

Іванишин В.В.

Національний авіаційний університет

Мошенский А.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БІО-ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ І КЕРУВАННЯ ПАСІКОЮ. МІКРОПРОЦЕСОРНІ ПЛАТФОРМИ

Автоматизація процесів у бджільництві набуває особливої актуальності в умовах зростання потреб у точному моніторингу стану бджолосімей. Однією з основних проблем залишається вибір енергоефективної та доступної мікропроцесорної платформи для реалізації систем збирання даних з пасіки у режимі реального часу. У статті проведено аналіз сучасних мікроконтролерів, що застосовуються в біо-технічних системах, зокрема ESP32, ESP8266, STM32L4, NRF52840 та інших. Особливу увагу приділено критеріям енергоспоживання, вартості, продуктивності та можливості автономної роботи.

Основним об'єктом дослідження є мікроконтролер ESP32, який завдяки підтримці Wi-Fi, BLE та глибокого сну (deep sleep) з мінімальним енергоспоживанням до 5 μ A, визнано найбільш придатним для створення базових вузлів системи моніторингу. Завдяки режимам пробудження від таймерів і зовнішніх сенсорів, а також можливості OTA-оновлень, ESP32 дозволяє створити автономну систему, яка може працювати місяцями без перезарядки. У роботі також розглянуто варіанти платформ для вузлів з підвищеними вимогами до автономності, зокрема на основі STM32L4 і NRF52840, та для високоефективних задач – Raspberry Pi Zero W 2.

Запропоновані платформи підтримують підключення сенсорів температури, вологості, ваги та звуку, що забезпечує комплексний моніторинг стану вуликів. Дані можуть передаватися через Wi-Fi або LoRa-модулі, залежно від умов розміщення пасіки. Порівняльний аналіз апаратних рішень супроводжено графіками ефективності, що враховують співвідношення потужності до вартості та енергоспоживання, що дозволяє обґрунтовано підібрати платформу для конкретного завдання.

Запропоноване рішення може бути основою для створення масштабованих і доступних автоматизованих IoT-систем в галузі сільського господарства. Впровадження такої системи на пасіках дозволить зменшити витрати на технічне обслуговування, підвищити точність контролю та сприятиме ефективнішому управлінню бджолиними господарствами, що, у свою чергу, позитивно позначиться на екосистемі через поліпшення запилення ентомофільних культур.

Ключові слова: автоматизація, ESP32, моніторинг бджолосімей, мікроконтролери, енергозбереження, LoRa, Wi-Fi, сенсори, автономні системи, інтернет речей (IoT), аграрні технології.

Постановка проблеми. Автоматизація бджільництва є актуальним напрямом розвитку аграрних біо-технічних систем. Необхідність постійного моніторингу стану бджолосімей, раннього виявлення загроз (захворювань, голодування, роїння) та підвищення ефективності господарювання обумовлює потребу у надійних, енергоефективних та автономних системах збирання та передавання даних.

Фізична частина біо-технічної системи складається з сенсорів (температури, вологості, ваги, звуку), модулів зв'язку (Wi-Fi, LoRa), блока живлення (акумулятор, сонячна панель) і центрального мікроконтролера [1].

Основні вимоги до системи складаються:

- ✓ енергоспоживання у режимі сну <10 μ A;
- ✓ робоча напруга до 5 В;
- ✓ підтримка OTA;
- ✓ підтримка Wi-Fi або LoRa;
- ✓ компактність;
- ✓ стабільність у температурному діапазоні -30...+60 °C.

Центральною складовою таких систем виступає мікропроцесорна платформа, що забезпечує керування сенсорами, збір, обробку і трансляцію даних у реальному часі.

На ринку доступні десятки апаратних рішень з різними характеристиками, тому критичним

є обґрунтований вибір платформи, яка забезпечить довготривалу автономну роботу в умовах обмеженого живлення, підтримку бездротових інтерфейсів і належну обчислювальну потужність.

Загальні критерії вибору мікропроцесорної платформи:

- ✓ споживання енергії в різних режимах (активний / sleep / deep sleep);
- ✓ кількість портів вводу/виводу;
- ✓ обсяг RAM і Flash;
- наявність бездротових інтерфейсів (Wi-Fi, BLE, LoRa, Zigbee);
- ✓ доступність і підтримка програмного забезпечення;
- ✓ вартість і габарити плати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі розвитку мікропроцесорних технологій існує багато різноманітних одноплатних інтегрованих систем. Нижче у Таблиці 1 наведено характеристики найпоширеніших платформ, які застосовуються в системах IoT, включаючи бджолині пасіки. Основна увага приділяється споживанню енергії, вартості, доступності бездротових інтерфейсів та підтримці автономної роботи.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є систематизація доступних апаратних платформ, їх порівняльний аналіз за техніко-експлуатаційними показниками та обґрунтування вибору оптимального рішення для розробки автоматизованої систем моніторингу стану бджолоосімей.

На основі поставлених критеріїв та сучасного стану розвитку мікропроцесорних інтегрованих одноплатних систем провести порівняльний аналіз за трьома основними параметрами: енергое-

фективність, ціна та обчислювальна потужність та обґрунтувати вибір оптимальної платформи для автоматизованої біо-технічної системи моніторингу та керування пасікою.

Виклад основного матеріалу. Сьогодні існує широкий спектр технічних рішень для моніторингу стану бджолоосімей, що ґрунтуються на використанні бездротових сенсорів, мікроконтролерів та технологій передачі даних у реальному часі. Проте більшість із них мають низку суттєвих обмежень: високе енергоспоживання, обмежений час автономної роботи або надто високу вартість, що унеможливорює їх масове впровадження в малих пасічних господарствах. У даному дослідженні аналізується апаратна частина інноваційної системи моніторингу, яка базується на використанні енергоефективних мікропроцесорних платформ з підтримкою бездротових протоколів зв'язку (Wi-Fi, BLE, LoRa). Основну увагу приділено порівнянню таких платформ за критеріями енергоспоживання, обчислювальної потужності та вартості з метою вибору оптимального рішення для автономної роботи в умовах пасіки.

Аналіз актуальних платформ:

1. ESP8266 (ESP-12F) [2]

Рік випуску: 2014

Виробник: Espressif Systems (Китай)

ESP8266 – один із перших наддешевих Wi-Fi мікроконтролерів, що спричинив революцію в IoT-пристроях. Початково був розроблений як Wi-Fi модуль для Arduino, але згодом отримав повноцінне SDK. Версія ESP-12F має вбудовану антену, 12 GPIO, 4 Мб флеш-пам'яті та підтримує глибокий сон із струмом <10 μ A. Підтримує OTA-прошивку, що дозволяє дистанційне оновлення прошивки.

Таблиця 1

Порівняння мікропроцесорних платформ

№	Платформа	Wi-Fi/ LoRa/ BT	Напруга живлення, В.	Споживання Deep Sleep, μ A.	Ціна, грн.	Особливості
1	ESP8266 (ESP-12F)	Wi-Fi	3.3	~ 10	75	Дешева, проста
2	ESP32	Wi-Fi + BLE	3.3	~ 5	150	Двоядерний, OTA
3	Raspberry Pi Zero W 2	Wi-Fi + BLE	5	~ 80	600	Linux, Python
4	STM32L476RG	–	1.8–3.6	< 1	400	Споживання, промисловий
5	NRF52840	BLE, Zigbee, Thread	1.7–3.6	< 1	350	Багатопротокольний
6	Seeeduno XIAO	–	3.3	~ 2	180	ARM Cortex, компактний
7	Arduino Portenta H7	Wi-Fi + BT	3.3–5	~ 20	1900	Машинне навчання, двоядерний

2. ESP32 [3]**Рік випуску:** 2016**Виробник:** Espressif Systems (Китай)

ESP32 – наступник ESP8266, має двоядерний 32-бітний Tensilica Xtensa LX6 процесор, 520 КБ SRAM, Wi-Fi і BLE модулі, апаратне шифрування, 34 GPIO. Підтримує розширені енергозберігаючі режими та OTA. Платформа активно розвивається: існують варіації з підтримкою LoRa, камер, сенсорів тощо.

3. Raspberry Pi Zero W 2 [4]**Рік випуску:** 2021**Виробник:** Raspberry Pi Foundation (Велика Британія)

Одноплатний комп'ютер, що працює під управлінням Linux. Містить чотирьох-ядерний ARM Cortex-A53, 512 МБ RAM, Wi-Fi, Bluetooth, HDMI, USB і GPIO. Призначений для задач з високими вимогами до обчислювальної потужності – локальна аналітика, обробка звуку або зображень, зв'язок з хмарними сервісами.

4. STM32L4 (STM32L476RG) [5]**Рік випуску:** 2016**Виробник:** STMicroelectronics (Швейцарія)

STM32L4 – серія ARM Cortex-M4 мікроконтролерів із наднизьким енергоспоживанням. Має до 1 МБ флеш-пам'яті, 128 КБ RAM, підтримку режимів STOP та STANDBY з енергоспоживанням <1 μ A. Часто застосовується у медичних приладах, датчиках, wearable-пристроях.

5. NRF52840 [6]**Рік випуску:** 2018**Виробник:** Nordic Semiconductor (Норвегія)

Орієнтований на IoT з використанням BLE, Thread, Zigbee, ANT. Має ARM Cortex-M4, 1 МБ флеш-пам'яті, 256 КБ RAM, повну підтримку Bluetooth 5.0. Підтримує режим «System Off» із <0.3 μ A споживанням.

6. Seeeduino XIAO [7]**Рік випуску:** 2020**Виробник:** Seeed Studio (Китай)

Компактна плата на базі ARM Cortex-M0+ (SAMD21G18), розміром лише 20×17.5 мм. Має 256 КБ флеш-пам'яті, 32 КБ SRAM. Не має вбудованого бездротового зв'язку, але може бути доповнена зовнішніми модулями.

7. Arduino Portenta H7 [8]**Рік випуску:** 2020**Виробник:** Arduino SA (Італія)

Високопродуктивна плата із двоядерним процесором (ARM Cortex-M7 + M4), Wi-Fi, Bluetooth, підтримкою TensorFlow Lite. Розрахована на складні проекти у сфері edge computing

та штучного інтелекту. Підтримує USB-C, камери, дисплеї.

В результаті порівняння сучасних мікропроцесорних платформ (Таблиця 1) було виявлено суттєві відмінності у вартості, енергоспоживанні та обчислювальних можливостях актуальних модулів. Щоб оцінити доцільність використання кожної з платформ у системах моніторингу пасіки, проведено аналіз ключових параметрів.

Насамперед важливо враховувати енергоспоживання в режимі сну, оскільки саме цей режим є домінуючим у роботі сенсорних вузлів. На Рисунку 1 представлено залежність між вартістю платформи (у гривнях) та її енергоспоживанням у режимі глибокого сну (μ A). Графік подано у логарифмічній шкалі, що дозволяє виявити оптимальні платформи при значних відмінностях у параметрах.

Найбільш збалансованими за співвідношенням «ціна – споживання» виявилися ESP32 та ESP8266. Перша платформа забезпечує хорошу продуктивність при низькому енергоспоживанні, тоді як друга – є найбільш доступною. Натомість Raspberry Pi Zero W 2 і Portenta H7 демонструють значне енергоспоживання, що ускладнює їх використання у повністю автономних системах без зовнішнього живлення.

Оцінка обчислювальної потужності мікропроцесорних платформ є важливим етапом у виборі апаратної бази для систем моніторингу, оскільки саме цей параметр визначає можливість виконання задач попередньої обробки даних, фільтрації сигналів та управління бездротовими модулями у режимі реального часу. З огляду на суттєву відмінність архітектур і підходів до їх програмування у цьому дослідженні для порівняння застосовано метод нормованої умовної продуктивності, яка враховує три ключові фактори: тактову частоту процесора, кількість ядер та ефективність виконання інструкцій (IPC – instructions per cycle).

Цей метод дозволяє одержати відносні значення, придатні для графічного та табличного порівняння, навіть якщо виробники не надають стандартні показники продуктивності у вигляді MIPS чи CoreMark.

Значення IPC було визначено на основі технічної документації та результатів незалежних тестувань:

для Cortex-M0+ (Seeeduino XIAO) типове IPC $\approx$ 0.9 [9];

для Cortex-M4 (STM32L4, NRF52840) – IPC $\approx$ 1.0 [10];

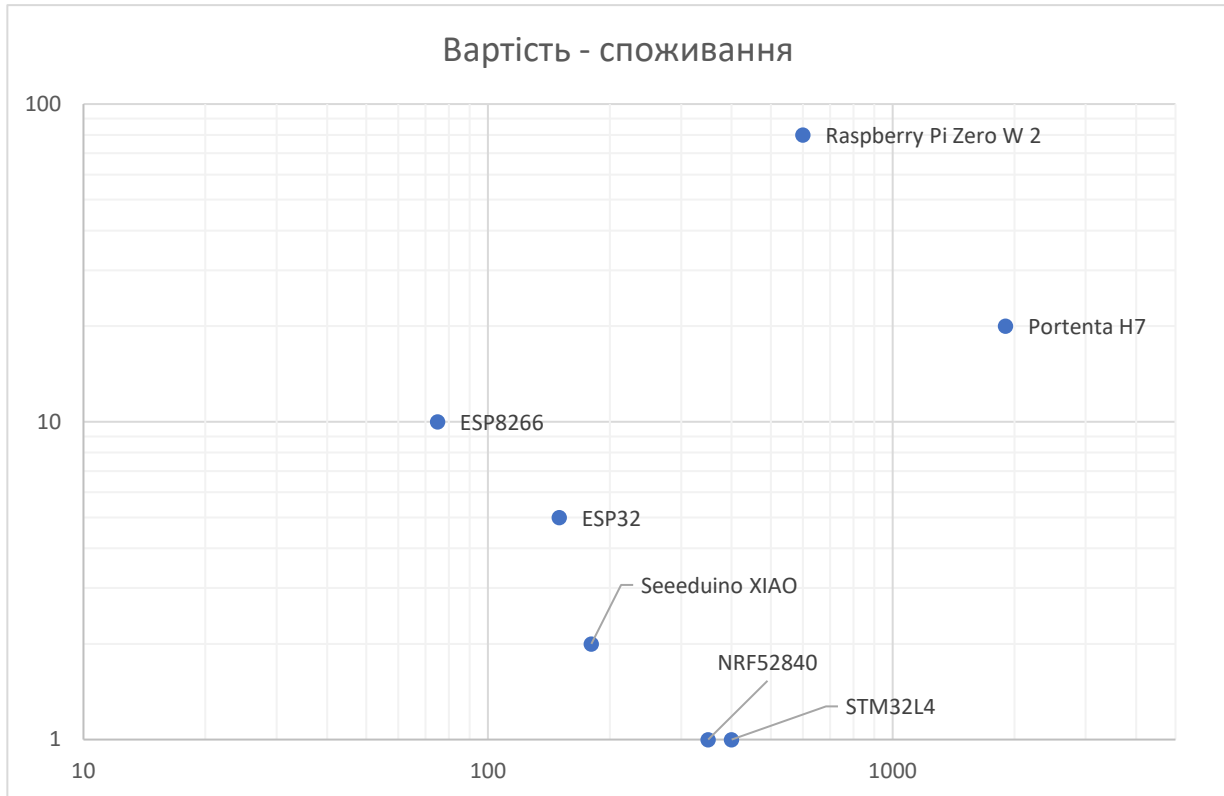


Рис. 1. Споживання платформ в режимі DeepSleep

для Xtensa LX6 (ESP32) – $IPC \approx 1.1\text{--}1.2$ [3];

для Cortex-A53 (Raspberry Pi Zero W 2) – IPC може досягати 2.0 при роботі з Linux і багатозадачністю [4].

Обчислювальна потужність P мікроконтролера в умовних одиницях визначається за формулою (1):

$$P = \frac{f \cdot n \cdot IPC}{K} \quad (1)$$

де f – тактова частота ядра, МГц;

n – кількість фізичних ядер;

IPC – кількість інструкцій, які процесор виконує за один такт (Instructions Per Cycle), що залежить від архітектури ядра;

K – коефіцієнт нормалізації (у цьому дослідженні $K = 10$).

Такий метод не є заміною промислових методів тестування (напр., CoreMark), але дозволяє швидко оцінити доцільність використання конкретної платформи в задачах низькорівневої обробки сигналів у системах моніторингу.

Результати розрахунку нормованої умовної продуктивності приведено у Таблиці 2.

Рисунок 2 ілюструє, як змінюється обчислювальна потужність із ростом вартості.

Лідером за обчислювальною потужністю є Raspberry Pi Zero W 2, який підтримує бага-

тозадачність, обробку зображень, запуск Python-скриптів і роботу під повноцінною ОС. Проте його високе споживання енергії суттєво обмежує автономне застосування. Водночас ESP32 забезпечує достатню потужність для більшості задач моніторингу (обробка сенсорних даних, попередня фільтрація, передача), маючи при цьому значно нижче енергоспоживання. Платформи STM32L4, NRF52840 та Seeeduino XIAO – менш потужні, але підходять для виконання вузькоспеціалізованих, низькорівневих завдань.

Формалізоване представлення інтегральної ефективності платформи може бути розрахована за загальною формулою (2) з використанням коефіцієнтів важливості:

$$\eta = \frac{P}{k_E \cdot E \cdot k_C \cdot C} \quad (2)$$

де η – інтегральна ефективність платформи (безрозмірна величина);

P – обчислювальна потужність (умовні одиниці, наприклад MIPS або бал);

E – енергоспоживання в режимі сну (в μA);

C – вартість пристрою (у гривнях);

k_E – ваговий коефіцієнт важливості енергоефективності;

k_C – ваговий коефіцієнт важливості вартості.

Нормована умовна продуктивність платформ

№	Платформа	Архітектура	Частота, МГц	Кількість ядер	IPC	Умовна потужність, бали
1	ESP8266 (ESP-12F)	Xtensa LX106	80	1	0,9	7,20
2	ESP32	Xtensa LX6	240	2	1,2	57,60
3	Raspberry Pi Zero W 2	Cortex-A53	1000	4	2,0	1000,00
4	STM32L476RG	Cortex-M4	80	1	1,0	8,00
5	NRF52840	Cortex-M4	80	1	1,0	6,40
6	Seeeduino XIAO	Cortex-M0+	48	1	0,9	4,32
7	Arduino Portenta H7	Cortex-M7+M4	480	1	1,2	115,20

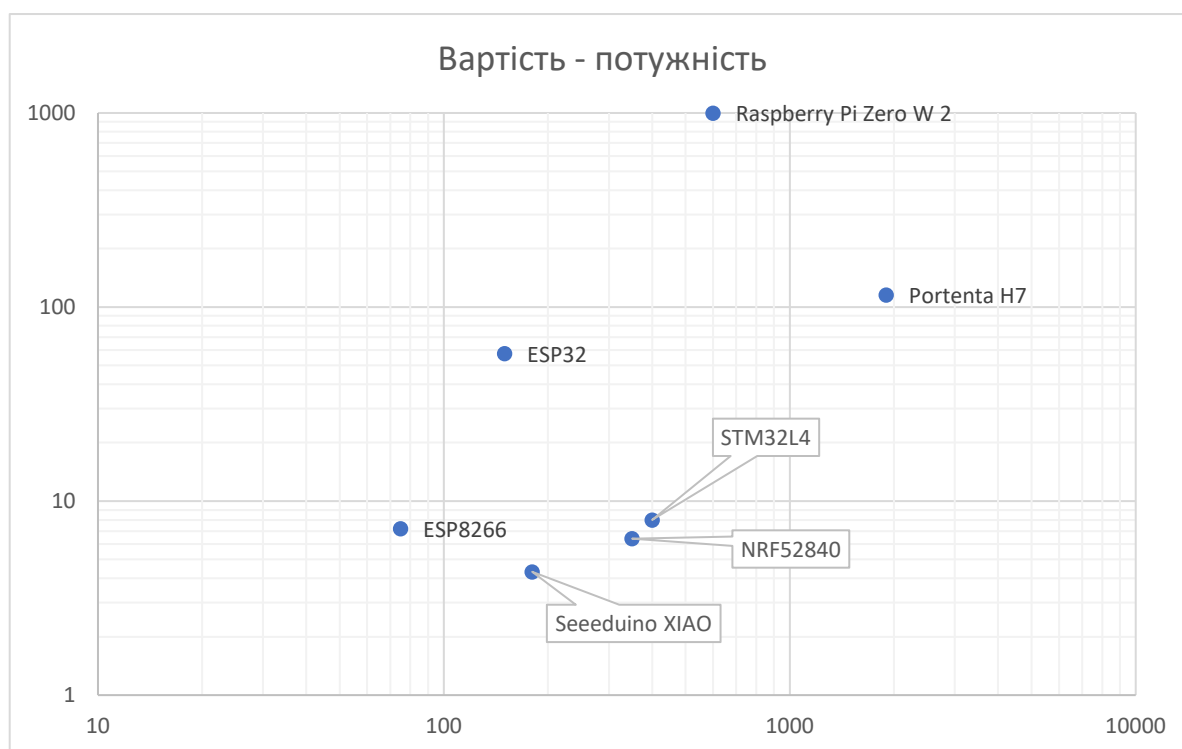


Рис. 2. Зміна обчислювальної потужності з ростом вартості платформ

Або в спрощеному варіанті, коли усі коефіцієнти дорівнюють 1, тобто однаково важливі – формула (3):

$$\eta = \frac{P}{E \cdot C} \quad (3)$$

Такий підхід дозволяє порівнювати платформи з одночасним урахуванням обчислювального ресурсу, енергоспоживання та ціни. Результати наведено на Рисунку 3.

Оптимальний індекс ефективності показала ESP32, яка впевнено випереджає інші платформи з врахуванням комунікаційних можливостей та простоти інтеграції. Вона забезпечує достатній рівень продуктивності для більшості задач системи моніторингу пасіки, підтримує

бездротові протоколи зв'язку (Wi-Fi, BLE), має низьке енергоспоживання та адекватну вартість. ESP8266 також показує високий результат, що робить її придатною для простих та надбюджетних рішень. Інші платформи виявилися менш ефективними через або високу ціну (Portenta H7), або обмежену функціональність при потребі зовнішніх модулів (Seeeduino XIAO, STM32L4).

Висновки. На основі розробленої методики нормованої умовної продуктивності, що враховує тактову частоту, кількість ядер та IPC-потенціал архітектури, проведено порівняльний аналіз мікропроцесорних платформ для системи моніторингу пасіки.

Проведено оцінку мікропроцесорних платформ для автономних систем моніторингу пасіки

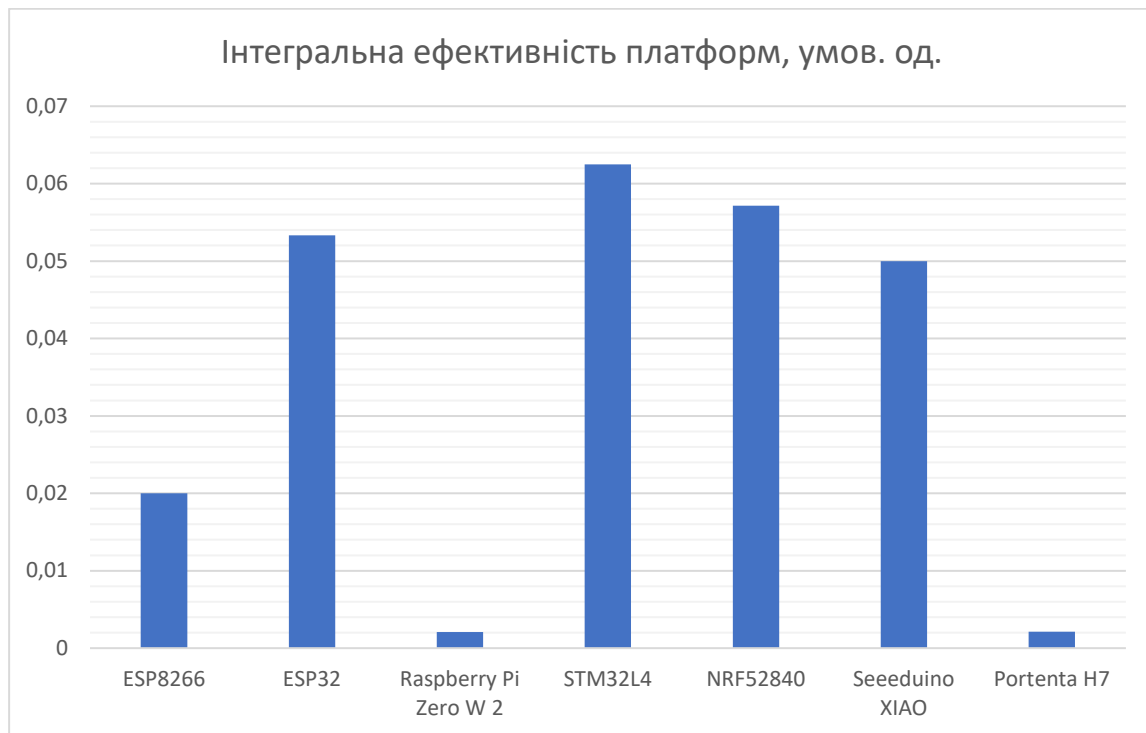


Рис. 3. Інтегральна ефективність платформ, умов. од.

з використанням запропонованої методики. До розрахунку включено три ключові параметри: обчислювальну потужність, енергоспоживання в режимі сну та вартість обладнання. Це дозволило здійснити комплексне порівняння платформ за інтегральним показником ефективності.

Найбільш збалансованим рішенням виявилася платформа ESP32, яка поєднує достатню обчислювальну потужність, низьке енергоспоживання та доступну вартість. Її використання доцільне як у ролі сенсорного вузла, так і як вузла збору, обробки й передавання даних.

Для вузлів із критичними вимогами до автономної роботи рекомендовано STM32L4 або NRF52840, що демонструють наднизьке споживання енергії при збереженні базової функціональності.

Raspberry Pi Zero W 2 та Arduino Portenta H7 доцільно застосовувати лише у випадках, де доступне живлення та необхідна висока продуктивність, зокрема для обробки аудіосигналів або застосування алгоритмів штучного інтелекту.

Найбільш ефективною стратегією впровадження може стати гібридна архітектура, що поєднує ESP32 як універсальну платформу, STM32/NRF – для енергонезалежних сенсорів, та Raspberry Pi – для агрегації даних і хмарної інтеграції.

Запропонований підхід забезпечує технічну доцільність, економічну ефективність і високу адаптивність до умов польового застосування, що відкриває перспективу його широкого впровадження в аграрному секторі України, зокрема у сфері автоматизації бджільництва.

Список літератури:

1. Ivanyshyn V. V., Moshensky A. O. The concept of an automated apiary monitoring system based on lora technology using real-time sensors. Scientific notes of taurida national V.I. vernadsky university. series: technical sciences. 2024. T. 1, № 5. С. 149–153. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/23> (дата звернення: 15.04.2025).
2. Espressif Systems. ESP8266EX Datasheet. Wireless SoCs, Software, Cloud and AIoT Solutions | Espressif Systems. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf (дата звернення: 15.04.2025).
3. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. Wireless SoCs, Software, Cloud and AIoT Solutions | Espressif Systems. URL: <https://surl.li/lckimq> (дата звернення: 15.04.2025).
4. Raspberry Pi Zero 2 W. Raspberry Pi Datasheets. URL: <https://surl.li/dmfoce> (дата звернення: 15.04.2025).
5. STM32L4 series of ultra-low-power MCUs. URL: <https://surl.li/hcoytm> (дата звернення: 15.04.2025).

6. nRF52840 Product Specification v1.11. URL: <https://surl.li/rjhmmw> (дата звернення: 15.04.2025).
7. Getting Started with Seeed Studio XIAO SAMD21 | Seeed Studio Wiki. Seeed Studio Wiki. URL: <https://wiki.seeedstudio.com/Seeeduino-XIAO/> (дата звернення: 15.04.2025).
8. Arduino SA. Portenta H7 – Technical Documentation. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/portenta-h7/> (дата звернення: 15.04.2025).
9. Cortex-M0+ Technical Reference Manual. Arm Developer. URL: <https://developer.arm.com/documentation/ddi0484/latest> (дата звернення: 15.04.2025).
10. Cortex-M4 Processor Technical Reference Manual. Arm Developer. URL: <https://developer.arm.com/documentation/ddi0439/latest> (дата звернення: 15.04.2025).
11. A Lora-based Testbed Development for Stingless Bee Monitoring System / M. Taib Miskon та ін. TEM Journal. 2022. С. 712–718. URL: <https://doi.org/10.18421/tem112-26> (дата звернення: 15.04.2025).
12. IoT and Machine Learning Techniques for Precision Beekeeping. MDPI. 2024. URL: <https://www.mdpi.com/2673-2688/6/2/26> (дата звернення: 15.04.2025).
13. BHiveSense: an integrated information system architecture for sustainable remote monitoring and management of apiaries based on IoT and microservices / D. Cota et al. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2023. P. 100110. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100110> (дата звернення: 15.04.2025).
14. Energy consumption in ESP32. Luis Llamas. URL: <https://www.luisllamas.es/en/esp32-power-consumption/> (дата звернення: 15.04.2025).
15. ESP32 Active Mode and Deep Sleep Mode Power Consumption Comparison. Circuit Digest – Electronics Engineering News, Latest Products, Articles and Projects. URL: <https://surl.li/sxyadq> (дата звернення: 15.04.2025).
16. Ntawuzumunsi E., Kumaran S., Sibomana L. Self-Powered Smart Beehive Monitoring and Control System (SBMaCS). Sensors. 2021. Vol. 21, no. 10. P. 3522. URL: <https://doi.org/10.3390/s21103522> (дата звернення: 15.04.2025).

Ivanyshyn V.V., Moshensky A.O. HARDWARE FOR THE BIO-TECHNICAL SYSTEM FOR MONITORING AND CONTROLLING THE APIARY. MICROPROCESSOR PLATFORMS

Automation of processes in beekeeping is becoming especially relevant in the context of the growing need for accurate monitoring of bee colonies. One of the main problems is the choice of an energy-efficient and affordable microprocessor platform for the implementation of real-time data collection systems from the apiary. The article analyzes modern microcontrollers used in bio-technical systems, in particular ESP32, ESP8266, STM32L4, NRF52840 and others. Particular attention is paid to the criteria of energy consumption, cost, performance, and the possibility of autonomous operation in remote conditions.

The main object of the study is the ESP32 microcontroller, which, due to its support for Wi-Fi, BLE and deep sleep with a minimum power consumption of up to 5 μ A, is recognized as the most suitable for creating basic nodes of the monitoring system. Thanks to the wake-up modes from timers and external sensors, as well as the possibility of OTA updates, ESP32 allows you to create an autonomous system that can work for months without recharging. The paper also considers platform options for nodes with increased requirements for autonomy, in particular, based on STM32L4 and NRF52840, and for high-performance tasks – Raspberry Pi Zero W2.

The proposed platforms support the connection of temperature, humidity, weight, and sound sensors, which provides comprehensive monitoring of the hives. The data can be transmitted via Wi-Fi or LoRa modules, depending on the location of the apiary. The comparative analysis of hardware solutions is accompanied by efficiency graphs that take into account the power to cost ratio and energy consumption, which allows you to reasonably select a platform for a specific task.

The proposed solution can be the basis for the creation of scalable and affordable automated IoT systems in the field of agriculture. The introduction of such a system in apiaries will reduce maintenance costs, increase the accuracy of control, and contribute to more efficient management of bee farms, which, in turn, will have a positive impact on the ecosystem by improving pollination of entomophilous crops.

Key words: automation, ESP32, bee colony monitoring, microcontrollers, energy saving, LoRa, Wi-Fi, sensors, autonomous systems, Internet of Things (IoT), agricultural technologies.