

Іванишин В.В.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Мошенський А.О.

Національний університет харчових технологій

АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БІОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ І КЕРУВАННЯ ПАСІКОЮ. СЕНСОРНІ ПРИСТРОЇ

Автоматизація процесів у бджільництві набуває особливої актуальності в умовах зростання потреб у точному моніторингу стану бджолоосімей. Однією з основних проблем залишається вибір надійних, та доступних сенсорів для реалізації систем збирання даних з пасіки у режимі реального часу. У статті проведено аналіз сучасних сенсорів, що застосовуються в біотехнічних системах, зокрема для вимірювання температури (T), вологості (RH), атмосферного тиску (P) та ваги. Особливу увагу приділено критеріям точності, енергоспоживання, вартості, та довговічності.

Основним об'єктом дослідження є комплексний підхід до вибору сенсорів, що дозволяє створити збалансовану систему моніторингу. Розглянуто популярні та доступні сенсори, такі як DHT22, BME280, DS18B20, SHT31 для контролю температури та вологості, тензометричні датчики для ваги. Запропоновані сенсори є сумісними з популярними мікроконтролерними платформами, такими як ESP32, що дозволяє створювати гнучкі та масштабовані системи.

В статті також розглянуто варіанти сенсорів для вузлів з підвищеними вимогами до точності та надійності. Порівняльний аналіз сенсорів супроводжено таблицями з ключовими характеристиками, що дозволяє обґрунтовано підібрати сенсор для конкретного завдання. Запропоновані рішення можуть бути основою для створення масштабованих і доступних автоматизованих IoT-систем в галузі сільськогосподарства. Впровадження такої системи на пасіках дозволить зменшити витрати на технічне обслуговування, підвищити точність контролю та сприятиме ефективнішому управлінню бджолиними господарствами.

Ключові слова: автоматизація, сенсори, моніторинг бджолоосімей, DHT22, BME280, DS18B20, SHT31, тензодатчики, інтернет речей (IoT).

Постановка проблеми. Сучасне бджільництво, що є невід'ємною складовою аграрного сектору та екосистеми в цілому, стикається з численними викликами, включаючи зміни клімату, поширення хвороб, вплив пестицидів та зменшення кормової бази [1].

Ключовим елементом таких систем є сенсорна підсистема, яка відповідає за збір первинних даних про внутрішнє середовище вулика та зовнішні умови. Вибір оптимального набору сенсорів є критично важливим завданням, оскільки він безпосередньо впливає на точність, надійність, енергоефективність та економічну доцільність всієї системи [2]. Існуючі дослідження часто фокусуються на окремих аспектах моніторингу або на конкретних апаратних платформах, проте бракує комплексного аналізу вимог до сенсорів та критеріїв їх вибору з урахуванням специфіки бджільництва

та академічних стандартів. Необхідність забезпечення тривалої автономної роботи системи в умовах віддалених пасік висуває жорсткі вимоги до енергоспоживання сенсорів, а мінливі кліматичні умови та біологічна активність бджіл вимагають високої стійкості та надійності датчиків [2].

Таким чином, актуальність даного дослідження полягає у формулюванні науково обґрунтованих вимог та критеріїв для вибору сенсорів, що дозволить розробити високоефективні та адаптивні автоматизовані системи моніторингу і керування пасікою, сприяючи сталому розвитку бджільництва та збереженню біорізноманіття.

Оптимальна конфігурація системи моніторингу для вулика складається з сенсорів (температури, вологості, ваги), модулів зв'язку (Wi-Fi, LoRa), блока живлення (акумулятор, сонячна панель) і центрального мікроконтролера [3].

Основні вимоги до сенсорів [4]:

1. Сенсори температури:
 - Діапазон від -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$ – для покриття можливих умов у вулику і навколо нього; точність: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, роздільна здатність $0,1^{\circ}\text{C}$;
 - Температурний режим у діапазоні $34\text{--}36^{\circ}\text{C}$ є критичним для здоров'я розплоду; відхилення за межі $\pm 1^{\circ}\text{C}$ – сигнал небезпеки.
2. Сенсори вологості:
 - Діапазон: $0\text{--}100\%$ RH, точність $\pm 2\%$ RH, роздільна здатність $0,1\%$ RH;
 - Захист від середовища: сенсор має бути захищений від прополісу, конденсату та воску (наприклад, мембранний корпус або захисна оболонка);
 - Оптимальне встановлене бджолами RH $\approx 70\%$ [2]; зниження RH часто передуює роїнню – сенсор має виявляти такі зміни.
3. Барометричні сенсори:
 - Діапазон: $700\text{--}780$ мм рт. ст., точність ± 1 мм рт. ст.;
 - Часто обирають комбіновані датчики T/RH/P (наприклад, BME280, BMP388) – $\rightarrow$ вигода в компактності та інтерфейсі.
4. Тензодатчики:
 - Діапазон: до ~ 200 кг, роздільна здатність $10\text{--}50$ г достатня для виявлення коливань (підйому маси в сезон збору, падіння маси під час роїння);
 - Точність: похибка $\leq 1\%$.

Схематичне розміщення сенсорів показано на Рис. 1.

Метою цієї роботи є систематизація сучасних сенсорних пристроїв для забезпечення автоматизованої системи моніторингу пасіки даними про вагу, вологість, атмосферний тиск біотехнічної системи, їх порівняльний аналіз за техніко-експлуатаційними показниками та обґрунтування вибору оптимального рішення для інтеграції в систему моніторингу стану бджолосімей.

Аналіз існуючих систем. На сучасному етапі розвитку елементної бази існує багато різноманітних сенсорних пристроїв з різними технічними характеристиками. У таблиці 1 наведено найпопулярніші сенсори, які застосовуються в системах IoT, зокрема на платформах ESP32, ESP8266, та RaspberryPi. Основна увага приділяється сумісності, вартості, доступності та підтримці автономної роботи.

Формулювання завдання. На основі поставлених критеріїв та сучасного стану ринку сенсорних пристроїв провести науково-обґрунтований порівняльний аналіз за трьома основними параметрами: точність, енергоефективність, ціна та запропонувати вибір оптимального комплекту для автоматизованої біотехнічної системи моніторингу та керування пасікою.

Виклад основного матеріалу. Ефективність функціонування автоматизованих систем моніторингу пасік детермінується адекватністю вибору

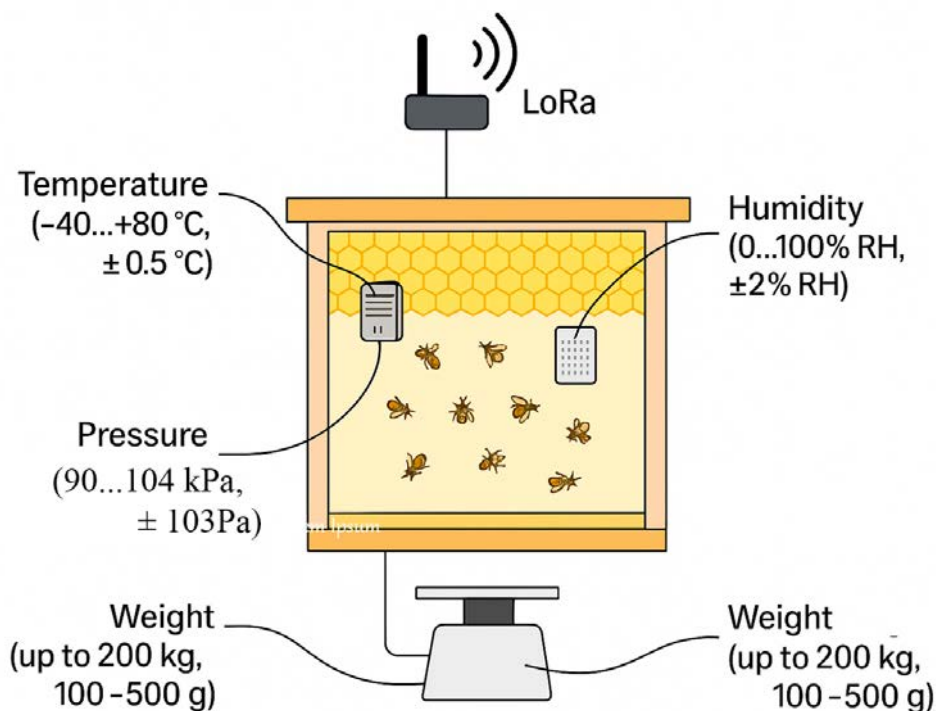


Рис. 1. Схематичне розміщення сенсорів

сенсорних елементів, які забезпечують збір релевантних даних про біологічні та фізичні параметри бджолосімей. Нижче представлено детальний аналіз ключових категорій сенсорів, їх специфічних вимог та критеріїв вибору, що ґрунтуються на сучасних наукових дослідженнях.

1. Сенсори температури та вологості [5]

Моніторинг температурно-вологісного режиму у вулику є фундаментальним для оцінки фізіологічного стану бджолосімей, виявлення патологій та прогнозування роїння. Бджоли підтримують стабільну температуру в зоні розплоду на рівні 34–35°C з відхиленнями не більше $\pm 0.5^\circ\text{C}$, що є критично важливим для розвитку розплоду. Оптимальна відносна вологість у вулику коливається в межах 50–70%. Відхилення від цих параметрів може призвести до стресу колонії, розвитку плісняви або кристалізації меду.

Основні вимоги до сенсорів температури та вологості:

1) Точність: Для моніторингу зони розплоду необхідна точність вимірювання температури не гірше $\pm 0.5^\circ\text{C}$, а для вологості – $\pm 3\text{--}5\% \text{ RH}$ [4];

2) Діапазон вимірювань: Температура: від -10°C до $+50^\circ\text{C}$ (для внутрішнього моніторингу), вологість: від 0% до 100% RH;

3) Стабільність: Довготривала стабільність показань в умовах високої вологості та наявності агресивних речовин (наприклад, прополісу);

4) Час відгуку: Швидкий час відгуку для фіксації динамічних змін у мікрокліматі вулика;

5) Енергоспоживання: Мінімальне енергоспоживання для забезпечення тривалої автономної роботи системи, особливо в режимі глибокого сну;

6) Габарити: Компактні розміри для інтеграції всередину вулика без порушення життєдіяльності бджіл.

Критерії вибору та типові рішення:

1) DHT22 (AM2302): Широко застосовується завдяки низькій вартості та простоті інтерфейсу. Забезпечує точність $\pm 0.5^\circ\text{C}$ для температури та $\pm 2\text{--}5\% \text{ RH}$ для вологості. Однак, його обмежена швидкість оновлення даних (до 0.5 Гц) та чутливість до конденсації можуть бути недоліками для прецизійних вимірювань [4].

2) BME280: Інтегрований сенсор, що вимірює температуру, вологість та атмосферний тиск. Характеризується високою точністю (температура $\pm 0.5^\circ\text{C}$, вологість $\pm 3\% \text{ RH}$) та надзвичайно низьким енергоспоживанням (до 3.6 μA в режимі вимі-

Таблиця 1

Порівняння популярних сенсорних пристроїв для платформи ERSP32

№	Сенсор	Вимірює	Діапазон	Точність (тип.)	Роздільна здатність / шум (тип.)	Інтерфейс / Живлення	Орієнтовна ціна*, \$
1	Sensirion SHT31	T, RH	0–100%RH; –40...+125 °C	$\pm 2\% \text{ RH}$; $\pm 0.3 \dots 0.4^\circ\text{C}$	0.01%RH / 0.01 °C	I ² C; 2.3–5.5 В	\$3–4
2	Bosch BME280	T, RH, P	0–100%RH; 300–1100 гПа	RH $\pm 3\%$	тиск ~ 0.18 Па	I ² C/SPI; 1.71–3.6 В	\$3–5
3	Analog Devices DS18B20	T	–55...+125 °C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$ (–10...+85 °C)	до 12-біт (0.0625 °C)	1-Wire; 3.0–5.5 В	\$4–5
4	Infineon DPS310	P, T	300–1200 гПа	відносна ± 0.06 гПа	0.002 гПа (≈ 0.02 м) у high-precision	I ² C/SPI; 1.7–3.6 В	\$5–8
5	Bosch BMP388	P, T	300–1250 гПа	± 0.05 кПа	~ 0.08 Па RMS (тип.)	I ² C/SPI; 1.65–3.6 В	\$3–6
6	ST LPS22HB	P, T	260–1260 гПа	± 0.1 кПа	24-біт ADC	I ² C/SPI; 1.7–3.6 В	\$7–9
7	TE MS5611	P, T	10–1200 мбар	роздільна здатність висоти ~ 10 см	24-біт $\Delta\Sigma$ ADC	I ² C/SPI; 3.0–3.6 В	\$4–8
8	Тензодатчик TAL220B 5 кг + HX711	Маса	до 5 кг	нелінійність/ повзучість тип. $< 0.03\text{--}0.05\%$ FS	HX711 24-біт , 10 або 80 SPS	Міст Уітстона → HX711 (ESP32 GPIO)	\$15–20
9	Тензодатчик YZC-133 20 кг + HX711	Маса	до 20 кг	вихід 1.0 ± 0.15 мВ/В (тип.)	HX711 24-біт , 10 або 80 SPS	Міст Уітстона → HX711 (ESP32 GPIO)	\$20–21

Примітка: * – ціни орієнтовні, залежать від обсягу закупівлі і постачальника.

рювання), що робить його оптимальним вибором для автономних систем [6].

3) SHT31-D: Сенсор від Sensirion, відомий своєю високою точністю (температура $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, вологість $\pm 2\%$ RH) та надійністю. Використовує цифровий інтерфейс I2C, що спрощує інтеграцію. Його вартість вища, але виправдана для систем, що вимагають підвищеної точності [7].

4) DS18B20: Цифровий термометр з інтерфейсом One-Wire, що дозволяє підключати декілька датчиків до однієї лінії передачі даних. Забезпечує точність $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ в діапазоні від -10°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Його герметичне виконання робить його придатним для прямого контакту з медом або для моніторингу температури розпладу [8].

Вибір між цими сенсорами залежить від компромісу між вартістю, точністю та енергоспоживанням. Для базового моніторингу можна застосувати DHT22, тоді як для наукових досліджень або систем з високими вимогами до точності кращими є BME280 або SHT31-D.

2. Сенсори ваги

Моніторинг маси вулика є одним з найбільш інформативних показників стану бджолосім'ї, що дозволяє оцінювати динаміку медозбору, споживання кормових запасів, а також виявляти такі події, як роїння або викрадення меду [9]. Зміни маси можуть свідчити про активність фуражування, наявність нектару, а також про загальний стан розвитку колонії [10].

Основні вимоги до сенсорів ваги [11]:

1) Діапазон вимірювань: Сенсор повинен бути здатним вимірювати масу в діапазоні від кількох кілограмів (порожній вулик) до 100-200 кг (вулик з медом та бджолами), залежно від типу вулика та регіональних особливостей;

2) Точність: Висока точність є критично важливою для виявлення незначних щоденних змін маси, що свідчать про приріст або втрату нектару; Рекомендована точність становить $\pm 10\text{-}50$ грамів.

3) Стабільність та довговічність: Сенсори повинні зберігати калібрування та функціональність протягом тривалого часу в умовах зовнішнього середовища (перепади температур, вологість, вібрації, механічні навантаження);

4) Стійкість до зовнішніх впливів: Захист від вологи, пилу, гризунів та комах є обов'язковим для забезпечення надійної роботи системи;

5) Енергоспоживання: Оскільки системи моніторингу часто працюють автономно, сенсори ваги повинні мати низьке енергоспоживання, особливо в режимі очікування.

Критерії вибору та типові рішення:

1) Тензометричні датчики (Load Cells): Це найбільш поширений тип сенсорів для вимірювання ваги. Вони працюють на принципі перетворення механічної деформації (викликаной прикладеною масою) в електричний сигнал. Зазвичай використовуються чотири тензометричні датчики, розташовані під кожним кутом вулика, для рівномірного розподілу навантаження та підвищення точності [12]. Але є й інші системи з використанням двох ферм і одного сенсора розміщеного між ними;

2) Переваги: Висока точність, лінійність, надійність, доступність у різних діапазонах навантаження;

3) Недоліки: Чутливість до точки прикладання навантаження (вимагає рівномірного розподілу), необхідність калібрування, потенційна чутливість до температурних коливань;

4) П'єзоелектричні сенсори: Хоча менш поширені для вимірювання загальної ваги вулика, п'єзоелектричні сенсори можуть використовуватися для виявлення мікроколивань або вібрацій, пов'язаних з активністю бджіл, що може бути корельовано з масою;

5) Переваги: Висока чутливість до динамічних змін, низьке енергоспоживання;

6) Недоліки: Обмежений діапазон вимірювань, складність калібрування для статичної ваги, чутливість до шуму.

3. Сенсори атмосферного тиску

Моніторинг атмосферного тиску у складі системи контролю пасіки виконує допоміжну, але важливу функцію. З одного боку, він забезпечує реєстрацію метеорологічних змін, що впливають на активність льоту бджіл, а з іншого – дозволяє інтегрувати дані про тиск з інформацією про температуру та вологість для більш точного моделювання мікроклімату вулика. Коливання тиску корелюють із погодними змінами: зниження барометричного тиску зазвичай передують зменшенню льотної активності, тоді як стабільний високий тиск асоціюється з інтенсивним збором нектару [13].

Основні вимоги до сенсорів атмосферного тиску:

1) Діапазон вимірювань: від 700 до 780 мм рт. ст, що охоплює природні зміни на рівні моря та у більшості регіонів утримання пасік;

2) Точність: не гірше ± 1 мм рт. ст. для забезпечення достовірності короткострокових прогнозів і кореляції з іншими параметрами;

3) Стабільність: низький дрейф у часі, особливо за умов коливань температури та вологості;

4) Інтеграція: наявність цифрового інтерфейсу (I²C або SPI) для прямої взаємодії з ESP32;

5) Енергоспоживання: мінімальне споживання енергії (у межах кількох мкА в режимі очікування), що є критично важливим для автономних систем із живленням від батарей або сонячних панелей;

6) Компактність та захист: невеликі габарити та можливість захисту від конденсації і забруднень, характерних для бджолиного середовища.

Критерії вибору та типові рішення:

1) Bosch BME280: комплексний сенсор, що вимірює температуру, вологість і тиск у діапазоні 300–1100 hPa. Забезпечує точність ± 1 hPa і дуже низьке енергоспоживання (≈ 3 μ A), що робить його оптимальним вибором для багатофункціональних автономних систем [6].

2) Infineon DPS310: сучасний сенсор із високою точністю (± 0.5 hPa) та низьким енергоспоживанням (≈ 1.7 μ A). Має розширений діапазон (300–1200 hPa) та добре підходить для тривалих моніторингових застосувань.

3) Bosch BMP388: високостабільний сенсор нового покоління з точністю ± 0.5 hPa і підвищеною термокомпенсацією. Призначений для застосувань, де потрібна довготривала стабільність [14].

4) ST LPS22HB: ультракомпактний сенсор з точністю до ± 0.2 hPa та діапазоном 260–1260 hPa. Відзначається наднизьким енергоспоживанням, що робить його придатним для живлення від батарей [15].

5) TE MS5611: сенсор із високою точністю (± 0.1 – 0.2 hPa), який широко використовується в авіоніці та наукових приладах. Його недолік – відносно висока ціна, проте він забезпечує найвищий рівень точності серед наведених рішень [16].

Вибір сенсора атмосферного тиску залежить від вимог системи: для базових рішень доцільним є застосування BME280 завдяки його багатофункціональності та низькій вартості; для систем із підвищеними вимогами до стабільності та точності кращими є DPS310 або BMP388; у наукових і високоточних дослідженнях перевагу слід надавати MS5611, незважаючи на його вищу вартість.

В контексті моніторингу бджолиних сімей ключовим фактором є поєднання енергоефективності, довготривалої стабільності та багатофункціональності. Оскільки система працює в умовах підвищеної вологості, можливого конденсату та обмеженого енергопостачання, оптимальним рішенням є застосування Bosch BME280. Він забезпечує одночасне вимірювання температури, вологості та тиску в одному модулі, що зменшує кількість компонентів, спрощує герметизацію та знижує ризик відмови через пошкодження окремих сенсорів. Додатково, завдяки широкій підтримці бібліотек та успішним апробаціям у системах екологічного моніторингу, BME280 має перевагу над більш вузькоспеціалізованими рішеннями (DPS310, MS5611). Це робить його оптимальним для польових умов та масового впровадження в біотехнічні системи моніторингу пасік.

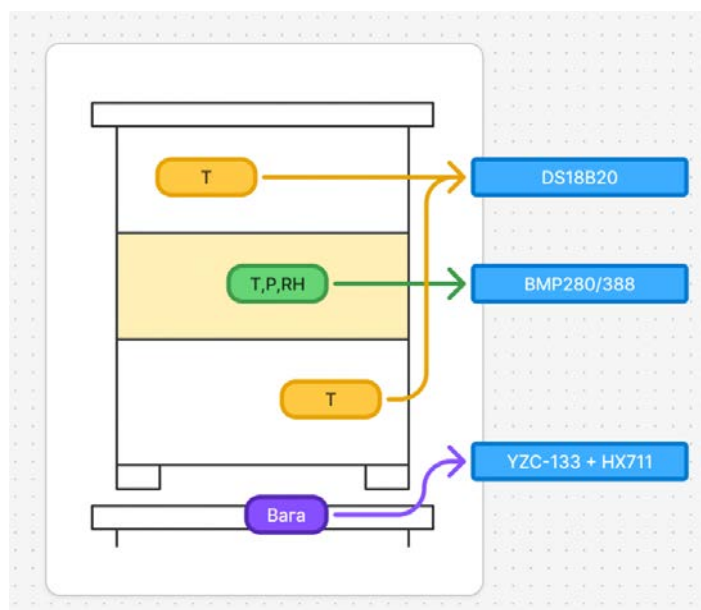


Рис. 2. Оптимальне розміщення комплекту сенсорів у вулику

Оптимальне розміщення сенсорів у вулику передбачає встановлення температурних і вологісних датчиків у зоні розплоду для точного відображення мікроклімату, а також додаткових контрольних точок біля льотка для оцінки впливу зовнішнього середовища. Датчик тиску доцільно розташовувати в центральній частині вулика, де він найменше піддається локальним коливанням температури й вологості. Ваговий модуль із тензодатчиком YZC-133 та підсилювачем HX711 інтегрується у платформу під вуликом, що забезпечує безперервний моніторинг динаміки маси та виключає вплив внутрішніх умов на роботу сенсора Рис. 2.

Висновки. Ефективна автоматизація моніторингу пасік є невід'ємною умовою для розвитку інформатизованого бджільництва та забезпечення сталого функціонування галузі.

Проведений аналіз наукових джерел та технічних характеристик сенсорних елементів дозволив сформулювати комплексні вимоги та критерії вибору для кожної категорії сенсорів, що використовуються в автоматизованих системах моніторингу бджолосімей.

Встановлено, що для моніторингу температурно-вологісного режиму оптимальним є вико-

ристання інтегрованих сенсорів типу BME280 або SHT31-D, які забезпечують високу точність та низьке енергоспоживання. Для вимірювання маси вулика найбільш доцільним є застосування тензометричних датчиків, зокрема YZC-133 (або аналогів) в зв'язці з АЦП HX711, що гарантує необхідну точність та стабільність. Барометричні показники можуть вимірюватись комплексним BME280, або окремим – у разі використання для температури і вологості SHT31.

Запропоновані рекомендації та критерії вибору сенсорів створюють науково-методологічну основу для проектування високоефективних, надійних та енергоефективних автоматизованих систем моніторингу пасік. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розробку інтелектуальних алгоритмів обробки даних, що дозволять не лише фіксувати параметри, але й прогнозувати стан бджолосімей, виявляти аномалії та надавати бджолярам обґрунтовані рекомендації для прийняття управлінських рішень. Це сприятиме підвищенню продуктивності пасік, збереженню здоров'я бджіл та зміцненню продовольчої безпеки.

Список літератури:

1. Bartos Hunor, Bodor Zsolt, Keresztesi Ágnes, Gârbacea George, Deak György, Matei Monica, Laslo, Lucian, Boboc Madalina, Holban Elena, Szép Róbert. *Advances in Beehive Monitoring Systems: Low-Cost Integrating Sensor Technology for Improved Apiculture Management*. E3S Web of Conferences. 2024. 589. 04001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458904001>
2. Marek Urban, Róbert Chlebo, *Current Status and Future Outlooks of Precision Beekeeping Systems and Services*. *Reviews in Agricultural Science*. 2024. Vol.12. Pages 165–181. Released on J-STAGE August 15, 2024, Online ISSN 2187-090X, https://doi.org/10.7831/ras.12.0_165
3. 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: 05.08.2025).
4. Cecchi S., Spinsante S., Terenzi A., Orcioni S. A Smart Sensor-Based Measurement System for Advanced Bee Hive Monitoring. *Sensors*. 2020. 20(9). 2726. <https://doi.org/10.3390/s20092726>.
5. Hunor B., Bodor Z., Keresztesi Á., et al. *Advances in Beehive Monitoring Systems: Low-Cost Integrating Sensor Technology for Improved Apiculture Management*. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 589. 04001. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458904001>.
6. Bosch Sensortec. BME280 – Humidity, Pressure and Temperature Sensor: Datasheet. 2024. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf> (дата звернення: 05.08.2025).
7. Sensirion. SHT3x – Humidity and Temperature Sensor: Datasheet. 2022. URL: https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/63A5A569/Datasheet_SHT3x_DIS.pdf (дата звернення: 05.08.2025).
8. Analog Devices | Maxim Integrated. DS18B20 – Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer: Datasheet. 2019. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf> (дата звернення: 05.08.2025).
9. Bratek P., Dziurdzia, P. Energy-Efficient Wireless Weight Sensor for Remote Beehive Monitoring. *Sensors*. 2021. Vol. 21(19). 6405. DOI: 10.3390/s21196405. URL: <https://doi.org/10.3390/s21186032>.
10. Senger D., Gruber C., et al. Weight, temperature and humidity sensor data of honey bee colonies in Germany, 2019–2022. *Data in Brief*. 2024. Vol. 52. 109017. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.110015>

11. Moreno C.A. Real-Time Monitoring System of a Beehive through IoT. SSRN preprint. 2025. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5187027>. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5187027 (дата звернення: 05.08.2025).
12. Koroliuk R., et al. Automated monitoring of bee colony movement in the hive based on load cells. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3842. P. 71–78. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3842/paper9.pdf> (дата звернення: 05.08.2025).
13. Withers P.C. The effects of ambient air pressure on oxygen consumption of resting and hovering honeybees. *J Comp Physiol B* 141, 433–437 (1981). <https://doi.org/10.1007/BF01101463>
14. Bosch Sensortec. BMP388 – Digital Pressure Sensor: Datasheet. 2020. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmp388-ds001.pdf> (дата звернення: 05.08.2025).
15. STMicroelectronics. LPS22HB – MEMS Nano Pressure Sensor: Datasheet. 2015. URL: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lps22hb.html> (дата звернення: 05.08.2025).
16. TEConnectivity (MEAS). MS5611-01BA03 Barometric Pressure Sensor: Datasheet. 2017. URL: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FMS5611-01BA03%7FB3%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_MS5611-01BA03_B3.pdf%7FCAT-BLPS0036 (дата звернення: 05.08.2025).

Ivanyshyn V.V., Moshensky A.O. HARDWARE OF THE BIO-TECHNICAL SYSTEM FOR BEEHIVE MONITORING AND CONTROL. SENSOR DEVICES

Automation in apiculture is becoming increasingly relevant due to the growing demand for accurate monitoring of bee colony conditions. One of the key challenges remains the selection of reliable and cost-effective sensors for real-time data acquisition from beehives. This paper presents an analysis of modern sensors applied in bio-technical systems, particularly those used for measuring temperature, humidity, atmospheric pressure, and hive weight. Special attention is given to the criteria of accuracy, power consumption, cost, and long-term stability.

The primary focus of this study is a comprehensive approach to sensor selection, enabling the development of a balanced monitoring system. Widely used and accessible sensors such as DHT22, BME280, DS18B20 and SHT11 for temperature and humidity control, as well as load cells for weight measurement, are considered. The proposed sensors are compatible with popular microcontroller platforms such as ESP32, ensuring flexible and scalable system design.

Additionally, the article discusses sensor options for applications with higher demands on accuracy and reliability. The comparative analysis of sensors is supplemented by tables summarizing key characteristics, which allows for a well-founded choice of devices for specific tasks. The proposed solutions may serve as a foundation for the development of scalable and cost-effective automated IoT-based systems in agriculture. The implementation of such systems in beekeeping can reduce maintenance costs, improve monitoring accuracy, and contribute to more efficient management of apiaries.

Key words: automation, sensors, bee colony monitoring, DHT22, BME280, DS18B20, SHT11, load cells, Internet of Things (IoT).

Дата надходження статті: 14.09.2025

Дата прийняття статті: 27.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025