрему увагу приділено захисту сенсорів від механічних ушкоджень, забруднення та проникнення комах. На рисунку 3.9 представлено температурно-вологісні датчики, розміщені у спеціалізованому захисному корпусі з

вентиляційною сіткою, що забезпечує точність вимірювань за одночасного захисту чутливих елементів.



Рис. 3.9. Датчики температури та вологості в захисному корпусі з вентиляційною сіткою

На рисунку 3.10 наведено приймальний модуль системи моніторингу, призначений для приймання даних від передавального вузла за допомогою бездротового модуля LoRa RA-01 (SX1278). Приймач реалізований на базі мікроконтролера ESP32, який виконує функції декодування, первинної обробки отриманої інформації та її подальшої передачі до хмарної платформи Blynk для віддаленого моніторингу та аналізу.

Для локальної візуалізації параметрів функціонування вулика у приймальному пристрої використовується OLED-дисплей, що забезпечує відображення в режимі реального часу основних показників, зокрема температури, відносної вологості, атмосферного тиску та маси. Наявність вбудованого дисплея значно підвищує ергономіку системи, дозволяючи оперативно оцінювати стан об'єкта без необхідності доступу до зовнішніх клієнтських пристроїв. Передавання зібраних даних на сервер здійснюється через Wi-Fi-з'єднання, що забезпечує безперервний дистанційний доступ до інформації з будь-якої точки мережі Інтернет.

Крім того, приймальний модуль оснащений світлодіодним індикатором, який використовується для візуального контролю режимів роботи пристрою

(живлення, передавання даних, наявність зв'язку). Усі електронні компоненти змонтовані в захисному корпусі, що мінімізує ризик механічних пошкоджень і забезпечує стабільну експлуатацію пристрою в умовах зовнішнього середовища.

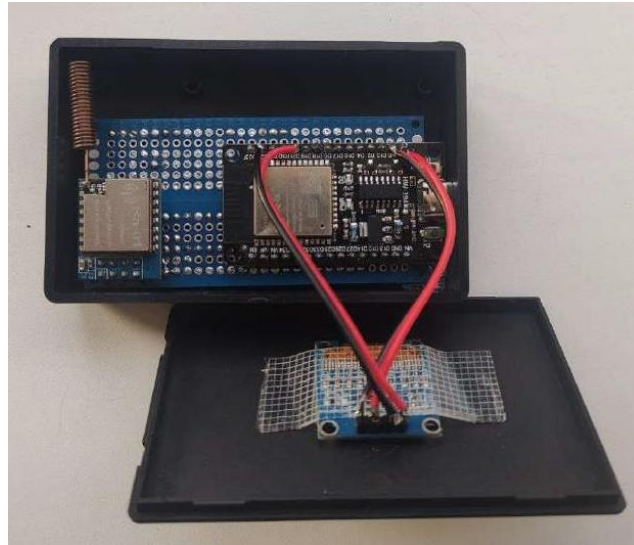


Рис. 3.10. Зовнішній вигляд приймача системи моніторингу

3.2. Розробка програмної частини

Програмна реалізація системи моніторингу бджолиних вуликів ґрунтується на використанні двох логічно взаємопов'язаних програмних модулів, що функціонують на базі мікроконтролерів ESP32 та забезпечують повний цикл обробки інформації — від збору сенсорних даних до їх передавання та віддаленого візуального контролю.

Архітектура програмного забезпечення побудована за принципом розподілу функціональних ролей між передавальним та приймальним пристроями. Передавальний модуль здійснює опитування сенсорів, формування та кодування пакетів даних, після чого передає їх на приймальний вузол за допомогою енергоефективного бездротового зв'язку LoRa у режимі «точка–точка» на частоті 433 МГц. Приймальний модуль, у свою чергу, відповідає за приймання повідомлень, їх обробку, локальне відображення та подальшу передачу до хмарної платформи через Wi-Fi-з'єднання.

Застосування такої дворівневої програмно-апаратної структури дозволяє забезпечити високу надійність обміну даними, низьке енергоспоживання передавального вузла та стабільну роботу системи в умовах відсутності

розвиненої телекомунікаційної інфраструктури, що є характерним для віддалених пасік.

Передавальний модуль призначений для збору параметрів мікроклімату та маси бджолиного вулика з використанням комплексу цифрових сенсорів. До його складу входять датчики BME280, BMP280 та АНТ20, які забезпечують вимірювання температури, відносної вологості повітря та атмосферного тиску, а також тензометричний датчик із підсилювачем HX711, що використовується для визначення маси вулика. Зчитування інформації з мікрокліматичних сенсорів здійснюється через інтерфейс I²C, який дозволяє підключати декілька пристроїв до однієї двопровідної шини мікроконтролера ESP32, суттєво спрощуючи апаратну реалізацію та зменшуючи кількість фізичних з'єднань.

Обробка даних маси виконується шляхом зчитування цифрового сигналу з підсилювача HX711 з використанням калібрувального коефіцієнта CALIBRATION_FACTOR та коригувального зсуву OFFSET, значення яких задаються програмно на основі попередньо виконаних еталонних вимірювань. Для підвищення достовірності результатів усі значення маси, що не перевищують 1 кг, автоматично ігноруються як нерелевантні, оскільки вони можуть бути спричинені електричними шумами або відповідати вазі порожнього вулика. З метою компенсації систематичної похибки датчика BME280, відомого схильністю до заниження показників вологості, у програмному забезпеченні реалізовано корекцію вимірювань шляхом додавання фіксованого значення +4% (константа BME_HUMIDITY_CORRECTION), що підвищує точність та повторюваність результатів.

Після завершення збору та попередньої обробки всі виміряні параметри об'єднуються у структуроване текстове повідомлення з уніфікованим форматом і чітко визначеними ідентифікаторами полів. Приклади такого повідомлення включають рядки виду

«TEMP: 34.7C | HUM: 58% | PRES: 990 hPa | WEIGHT: 18760 g» або

«BME280: T=24.3C H=45.2% P=1005.1 hPa»,

що значно спрощує подальший парсинг і обробку даних на стороні приймального модуля.

З метою зниження ймовірності втрати або пошкодження пакета кожне сформоване повідомлення передається п'ять разів поспіль із короткою часовою затримкою між окремими передачами. Бездротовий модуль LoRa RA-01 на базі чипа SX1278, інтегрований у передавальний пристрій, взаємодіє з мікроконтролером через SPI-інтерфейс і працює з параметрами, підібраними для досягнення оптимального компромісу між дальністю зв'язку, стабільністю передавання та рівнем енергоспоживання, зокрема значеннями spreading factor, bandwidth і потужності передавача. Після завершення циклу передавання система переходить у режим глибокого сну (Deep Sleep), що забезпечує мінімальне енергоспоживання та підвищує автономність роботи пристрою.

Перед переходом у режим глибокого сну система послідовно виконує комплекс обов'язкових завершальних операцій. Зокрема, коректно завершується передавання всіх сформованих пакетів даних через бездротовий інтерфейс LoRa, після чого поетапно деактивуються задіяні периферійні інтерфейси: I²C, що використовується для обміну даними з сенсорами, та SPI, призначений для взаємодії з радіомодулем. Додатково зупиняється робота послідовного інтерфейсу, що дозволяє уникнути втрати даних і некоректних станів під час переходу в енергоощадний режим. Окрема увага приділяється програмному переведенню LoRa-модуля у режим сну за допомогою виклику команди `LoRa.sleep()`, що запобігає його неконтрольованому стану після подальшого пробудження мікроконтролера.

Інтервал глибокого сну встановлено на рівні 60 хвилин, що відповідає 3600000000 мікросекунд, і забезпечує раціональний компроміс між періодичністю оновлення інформації та загальною енергоефективністю системи. У режимі Deep Sleep мікроконтролер ESP32 повністю припиняє виконання прикладного коду, залишаючи активним лише модуль реального часу (RTC), який відповідає за формування сигналу пробудження. Оскільки вміст оперативної пам'яті не зберігається, кожен цикл роботи після виходу зі сну

розпочинається з повної ініціалізації апаратних і програмних компонентів, що позитивно впливає на стабільність функціонування системи після тривалих періодів бездіяльності.

З метою мінімізації паразитного енергоспоживання всі GPIO-порти автоматично переводяться у високоімпедансний стан із фіксацією логічного рівня 3,3 В. Це є критично важливим для підключених периферійних пристроїв, які можуть споживати струм через внутрішні або зовнішні підтягуючі резистори. У разі необхідності додатковий рівень захисту забезпечується апаратним відключенням живлення сенсорів за допомогою MOSFET-ключів, однак у стандартному режимі роботи вони залишаються під напругою для скорочення часу ініціалізації після пробудження.

Пробудження мікроконтролера реалізовано виключно за сигналом RTC-таймера, що унеможливорює випадкову активацію системи під впливом зовнішніх електромагнітних завад. Після завершення заданого інтервалу ESP32 автоматично переходить в активний стан, виконує повторний цикл зчитування, обробки та передавання даних, формуючи замкнутий алгоритм автономної роботи. Завдяки використанню літій-іонного акумулятора формату 18650 у поєднанні зі стабілізацією напруги до 5 В система здатна функціонувати автономно протягом тривалого часу — від кількох тижнів до кількох місяців — без необхідності втручання користувача.

Приймальний модуль, реалізований на базі мікроконтролера ESP32, виконує функції прийому повідомлень через LoRa-канал, локального відображення інформації та передавання ключових параметрів у мобільний застосунок за допомогою хмарної платформи Blynk. Після запуску програмне забезпечення ініціалізує інтерфейси SPI (для LoRa-модуля), I²C (для OLED-дисплея) та модуль Wi-Fi, після чого встановлює з'єднання з сервером Blynk. У разі надходження нового пакета даних спеціалізована функція `parseLoRaData()` здійснює синтаксичний аналіз прийнятого рядка, ідентифікує маркери параметрів, вилучає числові значення та зберігає їх у структурі `SensorData`. Такий підхід дозволяє виявляти неповні або пошкоджені повідомлення: у випадку

відсутності будь-якого параметра відповідне поле не оновлюється, що запобігає використанню недостовірних даних. Факт успішного прийому сигналу індикується короткочасним увімкненням вбудованого світлодіода ESP32, який виконує роль індикатора активності системи.

Відображення інформації на OLED-дисплеї з роздільною здатністю 128×64 пікселі реалізовано у вигляді трьох циклічних режимів, які автоматично змінюються з інтервалом 5 секунд. У першому режимі відображаються параметри мікроклімату всередині вулика, у другому — зовнішні умови, у третьому — технічні характеристики системи, зокрема напруга живлення та рівень сигналу. Використання бібліотеки Adafruit SSD1306 дозволило реалізувати компактний та інформативний графічний інтерфейс із чіткою структурою рядків, що забезпечує зручність візуального сприйняття інформації навіть при короткочасному перегляді. Візуальний інтерфейс приймального модуля представлено на рисунку 3.11.



Рис. 3.11. Візуальний інтерфейс приймача

Система відображення інформації реалізує комплексний інтерфейс із трьома автоматично чергованими екранами, кожен з яких активний протягом 5 секунд (константа `slideInterval`). Верхня смуга дисплея висотою 16 пікселів постійно відображає фірмову назву “Melissa” у вигляді білого прямокутника з

чорним текстом (реалізація через функцію `drawStaticElements`), що забезпечує чітку візуальну ідентифікацію пристрою.

Перший інформаційний екран (`drawInsideSlide`) призначений для детального відображення критично важливих параметрів мікроклімату всередині вулика. На ньому показуються температурні показники з точністю до $0,1^{\circ}\text{C}$ та відносна вологість з точністю до $0,1\%$, отримані з високоточних датчиків АНТ20. Дані супроводжуються чіткими мітками “Temp” та “Humidity” у стандартних одиницях вимірювання.

Другий екран (`drawOutsideSlide`) відображає зовнішні умови навколишнього середовища, використовуючи дані з датчика BME280 із такою ж точністю. Для підвищення точності показників вологості здійснюється програмна корекція значень на $+4\%$, що компенсує систематичну похибку датчика.

Третій, технічний екран (`drawInfoSlide`) включає спеціалізовані параметри: вагу вулика в грамах (ціле число), рівень сигналу LoRa в dBm з позначкою RSSI та час останньої синхронізації з платформою Blynk у хвилинах і секундах. Значення ваги менше 1000 г автоматично фільтруються для виключення хибних показників, викликаних шумами або порожнім вуликом. Час останньої синхронізації відображається у зручному форматі “Xm Ys ago” завдяки функції `formatTime`, яка конвертує мілісекунди у зрозумілий користувачу часовий формат.

Інтерфейс дисплея інтегрований із механізмом прийому даних через LoRa (`receiveLoRaData`). Після надходження нового пакета відбувається миттєве оновлення відображення через функцію `updateDisplay`, що гарантує актуальність інформації на екрані. Для візуального підтвердження успішного прийому повідомлення використовується вбудований світлодіод (`BUILTIN_LED`), який спалахує при кожному прийнятому пакеті даних.

Передача даних до платформи Blynk здійснюється за допомогою бібліотеки `BlynkSimpleEsp32`, яка дозволяє надсилати параметри на віртуальні пini (V1–V8) із фіксованим інтервалом оновлення 5 хвилин, незалежно від

частоти прийому даних. Такий підхід зменшує навантаження на Wi-Fi-мережу та оптимізує енергоспоживання. Функція `updateBlynk()` контролює час останнього оновлення, формує новий пакет даних і передає його у мобільний додаток лише за умови дотримання визначених критеріїв.

У рамках цієї функції відбувається точне відображення ключових параметрів на відповідних віртуальних пінах платформи Blynk. Температурні показники внутрішнього (AHT20) та зовнішнього (BME280) датчиків передаються на піни V1 та V4 з точністю до одного знаку після коми. Вологість з тих самих сенсорів надсилається на піни V2 та V7, забезпечуючи комплексний моніторинг мікрокліматичних умов. Атмосферний тиск, виміряний барометричними датчиками BME280 і BMP280, передається на піни V3 та V5 для оцінки зміни погодних умов. Вага вулика, отримана з тензодатчиків через модуль HX711, надсилається на пін V8 у грамах у вигляді цілого числа.

Кожен цикл передачі супроводжується логуванням у послідовний порт (Serial) із повідомленням [Blynk] Data sent to Blynk (5min interval), що дозволяє відслідковувати стан обміну даними під час налагодження системи. Для уникнення надмірного навантаження на сервер Blynk застосовується прапор `newDataAvailable`, який активується тільки при надходженні нових даних через LoRa-з'єднання, забезпечуючи оновлення хмарного сховища лише за наявності актуальної інформації.

Особливістю реалізації є стабільність зв'язку: система автоматично відновлює підключення до сервера Blynk у разі його втрати, що реалізовано циклом очікування `while (WiFi.status() != WL_CONNECTED || !Blynk.connected())` у функції `setup()`. Усі передані дані зберігаються на платформі Blynk і доступні для візуалізації через мобільний додаток, що дозволяє вести тривалий моніторинг змін параметрів. Для кожного показника можна налаштовувати індивідуальні графіки, інформаційні панелі та межі допустимих значень безпосередньо в інтерфейсі Blynk, що підвищує зручність та наочність аналізу.

Ключовим елементом системи є механізм аварійних сповіщень, який безперервно моніторить критичні параметри мікроклімату, зокрема температуру та вологість. У програмному коді визначено порогові значення: для температури – від 10 °C до 38 °C, для вологості – від 30 % до 80 %. У разі виходу показників за ці межі система автоматично формує відповідне попередження, яке надсилається користувачу через функцію `Blynk.logEvent()` у зручному для мобільного застосунку форматі, наприклад: “УВАГА: Висока температура всередині 39.5°C”.

Щоб уникнути надмірного надсилання повідомлень при незначних коливаннях поблизу порогових значень, реалізовано гистерезис: 2 °C для температури та 5 % для вологості. Статус кожного сповіщення контролюється логічними змінними типу `highTempAlertSent`, що забезпечує одноразове спрацьовування для кожного інциденту. Після нормалізації параметрів відповідні змінні скидаються, дозволяючи повторне сповіщення у разі повторного перевищення порогів.

Програмна архітектура характеризується чіткою модульністю та розподілом функцій: окремі блоки коду відповідають за ініціалізацію, зчитування сенсорних даних, їх обробку, передачу, відображення на OLED-дисплеї та енергозбереження. Такий підхід забезпечує легкість розширення функціональності, наприклад, для інтеграції модуля GPS, карти пам'яті microSD для локального збереження історичних даних або підключення сонячної панелі для автономного живлення.

Весь код написано мовою Arduino C++ із використанням перевірених бібліотек (`Adafruit_Sensor`, `HX711`, `LoRa.h`, `BlynkSimpleEsp32`), що гарантує 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 їх оперативного аналізу система інтегрована з хмарним сервісом із графічним інтерфейсом користувача, що відображає інформацію в реальному часі. У даній

реалізації використано платформу Blynk, яка дозволяє формувати інтуїтивно зрозумілий мобільний інтерфейс.

Передача даних здійснюється через приймальний модуль на базі ESP32. Після отримання пакета з LoRa-модуля RA-01 контролер обробляє дані сенсорів та надсилає їх у хмару через Wi-Fi-з'єднання. Використовується офіційна бібліотека Blynk із унікальним токеном аутентифікації, який забезпечує безпечне зв'язування фізичного пристрою з віртуальним середовищем облікового запису користувача.

Інтерфейс мобільного додатку Blynk було розроблено з метою забезпечення відображення ключових параметрів стану вулика у режимі реального часу. Для кожного сенсорного показника – температури, вологості, атмосферного тиску та ваги – створено окремі віджети, які дозволяють відображати дані як у цифровому форматі, так і у вигляді графіків. Такий підхід дає змогу не лише оперативно контролювати поточний стан, а й аналізувати динаміку змін за обраний часовий проміжок. Дані надходять від передавача з визначеною періодичністю, відповідною інтервалу роботи системи, та автоматично оновлюються на екрані користувача.

Комунікація з платформою Blynk здійснюється через віртуальні піни, що забезпечує гнучке налаштування структури передачі даних та спрощує адаптацію інтерфейсу при зміні конфігурації пристрою або оновленні прошивки. Для реалізації інтерфейсу створено окремий проєкт у мобільному додатку, після чого згенеровано унікальний токен, який інтегрується в прошивку приймального модуля. Кожен віджет прив'язано до відповідного віртуального піну, що забезпечує синхронізацію відображуваних значень із даними, які надходять від приймача.

Завдяки такій конфігурації реалізовано повноцінний користувацький інтерфейс, який дозволяє здійснювати безперервний моніторинг стану вулика з будь-якого місця, де є доступ до Інтернету, без потреби у спеціальних знаннях користувача. Візуальне представлення інтерфейсу наведено на рисунку 3.12.

Однією з ключових функцій системи є автоматичне надсилання критичних повідомлень у разі перевищення допустимих меж температури або вологості. Після обробки отриманих даних на приймальному модулі відбувається порівняння фактичних показників із заданими пороговими значеннями. У разі виявлення перевищень система автоматично генерує подію та надсилає її на сервер Blynk, забезпечуючи своєчасне інформування користувача про критичні стані вулика.

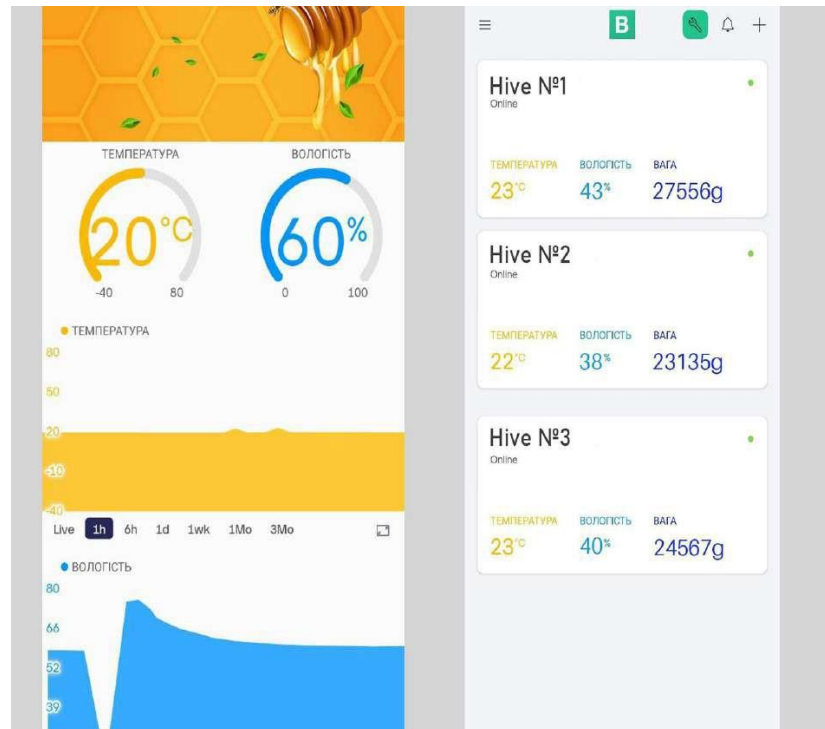


Рис. 3.12. Візуалізація даних з вулика у мобільному застосунку

Користувач, який підключив мобільний застосунок до системи, отримує push-повідомлення у режимі реального часу про критичні зміни параметрів мікроклімату всередині вулика. Крім того, система автоматично надсилає повідомлення на електронну пошту, що забезпечує своєчасне інформування пасічника та дозволяє оперативно реагувати на потенційно небезпечні умови. Завдяки цьому забезпечується надійний контроль навіть на значній відстані від пасіки, що є особливо актуальним для сучасних методів бджільництва. На рисунку 3.13 наведено приклад відображення критичного повідомлення у мобільному додатку.

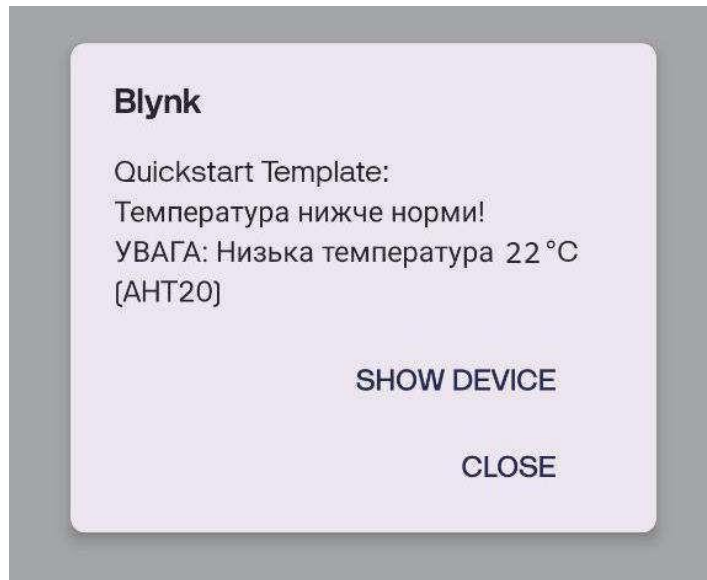


Рис. 3.13. Візуалізація критичного повідомлення у додатку

3.4. Тестування системи

3.4.1. Умови проведення тестування

Система моніторингу бджолиних вуликів тестувалася у реальних умовах на приватній пасіці протягом 7 днів у різні пори доби. Передавач із сенсорами температури, вологості та ваги розташовувався безпосередньо на вулику: зовнішній датчик BME280 – у захисному корпусі з вентиляційною сіткою, внутрішній блок BMP280 + АНТ20 – у гніздовій зоні, а тензодатчик – під дном вулика. Приймач із OLED-дисплеєм SSD1306 (128×64 пікселів) встановлено на відстані ~600–700 м для оцінки стабільності LoRa-зв'язку та точності передачі даних. Дисплей дозволяв оперативний контроль параметрів без використання мобільного застосунку. Температура навколишнього середовища коливалася від +6 °C до +22 °C у різних погодних умовах.



Рис. 3.14. Розміщення передавача на вулику

3.4.2. Перевірка стабільності бездротового зв'язку (LoRa)

Тестування модулем SX1278 проводилось на відстанях до 700 м із природними перешкодами (дерева, будівлі).

Таблиця 3.1

Тестування LoRa SX1278

Відстань, м	Середня затримка, с	Втрати пакетів, %
300	0,5	0
500	1,5	1–2
700	2,5	3–5

На 300 м зв'язок залишався стабільним без втрат пакетів (затримка $\sim 0,5$ с), на 500 м – до 1,5 с, на 700 м – до 2,5 с із поодинокими втратами пакетів. Графік залежності затримки від відстані демонструє, що протокол LoRa забезпечує надійну передачу даних у реальних умовах, а в умовах відкритої місцевості дальність може збільшуватися до теоретичних 10 км.

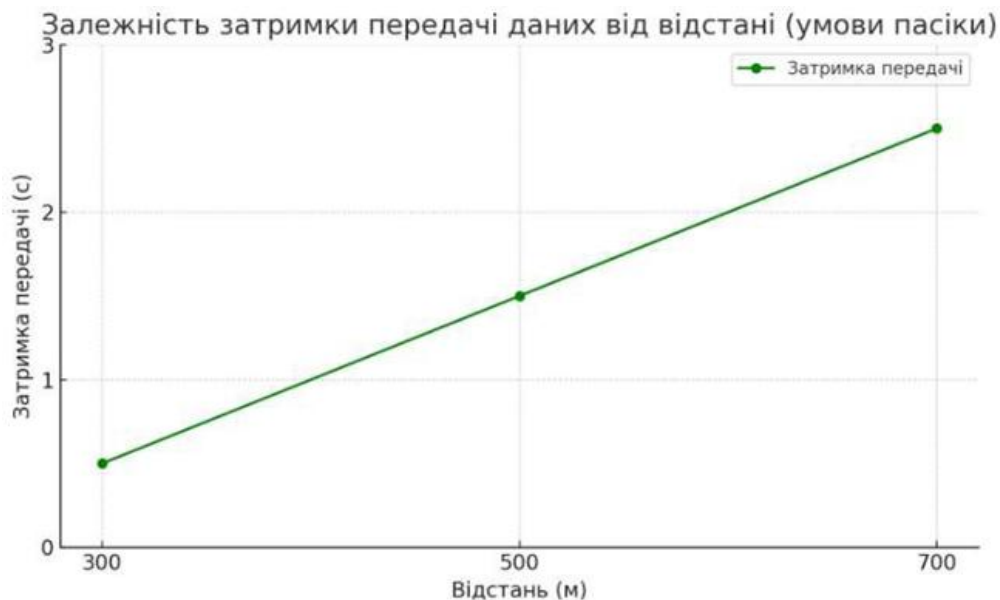


Рис. 3.15. Залежність затримки передачі даних від відстані

3.4.3. Тестування сенсорів

Температура всередині вулика утримувалася на рівні 33–35 °С, а вологість – 50–60 % з короткочасними зниженнями до 40 %. Зовнішні датчики фіксували більші коливання температури та вологості, проте внутрішні показники залишалися стабільними. Зміна ваги вулика протягом тижня склала 2 328 г (з початкових 23 563 г), що відображає природну активність бджіл і залежність від погодних умов та наявності медоносів.

Таблиця 3.2

Внутрішній мікроклімат та вага вулика

Параметр	Діапазон/Середнє	Примітка
Температура всередині, °С	33–35	Оптимальна для розвитку розплоду
Вологість, %	50–60 (мін. 40)	Короткочасне падіння через вентиляційну активність бджіл
Зміна ваги, г	2 328 (з початкових 23 563)	Відображає активність бджіл та наявність медоносів

Результати підтверджують точність та надійність сенсорів для моніторингу критичних параметрів.



Рис. 3.16. Зміна ваги вулика

3.4.4. Тестування мобільного інтерфейсу (Blynk)

Мобільний додаток Blynk забезпечував віддалений доступ до даних температури, вологості та ваги вулика. З'єднання з ESP32 було стабільним, дані передавалися без затримок і втрат пакетів. Інтерфейс відображав актуальні показники в реальному часі, забезпечуючи зручний та інтуїтивно зрозумілий контроль. Платформа дозволяє легко масштабувати систему шляхом підключення нових сенсорів або функцій без змін апаратного забезпечення.

3.4.5. Перевірка автономності передавача

Передавач живився від літій-іонного акумулятора 18650 ємністю 2600 мА·год. Споживання: ~50 мА у активному режимі та <1 мА у Deep Sleep. При інтервалі оновлення даних 10 хв батарея забезпечувала безперервну роботу 7 днів без підзарядки.

Таблиця 3.3

Дослідження залежності автономності від тривалості сну показало

Інтервал сну, хв	Тривалість роботи, дні
5	73
30	100
60	104

Графік показує асимптотичний приріст автономності, що підтверджує ефективність оптимізації частоти передачі та енергозберігаючих режимів.

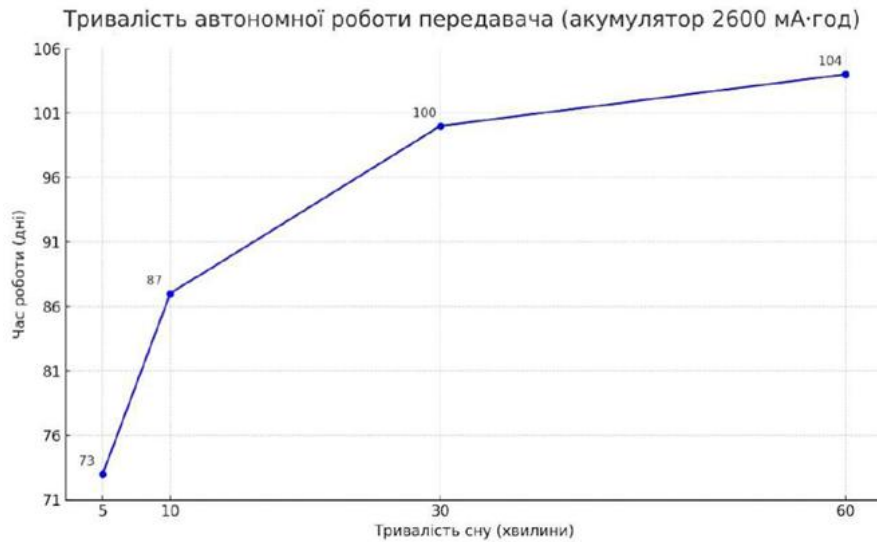


Рис. 3.17. Залежність тривалості автономної роботи передавача від інтервалів Deep Sleep

3.4.6. Масштабованість системи та перспективи вдосконалення

Система придатна для малих і великих пасік, забезпечуючи надійну передачу даних на сотні метрів без кабельної інфраструктури. Передавачі автономно фіксують мікроклімат та вагу вулика, а система ідентифікації гарантує коректну маршрутизацію даних при масштабуванні. Blynk дозволяє централізовано збирати та аналізувати великі обсяги даних; можливе підключення зовнішніх серверів для прогнозування аномалій і автоматичних сповіщень.

Програмна архітектура дає змогу інтегрувати нові сенсори (акустичні, газові, акселерометри) та алгоритми машинного навчання без заміни апаратного забезпечення. Енергетична автономність завдяки Deep Sleep і оптимізації частоти передачі дозволяє передавачам працювати понад 100 днів.

Перспективи вдосконалення: інтеграція нових сенсорів, автоматичне регулювання вентиляції, адаптивні режими енергоспоживання, використання сонячних панелей, розвиток веб-інтерфейсу та вдосконалення мобільного додатку для аналітики та централізованого управління.

Висновки до розділу

У цьому розділі було реалізовано повну апаратну та програмну частину системи моніторингу бджолиних вуликів, а також налаштовано хмарний сервіс для віддаленого спостереження.

Апаратна складова базується на мікроконтролері ESP32, до якого підключено набір сенсорів: BME280, BMP280, АНТ20 для вимірювання температури, вологості та атмосферного тиску, а також тензодатчики з HX711 для контролю маси вулика. Для забезпечення стабільного зв'язку на великій відстані використано модуль LoRa RA-01, а передача даних у локальну мережу реалізована через Wi-Fi. Для захисту електронних компонентів від зовнішніх впливів передбачено спеціальні корпуси з вентиляційними отворами та ущільненнями.

Програмна частина системи складається з двох основних модулів: передавача, який зчитує дані з датчиків і передає їх через LoRa, та приймача, який отримує інформацію, обробляє її і передає на сервер. Для стабільної роботи реалізовано алгоритми фільтрації даних, корекції показників (наприклад, вологості з BME280) та циклічного переходу у режим глибокого сну для енергозбереження. Дані передаються у структурованому форматі з мітками, що спрощує їх подальший аналіз.

Хмарний сервіс побудовано на платформі Blynk, яка забезпечує візуалізацію даних у реальному часі через мобільний додаток. Налаштовано віджети для відображення температури, вологості, атмосферного тиску та ваги, а також автоматичні сповіщення при перевищенні критичних значень, що дозволяє пасічнику оперативно реагувати на зміни стану вулика.

Тестування системи в реальних умовах підтвердило її стабільність і надійність. Передавачі з датчиками BME280, BMP280, АНТ20 та тензодатчиками HX711 забезпечили точний моніторинг мікроклімату та ваги вулика. LoRa RA-01 SX1278 гарантує ефективну передачу даних до 700 м, а мобільний інтерфейс Blynk забезпечує віддалений доступ у реальному часі. Оптимізація енергоспоживання дозволяє передавачам працювати до 104 днів без підзарядки. Захисні корпуси ефективно оберігають електроніку, не впливаючи на точність вимірювань. Система готова до масштабного та тривалого використання, забезпечуючи надійний моніторинг умов у вуликах та підтримку цифрової трансформації бджільництва.

ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи розроблено та практично реалізовано систему моніторингу бджолиних вуликів на основі концепції Internet of Things (IoT). Основні результати дослідження полягають у наступному:

1. Проведено комплексний аналіз галузі бджільництва, що дозволило ідентифікувати критичні фактори впливу на життєдіяльність бджолиних сімей. Обґрунтовано необхідність автоматизації контролю мікроклімату як ключового інструменту зниження втрат у сучасному бджільництві.
2. Спроектовано архітектуру багатокомпонентної системи, що базується на енергоефективному мікроконтролері ESP32. Вибір технології LoRa дозволив забезпечити стабільний радіозв'язок на відстані до 700 м, що є оптимальним для умов розосереджених пасік.
3. Розроблено та протестовано апаратно-програмний комплекс, який забезпечує високу точність вимірювань (температура — $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, вологість — $\pm 3\%$, вага — $0,1\%$).
4. Реалізовано алгоритми збору та обробки даних у середовищі Arduino IDE з подальшою інтеграцією у хмарну платформу Blynk для візуалізації та оперативного сповіщення.
5. Експериментально підтверджено високу автономність системи (до 4 місяців роботи без підзарядки), що доводить економічну доцільність її впровадження.

Наукова новизна та практичне значення роботи полягають у подальшому розвитку інформаційної технології моніторингу через поєднання прецизійних датчиків, хмарних сервісів та мобільних інтерфейсів. Впровадження системи дозволяє мінімізувати безпосереднє втручання людини в життя бджіл, підвищити продуктивність пасіки та забезпечити цифрову трансформацію галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Analysis of Energy Consumption in a Precision Beekeeping System. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.14934>
3. Arduino – What is it and why use it? Wired. URL: <https://www.wired.com/2008/04/just-what-is-an/>
4. 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
5. Blynk: офіційний сайт платформи для розробки IoT-додатків. URL: <https://www.blynk.cc/>
6. 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>
7. 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.
8. ESP32 Forum: технічна підтримка і документація. URL: <https://www.esp32.com/>
9. 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>
10. GeekDad Arduino Guide: Introduction. Wired. URL: <https://www.wired.com/2012/02/arduino-introduction/>
11. Hackster.io. Smart Beehive Monitoring Systems. URL: <https://www.hackster.io/vishwasnavada/smart-beehive-monitoring-systems->

12. IoT Enabled Bee Hive Monitoring System. URL: https://www.researchgate.net/publication/375707527_IoT_Enabled_Bee_Hive_Monitoring_System
13. IoT For All: новини, аналітика та освітні матеріали з тематики IoT. URL: <https://www.iotforall.com/>
14. 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.
15. Kridi, D. S., et al. A framework for better sensor-based beehive health monitoring *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 210. P. 107923.
16. 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.*
17. Liyanage N. IoT-Based Smart Beehive Monitoring System. *2024 6th International Conference on Advancements in Computing (ICAC)*. 2024. P. 247– 252.
18. Machine Learning, ML – Машинне навчання. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/>
19. Raspberry Pi Foundation: офіційний сайт мікрокомп'ютерів Raspberry Pi. URL: <https://www.raspberrypi.org/>
20. Real-Time Monitoring System of a Beehive Through IoT. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5187027
21. Salama R. Internet of intelligent things (IoT) – An overview. *2023 International Conference on Computational Intelligence, Communication Technology and Networking (CICTN)*. 2023. P. 801–805.
22. ScienceDirect. Intelligent Beehive Monitoring System Based on Internet of

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375524001898>

- 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.Terenzi, A., Cecchi, S., Spinsante, S., Orcioni, S., Piazza, F. A Smart Sensor-Based Measurement System for Advanced Bee Hive Monitoring Sensors, 2020. Vol. 20, No. 9. P. 2726.
- 25.Захарченко Т. В. Методи оцінки стану бджолиних сімей за допомогою комп'ютерних технологій, Бджільництво України, 2022. № 3. С. 15–20.
- 26.Іванов І. І. Система моніторингу бджолиних вуликів на основі Інтернету речей: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06 Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. Київ, 2022. – 150 с.
- 27.Ковальчук Л. П. Вплив кліматичних змін на продуктивність бджолиних сімей: моніторинг та прогнозування: Дис. канд. с.-г. наук: 06.02.01, Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України, Київ, 2021. – 130 с.
- 28.Морозов Д. В. Розробка алгоритмів обробки даних з датчиків для моніторингу бджолиних вуликів, Комп'ютерні технології в сільському господарстві. 2023. № 2. С. 34–41.
- 29.Оконський М.В., Лупенко С.А., Паламар А.М. Інформаційно-вимірювальна система для контролю метеорологічних параметрів на основі Інтернету речей. Матеріали ІХ науково-технічної конференції "Інформаційні моделі, системи та технології" Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 8–9 грудня 2021 року), Тернопіль: ТНТУ, 2021. С. 118.
- 30.Оконський М.В., Лупенко С.А., Паламар А.М. Комп'ютерна система для моніторингу метеорологічних параметрів на основі IoT. Актуальні задачі сучасних технологій : збірник тез доповідей X міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів (Тернопіль, 24–25 листопада 2021 року), Тернопіль: ТНТУ, 2021. С. 112.

- 31.Паламар А., Величко Д. Система моніторингу якості повітря в приміщеннях. Матеріали V Міжнародної студентської науково-технічної конференції "Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання" (Тернопіль, 28-29 квітня 2022 року), Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 138.
- 32.Паламар М.І., Стрембіцький М.О., Паламар А.М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів. Навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ. 2019. 150 с.
- 33.Петренко О. В. Розробка програмно-апаратного комплексу для моніторингу стану бджолиних сімей: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06 Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. Київ, 2023. 120 с.
- 34.Савченко О. М. Аналіз впливу електромагнітного випромінювання на бджолині сім'ї, Екологічний вісник, 2021. № 4. С. 56–63.
- 35.Сидоренко М. М. Інноваційні технології в бджільництві: моніторинг та аналіз: Дис. докт. с.-г. наук: 06.02.01, Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. Київ, 2024. – 200 с.
- 36.Ткаченко А. С. Сучасні методи моніторингу стану бджолиних вуликів: огляд та аналіз, Вісник аграрної науки, 2022. № 3. С. 45–52.
- 37.Федоренко В. М. Розробка програмного забезпечення для аналізу даних з систем моніторингу бджолиних вуликів Інформаційні технології в агропромисловому комплексі, 2023. № 1. С. 10–17.

ДОДАТОК А
ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЕРЕДАВАЧА
ДАНИХ ДЛЯ ІОТ-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 ІОТ-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();

112

    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, "Bará: ", "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 (AHT20)

if (lastData.aht_temp > HIGH_TEMP_THRESHOLD &&
!highTempAlertSent) {

    sendAlert("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)
{

```

```

        sendAlert("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 (AHT20)

    if (lastData.aht_humidity > HIGH_HUMIDITY_THRESHOLD &&
!highHumidityAlertSent) {

        sendAlert("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 showAlert(const String& eventName, const String& message) {  
  
  Blynk.logEvent(eventName, message);  
  
  Serial.println("[Alert] " + message);  
  
}
```