

Іванишин В.В.

Національний університет харчових технологій

Мошенский А.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

КОНЦЕПЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПАСІКИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LORA З ВИКОРИСТАННЯМ СЕНСОРІВ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

У сучасному світі бджільництво стає все більш залежним від нових технологій для підвищення продуктивності пасік та забезпечення ефективного управління бджолосім'ями. Однією з ключових проблем є необхідність своєчасного моніторингу стану вуликів для запобігання роїнню, захворювань бджіл та інших факторам, що можуть призвести до втрати бджолосімей. Система моніторингу на базі технології LoRa та контролера ESP32 пропонує економічне рішення для віддаленого контролю стану вуликів у реальному часі з використанням бездротових сенсорних мереж.

Основними перевагами системи є низьке енергоспоживання, великий радіус дії (до 15 км) і можливість автономної роботи завдяки використанню сонячних панелей і акумуляторів. Це робить систему ідеальною для використання у віддалених районах або на великих пасіках. Система включає сенсори для вимірювання температури, вологості, ваги та акустики у вуликах. Зібрані дані передаються через мережу LoRa на базову станцію, де зберігаються на хмарному сервері, і доступні для аналізу через веб-інтерфейс або мобільний додаток.

Система моніторингу бджолосімей на основі ESP32 та LoRa є однією з найекономічніших та ефективних систем серед існуючих на ринку. Вартість впровадження для одного вулика варіюється від \$36 до \$85, а для базової станції – від \$70 до \$150, що робить її доступною навіть для невеликих пасік. Крім того, низькі витрати на обслуговування (приблизно \$10–\$20 на рік) забезпечують швидку окупність інвестицій протягом 1–2 років.

В статті наводяться порівняльні характеристики аналогічних систем та бездротових технологій. Запропонована концепція та структурна схема автоматизованої системи. Особлива увага приділяється енергозбереженню контролера ESP32, тому запропоновано використання режиму глибокого сну, що дозволяє контролеру працювати кілька місяців без необхідності перезарядки.

Розроблена концепція може бути використана як основа для подальших досліджень та удосконалень у сфері автоматизації бджільництва, а також слугувати базою для масштабованих IoT-рішень у галузі сільського господарства. Реалізація і застосування запропонованої системи дозволить значно підвищити ефективність управління пасіками, зменшити ризики втрат і поліпшити якість розвитку бджолосімей та надасть ефект від запилу ентомофільних культур.

Ключові слова: бджільництво, моніторинг бджолосімей, LoRa, ESP32, бездротові сенсорні мережі, автоматизація пасіки, інтернет речей (IoT), енергозбереження, сенсори температури, сенсори ваги, сонячні панелі, автономна система, віддалений моніторинг, хмарні сервіси, пасіка, апарії.

Постановка проблеми. Бджільництво є однією з ключових галузей сільського господарства, яка забезпечує виробництво не тільки меду та інших цінних продуктів (прополіс, маточне молочко, бджолина отрута), але й виступає критично важливою складовою для запилення ентомофільних культур. У зв'язку зі зниженням кількості бджолосімей та скороченням виробництва, постала нагальна потреба у впровадженні інноваційних рішень для управління пасіками та контролю стану бджіл [15].

Однією з найбільших проблем сучасного бджільництва є значні витрати часу та ресур-

сів на моніторинг та обслуговування бджолосімей. У більшості випадків це потребує постійної фізичної присутності пасічника, що ускладнює управління великими пасіками та знижує ефективність виробництва. Традиційні методи ведення бджільництва часто не враховують сучасні технології, які здатні полегшити цей процес і зробити його більш продуктивним [12].

З цією метою було розроблено та впроваджено низку автоматизованих систем моніторингу стану бджолиних сімей [2–3, 5–8]. Однак, більшість існуючих систем мають обмеження, такі як висока

вартість, недостатня адаптація до місцевих умов та обмежений функціонал. Це зумовлює потребу в розробці нової системи, яка б враховувала особливості українського ринку і була доступною для малих та середніх пасік.

Ця робота спрямована на розробку та обґрунтування концепції нової системи моніторингу бджолосімей, заснованої на сучасних бездротових технологіях і здатної забезпечити ефективний контроль за станом вуликів у реальному часі. Особливу увагу буде приділено використанню технологій LoRa та IoT, що забезпечують віддалений доступ до даних і дозволяють оптимізувати витрати енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі розвитку технологій для бджільництва існує багато різноманітних систем моніторингу стану бджолосімей [2–3, 5–8, 10, 14, 16]. Однак, більшість з них поки що не набули широкого розповсюдження і знаходяться на етапі тестування або вдосконалення. Нижче наведено порівняльний аналіз найбільш популярних систем, що використовуються в бджільництві на сьогоднішній день.

Основні недоліки наведених систем:

1. BroodMinder – обмежений радіус дії через використання технології Bluetooth.
2. Arnia – висока вартість і залежність від GSM мереж, що ускладнює використання у віддалених регіонах.
3. HiveTool – відсутність інтеграції з іншими сенсорами чи системами моніторингу.
4. ApisProtect – висока ціна та складність налаштувань для малих пасік.
5. BuzzBox – підтримує лише базові сенсори, такі як температура та вага.

6. BeeCheck – Основним недоліком є обмежена функціональність для великих пасік, де необхідно більше комплексних даних.

7. VIBee – не підтримує інші параметри, крім вібрації, що обмежує можливості аналізу.

8. Bee-Ring – система є дорогою, і підтримка додаткових сенсорів обмежена.

Постановка завдання. Сучасні системи моніторингу бджолосімей, які наведені вище та інші, зазвичай мають високу вартість і використовують енергоємні технології передачі даних (GSM, Wi-Fi), що обмежує їх використання у віддалених місцевостях або на великих пасіках. Ці системи також можуть залежати від доступу до мобільних мереж, що не завжди є можливим у сільській місцевості. Тож метою розробки концепції є створення нової автоматизованої системи моніторингу бджолосімей у вигляді доступного, енергоефективного та масштабованого рішення для віддаленого контролю стану вуликів, яке забезпечить пасічникам можливість моніторингу ключових параметрів без постійної фізичної присутності на пасіці з можливістю автоматизованої обробки даних та надання рекомендації по проведенню необхідних робіт.

Виклад основного матеріалу. Наразі вже існують системи, які дозволяють здійснювати моніторинг бджолосімей за допомогою бездротових сенсорів, що передають дані у режимі реального часу. Проте багато з них мають обмежений функціонал або є занадто дорогими для масового використання. У даному дослідженні пропонується концепція інноваційної системи моніторингу, яка використовує сучасні технології бездротової передачі даних, зокрема LoRa, що забезпечує низьке енергоспоживання, широкий радіус дії та можливість роботи у віддалених місцевостях.

Таблиця 1

Порівняння систем моніторингу бджолосімей

№	Система	Вартість (USD)	Функціональність	Технологія передачі даних	Країна походження	Особливості
1	BroodMinder	\$199–\$499	Основні параметри	Bluetooth	США	Простий монтаж
2	Arnia	\$400–\$1000	Розширений аналіз	GSM/IoT	Велика Британія	Моніторинг у реальному часі
3	HiveTool	\$250–\$600	Температура, вага	Інтернет	США	Аналіз метеоумов
4	ApisProtect	\$300–\$800	AI, оповіщення	IoT	Ірландія	Інтеграція з штучним інтелектом
5	BuzzBox	\$150–\$450	Температура, вага	GSM/IoT	США	Аналіз акустики
6	BeeSecure	\$50–\$100	Захист від крадіжок	GSM, GPS	Німеччина	Датчики руху
7	VIBee	\$200–\$600	Вібраційний аналіз	GSM, Wi-Fi	Швейцарія	Моніторинг вібрації для аналізу активності бджіл
8	Bee-Ring	\$250–\$700	Температура, вага, звук	IoT	Франція	Розширений аналіз активності бджіл

Порівняння бездротових технологій передавання даних

Технологія	Рік виникнення	Діапазон дії	Енергоспоживання	Швидкість передачі даних	Орієнтовна вартість впровадження (USD)	Придатність для бджільництва
LoRa	2015	До 15 км	Низьке	0.3–50 Кбіт/с	\$30–\$150	Висока
NB-IoT	2016	До 10 км	Низьке	26–250 Кбіт/с	\$1000–\$1500	Середня
GSM/4G	1991 (GSM), 2009 (4G)	Широке покриття	Високе	До 100 Мбіт/с	\$800–\$2000	Низька
ZigBee	1998	До 100 м	Низьке	До 250 Кбіт/с	\$150–\$300	Низька
Wi-Fi	1997	До 100 м	Високе	До 600 Мбіт/с	\$500–\$1000	Низька

З огляду на поставлену проблему пропонується, взявши з основу загальні принципи побудови аналогів, створити нову автоматизовану систему з трьома основними перевагами:

1. **Використання технології LoRa** – (Long Range) є сучасною бездротовою технологією, яка дозволяє передавати дані на великі відстані (до 10–15 км) при мінімальних витратах енергії. У порівнянні з іншими технологіями передачі даних (Bluetooth, Wi-Fi або GSM), LoRa забезпечує кращу дальність і енергоефективність, що робить її ідеальним вибором для віддалених або великих пасік [1, 4, 9]. Основні параметри сучасних бездротових технологій наведені у Таблиці 2.

2. **Висока енергоефективність.** Використання контролера ESP32 з підтримкою режиму глибокого

сну значно знижує енергоспоживання системи. Контролер може споживати лише кілька мікроампер під час сну і пробуджуватися лише для збору та передачі даних, що забезпечує роботу системи від сонячних панелей або батарей протягом кількох місяців (до півроку) без необхідності обслуговування [11, 17, 18, 19].

3. **Низька вартість.** Нова система розроблена на основі модульної архітектури та з використанням стандартних сенсорів, які мають широке поширення і низьку вартість. Такий підхід дозволить пасікам при розширенні значно зменшити вартість впровадження автоматизованої системи.

Структурно-функціональна схема пропонованої системи наведена на рисунку 1:

Технологічні особливості: Запропонована система моніторингу стану бджолосімей базується

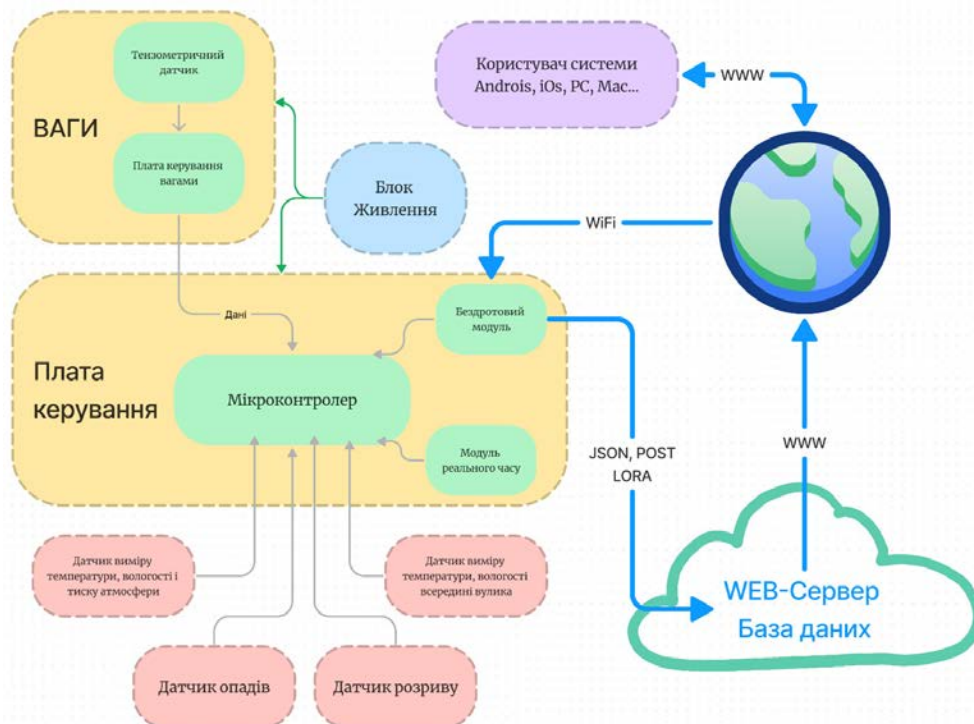


Рис. 1. Структурно-функціональна схема автоматизованої системи моніторингу стану бджолосімей

на інтеграції LoRa як основної технології передачі даних. Система включає набір сенсорів, які вимірюють температуру, вологість, вагу вуликів та акустичні параметри бджіл. Дані збираються у режимі реального часу і передаються на центральний сервер через мережу LoRa.

Ключовими компонентами системи є:

1. Сенсори температури і вологості: встановлені всередині та зовні вулика для контролю мікроклімату.

2. Вагові сенсори які дозволяють моніторити вагу вулика для відстеження медозбору та споживання кормів.

3. Акустичні сенсори: записують звуки вулика для аналізу активності бджіл та виявлення критичних ситуацій, таких як відсутність матки або роїння.

4. LoRa-модуль: забезпечує передачу даних з сенсорів на сервер на великі відстані з мінімальним споживанням енергії.

5. Модуль живлення: включає сонячні панелі та батареї для забезпечення тривалої автономної роботи системи.

Оптимізація коду для контролера ESP32 в режимі глибокого сну: У системах моніторингу бджолосімей важливо забезпечити тривалу автономну роботу, мінімізуючи енергоспоживання. Одним із найефективніших способів досягти цього є використання режиму глибокого сну (deep sleep) у контролерах ESP32 [18, 19]. Цей режим дозволяє значно знизити енергоспоживання, оскільки всі непотрібні компоненти, такі як Wi-Fi і процесор, вимикаються, а контролер споживає лише кілька мікроампер енергії.

Для підвищення енергоефективності системи моніторингу можна впровадити кілька додаткових оптимізацій. Окрім таймера пробудження, ESP32 також підтримує пробудження від різних апаратних подій, таких як сигнал від сенсорів або зовнішніх кнопок. Це дозволяє використовувати контролер у більш складних сценаріях і знижувати енергоспоживання.

У деяких випадках, особливо при моніторингу стану вуликів, важливо, щоб система могла миттєво реагувати на критичні події (наприклад, різкі зміни температури або ваги). Для цього можна налаштувати пробудження ESP32 за допомогою сигналу від зовнішніх сенсорів через GPIO-піни.

Висновки. Нове рішення з використанням технології LoRa є ідеальним для системи моніторингу бджолосімей завдяки своїм численним перевагам. Воно дозволяє передавати дані на

дуже великі відстані, до 10–15 км, що надзвичайно корисно для великих або віддалених пасік. Завдяки низькому енергоспоживанню система може працювати автономно протягом тривалого часу, використовуючи лише батареї або сонячні панелі, що значно знижує потребу в технічному обслуговуванні. Крім того, LoRa має високу стійкість до перешкод, що забезпечує надійну передачу даних навіть у складних умовах. Система легко масштабується і дозволяє однією базовою станцією обслуговувати велику кількість вуликів, що знижує загальні витрати на впровадження. Оскільки LoRa-модулі є відносно недорогими, система моніторингу на базі цієї технології економічно вигідна та доступна для різних типів пасік.

Вперше запропоновано використати для системи моніторингу пасіки оптимізацію контролера ESP32 для роботи в режимі глибокого сну, що дозволяє значно знизити енергоспоживання і забезпечити тривалу автономну роботу автоматизованої системи моніторингу бджолосімей. Використання сенсорів для вимірювання температури, вологості, ваги та інших параметрів вулика у поєднанні з LoRa-модулем для передачі даних забезпечило надійну і точну систему контролю. Перевага цього рішення полягає в його здатності працювати у віддалених місцях без постійного підключення до електромережі, що робить його ідеальним для застосування у великих або віддалених пасіках.

пробудження від таймерів та зовнішніх подій (наприклад, від сенсорів), а також швидкому переходу в режим глибокого сну, ESP32 мінімізує витрати енергії і продовжує термін служби системи. Нове рішення забезпечує високу енергоефективність без втрати якості або точності збору даних.

Нова система відзначається доступною вартістю компонентів, що робить її привабливою для широкого кола бджолярів. Її впровадження значно спрощує процес моніторингу пасіки, що позитивно позначається на підвищенні якості та кількості бджолосімей. Це, в свою чергу, сприяє ефективнішому запиленню ентомофільних культур, що матиме вагомий вплив на розвиток сільськогосподарського сектору України.

Тож можна вважати доцільним подальшу розробку концепції автоматизованої системи моніторингу пасіки на основі технології LoRa з використанням сенсорів реального часу з огляду на її перспективність і економічну привабливість для реалізації в реальному секторі економіки.

Список літератури:

1. Al-Rakhami, M., Almowuena, S. *Wireless Sensor Networks Security: State of the Art*, 2018.
2. ApisProtect. URL: <https://apisprotect.com/> (дата звернення: 13.09.2024).
3. Arnia Remote Hive Monitoring. URL: <http://www.arnia.co.uk/> (дата звернення: 13.09.2024).
4. Ayoub, W., Bennis, M., Nashashibi, F. *Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility // IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2019.
5. BeeCheck. URL: <https://beecheck.org/> (дата звернення: 13.09.2024).
6. BeeRing. URL: <https://www.bee-ring.com/> (дата звернення: 13.09.2024).
7. Broodminer. URL: <https://broodminder.com/> (дата звернення: 13.09.2024).
8. BuzzBox. URL: <https://www.osbeehives.com/> (дата звернення: 13.09.2024).
9. Debauche, O., Moulat, M.E., Mahmoudi, S., Boukraa, S., Manneback, P., Lebeau, F. *Web Monitoring of Bee Health for Researchers and Beekeepers Based on the Internet of Things*. *Procedia Comput. Sci.*, 2018.
10. HiveTool.Net. URL: <http://hivetool.net/> (дата звернення: 13.09.2024).
11. Marco Schwartz. *Internet of Things with ESP8266, Paperback – July 29, 2016*.
12. Мікла І. А., Кісь В. М. Система контролю стану бджолоїної сім'ї // *Матеріали МНПК «Інноваційні розробки в аграрній сфері», ХНТУСГ, ННІ МСМ. 12–13 грудня 2019 року.* – С. 122–123.
13. OSBeehives | BuzzBox Hive Health Monitor & Beekeeping App. URL: <https://www.osbeehives.com> (дата звернення: 13.09.2024).
14. VIBee. URL: <https://vibee-project.net/en/start-english/> (дата звернення: 13.09.2024).
15. Winston, M. *The biology of the honey bee*. London, England: First Harvard University Press, 1991.
16. 3Bee. URL: <https://www.3bee.com/en/technology/> (дата звернення: 13.09.2024).
17. Луїс Лламас. *Енергоспоживання ESP32*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.luisllamas.es/en/esp32-power-consumption/> – Дата доступу: 13 вересня 2023 року.
18. Програмування ESP32 для режиму глибокого сну // *Circuit Digest* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/esp32-active-mode-and-deep-sleep-mode-power-consumption> – Дата доступу: 13 вересня 2023 року.
19. Посібник зі зниження споживання енергії ESP32 на 95% // *DIYIoT* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://diyiot.com/reduce-the-esp32-power-consumption/> – Дата доступу: 13 вересня 2023 року.

Ivanyshyn V.V., Moshensky A.O. THE CONCEPT OF AN AUTOMATED APIARY MONITORING SYSTEM BASED ON LORA TECHNOLOGY USING REAL-TIME SENSORS

In today's world, beekeeping is becoming increasingly dependent on new technologies to increase apiary productivity and ensure effective bee colony management. One of the key issues is the need for timely monitoring of the condition of hives to prevent swarming, bee diseases and other factors that can lead to the loss of bee colonies. The monitoring system based on LoRa technology and the ESP32 controller offers a cost-effective solution for remote real-time monitoring of hives using wireless sensor networks.

The main advantages of the system are low power consumption, long range (up to 15 km) and the possibility of autonomous operation due to the use of solar panels and batteries. This makes the system ideal for use in remote areas or large apiaries. The system includes sensors to measure temperature, humidity, weight and acoustics in the hives. The collected data is transmitted via a LoRa network to the base station, where it is stored on a cloud server and available for analysis via a web interface or mobile app.

The ESP32 and LoRa-based bee colony monitoring system is one of the most cost-effective and efficient systems on the market. The cost of implementation for a single hive varies from \$36 to \$85, and for a base station – from \$70 to \$150, making it affordable even for small apiaries. In addition, low maintenance costs (approximately \$10–\$20 per year) ensure a quick return on investment within 1–2 years.

The article provides comparative characteristics of similar systems and wireless technologies. The concept and block diagram of the automated system are proposed. Particular attention is paid to energy saving of the ESP32 controller, so it is proposed to use the deep sleep mode, which allows the controller to operate for several months without the need for recharging.

The developed concept can be used as a basis for further research and improvements in the field of beekeeping automation, as well as serve as a basis for scalable IoT solutions in the field of agriculture. The implementation and application of the proposed system will significantly increase the efficiency of apiary management, reduce the risk of losses and improve the quality of bee colony development, and will have an effect on the pollination of entomophilic crops.

Key words: *beekeeping, bee colony monitoring, LoRa, ESP32, wireless sensor networks, apiary automation, Internet of Things (IoT), energy efficiency, temperature sensors, weight sensors, solar panels, autonomous system, remote monitoring, cloud services, apiary.*