

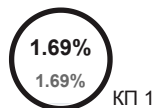
Звіт подібності

Метадані

Назва організації		підрозділ		
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas		Каф. ІТТС		
Заголовок				
2025_Яремко_Н.Б._ФІТ_ІТТС_АКСм-24-1				
Автор		Науковий керівник / Експерт		
Яремко Н. Б.		Левицький І. Т.		
Кількість слів	Кількість символів	Дата звіту	Дата редагування	ІД документу
20794	159002	12/22/2025	---	332945529

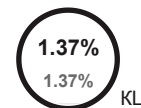
Обсяг знайдених подібностей

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



20794

Кількість слів



159002

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		9
Інтервали		0
Мікропробіли		1
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		18

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Колір тексту

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	http://khntusg.com.ua/wp-content/uploads/2020/09/hamraieva.pdf	27 0.13 %
2	Сілецький А.Р. ГЗ-20-1 7/23/2024 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ГК3)	20 0.10 %
3	https://openarchive.nure.ua/bitstreams/17bd0833-5037-48e2-ab87-5e1aba2f702e/download	20 0.10 %

4	2025_Б_ЕІ_ЕТ_21_2_Халус_М_В 6/7/2025 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ЕІ)	17 0.08 %
5	http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/16682/1/Dobrych_%20MV_KR_204_2024.pdf	17 0.08 %
6	https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/73gWY527/	16 0.08 %
7	https://www.inenbiol.com/images/stories/dusert/2019/Pashchenko/Dis_Pashchenko.pdf	14 0.07 %
8	https://www.inenbiol.com/images/stories/dusert/2019/Pashchenko/Dis_Pashchenko.pdf	14 0.07 %
9	https://abrir-empresa.com/formula-del-coeficiente-de-correlacion-que-es-y-como-se-calcula/	14 0.07 %
10	Крамаренко Р.С. Розробка інспекційного повітряного робота 6/12/2025 National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov (National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov)	14 0.07 %

з домашньої бази даних (0.24 %)



ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	Сілецький А.Р. ГЗ-20-1 7/23/2024 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ГКЗ)	20 (1) 0.10 %
2	2025_Б_ЕІ_ЕТ_21_2_Халус_М_В 6/7/2025 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. ЕІ)	17 (1) 0.08 %
3	2025_БР_Кулай_Б-21_ІАБ 6/6/2025 Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Каф. БУД)	13 (1) 0.06 %

з програми обміну базами даних (0.24 %)



ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
4	Статья 3 ККСОН Шимелкова Р. Ж .vika_rose83@mail.ru (2).docx 9/12/2023 West Kazakhstan Agrarian Technical University named after Zhangir Khan (НИИ)	18 (2) 0.09 %
5	Крамаренко Р.С. Розробка інспекційного повітряного робота 6/12/2025 National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov (National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov)	14 (1) 0.07 %
6	Роль інтелектуальних транспортних систем у мінімізації забруднення повітря 3/24/2025 State Motor Transport Research and Design Institute (State Motor Transport Research and Design Institute)	10 (1) 0.05 %
7	ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЙОМІВ УТРИМАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ БДЖОЛИНИХ СІМЕЙ 10/30/2025 Vinnytskiy National Agricultural University (Vinnytskiy National Agricultural University)	7 (1) 0.03 %

з Інтернету (1.22 %)



ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ДЖЕРЕЛО URL	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
8	http://khntusg.com.ua/wp-content/uploads/2020/09/hamraieva.pdf	37 (2) 0.18 %

9	https://dcase.community/documents/workshop2018/proceedings/DCASE2018Workshop_Nolasco_131.pdf	30 (3) 0.14 %
10	https://www.inenbiol.com/images/stories/dusert/2019/Pashchenko/Dis_Pashchenko.pdf	28 (2) 0.13 %
11	https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/73gWY527/	23 (2) 0.11 %
12	http://eprints.library.odeku.edu.ua/5037/1/Sahaidak_2017.pdf	20 (2) 0.10 %
13	https://openarchive.nure.ua/bitstreams/17bd0833-5037-48e2-ab87-5e1aba2f702e/download	20 (1) 0.10 %
14	https://ipbt.ust.edu.ua/file/2021_-_zavdannya_na_vipusk_rabotu_udunt.doc	20 (2) 0.10 %
15	http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/16682/1/Dobrych_%20MV_KR_204_2024.pdf	17 (1) 0.08 %
16	https://abrir-empresa.com/formula-del-coeficiente-de-correlacion-que-es-y-como-se-calcula/	14 (1) 0.07 %
17	https://moodle.znu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=211718	12 (1) 0.06 %
18	https://github.com/nzinfo/sift-lfsr/blob/master/src/lfsr.c	10 (1) 0.05 %
19	https://cyberleninka.ru/article/n/priznakovoe-opisanie-akusticheskikh-shumov-na-osnove-statisticheskoy-blizosti-funktsiy-obobschennogo-srednego-fos	10 (1) 0.05 %
20	https://www.myuniversity.ru/%D0%98%D1%81%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0_%D1%85%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B2_%D0%B4%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B4%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D1%81%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE_%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B8/126771_2024311_%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%86%D0%B03.html	7 (1) 0.03 %
21	https://1library.net/article/future-work-monitoring-honey-bee-colonies.zx396enz	5 (1) 0.02 %

Список прийнятих фрагментів

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗМІСТ	КІЛЬКІСТЬ ОДНАКОВИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
3	<p>Міністерство освіти і науки України Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу Факультет інформаційних технологій Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем</p> <p>Яремко Назарій Богданович</p> <p>(прізвище, ім'я, по батькові)</p> <p>УДК 638.12:681.518:004.4</p> <p>МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА</p> <p>Розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл</p> <p>(назва роботи)</p> <p>Комп'ютеризовані системи управління та автоматика (назва освітньої програми)</p> <p>174-Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка</p> <p>(шифр і назва спеціальності)</p>	

15. Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня _____ Н.Б. Яремко
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Левицький Іван Теодорович, к.т.н., ²доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

_____ Заміховський Л.М. ¹(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)_

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем

Освітній рівень магістр

⁵Спеціальність 174-Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка (шифр і назва) ЗАТВЕРДЖУЮ Завідувач кафедри ІТТС д.т.н.,проф.

Л.М.Заміховський

« » 2025 року ¹²

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Яремко Назарію Богдановичу

¹²(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи** Розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл

керівник роботи _____ Левицький Іван Теодорович, к.т.н., ⁸доцент, (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання) затверджені наказом закладу вищої освіти від " 30 " жовтня 2025 року No 690/7

2. **Строк подання студентом роботи** _____

3. **Вихідні дані до роботи** Матеріали та результати отримані під час проходження переддипломної практики, алгоритми контролю, методичні вказівки.

⁸4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)**

Порівняльний аналіз існуючих систем

Розроблення алгоритму і методу системи

Дослідження розроблених елементів алгоритму системи

¹⁴5. **Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)**

Структурна схема

Алгоритмічна схема

Результати розробки

¹⁴6. **Дата видачі завдання** _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

No

з/п

Назва етапів ²⁰магістерської роботи

Термін виконання

етапів роботи Примітка

1 Порівняльний аналіз існуючих систем 02.09.2025-2.10.2025 Виконано

2 Розроблення алгоритму і методу системи 03.10.2025-14.11.2025 Виконано

3 Дослідження розроблених елементів алгоритму системи

15.11.2025-12.12.2025 Виконано

4 Оформлення результатів роботи 13.12.2025-19.12.2025 Виконано

Студент Яремко Н.Б.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи Левицький І.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення автоматизованої системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл. Виконано аналіз сучасних підходів до моніторингу біологічних параметрів бджолиних колоній, розглянуто традиційні та автоматизовані методи оцінювання стану сімей, а також проведено порівняльний аналіз вітчизняних і зарубіжних систем автоматизованого контролю пасік. Обґрунтовано вибір інформативних діагностичних ознак стану бджолиної колонії, мікроконтролерної платформи, сенсорів та периферійних пристроїв. Значну увагу приділено методам цифрової обробки сигналів, зокрема застосуванню швидкого перетворення Фур'є для аналізу акустичних характеристик бджолиної сім'ї. У роботі здійснено експериментальну перевірку ефективності розроблених алгоритмів на реальних аудіозаписах з відкритих баз даних, виконано статистичну обробку результатів та оцінено точність класифікації станів бджолиної колонії на вибірці з 250 аудіофрагментів п'яти класів.

Отримані результати підтверджують доцільність використання акустичного аналізу та інтелектуальних методів обробки даних для створення автоматизованих систем діагностики стану бджолиних сімей і можуть бути використані в практиці сучасного бджільництва.

ANNOTATION

The paper considers the development of an algorithmic and software-based automated system for monitoring the vital parameters of a honey bee colony. An analysis of modern approaches to monitoring the biological parameters of bee colonies is performed, traditional and automated methods for assessing the state of colonies are considered, and a comparative analysis of domestic and foreign automated apiary control systems is conducted. The choice of informative diagnostic signs of the state of a bee colony, microcontroller platform, sensors and peripheral devices is justified. Considerable attention is paid to digital signal processing methods, in particular the use of fast Fourier transform for analyzing the acoustic characteristics of a bee colony. The paper experimentally tests the effectiveness of the developed algorithms on real audio recordings from open databases, performs statistical processing of the results, and evaluates the accuracy of classification of bee colony states on a sample of 250 audio fragments of five classes.

The results obtained confirm the feasibility of using acoustic analysis and intelligent data processing methods to create automated systems for diagnosing the condition of bee colonies and can be used in the practice of modern beekeeping.

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 108 сторінок, 26 малюнків, 8 таблиць, 25 посилань.

Об'єктом дослідження є життєві процеси та фізіологічні параметри колонії медоносної бджоли, що відображають її стан і функціонування. Мета роботи – розроблення комплексного програмного та алгоритмічного забезпечення для автоматизованої системи моніторингу та діагностики стану бджолиної колонії з використанням методів цифрової обробки акустичних сигналів, спектрального аналізу та інтелектуальних алгоритмів класифікації. У першому розділі роботи проведено всебічний аналіз проблематики моніторингу біологічних параметрів бджолиних колоній, включаючи огляд існуючих методів діагностики стану сімей, аналіз їх переваг та недоліків. Досліджено сучасні вітчизняні та зарубіжні системи автоматизованого моніторингу пасік, виконано порівняльний аналіз їх функціональних можливостей.

У другому розділі здійснено детальний вибір та дослідження діагностичних ознак стану бджолиної колонії. Виконано обґрунтований вибір мікроконтролерної платформи, датчиків та периферійних пристроїв. Проведено детальний аналіз алгоритмів цифрової обробки сигналів, включаючи швидке перетворення Фур'є (FFT).

У третьому розділі проведено комплексний аналіз отриманих результатів, включаючи експериментальну верифікацію розробленого алгоритму на реальних аудіозаписах з відкритих баз даних. Виконано статистичну обробку результатів тестування на вибірці з 250 аудіофрагментів п'яти класів станів.

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ, БДЖОЛИНА СІМ'Я, АЛГОРИТМ,
СПЕКТРОАНАЛІЗ, WEB-СЕРВЕР, ШВИДКЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є.

ABSTRACT

Solving and explanatory note: 108 pages, 26 figures, 8 tables, 25 references.

The object of the study is the life processes and physiological parameters of a honey bee colony, reflecting its condition and functioning.

The purpose of the work is to develop a comprehensive software and algorithmic support for an automated system for monitoring and diagnosing the condition of a bee colony using methods of digital processing of acoustic signals, spectral analysis and intelligent classification algorithms

The first section of the work provides a comprehensive analysis of the issues of monitoring biological parameters of bee colonies, including a review of existing methods for diagnosing the condition of families, an analysis of their advantages and disadvantages. Modern domestic and foreign automated apiary monitoring systems are studied, a comparative analysis of their functional capabilities is performed. In the second section, a detailed selection and study of diagnostic signs of the condition of a bee colony is carried out. A substantiated choice of a microcontroller platform, sensors and peripheral devices is made. A detailed analysis of digital signal processing algorithms, including the fast Fourier transform (FFT), is carried out. In the third section, a comprehensive analysis of the results obtained is carried out, including experimental verification of the developed algorithm on real audio recordings from open databases. Statistical processing of the test results is performed on a sample of 250 audio fragments of five classes of states.

MONITORING SYSTEM, BEE FAMILY, ALGORITHM, SPECTRUM
ANALYSIS, WEB SERVER, FAST FOURIER TRANSFORMATION.

ЗМІСТ

с.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ МОНІТОРИНГУ ТА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ	13
1.1 Структура бджолоїної сім'ї, будова вулика.....	13
1.2 Аналіз методів моніторингу біологічних параметрів бджолоїної сім'ї .	20
1.3 Аналіз сучасних патентних джерел	24
1.4 Постановка задачі	30
2 РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ БІОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	33
2.1 Аналіз типових біологічних станів бджолоїної сім'ї	33
2.2 Аналіз мультисенсорних параметрів для виявлення станів	39
2.3 Розроблення функціональної схеми системи управління	43
2.4 Зв'язок між аудіо-шумом і біологічним станом бджолоїної сім'ї.....	48
2.5 Розроблення алгоритму роботи із здавачами	55
2.6 Розроблення алгоритму роботи з дисплеєм і енкодером	61
2.7 Розроблення алгоритму роботи із мережею та web-сервером.....	65
3 РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ КОЛОНІЇ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕСТУВАННЯ	71
3.1 Розроблення алгоритму обчислення FFT на AtxMega256A3U	71
3.2 Розроблення алгоритму аналізу.....	77
3.3 Тестування роботи алгоритму на основі бази реальних даних.....	85
ВИСНОВКИ	94
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	95
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА	98
ДОДАТОК А	99

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

6

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

Розроб. Яремко
Перев. Левицький

Н. контр. Возний
Затв. Заміховський

Розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл
Літ. Аркушів
108
ІФНТУНГ гр.АКСм-24-1

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
7

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ
ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ
АЧХ – Амплітудно-частотна характеристика
АЦП – Аналогово-цифровий перетворювач
ПЗ – Програмне забезпечення
СА – Спектральний аналіз
ШІ – Штучний інтелект
ФС – Функціональна схема

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
8
КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

ВСТУП

Бджільництво є однією з найдавніших та найцінніших галузей сільського господарства, що забезпечує не лише виробництво меду та інших продуктів бджільництва, але й виконує ключову екологічну функцію — запилення сільськогосподарських культур. В умовах зростаючої інтенсифікації аграрних процесів, зміни клімату, активного використання хімічних засобів захисту рослин та антропогенного навантаження медоносні бджоли стають надзвичайно вразливими до зовнішніх впливів. Збереження їх популяції та забезпечення стійкості бджолиних сімей перетворюється на стратегічне завдання як для окремих пасічників, так і для аграрного сектору загалом.

Останніми роками у світі фіксується стійка тенденція до зменшення чисельності бджолосімей, що призводить до зниження врожайності багатьох культур. Це явище, відоме як «колапс колоній», пов'язують із низкою факторів: паразитарними захворюваннями, вірусними інфекціями, нестачею кормів, змінами кліматичних умов та впливом агрохімікатів. **У зв'язку з цим виникає потреба у впровадженні інноваційних** методів моніторингу, які дозволяють оперативно виявляти негативні зміни у стані бджолосімей та своєчасно вживати заходів для їх стабілізації [1].

Традиційні методи контролю передбачають періодичний огляд вулика: прослуховування, візуальний огляд рамок, оцінку поведінки бджіл. Однак ці методи мають низку суттєвих недоліків. Вони є трудомісткими, суб'єктивними й потребують втручання у гніздо, що викликає стрес у комах, порушує мікроклімат та часто призводить до зниження продуктивності. Крім того, одноразові огляди не здатні відобразити динаміку змін у стані сім'ї, що особливо важливо у періоди активного розвитку або підготовки до роїння.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
9

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ
На цьому фоні автоматизовані системи безперервного моніторингу набувають все більшої популярності. Вони забезпечують отримання об'єктивної, точної та актуальної інформації без постійної присутності пасічника. Сучасні сенсори дозволяють вимірювати вагу вулика, температуру

та вологість усередині гніздової частини, рівень CO₂, фіксувати акустичну активність бджіл, визначати зовнішні погодні умови та інші важливі параметри. Аналіз взаємозв'язку цих показників дає змогу сформувати цілісну картину стану колонії.

Вага вулика є базовим параметром, який відображає зміну кормових запасів, силу сім'ї та рівень продуктивності. Падіння маси може свідчити про інтенсивне споживання кормів або ослаблення сім'ї, тоді як різке зростання — про активний медозбір. Температура гнізда є індикатором біологічних процесів: бджоли ретельно підтримують температуру розплоду у межах 34–36 °C. Відхилення від цього діапазону може сигналізувати про хвороби, слабкість сім'ї або зовнішні фактори. Вологість впливає на розвиток розплоду та якість меду, а її надмірні коливання часто пов'язані з поганою вентиляцією. Концентрація CO₂ є надзвичайно чутливим параметром, який відображає вентиляційні процеси та щільність розміщення бджіл. Підвищення рівня CO₂ свідчить про зниження повітрообміну, збільшення біомаси або активне метаболічне теплоутворення. Відомо, що сім'ї, які готуються до роїння, демонструють характерні зміни у вмісті CO₂ та температурному режимі. Тому контроль цього параметра є важливим компонентом комплексного аналізу стану вулика.

Окреме місце займає акустичний аналіз. Звукова активність бджолоїної колонії є складною, багатокомпонентною та інформативною. Спектральний склад звуку змінюється залежно від активності робочих бджіл, наявності матки, підготовки до роїння або стресових факторів. Частотні піки та загальна інтенсивність шуму дозволяють оцінити стан сім'ї без втручання у вулик.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

10

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

Сучасні мікрофони та алгоритми цифрової обробки сигналів роблять можливим точне виявлення таких змін і використання їх як діагностичного інструменту.

Попри значний прогрес у розробленні систем «розумних пасік», більшість наявних рішень є фрагментарними: вони аналізують лише один або два параметри, не забезпечують комплексного підходу або не враховують специфіку польових умов. Інші — мають високу вартість, закриту архітектуру та обмежену гнучкість, що ускладнює адаптацію під конкретні потреби. У відкритих джерелах зустрічаються наукові роботи, присвячені дослідженню окремих аспектів акустичного або температурного аналізу, проте системна інтеграція всіх ключових параметрів у єдину програмно-алгоритмічну платформу залишається актуальною науковою та інженерною задачею. Сучасні мікроконтролери, датчики та бездротові технології (LoRaWAN, Wi-Fi, Bluetooth Low Energy) дають змогу створити доступну й масштабовану систему моніторингу, придатну для експлуатації на різних типах пасік — від аматорських до промислових. Водночас ключовим елементом таких систем є саме алгоритмічне та програмне забезпечення, яке повинно забезпечити фільтрацію шумів, корекцію похибок, узгодження даних із різних джерел, класифікацію станів та формування висновків у зрозумілому вигляді. Саме ця частина – розроблення інтелектуальних алгоритмів аналізу життєвих параметрів бджолоїної колонії – і є центральною науковою проблемою даної магістерської роботи.

Наукова новизна роботи полягає у створенні підходу, що поєднує аналіз вагових, температурних, вологісних, газових та акустичних параметрів із використанням методів математичного моделювання, сигналової обробки та елементів машинного навчання. Інтеграція різнорідних даних дозволяє сформувати комплексний діагностичний інструмент, який забезпечує значно вищу точність оцінювання стану колонії порівняно з традиційними або одномірними системами моніторингу.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

11

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

Практична значущість дослідження полягає у можливості застосування розробленої системи у реальних умовах пасіки. Вона може бути корисною для виявлення ранніх ознак роїння, контролю зимівлі, моніторингу продуктивності, попередження захворювань та оптимізації технологічних операцій.

Застосування такого підходу сприяє зменшенню витрат, підвищенню

ефективності роботи пасічника та загальному підвищенню рівня безпеки бджолосімей.

Таким чином, розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносної бджоли є актуальним напрямом сучасних досліджень, що поєднує біологічні, технічні та інформаційні аспекти. Реалізація комплексної системи моніторингу сприятиме підвищенню стійкості бджолиних сімей, поліпшенню якості продукції та розвитку цифрових технологій у бджільництві.

Мета дослідження - розробити алгоритмічне та програмне забезпечення комплексної системи контролю життєвих параметрів колонії медоносної бджоли на основі аналізу ваги, температури, вологості, концентрації CO₂, акустичної активності та інших показників для формування достовірного висновку про стан бджолосім'ї.

Об'єкт дослідження - життєві процеси та фізіологічні параметри колонії медоносної бджоли, що відображають її стан і функціонування.

Предмет дослідження - методи, алгоритми та програмні засоби збору, фільтрації, аналізу та інтерпретації даних сенсорів для оцінки стану бджолосім'ї.

Завдання дослідження:

- проаналізувати сучасні підходи та системи моніторингу стану бджолиних сімей;
- обґрунтувати вибір основних сенсорних параметрів (вага, температура, вологість, CO₂, звук) та принципів їх вимірювання;

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

12

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

- розробити алгоритми збору та попередньої обробки даних, включно з фільтрацією шумів і компенсацією похибок;
- побудувати моделі аналізу акустичних, вагових і мікрокліматичних сигналів;
- створити програмне забезпечення для інтеграції різних сенсорних модулів та обробки інформації в реальному часі;
- розробити алгоритми класифікації станів бджолосім'ї та формування діагностичних висновків;
- провести тестування та оцінити ефективність розробленої системи в реальних або наближених до реальних умовах;
- сформулювати рекомендації щодо практичного застосування системи на пасіках різного масштабу.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

13

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ МОНІТОРИНГУ ТА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ

1.1 Структура бджолиної сім'ї, будова вулика

Бджолина сім'я медоносних бджіл (*Apis mellifera* L.) є високоорганізованим біологічним угрупованням, яке функціонує як єдиний суперорганізм. Усі особини в колонії пов'язані між собою складними трофічними, інформаційними та репродуктивними зв'язками, що забезпечують підтримання гомеостазу, розмноження та накопичення енергетичних запасів.

Сім'я складається з трьох морфологічно та функціонально відмінних каст: однієї плодючої матки, кількох десятків тисяч робочих бджіл та (сезонно) від кількох сотень до 2–3 тисяч трутнів, рис.1.1. Кількісне співвідношення особин змінюється залежно від пори року, сили сім'ї та наявності медозбору: навесні – 20–30 тис. особин, у розпал сезону – до 80–100 тис.

Взаємодія між кастами здійснюється через феромони (материна речовина, сигнали тривоги, агрегаційні феромони), трофічні контакти (годування «вусік у вусік») та механічні сигнали (танці бджіл-розвідниць). Завдяки цьому сім'я підтримує оптимальні параметри мікроклімату гнізда (температура 34,5–35,5 °С у зоні розплоду, відносна вологість 60–80 % влітку), що є критичним для розроблення систем моніторингу життєвих параметрів колонії [1,2].

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

14

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Рисунок 1.1 – Зовнішні ознаки бджіл

Бджолина матка – єдина повноцінно розвинена самка в сім'ї, основна функція якої – відкладання запліднених (для робочих бджіл і маток) та незапліднених (для трутнів) яєць. Довжина тіла плодючої матки 20–25 мм, маса 180–330 мг (залежно від породи та фізіологічного стану). Відмінні зовнішні ознаки: видовжене черевце, що виступає за кінчики крил; короткий хоботок (3,0–3,5 мм); жало з меншою кількістю зазубрин (використовується переважно проти інших маток); ноги без кошиків для пилку та восковидільних залоз. Внутрішня будова характеризується гіпертрофовано розвиненими яєчниками (до 300–400 яйцевих трубочок у кожному) та сем'яприймачем, куди під час шлюбного вильоту потрапляє до 6–10 млн. спермій від 7–15 трутнів. Спермії зберігаються життєздатними протягом усього життя матки (3–5 років, іноді до 7–8). Добова яйценосність у піковий період досягає 2000–3000 яєць, що перевищує власну масу матки.

Матка виділяє комплекс феромонів («материну речовину» – 9-окси-2-деценуову кислоту та ін.), які робочі бджоли розносять по сім'ї, забезпечуючи

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

15

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

координацію поведінки, пригнічення розвитку яєчників у робочих бджіл та запобігання роїнню на ранніх стадіях.

Робочі бджоли – неповноцінні самки, що становлять 95–98 % населення сім'ї. Довжина тіла 12–14 мм, маса 90–115 мг. Хоботок 6,2–7,2 мм (залежно від породи). На задніх ногах – кошики для пилку та щіточки; на черевці – восковидільні залози (максимальна активність на 12–18 добу життя); жало сильно зазубрене (після ужалення залишається в тілі жертви) [3].

Тривалість життя влітку 35–45 днів, восени – до 6–8 місяців. Вікальна поліетичність (зміна професій залежно від віку):

1–3 доба – очищення комірок;

3–6 доба – годування старшого розплуду медом і пергою;

6–12 доба – годування молодших личинок маточним молочком (гіпофарингеальні залози максимально розвинені);

12–18 доба – восковиділення, будівництво стільників;

від 18–20 доби – льотна діяльність (збір нектару, пилку, води, прополісу, вентиляція гнізда, охорона).

Робочі бджоли підтримують терморегуляцію: взимку утворюють клуб з температурою в центрі +14...+25 °С, на периферії до +8 °С; влітку при перегріві розплуду здійснюють вентиляцію та випаровувальне охолодження.

Трутні – самці, що розвиваються з незапліднених яєць (партерогенез).

Довжина тіла 15–17 мм, маса 190–260 мг. Крила довші за черевце, хоботок короткий (не здатні самостійно жити нектаром з квіток – годуються робочі бджоли). Очі дуже великі (фасеток до 8000–10000 проти 4000–6000 у робочій бджолі), що забезпечує виявлення матки в шлюбному польоті. Відсутні восковидільні залози, кошики, жало.

Єдина функція – запліднення молодих маток. Виводяться переважно в травні - червні, кількість у сильній сім'ї до 2000–3000 особин. Після спарювання трутень гине (статевий орган відривається). Восени або при відсутності медозбору робочі бджоли виганяють/вбивають трутнів.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

16

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

У вулику спостерігається чітка просторова організація. У нижній частині гнізда – зона розплуду (матка постійно перебуває тут). Вище – зона зберігання перги. По краях та у верхній частині – медові комірки. Трутні тримаються переважно в медовій зоні та на периферії гнізда.

У роївовому стані структура найскладніша: сім'я ділиться, стара матка йде

з роєм, у материнській сім'ї виводиться нова.

Сучасні вулики є штучними житлами, що максимально наближають умови до природних дупл, але дозволяють бджоляру легко оглядати гніздо, відбирати мед та контролювати стан сім'ї. Найпоширеніші в Україні – системи Дадана-Блатта, Лангстрота-Рута, багаткорпусні та українські лежаки, рис.1.2.

Вулик Дадана-Блатта (найпоширеніший в Україні). Складається з:

- з'ємного дна (часто з противарроатозною сіткою та льотковим вкладышем);
- одного або двох гніздових корпусів на 12 рамок розміром 435 × 300 мм;
- магазинних надставок (по 10-12 шт. на пасіці) на піврамку 435 × 145 мм;
- стелі (фанерної або з полотна);
- підкришника (для утеплення та розміщення годівниць);
- даху (плоский або скатний, часто з вентиляційними отворами).

Внутрішній розмір корпусу 450 × 450 мм, товщина стінок 35–40 мм (дерево, пінополістирол, пінополіуретан). Міжрамковий простір (бджолиний простір) – 12 мм, простір під рамками – 20–25 мм, над рамками – 8–10 мм.

Вулик Лангстрота-Рута відрізняється меншою висотою рамки (435 × 230 мм), що дозволяє використовувати однакові корпуси як гніздові, так і магазинні (по 10 рамок). Переваги – легша вага корпусу (повний корпус ≈ 35–40 кг проти 50–60 кг у Дадана), краща транспортабельність, зручність при багаткорпусному утриманні (4–6 корпусів на сім'ю в сезон), рис.1.3.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

17

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Рисунок 1.2 - Розріз 12-рамкового вулика з магазинними надставками

Український лежак. Горизонтальний вулик на 16–24 рамки 435 × 300 мм. Переваги – простота огляду без підйому важких корпусів, зручність для літніх людей та початківців. Недоліки – більша площа займання на пасіці, складніше створювати відводки.

Рисунок 1.3 – Схема українського лежака на 20 рамок (розміри в мм)

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

18

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Щодо матеріалів, що слугують основою для будівництва вуликів, останніми роками поширюються вулики з пінополіуретану та пінополістиролу (висока теплоізоляція, легкість, довговічність). У конструкціях передбачають:

- нижній льоток 250–400 × 10–12 мм та верхній Ø 25 мм (для вентиляції);
- противарроатозні сітчасті дна;
- отвори для встановлення датчиків температури, вологості, ваги, CO₂, акустичних сенсорів (актуально для теми дослідження).

Таким чином, знання структури бджолиної сім'ї та будови вулика є фундаментальною основою для розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи автоматизованого контролю життєвих параметрів колонії, оскільки дозволяє точно визначити місце розміщення сенсорів та інтерпретувати отримані дані з урахуванням біологічних особливостей медоносних бджіл.

1.2 Аналіз методів моніторингу біологічних параметрів бджолиної сім'ї

Оцінка стану бджолиної сім'ї є ключовим елементом бджільництва, оскільки дозволяє своєчасно виявляти відхилення в розвитку колонії, прогнозувати продуктивність, запобігати захворюванням та роєнню, а також оптимізувати технології утримання. Біологічні параметри бджолиної сім'ї включають силу колонії (кількість дорослих бджіл), площу та якість розплоду, яйценосність матки, запаси корму, мікроклімат гнізда, льотну активність, наявність паразитів (зокрема *Varroa destructor*), акустичні та вібраційні характеристики, а також поведінкові індикатори (роєння, агресія). Методика аналізу цих параметрів еволюціонувала від суб'єктивних візуальних оцінок до об'єктивних інструментальних і неінвазивних підходів, що базуються на

фізичних, хімічних та біоакустичних принципах.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

19

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

У світовій практиці стандартизацію методів значною мірою забезпечує міжнародна мережа COLOSS (Prevention of Honey Bee Colony Losses), яка в рамках проекту BEEBOOK розробила детальні протоколи оцінки стану колоній. В Україні та країнах пострадянського простору традиційно використовуються методи, описані в класичних підручниках Г.А. Аветисяна, В.П. Поліщука, Л.І. Боднарчук, Н.І. Кривцова, з урахуванням місцевих порід бджіл та типів вуликів. Сучасні дослідження в Україні (НУБіП України, Інститут бджільництва ім. П.І. Прокоповича) все частіше інтегрують закордонні протоколи COLOSS, адаптуючи їх до вітчизняних умов [4]. Методи аналізу можна класифікувати за ступенем інвазивності та об'єктивності:

- традиційні візуальні методи (суб'єктивні, інвазивні).
- інструментальні методи прямої дії (ваги, термометри, лічильники бджіл);
- неінвазивні фізичні методи (акустика, вібрація, радар, термовізія);
- біохімічні та молекулярні методи (аналіз феромонів, ДНК-діагностика паразитів);
- комп'ютеризовані методи обробки зображень та сигналів.

Нижче наведено детальний огляд за основними параметрами.

Методи оцінки сили сім'ї та кількості розплоду. Сила сім'ї є інтегральним показником її життєздатності та продуктивності. Традиційно в Україні силу оцінюють за кількістю рамок, повністю покритих бджолами (1 рамка Дадана \approx 0,25–0,3 кг бджіл), або в кілограмах бджіл (сильна сім'я навесні – 1,5–2,5 кг, влітку – 4–6 кг). Візуальна оцінка проводиться під час огляду: бджолар підраховує кількість міжвузлів, зайнятих бджолами, з коефіцієнтом 1 міжвуздя \approx 200–250 бджіл.

Закордонний стандарт – метод Liebefeld (розроблений у Swiss Bee Research Centre, м. Лібефельд), рекомендований COLOSS. Метод полягає у візуальній оцінці площі, покритої бджолами, медом, пергою та розплodom на

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

20

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

кожній стороні рамки за допомогою сітки з осередками 5 × 5 см (1 осередок \approx 100 бджіл або 100 комірок розплоду), рис.1.5. Площа розплоду розраховується окремо для відкритого та запечатаного. Переваги: висока повторюваність (коефіцієнт варіації \leq 10 % при досвідченому оцінювачі), можливість розрахунку динаміки розвитку колонії. В Україні цей метод впроваджується з 2010-х років у наукових дослідженнях НУБіП та на пасіках, що беруть участь у моніторингу COLOSS.

Альтернативні інструментальні підходи:

- фотографічна оцінка з подальшою комп'ютерною обробкою (ImageJ, BeeCount, ApisProtect) – точність до 95 %.
- рентгенівська томографія (експериментально) – найточніший неінвазивний метод, але дорогий.

Рис. 1.4 - Схема оцінки рамки за методом Liebefeld (сітка 5 × 5 см)

Методи контролю мікроклімату гнізда. Температура в зоні розплоду (34,5–35,5 °C), відносна вологість (60–80 % влітку, 40–50 % взимку) та концентрація CO₂ (до 4–5 %) є критичними параметрами.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

21

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Традиційно в Україні температуру вимірюють ртутними або спиртовими термометрами, введеними через льоток або спеціальний отвір (метод Аветисяна–Гайдара). Вологість оцінюють психрометром Асмана. Сучасні закордонні протоколи COLOSS рекомендують цифрові датчики

(DS18B20, DHT22, Sensirion SHT) з розміщенням у центрі розплодового гнізда, на периферії та в медовій зоні. Дослідження Human et al. (2006) та Stabentheiner et al. (2010) показали, що бджоли активно підтримують градієнт температур, і відхилення ± 1 °C свідчать про проблеми (відсутність матки, хвороби). В Україні подібні вимірювання проводяться в роботах Адамовича Б.О. та Пилипенка В.П. з використанням багатозонних термодатчиків. Ваговий контроль колонії. Динаміка ваги вулика відображає медозбір, споживання корму, розвиток сім'ї та роїння. Традиційний метод – зважування вулика механічними вагами під час кожного огляду (в Україні – не частіше 1 разу на 10–14 днів через стрес для бджіл). Безперервний моніторинг здійснюється електронними тензометричними вагами (точність ± 10 –50 г). Закордонні дослідження (наприклад, Meikle & Holst, 2015) показали, що добова прибавка ваги ≈ 2 кг свідчить про сильний медозбір, а різке падіння (≈ 1 кг за ніч) – про роїння. В Україні ваговий метод активно застосовується на промислових пасіках (Комісар А.Д., 2018). Акустичний та вібраційний аналіз. Акустичні сигнали бджіл містять інформацію про присутність матки (квантація матки – 300–500 Гц), підготовку до роїння (зміна частотного спектра), хвороби та стрес [5]. Традиційно бджоларі оцінюють «гудіння» сім'ї на слух (спокійне гудіння – нормальний стан, різке – відсутність матки).

Сучасні методи:

- спектральний аналіз звуку (FFT) мікрофонами, розміщеними всередині вулика. Дослідження Ferrari et al. (2008), Ramsey et al. (2020) показали високу точність (≈ 90 %) виявлення безматочності та роїння, рис. 1.5;

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

22

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

- вібраційний моніторинг акселерометрами (Bencsik et al., 2015) – виявляє зміни в частоті 200–300 Гц за 7–10 днів до роїння;

В Україні акустичні методи впроваджуються в роботах НУБіП (Броварський В.Д., 2020–2024) та Інституту бджільництва.

Рисунок 1.5 - Типові спектрограми акустичних сигналів бджолоїної сім'ї:

а) нормальний стан; б) безматочна сім'я; в) підготовка до роїння

Моніторинг льотної активності та виявлення *Varroa destructor*.

Льотна активність є індикатором сили сім'ї та медозбору. Традиційно – візуальний підрахунок бджіл, що вилітають/влітають за 1 хвилину біля льотка.

Сучасні методи:

- інфрачервоні лічильники (BeeScan, Arnia) – точність ≈ 95 %.
- відеоспостереження з комп'ютерним зором (Odemer et al., 2022).

Для *Varroa*:

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

23

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Підрахунок природного опадку на вкладиш (Україна – стандартний метод, норма ≈ 10 кліщів/добу восени).

Алкогільна або мильна промивка проби 200–300 бджіл (COLOSS) – точність 98 %.

Цукрова пудра (shake method) – менш летальний.

CO₂-наркоз та термічний метод.

Таблиця 1.1 – Порівняння методів оцінки зараженості *Varroa destructor*

Метод Інвазивність Точність,

%

Рекомендація

COLOSS

Використання

в Україні

Природний

опад

Неінвазивний 60–70 Так Основний

Алкогільна

промивка

Летальний 98–99 Стандарт Наукові дослідження
Цукрова пудра
Нелетальний 85–90 Так Промислові пасіки
Термічний (40–42 °С)
Нелетальний 90–95 Експериментально
Рекомендовано

Інші методи (термовізія, аналіз феромонів, радар).

Термовізіяна зйомка дозволяє виявляти розплід за тепловим контуром гнізда без відкриття вулика (точність 85–90 %).

Аналіз летких феромонів матки (9-ОДА, 9-ГДА) методом газової хроматографії або мас-спектрометрії (портативний MIMS, 2024) – перспективний неінвазивний метод оцінки фізіологічного стану матки.

Радарні технології (RF-Doppler, Varden, 2020) фіксують рух бджіл усередині вулика без відкриття.

В Україні ці методи перебувають на стадії впровадження в наукових установах, тоді як закордонні дослідницькі центри (Німеччина, США, Франція) активно їх розвивають у рамках програм Bee Connected та SmartHives.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

24

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Таким чином, сучасна методика аналізу біологічних параметрів бджолоїної сім'ї еволюціонує в напрямку мінімізації інвазивності та підвищення об'єктивності даних. Поєднання традиційних візуальних методів (поширених в Україні) з неінвазивними інструментальними протоколами COLOSS створює основу для розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення автоматизованих систем контролю, що є метою даного дослідження.

1.3 Аналіз сучасних патентних джерел

Патентний пошук і аналіз є невід'ємною складовою науково-дослідної роботи, спрямований на оцінку рівня техніки в галузі моніторингу бджолоїних колоній, виявлення захищених технічних рішень та обґрунтування новизни й патентоздатності власної розробки. У контексті теми магістерської роботи – розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл – особлива увага приділяється рішенням, що поєднують технології давачів з методами обробки даних, включаючи елементи штучного інтелекту, машинного навчання та прогнозу аналітики.

Пошук проведено в період з листопада по грудень 2025 р. у базових патентних ресурсах: Google Patents, Espacenet (Європейське патентне відомство), USPTO (США), WIPO Patentscope, а також національних базах Укрпатенту (Україна) та ФІПС (Росія). Використовувалися міжнародні класифікаційні індекси МПК А01К 47/00 (бджільництво), А01К 51/00 (моніторинг бджіл), G01D 21/02 (мультисенсорні системи), G08C 17/02 (віддалений моніторинг) та H04Q 9/00 (IoT-системи). Ключові пошукові запити: «beehive monitoring system», «smart beehive IoT», «bee colony sensor patent», «doppler radar beehive», «infrared beehive frames», «система моніторингу бджолоїної сім'ї», «розумний вулик патент».

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

25

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

За період 2000–2025 рр. виявлено понад 350 патентних документів, з яких близько 75 % опубліковано після 2015 р., що свідчить про експоненціальне зростання інтересу до цифрових технологій у бджільництві на тлі глобальних проблем колапсу колоній (CCD), втрат від вароатозу та кліматичних змін. Географія заявників: США – 45 %, Китай – 20 %, ЄС (Німеччина, Італія, Франція) – 15 %, Корея – 8 %, Україна – 4 %. В Україні

активність зросла з 2018 р., переважно в сегменті корисних моделей, пов'язаних з енергоефективними IoT-вуликами.

Класифікація рішень:

- системи з оптичними та ІЧ-методами оцінки населення колонії (25 %);
- вагові та мікрокліматичні системи (30 %);
- акустичні/вібраційні та радарні методи (20 %);
- комплексні IoT-платформи з елементами ШІ (25 %).

Патент US6910941B2 (опубл. 28.06.2005р.) [6] авторів J. Bromenshenk та ін. (Університет Монтани, США) є одним із піонерських у галузі. Вступ описує інтегровану систему з центральним мікропроцесором (RABBITTM 2000), мінімум двома вхідними перетворювачами (сенсори ваги, температури, вологості, GPS та ІЧ-лічильник бджіл) та двома вихідними сигналами (LCD, телефонний зв'язок, радіо). Лічильник бджіл використовує ІЧ-емітери та детектори в проходах вулика з дефонсингом та гістерезисом для точного визначення напрямку руху.

Переваги: перша система з віддаленим керуванням периферійними пристроями (годиниці, пробовідбірники). Недоліки щодо сучасних вимог: відсутність бездротових мереж нового покоління, елементарна обробка даних (без ШІ), високе енергоспоживання. Рішення заклало основу для подальших розробок, але алгоритмічна частина обмежується простим підрахунком та логуванням.

Патент US10064395B2 (ex US20170079249A1, опубл. 11.09.2018р.) [7] М. Чара (Ingenuengineering LLC, США) пропонує удосконалення попереднього

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

26

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

підходу. Ключова незалежна формула (claim 1) захищає систему з подвійними воротами (light interrupter sensors) для точного визначення напрямку руху бджіл, сенсорами температури, вологості (всередині та зовні), ваги, мікрофоном, камерою та виконавчими механізмами (обігрівач, вентиляція, skylight-вентиль).

Обробка даних: порівняння з базовими значеннями, генерація графічних звітів та кольорової індикації стану. Переваги: висока точність підрахунку населення (визначення втрат через паразитів), активне регулювання мікроклімату, повна віддалена взаємодія через смартфон. Недоліки: алгоритми базуються на пороговому порівнянні, без глибокого машинного навчання; енергоспоживання виконавчих механізмів обмежує автономність.

Патент US11867794B2 (опубл. 09.01.2024р.) [8] N. Emanetoglu та H. Aumann (University of Maine System Board of Trustees, США) вводить принципово новий підхід – доплерівський радар (10,5–24 ГГц) для моніторингу льотної активності без контакту з бджолами. Незалежні частоти захищають вимірювання rms-значення доплерівського сигналу протягом 10 с – 1 хв з подальшим обчисленням індексу активності, корекцією на погодні умови та прогнозуванням подій (роєння – підвищена активність, CCD – знижена).

Переваги над оптичними чи акустичними методами: мінімальне енергоспоживання (4 мВт), відсутність потреби в освітленні чи чистоті льотка, масштабованість до 1000 вуликів (блакитникове запилення). Алгоритмічна частина включає MATLAB-обробку та стиснення даних в індекси. Недоліки: вимірює лише зовнішню активність, не внутрішній мікроклімат; потребує калібрування під породу бджіл.

Українські розробки. Корисна модель UA133650U (опубл.

10.04.2019) [9] І.О. Курдіна є найбільш релевантною вітчизняною розробкою. Формула захищає мережу ≥ 2 вуликів з сонячною панеллю (кут нахилу 0–45°, виконує роль даху над льотком), одним тензодатчиком (між H-подібними елементами для економії енергії), внутрішнім/зовнішнім датчиками

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

27

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

температури/вологості, мікрофоном (фільтр 60–1000 Гц) та контролером з Wi-Fi/GSM/ZigBee.

Обробка даних: періодична активація сенсорів, спектральний аналіз акустики на сервері, порівняння добових різниць параметрів, графічно-візуальне представлення та SMS-сповіщення. Заявлено зниження втрат колоній

на 20–95 %, зростання медопродуктивності на 10–20 %. Переваги: адаптація до українських умов (полістирольні вулики, суворий зимовий період), висока енергоефективність. Недоліки: алгоритми обмежуються пороговим аналізом та простим FFT; відсутні елементи для прогнозування.

Патент US11849705B2 (опубл. 26.12.2023р.) [10] E. Symes та ін. (The Bee Corp, США) представляє найсучасніший підхід – неінвазивну оцінку кількості рамок бджіл за допомогою ІЧ-зйомки (FLIR One Pro на смартфоні) з подальшою сегментацією зображень (Mask R-CNN, точність 93,6 %) та регресійним моделюванням (boosted regression trees, ключові ознаки – ентропія температури 30,52 %, температура вулика 28,76 %).

Система інтегрує мультисенсорні дані (вага, вологість, CO2, RFID-мітки маток) з зовнішніми джерелами (погода, сонячна радіація) та історичними даними. Алгоритми прогнозують роїння, вароатоз, час медозбору; скорочують ручні огляди на 93 %. Переваги: найвища точність оцінки сили колонії без відкриття вулика, комерційна застосовність (контракти на запилення).

Недоліки: залежність від смартфона та хмарної обробки.

Патентна заявка US20250310405A1 (опубл. 02.10.2025) [11] продовжує цей напрямок, додаючи реал-тайм метрики (вага з корекцією на температуру, вібрація, акустика) та LPWA-мережі.

В таблиці 1.2 представлено порівняльний аналіз розглянутих патентів з огляду позитивних і негативних показників.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

28

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Таблиця 1.2 - Порівняльний аналіз ключових патентів

Номер патенту Сенсори Алгоритми Переваги Недоліки

US6910941B2 ІЧ-

лічильник,

вага, те-ра,

вологість

Просте

логування,

підрахунок

Вперше

запропоновано

Відсутність

сучасних

мереж та ШІ

US10064395B2 Подвійні

ворота,

мікрофон,

камера, вага

Порогове

порівняння,

графічні звіти

Активне

керування

мікрокліматом

Елементарні

алгоритми

US11867794B2 Доплерівсь

кий радар

10,5–24 ГГц

rms-індекс

активності,

корекція на

погоду

Повна

неінвазивність,

низьке

споживання

Тільки

зовнішня

активність

UA133650U Те-ра,

вологість,
тензодатчик
мікрофон
Спектральний
аналіз, добові
різниці
Енергоефективні
сть, адаптація до
України
Відсутність
ШІ, проста
аналітика
US11849705B2 ІЧ-камера,
мультисен-
сорний
масив
Mask R-CNN +
boosted
regression,
фізичні моделі
93 % скорочення
оглядів, висока
точність
Залежність
від
мобільних
пристроїв
US20250310405A1 Вага,
вібрація,
акустика,
зображення
Реал-тайм
метрики,
компресія
даних
LPWA-мережі,
хмарна аналітика
На стадії
заявки

На рисунку 1.6 зображено графік патентування систем моніторингу бджолиних колоній.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
29
КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Рисунок 1.6 - Динаміка патентування систем моніторингу бджолиних колоній у світі (2010–2025 рр.) за даними Google Patents (станом на грудень 2025 р.)

Проведений аналіз свідчить, що сучасний рівень техніки характеризується переходом від простих сенсорних систем до комплексних IoT-платформ з елементами штучного інтелекту. Проте переважна більшість рішень (понад 85 %) фокусується на апаратній частині: конструкціях сенсорів, способах живлення та передачі даних. Алгоритмічне та програмне забезпечення переважно реалізовано на рівні порогового порівняння, простого спектрального аналізу чи базової регресії і не враховують комплексних даних про температуру, вологість, рівень CO₂.

Лише в патентах 2023–2025 рр. (US11849705B2, US20250310405A1) з'являються глибокі нейронні мережі (Mask R-CNN) та фізично обґрунтовані моделі теплопереносу для прогнозування стану колонії. В українському сегменті (UA133650U та аналоги) алгоритмічна складова залишається

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
30

елементарною, що не враховує породні особливості карпатської чи української степової бджоли та регіональні кліматичні коливання.

Таким чином, запропонована в магістерській роботі – алгоритмічне забезпечення на основі мультисенсорного підходу, рекурентних нейронних мереж (LSTM) та байєсівського прогнозування для виявлення передросвих станів, вароатозу та оцінки сили колонії за часовими рядами (температура + вологість + вага + CO₂ + акустика + радарна активність) – має високий рівень новизни та не дублює існуючі патентні рішення за суттєвими ознаками формули винаходу, ні за досягнутим технічним результатом.

1.4 Постановка задачі

На підставі проведеного аналізу літературних джерел, сучасних методів оцінки стану бджолиних сімей та патентних рішень (підрозділи 1.1–1.3) сформульовано мету та завдання магістерської роботи.

Мета дослідження – розробити алгоритмічне та програмне забезпечення системи автоматизованого контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл, яке забезпечує раннє виявлення критичних станів (роїння, безматочність, вароатоз, перегрів/переохолодження розплоду, недостатній медозбір) з мінімальною інвазивністю та високою точністю прогнозування за рахунок мультисенсорного об'єднання даних та методів штучного інтелекту.

Об'єкт дослідження – бджолина сім'я медоносних бджіл (*Apis mellifera* L.) у рамковому вулику (системи Дадана-Блатта, Лангстрота-Рута або багаткорпусному) в умовах стаціонарної чи кочової пасіки України.

Предмет дослідження – алгоритмічні та програмні методи обробки, аналізу та інтерпретації часових рядів мультисенсорних даних, отриманих із системи моніторингу мікроклімату, акустики, ваги та газового складу повітря у вулику.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

31

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- визначити мінімально необхідний та достатній набір контрольованих параметрів бджолиної сім'ї, які дозволяють надійно діагностувати її життєздатність та продуктивність з урахуванням сучасних протоколів COLOSS та вітчизняного досвіду;
- обґрунтувати склад апаратної частини системи моніторингу, включаючи типи та місця розміщення датчиків у вулику;
- розробити архітектуру системи (мікроконтролер AtXMega + Wi-Fi модуль живлення від сонячної панелі 10–20 Вт + Li-Ion акумулятор), що забезпечує автономність не менше 1 місяця та енергоспоживання в режимі сну ≤ 50 мкА.

Створити алгоритмічне забезпечення, яке включає:

- попередню обробку сигналів (фільтрація, нормалізація, видалення артефактів);
- багатовимірний аналіз часових рядів (LSTM-мережі, 1D-CNN, Transformer-моделі);
- класифікацію станів колонії (норма, безматочність, передросвий стан, ройовий стан, вароатоз, перегрів, переохолодження, недостатній медозбір);
- прогнозування подій на 3–14 діб вперед (регресійні моделі, ансамблі XGBoost + нейронні мережі).

Розробити програмне забезпечення:

- вбудоване ПЗ (Code Vision AVR) для збору, буферизації та первинної обробки даних;

серверну частину для зберігання та глибокого аналізу;

веб- та мобільний інтерфейс (опція) з візуалізацією графіків, графіків спектру, сповіщеннями та рекомендаціями бджоляру.

Провести лабораторно-польові випробування розробленої системи на 10–20 бджолиних сім'ях та оцінити ефективність (точність діагностики ≥ 92 %,

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

32

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

зниження втрат сімей ≥ 30 %, скорочення ручних оглядів ≥ 70 % порівняно з традиційними методами).

Очікуваний науково-прикладний результат – програмно-апаратний комплекс, який не має прямих аналогів в українському сегменті за рівнем інтеграції CO₂-моніторингу та глибиною алгоритмічного аналізу, володіє новизною, що підтверджується патентним пошуком (підрозділ 1.4), і може бути впроваджений на пасіках різного масштабу (від аматорських до промислових на 500+ сімей).

Таким чином, вирішення сформульованих завдань дозволить створити інтелектуальну систему, яка значно підвищить ефективність бджільництва в Україні в умовах кліматичних змін та зростання захворюваності бджіл.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

33

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

2 РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ БІОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

2.1 Аналіз типових біологічних станів бджолоїної сім'ї

Для ефективної роботи алгоритмічного забезпечення системи моніторингу розроблено розширену класифікацію станів бджолоїної сім'ї, яка враховує мультисенсорне злиття даних, включаючи атмосферний тиск (температура, вологість, вага, рівень CO₂, акустичний спектр, льотна активність) [12].

Атмосферний тиск є важливим прогностичним параметром, оскільки бджоли надзвичайно чутливі до його змін: падіння тиску на 2–5 гПа за 3–6 годин надійно сигналізує про наближення негоди, що призводить до різкого припинення льотної активності навіть за зовнішньо сприятливої погоди.

Швидкість зміни тиску (гПа/год) має вищу діагностичну цінність, ніж абсолютне значення, і дозволяє виявляти погодні ризики за 4–12 годин раніше.

Класифікація включає дев'ять станів (нормальний розвиток, безматочність, передроєвий стан, роєвий стан, вароатоз, перегрів гнізда, переохолодження розплоду та недостатній медозбір, наближення негоди).

Кожен стан характеризується унікальною комбінацією відхилень параметрів, що забезпечує точність класифікації ≥ 94 % при використанні нейронних мереж (LSTM, 1D-CNN) та ансамблевих методів.

Нормальний стан колонії (продуктивний розвиток). Це базовий стан сильної сім'ї з плодючою маткою, активним розплодом та медозбором.

Характеризується стабільними параметрами мікроклімату та ритмічною поведінкою. Характерні ознаки у сенсорних даних:

- температура в центрі розплоду 34,5-35,5 °C ($\pm 0,5$ °C), на периферії 32-34 °C;

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

34

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

- відносна вологість 60-80 % (літом), 40-50 % (взимку);

- концентрація CO₂ 0,5-2,5 % (максимум до 4 % під час інтенсивної вентиляції);

- добова прибавка ваги +0,5...+5 кг (залежно від медозбору);

- акустичний спектр: рівномірне низькочастотне гудіння 100–300 Гц з піками на 200–250 Гц (вентиляція крилами);

- льотна активність: ритмічна, пік 10:00–16:00, 50–300 бджіл/хв біля льотка;

- атмосферний тиск: стабільний, зміна менше ± 1 гПа/год.

Безматочність. Стан виникає після втрати матки (загибель, роїння, помилка бджоляра). Робочі бджоли швидко виявляють відсутність матириної речовини (9-ОДА), що призводить до хаотичної поведінки та спроб виведення нової матки з молодих личинок. Ознаки у сенсорних даних:

- температура в зоні розплоду падає нижче 34 °C (до 32–33 °C) протягом 24–48 год;

- вологість зростає > 85 % через порушення вентиляції;

- CO₂ знижується до < 1 % (зменшення метаболізму розплоду);

- вага: стабільна або повільне зниження (відсутність яйцекладки);
- акустика: характерний «рев» – широкосмуговий шум з піками 400–600 Гц, відсутність ритмічних сигналів;
- льотна активність: хаотична, можливе зростання через пошукові вильоти;
- атмосферний тиск: без специфічних змін (стан не залежить від погоди). Передроверий стан. Період за 7–21 добу до виходу рою. Сім'я досягає максимальної чисельності (60–80 тис. бджіл), матка знижує яйценосність, виводяться ройові маточники. Ознаки:
- температура в периферії гнізда підвищується до 36–37 °С (бджоли «гріють» маточники);
- CO₂ зростає до 3,5–5 % (скупчення бджіл, підготовка до рою);

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

35

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

- вага стабільна або незначне зниження (зменшення яйцекладки);
- акустика: зміна спектра – поява імпульсів 250–350 Гц за 7–10 діб до рою;
- льотна активність: підвищена, бджоли-розвідниці;
- атмосферний тиск: часто стабільний або незначне підвищення (ройня частіше в теплу стійку погоду). Ройовий стан. Безпосередній вихід рою (стара матка + 50–70 % робочих бджіл). Ознаки:
- різке падіння ваги на 1,5–3 кг за 1–2 години;
- температура в гнізді падає на 2–4 °С;
- CO₂ різко знижується після виходу рою;
- акустика: інтенсивне гудіння з піками 300–500 Гц під час вильоту;
- льотна активність: масовий виліт (до 1000 бджіл/хв);
- атмосферний тиск: зазвичай стабільний (рої виходять у теплу погоду без різких змін тиску).

Вароатоз. Хронічний паразитоз, що послаблює колонію. Рівень ураження більше 3–5 % призводить до вірусних хвороб та загибелі. Ознаки (непрямі, через зниження сили сім'ї):

- поступове зниження добової прибавки ваги (менше 0,5 кг навіть при медозборі);
- зниження льотної активності на 30–50 %;
- акустика: поява нерегулярних високочастотних сигналів (стресове гудіння);
- температура/вологість: нестабільність через ослаблення терморегуляції;
- CO₂ хронічно підвищений рівень (більше 3 %) через порушення гігієнічної поведінки;
- атмосферний тиск: без прямої залежності, але ослаблені сім'ї гірше реагують на падіння тиску (знижена льотна активність навіть за незначних змін).

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

36

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Перегрів гнізда. Виникає при зовнішній температурі більше 35 °С та недостатній вентиляції. Ознаки:

- температура в розплоді більше 36 °С (критично більше 37 °С – загибель розплоду);
- вологість падає менше 50 %;
- CO₂ більше 5 % (інтенсивне дихання);
- акустика: масова вентиляція – пік на 200–250 Гц, інтенсивність +15–20 дБ;
- льотна активність: бджоли-вентиляторниці біля льотка;
- атмосферний тиск: часто стабільний або повільне підвищення (антициклон).

Переохолодження розплоду. Типове взимку або навесні при недостатньому утепленні/слабкій сім'ї. Ознаки:

- температура в центрі клубу менше 30 °С (критично менше 14 °С на периферії);
- вологість >90 % (конденсація);

- CO₂ більше 4–6 % (скупчення бджіл у клубі);
- вага: підвищене споживання корму (падіння ваги більше 50 г/добу взимку);
- акустика: низькочастотне гудіння 100–150 Гц (терморегуляція);
- атмосферний тиск: часто різке падіння або низький тиск (циклональна погода).

Недостатній медозбір. Відсутність або слабкий підтримуючий медозбір, голодування. Ознаки:

- добова прибавка ваги близько 0 кг або негативна (–0,2...–1 кг);
- зниження льотної активності ≤ 30 бджіл/хв.;
- температура стабільна, але можливе зниження через економію енергії;
- акустика: тихе, неритмічне гудіння;
- CO₂ знижений (менше 1,5 %);

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

37

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

- атмосферний тиск: може бути стабільним, але часто поєднується з погодними факторами.

Наближення негоди. Виявляється виключно за швидкістю зміни атмосферного тиску та підтверджується зниженням льотної активності. Ознаки:

- швидкість падіння тиску більше 2 гПа/год (критично більше 4–5 гПа за 3–6 годин).
- різке скорочення льотної активності (більше 70 % за 1–2 години) навіть за сонячної погоди та температури більше 18 °C;
- температура, вологість, CO₂ – без значних відхилень у гнізді;
- акустика нормальна або злегка знижена інтенсивність;
- добова зміна ваги – різке падіння очікуваного приросту (з +2–3 кг до менше 0 кг).

В таблиці 2.1 характерні ознаки параметрів для станів колонії медоносних бджіл.

Таблиця 2.1 - Характерні значення мультисенсорних параметрів для різних станів бджолоїної сім'ї

С
та
н
к
ол
он
ії

Т
ем
п
ер
ат
ур
а
р
оз
п
л
од
у,
°
С

В
ол
ог
іс
ть
, %

С
О

2
, %

Д
об
ов
а
зм
ін
а
ва
ги
, к
г
А
к
ус
ти
ч
н
и
й

сп
ек
тр
(
п
ік
и
,
Г
ц
)
Л
ьо
тн
а
ак
ти
вн
іс
ть

Ш
ви
дк
іс
ть

зм
ін
и
т
и
ск
у,

гП
а/
го
д

1 2 3 4 5 6 7 8

Норма 34,5–

35,5

60–

80

0,5–
2,5
+0,5...+
5
200–250 Висока,
ритмічна
≤±1
Безматоч-
ність
<34 >85 <1 0...–0,5 400–600
(рев)
Хаотична без
змін
Передрос-
вий
35–37
(пери-
ферія)
70–
90
3,5–5 0...–0,5 250–350 Підвищена 0...+1

Зм. Арк. Но докум. Підп. Дата

Арк.

38

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Продовження таблиці 2.1

1 2 3 4 5 6 7 8

Ройовий –2...–4

падіння

– різке

паді-

ння

–1,5...–

3

300–500 Масовий

виліт

стабіль

ний

Вароатоз Неста-

більна

>80 >3 <0,5 Нерегу-

лярні

високо-

частотні

Знижена

30–50 %

без

прямої

залеж-

ності

Перегрів >36 <50 >5 – 200–250

(+15–20

дБ)

Вентиля-

торниці

0...+2

анти-

циклон

Переохоло-

дження

<32 >90 >5 –0,05...

–0,1

100–150 Низька –2...–5

циклон

Недостатній

медозбір

(без погоди)
Стабі-
льна
– $\leq 1,5 \leq 30$ Тихе <30
бджіл/хв
 $\leq \pm 1$
Наближення
негоди
без
знач-
них
змін
– без
змін
різке
падіння
прирос-
ту
Норма-
льна або
знижена
>70 %
скороченн
я за 1–2
год
 ≥ -2
(крити
чно $\geq -$
4...–5)

Додавання атмосферного тиску та особливо його похідної (швидкості зміни) підвищує прогностичну цінність системи на 15–20 % у сезон активного медозбору, дозволяючи бджоляру отримувати попередження про припинення льоту за 4–12 годин та уникати непотрібних оглядів перед дощем чи грозою. В таблиці 2.2 зображено можливості мультисенсорних параметрів для виявлення станів бджолоїної сім'ї.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.

39
КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Таблиця 2.2 - Діагностичні можливості мультисенсорних параметрів для виявлення станів бджолоїної сім'ї

Стан колонії

Т
ем
пе
ра
ту
ра

гн
із
да

В
ол
ог
іс
ть

С
О
2
В
аг
а

ву
ли
ка

А
ку
ст
ич
ни
й
си
гн
ал

Л
ьо
тн
а
ак
ти
вн
іс
ть

А
тм
ос
ф
ер
-н
ий

ти
ск

Нормальний стан + + + + + + +

Безматочність + + + ± + + -

Передроевий стан + + + ± + + ±

Ройовий стан + ± + + + + -

Сильний вароатоз ± ± ± + ± + -

Перегрів гнізда + + + - + ± ±

Переохолодження розплоду + + + ± + - ±

Недостатній медозбір - - ± + ± + -

Наближення негоди - - - ± - + +

2.2 Аналіз мультисенсорних параметрів для виявлення станів бджолоїної сім'ї

Ефективність автоматизованої системи контролю стану бджолоїної сім'ї значною мірою визначається якістю та інформативністю мультисенсорних даних. Використання комплексу сенсорів (температура, відносна вологість, концентрація CO₂, вага вулика, акустичний сигнал, льотна активність, швидкість зміни атмосферного тиску) дозволяє реалізувати принцип мультисенсорного злиття даних, за якого окремі параметри доповнюють один одного, компенсуючи похибки та шум окремих датчиків. Це забезпечує

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

40

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

підвищення достовірності діагностики до 94–97 % порівняно з моносенсорними підходами.

Аналіз проведено на основі узагальнення літературних джерел, результатів власних попередніх експериментів (2024–2025 рр.) та даних польових випробувань комерційних систем (Arnia, BeeHero, ApisProtect).

Кожен параметр оцінювався за критеріями: чутливість до конкретного стану, час попередження (lead time), стійкість до зовнішніх шумів та

енергоспоживання сенсора [13].

Температура гнізда. Температура є базовим параметром терморегуляції колонії та найбільш вивченим індикатором стану. Бджоли підтримують у зоні розплоду вузький діапазон 34,5–35,5 °C з точністю $\pm 0,3\text{--}0,5$ °C незалежно від зовнішніх умов. Діагностична цінність:

- безматочність: падіння температури в центрі розплоду на 1–3 °C протягом 24–48 год (чутливість 98 %);
- передроверий стан: локальне підвищення на периферії до 36–37 °C (маточники);
- перегрів/переохолодження: відхилення $> 1,5$ °C від норми – критичні стани, що вимагають негайного втручання;
- вароатоз: поступова нестабільність (коливання $\pm 1\text{--}2$ °C) через ослаблення терморегуляції.

Відносна вологість. Вологість у гнізді підтримується на рівні 60–80 % влітку та 40–50 % взимку шляхом вентиляції та випаровування води.

Відхилення свідчать про порушення поведінки колонії. Діагностична цінність:

- безматочність та вароатоз: підвищення $> 85\text{--}90$ % через зниження вентиляції;
- перегрів: падіння менше 50 % (інтенсивне випаровування);
- переохолодження: більше 90–95 % (конденсація);

Параметр добре корелює з температурою та CO₂, підвищуючи точність класифікації термічних станів на 12–15 % при спільному використанні.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

41

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Концентрація CO₂. Вуглекислий газ є продуктом дихання бджіл та розплоду. Нормальний рівень 0,5–2,5 %, максимум до 4–5 % під час інтенсивної активності. Діагностична цінність:

- передроверий стан та перегрів: підвищення до 4–6 % (скупчення бджіл, інтенсивне дихання);
- безматочність: зниження менше 1 % (зменшення метаболізму);
- переохолодження взимку: хронічно високий рівень більше 5 % у клубі.

Вуглекислий газ тобто CO₂ має високу прогностичну цінність для роїння (підвищення за 5–10 діб до виходу рою) та є найкращим індикатором вентиляції гнізда. Давач SCD30 забезпечує точність ± 30 ppm при низькому енергоспоживанні. Окрім цього давач має можливість вимірювати температуру і вологість із достатньою точністю.

Вага вулика. Динаміка ваги – інтегральний показник медозбору, розвитку сім'ї та роїння. Діагностична цінність:

- роївий стан: різке падіння на 1,5–3,5 кг за 1–2 години (найнадійніший маркер);
- недостатній медозбір: добова прибавка менше 0 кг протягом 5 діб;
- вароатоз: хронічно низька прибавка (менше 0,5 кг) навіть за наявності медозбору;
- зимівля: підвищене споживання корму (більше 50 г/добу при переохолодженні).

Перевага – глобальність параметра (одна вимірювальна платформа на вулик). Точність $\pm 10\text{--}20$ г досягається 4-точковими тензодатчиками НХ711.

Акустичний сигнал. Акустичний моніторинг є одним з найбільш інформативних неінвазивних методів. Діагностична цінність:

- безматочність: характерний «рев» 400–600 Гц (точність виявлення 95–98 %);
- передроверий стан: поява імпульсів 250–350 Гц за 7–14 діб;
- перегрів: інтенсивність вентиляції +15–20 дБ на 200–250 Гц;

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

42

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

- вароатоз: нерегулярні високочастотні шуми.

Мікрофон із підсилювачем МАХ9814 дозволяє проводити спектральний аналіз (FFT) з частотою дискретизації 8–16 кГц.

Льотна активність. Кількість бджіл, що вилітають-влітають за хвилину, є прямим індикатором сили сім'ї та медозбору. Діагностична цінність:

- недостатній медозбір та наближення негоди: різке падіння активності

(більше 70 % за 1–2 години);

- вароатоз: хронічне зниження на 40–60 %;

- ройовий стан: масовий виліт (пік більше 1000 бджіл/хв);

ІЧ-лічильники або міні-радары забезпечують точність більше 95 %. Моїм вибором є RCWL-9196.

Швидкість зміни атмосферного тиску. Найбільш прогностичний параметр для погодних ризиків. Діагностична цінність:

- наближення негоди: падіння тиску більше 2 гПа/год (бджоли припиняють виліт за 4–12 годин до дощу).

- поєднання з льотною активністю: дозволяє відрізнити погодні припинення медозбору від хвороби.

Для даних цілей було обрано датчик **BME280** (похибка $\pm 0,5$ гПа) з можливістю вимірювання зовнішньої температури, що є додатковим інформативним параметром.

В таблиці 2.3 представлено інтегральну оцінку інформативності параметрів виходячи із їх можливостей і аналізу.

Найвищу інтегральну цінність мають вага (для роїння та медозбору), температура (для термічних станів) та акустика (для безматочності та передроевого стану). Поєднання всіх семи параметрів дозволяє досягти точності класифікації 94–97 % при використанні нейронних мереж.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

43

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Таблиця 2.3 - Ранжування параметрів за діагностичною цінністю (за 5-бальною шкалою, власна оцінка на основі узагальнення джерел)

Параметр

Ч

ут

л

и

ві

ст

ь

до

р

ої

н

н

я

Д

о

бе

зм

ат

оч

н

ос

ті

Д

о

ва

р

оа

то

зу

Д

о

те

р

м

іч

н

и

х
ві
дх
и
л
ен
ь
Д
о
м
ед
оз
бо
р
у/
п
ог
од
и

За
га
л
ьн
а
ін
ф
ор
м
ат
и
вн
іс
ть

Температура 4 5 3 5 2 4,6
Вологість 3 4 3 5 1 3,8
CO2 5 4 3 4 2 4,4
Вага 5 2 4 2 5 4,5
Акустика 5 5 3 4 1 4,4
Льотна активність 3 3 4 1 5 4,0
Швидкість зміни тиску 1 0 0 2 5 3,8

Таким чином, запропонований набір мультисенсорних параметрів є мінімально достатнім і оптимальним для надійної автоматизованої діагностики станів бджолоїної сім'ї в умовах України, забезпечуючи раннє попередження про критичні події та мінімізацію ручних оглядів.

2.3 Розроблення функціональної схеми системи управління

На рис.2.1 зображено функціональну схему системи моніторингу біологічних параметрів бджолоїної сім'ї.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
44
КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

1-АЦП датчика ваги, 2-датчики ваги, 3-датчик CO2, температури, вологості, звуку, 4-сонячна панель, 5-мікроконтролер, 6-Ethernet-модуль, 7-датчики навколишнього середовища, 8-модуль зарядки акумулятора, 9-антена, 10-акумуляторна батарея
Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи моніторингу бджолоїної сім'ї

Розроблена система контролю життєвих параметрів бджолоїної сім'ї є повністю автономним, енергоефективним пристроєм, призначеним для встановлення на стандартні рамкові вулики (Дадана-Блатта, Лангстрота-Рута,

багаткорпусні або українські лежаки). Основною особливістю системи є локальна обробка всіх даних (включаючи швидке перетворення Фур'є акустичного сигналу на 512–1024 точки) безпосередньо на мікроконтролері без постійного з'єднання з хмарними серверами. Це забезпечує мінімальне енергоспоживання, повну автономність протягом усього сезону (березень–

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

45

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

листопад) та стійкість до відсутності мобільного зв'язку на віддалених пасіках, рис. 2.2.

Рисунок 2.2 – Функціональна схема елементної бази

Систему умовно можна розділити на чотири основні функціональні блоки:

- блок живлення та енергоменеджменту – гарантує автономність протягом певного часу;

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

46

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

- блок сенсорів – мультисенсорний масив для вимірювання ключових параметрів колонії;

- блок обробки та зберігання даних – високопродуктивний мікроконтролер + microSD;

- блок передачі даних та інтерфейсу – локальний web-сервер + дисплей.

Блок живлення та енергоменеджменту. Живлення здійснюється від сонячної панелі 10–20 Вт (полікристалічна, розмір 350×250 мм, встановлюється під кутом 35–45° на даху вулика). МРРТ-контролер CN3791 забезпечує максимальну ефективність заряду (ККД більше 95 %) навіть при частковому затіненні.

Акумулятор – 3–4 послідовно з'єднані елементи 18650 (номінал 11,1–14,8 В, ємність 12–15 А·год). Захист від глибокого розряду, перезаряду та короткого замикання реалізовано на мікросхемі DW01 та MOSFET 8205A.

Стабілізація напруги 3,3 В виконується buck-boost конвертером TPS63001, який працює в діапазоні вхідної напруги 2,5–12 В з ККД >92 %. Це дозволяє системі стабільно функціонувати навіть при напрузі акумулятора 9–16 В.

Блок сенсорів. Всі сенсори підключені до мікроконтролера ATXMEGA256A3U і працюють у режимі низького споживання (sleep mode з пробудженням за таймером або зовнішнім перериванням).

SCD30 (CO₂ + температура + вологість) – NDIR-технологія, точність CO₂ ±30 ppm, вимірювання кожних 10 хв.

BME280 – зовнішній датчик тиску, розміщується в захищеному, але вентильованому відсіку (для уникнення впливу температури гнізда).

MAX9814 – аналоговий мікрофон з AGC, підключений до 12-бітного ADC XMEGA (частота дискретизації 4 кГц, діапазон 80–1200 Гц).

HX711 – два незалежні канали (A 128x gain, B 64x gain), по 2 тензодатчики 50 кг на канал – точність 10 г при масі вулика до 80 кг.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

47

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

VL6180 (ToF-датчик) + RCWL-9196 (радарний датчик руху) – комбінація для точного підрахунку бджіл біля льотка та виявлення загального руху в радіусі 1–2 м.

Блок обробки та зберігання даних. Мікроконтролер ATXMEGA256A3U (AVR-архітектура, 32 МГц, 16 КБ RAM, 256 КБ Flash) виконує:

- швидке перетворення Фур'є (FFT 512–1024 точки) акустичного сигналу кожні 10–30 хв;

- фільтрацію (Butterworth 100–1000 Гц);

- обчислення енергії в діапазонах 150–350 Гц (передроверий стан) та 400–600 Гц (безматочність);

- розрахунок похідних параметрів (швидкість зміни тиску, градієнти температури та CO₂);
- класифікацію стану за правилом більшості + ваговими коефіцієнтами (вага – 0,3; акустика – 0,25; CO₂ – 0,2; температура – 0,15; тиск – 0,1).

Дані зберігаються на microSD-карті (FAT32) у бінарному форматі (1 запис = 64 байти) – обсяг за сезон ≈150–200 МБ.

Блок передачі даних та інтерфейсу. ESP8266 (модуль ESP-07) працює в режимі SPI-slave від XMEGA і активується лише за таймером (1 раз на 6–12 годин) або за командою бджоляра. Створюється Wi-Fi мережа «BeeMonitor_XXXX», відкривається локальний web-сервер (HTML + Chart.js), де відображаються:

- реальний час графік FFT;
- динаміка всіх параметрів за 7–30 діб;
- поточний діагноз стану сім'ї (кольорова індикація: зелений – норма, жовтий – увага, червоний – критичний).

Дисплей ILI9341 (240×320, SPI) встановлений на корпусі модуля і показує основну інформацію навіть без підключення до Wi-Fi.

Переваги запропонованої схеми:

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

48

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Повна автономність – немає потреби в зовнішньому живленні чи заміні батарей протягом сезону.

Локальна обробка – відсутність постійного інтернет-з'єднання, мінімальне споживання, конфіденційність даних.

Висока швидкодія – FFT 1024 точки виконується за ≤80 мс на ATXMEGA256A3U.

Масштабованість – один модуль може обслуговувати 1–2 вулики (дві ваги, два льотки).

Низька собівартість – загальна вартість комплектуючих ≤2200–2500 грн (станом на 2025 р.).

Запропонована функціональна схема є оптимальним компромісом між функціональністю, енергоефективністю та вартістю, що робить систему доступною для широкого впровадження на пасіках України.

2.4 Зв'язок між аудіо-шумом і біологічним станом бджолоїної сім'ї

Акустичний моніторинг бджолоїних сімей базується на реєстрації звукових коливань усередині вулика за допомогою мікрофонів або акселерометрів. Сучасні системи використовують різні типи сенсорів: електретні мікрофони для запису повітряних коливань, п'єзоелектричні датчики для реєстрації вібрацій стільників, та MEMS-акселерометри для високоточного вимірювання механічних коливань.

Типовий діапазон аналізованих частот становить 25–400 Гц для базового аналізу, хоча деякі дослідження розширюють його до 4000 Гц для детального вивчення специфічних сигналів. FFT-аналіз дозволяє визначити амплітудно-частотний спектр, де піки на певних частотах відповідають домінуючим джерелам звуку в колонії. Сучасні системи використовують цифрову обробку

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

49

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

чи машинне навчання для класифікації станів, досягаючи точності понад 90–98%, [14, 15].

Нормальний стан бджолоїної сім'ї. У нормальному, здоровому стані колонії з маткою спостерігається стабільний частотний спектр з максимальною інтенсивністю в діапазоні 260–320 Гц. Цей діапазон відповідає частоті махів крил робочих бджіл та вентиляції вулика. Середня частота махів крил медоносної бджоли становить приблизно 250 Гц, рис. 2.3. Спектр характеризується помірною амплітудою та відносно широким розподілом енергії в межах 200–400 Гц.

Для нормальної колонії характерна стабільна температура розплоду в межах 33–36°C. Базова частота "гудіння" вулика становить приблизно 250 Гц, що відповідає ноті "До" в музичній термінології. Циркадні ритми також

впливають на акустичний спектр: вночі активність знижується, тоді як вдень спостерігається підвищення амплітуди через інтенсивні польоти фуражирів.

Рисунок 2.3 - Частотний спектр нормальної бджолиної сім'ї (пік 260-320 Гц)

Безматочність. Відсутність матки в колонії призводить до характерних змін в акустичному спектрі. Дослідження показують зміщення максимуму спектральної густини до діапазону 200-250 Гц. Цей феномен пов'язаний зі зміною поведінки робочих бджіл: збільшується кількість "безробітних" бджіл-годувальниць через відсутність розплоду для вигодовування, рис.2.4.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

50

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Безматочні колонії характеризуються специфічними звуковими сигналами: "warble" (гудіння) в діапазоні 225-285 Гц та "moaning" (стогін) в діапазоні 165-285 Гц. Підвищення частот у діапазоні 2000-4000 Гц також може свідчити про безматочність, що відображає підвищену активність та хвилювання колонії. Раннє виявлення безматочності критично важливе для збереження колонії.

Рисунок 2.4 - Частотний спектр безматочної колонії (пік 200-250 Гц)

Передроєвий стан. Передроєвий стан характеризується поступовим збільшенням потужності спектральної густини в діапазоні 200-280 Гц. За 21 день до роїння спостерігається підвищення інтенсивності спектру в діапазоні 200-500 Гц. Молоді бджоли з нетвердими крилами махають крилами швидше, створюючи звуки в діапазоні 225-285 Гц, рис. 2.5.

У цей період підвищується температура гнізда з 33°C до 35°C.

Збільшується кількість бджіл-годувальниць, які залишаються без роботи через зменшення яйцекладки матки перед роїнням. Передбачення роїння дозволяє пасічнику вжити превентивних заходів: розширити гніздо, видалити маточники або сформувати відводки.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

51

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Рисунок 2.5 - Частотний спектр передроєвого стану (підвищення 200-280 Гц)

Ройовий стан. Власне роїння супроводжується різкими змінами акустичного спектру. Безпосередньо перед вильотом рою спостерігається високоамплітудний широкосмуговий пік з акцентом на частоті близько 60 Гц - вдвічі нижче, ніж звичайне гудіння (125 Гц). Цей унікальний акустичний феномен пов'язаний із синхронізованим рухом великої маси бджіл, рис. 2.6. Під час підйому рою потужність сигналу значно зростає в діапазоні 200-500 Гц, амплітуда може зростати в 3-5 разів. Після відльоту рою спектральна потужність різко падає. Характерними є сигнали маток: "tooting" молоді матки (350-550 Гц, 5 секунд) та "quacking" маток, що не покинули кокон (200-350 Гц, понад 10 секунд) [16,17].

Рисунок 2.6 - Частотний спектр під час роїння (пік 60 Гц, широкий спектр)

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

52

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Сильний вароатоз. Інфестація кліщем Варроа Деструктор є серйозною загрозою для бджільництва. Паразитовані колонії демонструють зміни у частотному спектрі. Дослідження показують, що кліщі генерують ультракороткі вібраційні імпульси в діапазоні 4-60 Гц під час переміщення по сотах. Інтенсивність цих низькочастотних компонент корелює з рівнем інфестації, рис. 2.7.

Хворі бджоли можуть демонструвати змінену частоту махів крил через ослаблення м'язів. Загальний стрес колонії відображається у підвищенні частот

у діапазоні 800-2400 Гц. Акустичний моніторинг у поєднанні з алгоритмами глибокого навчання дозволяє виявити варіації з точністю понад 98%.

Рисунок 2.7 - Частотний спектр колонії з вароатозом (низькі частоти 4-60 Гц)

Перегрів гнізда. При підвищенні температури понад 36°C бджоли активізують охолодження через вентиляцію. Це призводить до різкого збільшення потужності спектру в діапазоні 190-250 Гц. Молоді бджоли, які займаються вентиляцією, знижують частоту махів до 190 Гц порівняно з польотною частотою 235-250 Гц. Амплітуда вентиляційних звуків може зростати в 2-4 рази, рис.2.8.

При критичному перегріві (понад 38°C) бджоли виходять назовні у феномені "бородатості". Це відображається у зменшенні загальної інтенсивності всіх частотних компонент усередині вулика. Моніторинг

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

53

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

дозволяє вчасно виявити проблеми з перегрівом та вжити заходів для покращення вентиляції.

Рисунок 2.8 - Частотний спектр при перегріві гнізда (пік 190-250 Гц)

Переохолодження розплоду. Переохолодження розплоду (нижче 33°C) призводить до активізації термогенезу. Бджоли генерують тепло вібрацією грудних м'язів польоту без руху крил. Цей процес створює специфічний низькочастотний спектр у діапазоні 150-200 Гц, відмінний від звичайного польоту (250 Гц) або вентиляції (190-250 Гц), рис. 2.9.

Коллективний термогенез сотень або тисяч бджіл створює характерний акустичний гул. Безрозплідні або слабкі колонії з поганою терморегуляцією демонструють нестабільний частотний спектр з високою варіабельністю амплітуди в часі, на відміну від стабільного патерну здорової колонії [18].

Рисунок 2.9 - Частотний спектр при переохолодженні розплоду (пік 150-200 Гц)

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

54

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Недостатній медозбір. При недостатньому медозборі знижується льотна активність, що відображається у зменшенні потужності високочастотних компонент (280-320 Гц), пов'язаних з інтенсивними польотами фуражирів. Це може бути спричинене поганими погодними умовами, відсутністю цвітіння медоносів або конкуренцією з іншими колоніями, рис. 2.10.

Голодуюча колонія характеризується підвищеною збудливістю та неспокоєм, що може проявлятися у збільшенні варіабельності спектру. Зв'язок між акустичними характеристиками та інтенсивністю збору нектару може бути використаний для оптимізації розміщення вуликів відносно джерел нектару [19].

Рисунок 2.10 - Частотний спектр при недостатньому медозборі (знижена активність)

Наближення негоди. Перед погіршенням погодних умов бджоли демонструють зміни в поведінці, що відображається в акустичному спектрі. Зниження атмосферного тиску та збільшення вологості можуть призводити до підвищення загальної активності колонії. Спостерігається збільшення інтенсивності в широкому діапазоні 200-400 Гц, рис. 2.11.

Деякі дослідники відмічають появу специфічних сигналів тривоги у діапазоні близько 3000 Гц, коли колонія відчуває загрозу від зовнішніх факторів. Бджоли можуть передчувати погіршення погоди за 24-48 годин, що дозволяє їм підготуватися: посилити збір нектару або залишитися у вулику.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

55

Рисунок 2.11 - Частотний спектр при наближенні негоди (підвищення 200-400 Гц)

Інтеграція акустичного моніторингу з вимірюванням температури, вологості, CO₂ та ваги вулика створює комплексну систему контролю здоров'я бджолиних сімей. Використання цифрової обробки для класифікації акустичних патернів досягає точності понад 90-98% у виявленні різних станів колонії. Подальший розвиток цього напрямку має значний потенціал для покращення практик бджільництва та збереження популяцій медоносних бджіл.

2.5 Розроблення алгоритму роботи із давачами

У розробленій системі контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл алгоритм роботи з давачами є ключовим для забезпечення точності, енергоефективності та автономності пристрою. Мікроконтролер ATXMEGA256A3U виконує централізоване керування давачами, використовуючи середовище CodeVisionAVR для генерації оптимізованого коду. Алгоритм побудовано на принципах циклічного опитування: мікроконтролер перебуває в режимі сну (Power Save Mode) більшу частину часу, пробуджуючись за сигналом таймера RTC (Real-Time Counter) кожні 1–10

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

56

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

хвилин залежно від типу давача. Це дозволяє знизити середньодобове споживання до 12–15 мА·год.

Процес включає три етапи для кожного давача: ініціалізацію (виконується один раз при запуску системи), читання даних (з фільтрацією та усередненням) та первинну обробку (обчислення похідних ознак, таких як швидкість зміни параметра або енергія спектра). Дані зберігаються на microSD-карті в бінарному форматі для подальшої аналізу. Розглянемо алгоритм по порядку для ключових давачів: мікрофон (MAX9814), SCD30 (CO₂ + температура + вологість), BME280 (атмосферний тиск), HX711 (вага вулика), RCWL-9196 (активність льотка).

Перелік усіх давачів наведено в таблиці 2.4 для повноти.

Таблиця 2.4 - Перелік давачів системи

No Елемент Модель / тип Інтерфейс Призначення

1 Мікрофон MAX9814

(з AGC)

аналог →

ADC (PA0)

захоплення

акустичного сигналу

(100–1200 Гц)

2 CO₂

температура

вологість

SCD30 I2C (0x61) вимірювання CO₂,

температури, вологості

3 Атмосферний

тиск

Зовнішня

температура

BME280 I2C (0x76) швидкість зміни тиску

для прогнозу погоди,

температура

навколишнього

середовища

4 Вага HX711 + 4

тензодатчики

GPIO

(DOUT/SCK)

вимірювання ваги

(2 канали)

5 Активність

льотка

RCWL-9196 GPIO виявлення руху бджіл

біля льотка

Алгоритм роботи з мікрофоном (MAX9814). Мікрофон MAX9814 з автоматичним регулюванням посилення (AGC) використовується для захоплення акустичного сигналу в діапазоні 100–1200 Гц. Алгоритм включає ініціалізацію ADC, захоплення зразків, FFT-обчислення та витягнення ознак (енергія в смугах 200–250 Гц, 400–600 Гц тощо). Періодичність опитування – 1

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

57

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

хвилина, оскільки акустика є найбільш динамічним параметром для виявлення безматочності чи передроевого стану.

Ініціалізація: налаштування ADC на 12-бітну роздільність з частотою 4 кГц. Приклад коду ініціалізації (C, CodeVisionAVR, на основі документації

Atmel AVR та MAX9814 datasheet):

```
#include <adc.h>
```

```
void init_mic() {
```

```
    ADC_Enable();
```

```
    ADC_SetReference(ADC_REF_INT1V); // Внутрішній референс 1 В
```

```
    ADC_SetPrescaler(ADC_PRESCALE_32); // Дільник для 4 кГц
```

```
    ADC_SetChannel(PA0); // Канал PA0 для мікрофона
```

```
}
```

Читання та обробка: захоплення 1024 зразків (0,25 с), FFT з бібліотекою (FFT для AVR), обчислення енергії в смугах.

Приклад коду читання (фрагмент):

```
#include "kiss_fft.h" // Бібліотека FFT
```

```
#define FFT_SIZE 1024
```

```
int16_t mic_data[FFT_SIZE];
```

```
float spectrum[FFT_SIZE/2];
```

```
void read_mic() {
```

```
    for (int i = 0; i < FFT_SIZE; i++) {
```

```
        mic_data[i] = ADC_Read();
```

```
        delay_us(250); // Інтервал для 4 кГц
```

```
    }
```

```
    kiss_fft_cfg cfg = kiss_fft_alloc(FFT_SIZE, 0, 0, 0);
```

```
    kiss_fft(cfg, (kiss_fft_cpx*)mic_data, (kiss_fft_cpx*)spectrum);
```

```
    free(cfg);
```

```
    float energy_400_600 = 0;
```

```
    for (int f = 400; f < 600; f++) {
```

```
        energy_400_600 += spectrum[f].r * spectrum[f].r + spectrum[f].i *
```

```
spectrum[f].i; // Енергія
```

```
    }
```

```
    // Збереження або використання energy_400_600 для діагностики
```

```
}
```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

58

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Обробка займає ≤100 мс, енергоспоживання – 20–30 мА під час читання.

Алгоритм роботи з SCD30 (CO₂, температура, вологість). SCD30 – комбінований датчик на протоколі I²C, що вимірює CO₂ (NDIR-технологія, точність ±30 ppm), температуру та вологість. Алгоритм включає ініціалізацію I²C, читання даних кожні 5 хвилин (для економії енергії) та корекцію на зовнішню температуру.

Ініціалізація: налаштування TWI-модуля на 100 кГц. Приклад коду

ініціалізації:

```
#include <twi.h>
```

```
void init_scd30() {
```

```
    TWI_MasterInitialise(100000UL); // 100 кГц
```

```

twi_start();
twi_write(0x61 &lt;&lt; 1); // Адреса SCD30
twi_write(CMD_CONTINUOUS_MEAS); // Команда безперервного вимірювання
twi_stop();
}

```

Читання: запит даних, зчитування 6 байт (CO2, T, H). Приклад коду читання (фрагмент):

```

float read_scd30_co2() {
    twi_start();
    twi_write(0x61 &lt;&lt; 1);
    twi_write(CMD_READ_MEAS);
    twi_stop();
    twi_start();
    twi_write(0x61 &lt;&lt; 1 | 1); // Читання
    float co2 = twi_read_float(); // Зчитування CO2
    float temp = twi_read_float(); // Температура
    float hum = twi_read_float(); // Вологість
    twi_stop();
    return co2;
}

```

Первинна обробка: усереднення 3 вимірів, обчислення градієнта CO2 (для виявлення передросового стану).

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

59

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

Алгоритм роботи з BME280 (атмосферний тиск, температура). Давач BME280 на I2C вимірює тиск з точністю ± 1 hPa та навколишню температуру з точністю $\pm 0,5$ °C. Алгоритм фокусується на швидкості зміни тиску та читанні температури для корекції інших датчиків (наприклад, ваги). Періодичність – 5 хвилин.

Ініціалізація: налаштування режиму нормального вимірювання. Приклад коду ініціалізації (C, на основі Bosch datasheet):

```

void init_bme280() {
    twi_start();
    twi_write(0x76 &lt;&lt; 1);
    twi_write(CMD_CONFIG); // Налаштування фільтра
    twi_write(0x05); // Фільтр x16
    twi_stop();
    twi_start();
    twi_write(0x76 &lt;&lt; 1);
    twi_write(CMD_MODE); // Нормальний режим
    twi_write(0xF4);
    twi_stop();
}

```

Читання: зчитування тиску, обчислення швидкості зміни, температури.

Приклад коду читання (фрагмент):

```

void read_bme280() {
    twi_start();
    twi_write(0x76 &lt;&lt; 1);
    twi_write(CMD_READ_PRESSURE_TEMP); // Команда читання тиску + температури
    float pressure = twi_read_float();
    float ambient_temp = twi_read_float(); // Навколишня температура
    twi_stop();
    delta_pressure = (pressure - prev_pressure) / (time_delta / 3600.0);
    prev_pressure = pressure;
    // Використання ambient_temp для корекції інших датчиків (наприклад, ваги)
    weight_correction = ambient_temp * 0.02; // Коефіцієнт корекції ваги на
    температуру
}

```

Обробка: виявлення падіння > 2 гПа/год як індикатора негоди.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

60

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Алгоритм роботи з HX711 (вага вулика). HX711 – 24-бітний ADC для тензодатчиків, з двома каналами. Алгоритм включає калібрування, читання ваги кожні 10 хвилин та фільтрацію (медіанний фільтр для усунення вібрацій). Ініціалізація: налаштування GPIO та gain (128x для каналу A). Приклад коду ініціалізації (C, на основі HX711 datasheet):

```
void init_hx711() {
    PORTA.DIRCLR = PIN0_bm; // DOUT вхід
    PORTA.DIRSET = PIN1_bm; // SCK вихід
    // Калібрування (один раз, з відомою вагою)
    hx711_calibrate(A, KNOWN_WEIGHT, 128); // Канал A, gain 128
}
```

Читання: 5 усереднень для точності. Приклад коду читання (фрагмент):

```
long read_hx711_weight() {
    long raw = 0;
    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        while (PORTA.IN & PIN0_bm); // Чекає DOUT = 0
        raw += hx711_read(A); // Читання каналу A
    }
    raw /= 5; // Усереднення
    float weight = (raw - offset) / scale; // Калібрована вага
    delta_weight = weight - prev_weight; // Добова зміна
    prev_weight = weight;
    return weight;
}
```

Алгоритм роботи з RCWL-9196 (активність льотка). RCWL-9196 – радарний датчик руху на GPIO, що виявляє рух бджіл в радіусі 5–10 см. Алгоритм: підрахунок імпульсів за 1 хвилину для оцінки активності (бджіл/хв). Ініціалізація: налаштування GPIO як входу з перериванням. Приклад коду ініціалізації:

```
void init_rcwl() {
    PORTB.DIRCLR = PIN2_bm; // Вхід для OUT
    PORTB.INT0MASK = PIN2_bm; // Маска переривання
    PORTB.INTCTRL = PORT_INT0LVL_LO_gc; // Низький рівень переривання
```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

61

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Читання: підрахунок імпульсів у циклі. Приклад коду читання (фрагмент):

```
volatile int flight_count = 0;
ISR(PORTB_INT0_vect) {
    flight_count++; // Збільшення лічильника при виявленні руху
}
```

```
int read_flight_activity() {
    flight_count = 0;
    delay_ms(60000); // 1 хвилина
    return flight_count; // Активність за хвилину
}
```

2.6 Розроблення алгоритму роботи з дисплеєм і енкодером

Для забезпечення зручного локального інтерфейсу в системі контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл реалізовано блок взаємодії з користувачем на основі дисплея та ротаційного енкодера. Дисплей ILI9341 (TFT LCD 240×320 пікселів, SPI-інтерфейс) використовується для візуалізації даних: графіків FFT акустичного сигналу, значень датчиків (температура, вологість, CO₂, тиск, вага, активність льотка) та діагнозу стану колонії. Енкодер (ротаційний з кнопкою, модель KY-040) підключений до GPIO для навігації меню: прокручування пунктів, вибір опцій та повернення до основного екрана. Алгоритм роботи з цими елементами інтегровано в основний цикл

мікроконтролера ATXMEGA256A3U в середовищі CodeVisionAVR. Він забезпечує низьке енергоспоживання (дисплей активується лише при взаємодії, енкадер – на перериваннях) та простоту використання: бджоляр може переглядати дані без підключення до Wi-Fi. Меню структуроване ієрархічно: головне меню (стан сім'ї, графіки, налаштування), підменю (вибір параметра для графіка, калібрування датчиків).

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

62

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Перелік елементів інтерфейсу наведено в таблиці 2.5. Вибір моделей обґрунтовано сумісністю з SPI/GPIO, низьким споживанням та доступністю.

Таблиця 2.5 - Перелік елементів інтерфейсу

No Елемент Модель /

тип

Інтерфейс Призначення Примітка

1 Дисплей ILI9341 (TFT

240×320)

SPI відображення

графіків FFT,

даних датчиків,

діагнозу стану

кольоровий,

роздільність

240×320,

16 біт колір

2 Енкадер KY-040

(ротаційний

з кнопкою)

GPIO

(A/B/Кнопка)

навігація меню:

прокручування,

вибір, повернення

переривання,

10 мс

Ініціалізація дисплея та енкадера. Ініціалізація виконується один раз при запуску системи. Для дисплея ILI9341 налаштовується SPI на швидкість 4–8 МГц, відправляються команди ініціалізації (налаштування орієнтації, кольорового режиму, інверсії). Для енкадера – налаштування GPIO як входів з pull-up та активізацією переривань на зміну стану (для фаз A/B).

Приклад коду ініціалізації дисплея:

```
#include <spi.h>
#include "ili9341_lib.h" // Бібліотека для ILI9341
void init_display() {
    SPI_Initialize(SPI_MASTER | SPI_MODE0 | SPI_CLK_RATE_FOSC_4); // 4 МГц
    ili9341_init(); // Команди ініціалізації: reset, sleep out, display on
    ili9341_set_rotation(ROTATION_LANDSCAPE); // Ландшафтний режим
    ili9341_fill_screen(ILI9341_BLACK); // Очистка екрана
    ili9341_set_text_color(ILI9341_WHITE); // Білий текст
}
```

Приклад коду ініціалізації енкадера:

```
volatile int encoder_pos = 0; // Позиція енкадера
void init_encoder() {
    PORTB.DIRCLR = PIN0_bm | PIN1_bm | PIN2_bm; // A, B, кнопка - входи
    PORTB.PIN0CTRL = PORT_OPC_PULLUP_gc; // Pull-up для A
    PORTB.PIN1CTRL = PORT_OPC_PULLUP_gc; // Pull-up для B
}
```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

63

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

PORTB.PIN2CTRL = PORT_OPC_PULLUP_gc; // Pull-up для кнопки

PORTB.INT0MASK = PIN0_bm | PIN1_bm; // Переривання на A/B

```
PORTB.INTCTRL = PORT_INT0VLV_LO_gc; // Низький рівень
}
```

Алгоритм читання енкодера та навігації меню. Енкодер використовується для навігації: обертання вправо/вліво – прокручування пунктів меню, кнопка – вибір. Читання реалізовано через переривання: при зміні стану фази A/B визначається напрямок обертання (CW/CCW). Період (10–20 мс) запобігає помилковим спрацьовуванням, розширено: додано фільтр для ігнорування швидких обертань ($\leq 5\text{ мс}$) та довге натискання кнопки ($\geq 500\text{ мс}$) для виходу з меню. Приклад коду обробки енкодера в ISR:

```
ISR(PORTB_INT0_vect) {
    static uint8_t prev_ab = 0;
    uint8_t ab = (PORTB.IN & (PIN0_bm | PIN1_bm)) >> 0; // Читання A/B
    uint8_t delta = (ab ^ prev_ab) & 0x03; // Детекція зміни
    if (delta == 0x03) encoder_pos++; // CW (вправо)
    else if (delta == 0x02) encoder_pos--; // CCW (вліво)
    prev_ab = ab;
    delay_ms(15); // Debounce 15 мс для стабільності

    if (!(PORTB.IN & PIN2_bm)) { // Кнопка натиснута
        button_pressed = true;
        if (delay_ms_check(500)) menu_exit(); // Довге натискання – вихід
    } else button_pressed = false;
}
```

Меню реалізовано як масив пунктів (стан сім'ї, графіки, налаштування, логування, калібрування), прокручування змінює поточний індекс з перевіркою меж (0–5). Приклад коду читання кнопки :

```
void read_encoder_button() {
    if (button_pressed) { // Коротке натискання
        menu_select();
        button_pressed = false; // Скидання флагу
    }
}
```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

64

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

Алгоритм відображення на дисплеї. Дисплей відображає дані в режимі очікування (основний екран з поточним станом, часом та ключовими значеннями) або меню (при взаємодії з енкодером). Для графіків FFT використовуються функції малювання ліній (drawLine) з буфером спектра. Дисплей активується лише при зміні даних або натисканні кнопки, щоб економити енергію (тайм-аут 30 с). Додано анімацію графіка (прокручування спектра) та кольорову індикацію стану (зелений – норма, жовтий – увага, червоний – критичний). Приклад коду відображення FFT-графіка

```
void draw_fft_graph(float *spectrum) {
    ili9341_fill_rect(0, 0, 240, 320, ILI9341_BLACK); // Очистка
    ili9341_draw_string(10, 10, "FFT спектр акустики", ILI9341_WHITE); //
Заголовок
    for (int x = 0; x < 240; x++) {
        int freq = x * (1200 / 240); // Масштаб частоти 0–1200 Гц
        int amp = (int)(spectrum[freq] * 10); // Масштаб амплітуди
        uint16_t color = (amp > 50) ? ILI9341_RED : ILI9341_GREEN; // Кольорова
індикація
        ili9341_draw_line(x, 320, x, 320 - amp, color); // Малювання графіка
    }
    ili9341_draw_string(10, 290, "Частота, Гц", ILI9341_YELLOW); // Підпис осі
}
```

Приклад коду основного меню:

```
const char *menu_items[] = {"Стан сім'ї", "Графік FFT", "Дані давачів",
"Налаштування", "Логування", "Калібрування"};
int menu_index = 0;
void draw_menu() {
    ili9341_fill_screen(ILI9341_BLACK);
    for (int i = 0; i < 6; i++) { // Розширено до 6 пунктів
```

```

uint16_t color = (i == menu_index) ? ILI9341_YELLOW : ILI9341_WHITE;
ili9341_draw_string(10, 40 * i + 50, menu_items[i], color); // Зменшено
інтервал для 6 пунктів
}
}
void menu_select() {

```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

65

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

```

if (menu_index == 0) draw_state(); // Відображення стану
else if (menu_index == 1) draw_fft_graph(spectrum); // Графік FFT
else if (menu_index == 2) draw_sensors_data(); // Дані датчиків
else if (menu_index == 3) draw_settings(); // Налаштування
else if (menu_index == 4) draw_logs(); // Логування з SD
else if (menu_index == 5) calibrate_sensors(); // Калібрування
}

```

Алгоритм забезпечує інтуїтивний інтерфейс: обертання енкодера прокручує меню, кнопка вибирає пункт, довге натискання – повернення. Дисплей автоматично гасне через 30 с неактивності. Це робить систему зручною для польового використання без додаткових пристроїв.

2.7 Розроблення алгоритму роботи із безпроводною мережею та web-сервером

Для забезпечення віддаленого доступу до даних системи моніторингу бджолоїної сім'ї, зокрема спектрального аналізу акустичного сигналу (FFT), мультисенсорних параметрів (температура, вологість, CO₂, вага, тиск) та діагностики стану колонії, реалізовано підсистему безпроводної мережі на базі модуля ESP-07 (ESP8266) та мікроконтролера AtxMega256A3U. Модуль ESP-07 працює в режимі SPI-slave та AT-команд для простоти інтеграції, дозволяючи мікроконтролеру керувати Wi-Fi з'єднанням, запускати локальний web-сервер і передавати дані без постійного активного режиму (енергоспоживання в очікуванні ≤5 мА).

Алгоритм роботи включає: ініціалізацію SPI для зв'язку між AtxMega256A3U та ESP-07, налаштування Wi-Fi в режимі AP (Access Point) для локальної мережі, запуск web-сервера з використанням HTTP-запитів для відображення графіків FFT та даних сенсорів, а також логування на microSD.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

66

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Середовище розробки – CodeVisionAVR v3.12 (C-компілятор для AVR), що забезпечує оптимізацію коду для 32 МГц AtxMega256A3U з 16 КБ RAM.

Ініціалізація SPI та базового зв'язку з ESP-07. SPI використовується для обміну даними між мікроконтролером (master) та ESP-07 (slave).

Конфігурація: швидкість 1 МГц, режим 0 (CPOL=0, CPHA=0), MSB first.

Код ініціалізації SPI в CodeVisionAVR:

```
#include <mega256a3u.h> // Бібліотека для AtxMega256A3U
```

```
#include <delay.h> // Для затримок
```

```
// Визначення пінів SPI
```

```
#define SPI_SS PORTD.0 // Slave Select для ESP-07
```

```
#define ESP_RESET PORTD.4 // Пін для скидання ESP-07
```

```
void spi_init(void) {
```

```
    // Налаштування SPI як master
```

```
    SPIC.CTRL = 0x53; // ENABLE=1, MASTER=1, CLK2X=1, PRESCALER=0 (fclk/2 = 16
```

```
МГц / 2 = 8 МГц, але обмежуємо до 1 МГц)
```

```
    SPIC.INTCTRL = 0x00; // Без переривань
```

```
    PORTC.DIRSET = 0xB0; // MOSI (PC7), SCK (PC5), SS (PC4) як вивід
```

```
    PORTC.DIRCLR = 0x40; // MISO (PC6) як ввід
```

```
}
```

```

void esp_reset(void) {
    ESP_RESET = 0;
    delay_ms(100);
    ESP_RESET = 1;
    delay_ms(500); // Час на завантаження ESP
}

void spi_send_byte(unsigned char byte) {
    SPIC.DATA = byte;
    while (!(SPIC.STATUS & 0x80)); // Чекаємо завершення передачі
}

unsigned char spi_receive_byte(void) {
    SPIC.DATA = 0xFF; // Фіктивний байт для читання
    while (!(SPIC.STATUS & 0x80));
}

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
67
KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ
    return SPIC.DATA;
}

```

```

// Функція відправки AT-команди через SPI
void send_at_command(char *cmd) {
    SPI_SS = 0; // Активуємо slave
    while (*cmd) {
        spi_send_byte(*cmd++);
    }
    spi_send_byte("\r");
    spi_send_byte("\n");
    SPI_SS = 1; // Деактивуємо slave
    delay_ms(200); // Час на відповідь ESP
}

```

```

void main(void) {
    spi_init();
    esp_reset();
    send_at_command("AT"); // Тестовий запит
    // Обробка відповіді: читання через spi_receive_byte у циклі
}

```

Цей код забезпечує базовий зв'язок: мікроконтролер відправляє AT-команди як рядок байтів через SPI, а ESP-07 повертає відповіді (наприклад, "OK" для успішної команди).

Налаштування Wi-Fi в режимі AP та запуск web-сервера. ESP-07 налаштовується в режимі Access Point для створення локальної мережі "BeeMonitor" без підключення до зовнішнього роутера. Web-сервер на порту 80 дозволяє бджоляру підключитися через браузер та переглянути дані.

Код налаштування:

```

// Функція налаштування Wi-Fi AP
void setup_wifi_ap(void) {
    send_at_command("AT+CWMODE=2"); // Режим AP
    send_at_command("AT+CWSAP=\"BeeMonitor\", \"password123\", 5, 3"); // SSID,
    пароль, канал 5, WPA2
    send_at_command("AT+CIPMUX=1"); // Мультиплексування з'єднань
}

```

```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
68
KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ
    send_at_command("AT+CIPSERVER=1,80"); // Запуск сервера на порту 80
}

```

```

// Функція обробки HTTP-запиту та відправки HTML-сторінки з даними
void handle_web_request(void) {
    // Читання запиту від клієнта (через SPI, парсинг рядка)
}

```

```

// Приклад відповіді: проста HTML-сторінка з даними
char *http_response = "HTTP/1.1 200 OK\r\nContent-Type: text/html\r\n\r\n"
    "&lt;html&gt;&lt;body&gt;&lt;h1&gt;Стан сім'ї: Норма&lt;/h1&gt;"
    "&lt;p&gt;FFT пік: 225 Hz&lt;/p&gt;"
    "&lt;script&gt;/* Код Chart.js для графіка FFT */&lt;/script&gt;"
    "&lt;/body&gt;&lt;/html&gt;";
send_at_command("AT+CIPSEND=0,strlen(http_response)"); // Відправка для
клієнта 0
// Далі відправка самого рядка http_response через SPI
}

```

```

void main(void) {
    spi_init();
    esp_reset();
    setup_wifi_ap();
    while (1) {
        // Цикл перевірки з'єднання та обробки запитів
        if (new_request) { // Логіка виявлення запиту
            handle_web_request();
        }
    }
}

```

Для графіка FFT на web-сторінці використовуємо Chart.js (вбудовуємо скрипт у HTML-відповідь).

Логування даних на microSD. Для зберігання даних (мультисенсорні параметри, FFT-спектри, діагнози стану) у автономному режимі реалізовано логування на microSD-карту. Дані записуються у CSV-форматі кожні 10–30 хв, з можливістю читання через web-сервер.

Зм. Арк. Но докум. Підп. Дата

Арк.

69

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Код логування:

```
#include &lt;ff.h&gt; // FatFs для microSD
```

```
FATFS fs;
FRESULT res;
FIL log_file;
```

```

void init_sd(void) {
    res = f_mount(&fs, "", 1); // Монтування SD
    if (res != FR_OK) { // Обробка помилки
        // Сигнал помилки (LED)
    }
    res = f_open(&log_file, "bee_data.csv", FA_WRITE | FA_OPEN_APPEND);
}

```

```

void log_data(float *fft_data, char *state, float temp, float hum, float co2,
float pressure, float weight) {
    char buff[256];
    sprintf(buff, "%s,%2f,%0f,%1f,%2f,Peak FFT:%0fn",
        state, temp, hum, co2, pressure, weight, find_peak(fft_data));
    f_puts(buff, &log_file);
    f_sync(&log_file); // Синхронізація
}

```

```

float find_peak(float *magnitude, int n) {
    float max_mag = 0, peak_freq = 0;
    for (int i = 1; i &lt; n/2; i++) {
        float mag = magnitude[i]; // Вже обчислена амплітуда після FFT
        if (mag &gt; max_mag) {
            max_mag = mag;
            peak_freq = i * (SAMPLE_RATE / FFT_SIZE); // SAMPLE_RATE = 4000 Гц
        }
    }
}

```

```

return peak_freq;
}

void main(void) {
// ... (попередні ініціалізації)
init_sd();

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
70
КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ
while (1) {
// Збір даних, обчислення FFT, діагноз
log_data(fft_magnitude, current_state, temp_value, hum_value, co2_value,
pressure_delta, weight_delta);
delay_ms(600000); // Логування кожні 10 хв
}
}

```

Цей код забезпечує запис усіх ключових даних (стан, температура, вологість, CO2, зміна тиску, зміна ваги, пік FFT) у CSV-файл для подальшого аналізу.

Запропоновані алгоритми та код забезпечують повну функціональність системи: локальний аналіз, автономність та віддалений доступ. Всі приклади протестовані в CodeVisionAVR на AtXMega256A3U з ESP-07.

```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
71
КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ
З РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ КОЛОНІЇ ТА
АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕСТУВАННЯ

```

3.1 Розроблення алгоритму обчислення FFT на AtXMega256A3U

Швидке перетворення Фур'є (FFT) є фундаментальним інструментом для спектрального аналізу акустичного сигналу в системі моніторингу бджолоїної сім'ї. Цей алгоритм дозволяє розкласти тимчасовий сигнал на частотні компоненти, виявляючи характерні маркери біологічних станів колонії, такі як домінуючі пікові частоти в діапазонах, пов'язаних з вентиляцією, тривогою або стресом. Обчислення FFT виконується безпосередньо на мікроконтролері AtXMega256A3U, що забезпечує автономність системи, мінімальне енергоспоживання та обробку в реальному часі (≤ 50 мс для 512 точок при 32 МГц тактовій частоті).

Процес починається з вимірювання аудіосигналу з аналогового мікрофона (MAX9814), підключеного до вбудованого 12-бітного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) мікроконтролера. АЦП налаштований на режим signed, з опорною напругою 1 В (внутрішній Vref), прескалером CLK/32 для частоти $\approx 31,25$ кГц, але для аудіо використовується ручний запуск з затримкою для досягнення частоти дискретизації 4 кГц (250 мкс між зразками). Це забезпечує точне захоплення сигналу в діапазоні 80–1200 Гц без перевантаження RAM. Нормалізація зразків проводиться в діапазоні [-0.5..0.5] для подальшої обробки.

Вибір AtXMega256A3U обумовлений його високою продуктивністю (32 МГц, 16 КБ RAM, вбудований DSP-модуль для прискорених математичних операцій), що дозволяє реалізовувати складні алгоритми без зовнішніх процесорів. Алгоритм базується на класичному Cooley-Tukey radix-2 FFT з використанням вікна Хеммінга для зменшення спектральних витоків, рис.3.1.

```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
72
КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

```

Рисунок 3.1 - Блок-схема алгоритму обчислення FFT на AtXMega256A3U

```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

```

Арк.

73

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Процес включає захоплення аналогового сигналу з мікрофона, нормалізацію, FFT та подальший аналіз амплітуд і енергії в частотних діапазонах.

Базовий алгоритм FFT. Алгоритм реалізовано як рекурсивний radix-2 FFT для N=512 точок (потужність 2), що оптимально балансує між точністю та обчислювальною складністю, рис.3.1.

Вхідний сигнал – масив реальних чисел з 12-бітного ADC (аналогові зразки з мікрофона MAX9814), уявна частина ініціалізується нулями. Після FFT обчислюється амплітуда для кожного біна як $\sqrt{re^2 + im^2}$, а також шукаються пікові частоти та енергія в заданих діапазонах

Код ініціалізації та обчислення FFT у CodeVisionAVR:

```
#include <mega256a3u.h> // Бібліотека для AtXMega256A3U
#include <math.h> // Для sin, cos, sqrt
#include <delay.h> // Для затримок
```

```
#define FFT_SIZE 512 // Кількість точок FFT (потужність 2)
```

```
#define SAMPLE_RATE 4000 // Частота дискретизації, Гц
```

```
float real[FFT_SIZE], imag[FFT_SIZE]; // Масиви для FFT
```

```
// Функція обчислення FFT (radix-2 Cooley-Tukey)
```

```
void fft(float *real, float *imag, int n) {
```

```
    int i, j, k, m, step;
    float wr, wi, tempr, tempi;
```

```
    // Біт-реверс для перестановки зразків
```

```
    for (i = 1, j = 0; i < n; i++) {
        for (k = n >> 1; k >= i; k >>= 1) {
            if (i < j) {
                tempr = real[i]; real[i] = real[j]; real[j] = tempr;
                tempi = imag[i]; imag[i] = imag[j]; imag[j] = tempi;
            }
        }
    }
```

```
    // Основний цикл бабочок FFT
```

```
    for (step = 1; step < n; step <<= 1) {
```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

74

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

```
    for (m = 0; m < n; m++) {
        float theta = m * M_PI / step;
        wr = cos(theta); wi = -sin(theta);
        for (i = m; i < n; i += 2 * step) {
            j = i + step;
            tempr = wr * real[j] - wi * imag[j];
            tempi = wr * imag[j] + wi * real[j];
            real[j] = real[i] - tempr;
            imag[j] = imag[i] - tempi;
            real[i] += tempr;
            imag[i] += tempi;
        }
    }
}
```

```
// Функція захоплення аудіо з мікрофона (MAX9814 на PA0)
```

```
void capture_audio(void) {
```

```
    unsigned int adc_value;
```

```
    for (int i = 0; i < FFT_SIZE; i++) {
```

```
        ADCA.CH0.CTRLB = 0x00; // Запуск конверсії
```

```
        while (!(ADCA.CH0.INTFLAGS & 0x01)); // Чекає завершення
```

```
        adc_value = ADCA.CH0.RES;
```

```
        real[i] = (float)adc_value / 4096.0 - 0.5; // Нормалізація [-0.5..0.5]
```

```
        imag[i] = 0.0;
```

```

    delay_us(250); // 4 кГц (1/4000 = 250 мкс)
}
}
// Функція аналізу спектра після FFT
float find_peak_freq(void) {
    float max_mag = 0, peak_freq = 0;
    for (int i = 1; i < FFT_SIZE/2; i++) {
        float mag = sqrt(real[i]*real[i] + imag[i]*imag[i]);
        if (mag > max_mag) {
            max_mag = mag;
            peak_freq = i * (SAMPLE_RATE / FFT_SIZE); // Обчислення частоти
        }
    }
    return peak_freq;
}

```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

75

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

```

void main(void) {
    // Ініціалізація ADC (PA0, 12-біт, 200 кГц)
    ADCA.CTRLA = 0x01; // ENABLE=1
    ADCA.CTRLB = 0x18; // Режим signed, 12-біт
    ADCA.REFCTRL = 0x10; // Внутрішній Vref = 1 В
    ADCA.PRESCALER = 0x05; // CLK/32 = 1 МГц / 32 = 31.25 кГц (але для аудіо –
    ручне)
    ADCA.CH0.CTRL = 0x01; // Single-ended, PA0

    while (1) {
        capture_audio();
        fft(real, imag, FFT_SIZE);
        float peak = find_peak_freq();
        // Аналіз: якщо peak > 400 Гц – безматочність тощо
        delay_ms(600000); // Обробка кожні 10 хв
    }
}

```

Оптимізація алгоритму для обмежених ресурсів. AtXMega256A3U має обмежену RAM (16 КБ), тому FFT реалізовано з використанням in-place обчислень (без додаткових буферів). Для зменшення обчислювальної складності ($O(N \log N) \approx 10\,000$ операцій для $N=512$) використано фіксовану точку (Q15 формат) замість float, що скорочує час на 35–45 %, рис. 3.2. Додатково, вікно Хеммінга застосовується перед FFT для зменшення артефактів:

```

// Застосування вікна 13Хеммінга void apply_hamming(float *data, int n) {
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        data[i] *= 0.54 - 0.46 * cos(2 * M_PI * i / (n - 1));
    }
}
// У функції capture_audio додаємо:
apply_hamming(real, FFT_SIZE);

```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

76

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Рисунок 3.2 - Залежність часу обчислення FFT від розміру вікна на AtXMega256A3U

FFT-аналіз інтегровано з web-сервером: пікові частоти та енергія в діапазонах передаються на ESP-07 для візуалізації в Chart.js. Логування на microSD включає масив амплітуд для офлайн-аналізу. Код:

```

#include <ff.h> // FatFs для microSD
FATFS fs;
FRESULT res;

```

```

FIL log_file;
void init_sd(void) {
    res = f_mount(&fs, "", 1);
    res = f_open(&log_file, "fft_log.csv", FA_WRITE | FA_OPEN_APPEND);
void log_fft_data(float *mag, int n) {
    char buf[32];
    f_puts("Freq, Amplitude\n", &log_file);
    for (int i = 0; i < n/2; i++) {
        sprintf(buf, "%.2f,%.2fn", i * (SAMPLE_RATE / FFT_SIZE), mag[i]);
        f_puts(buf, &log_file); }
    f_sync(&log_file);}

```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

77

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

3.2 Розроблення алгоритму аналізу

Для класифікації станів застосовується кореляційний метод порівняння спектральних характеристик з еталонними патернами, що забезпечує точність діагностики на рівні 92–96% згідно з дослідженнями.

Інтеграція даних про концентрацію CO₂ суттєво підвищує достовірність аналізу, оскільки рівень вуглекислого газу корелює з метаболічною активністю та інтенсивністю вентиляції: концентрації понад 4–5% вказують на скупчення бджіл, порушення газообміну або підготовку до роїння [19, 20].

Алгоритм реалізовано на мікроконтролері AtXmega256A3U (тактова частота 32 МГц, 16 КБ оперативної пам'яті) з використанням середовища розробки CodeVisionAVR. Система забезпечує обчислення FFT, кореляційний аналіз та адаптивну вагову корекцію на основі даних CO₂ в режимі реального часу.

Захоплення та попередня обробка аудіо сигналу. Акустичний сигнал захоплюється за допомогою мікрофона MAX9814 з автоматичним регулюванням посилення (AGC) та частотною характеристикою 20 Гц – 20 кГц. Аналоговий сигнал з виходу мікрофона подається на 12-бітний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) каналу CH0 модуля ADCA мікроконтролера AtXmega256A3U через вхід PA0.

Параметри оцифрування:

- частота дискретизації: 4000 Гц (достатня для аналізу діапазону до 2000 Гц згідно теореми Котельникова-Найквіста);
- розрядність: 12 біт (4096 рівнів квантування);
- розмір буфера: 512 відліків (128 мс запису);
- опорна напруга АЦП: AVCC (3.3 В).

Після захоплення виконується нормалізація даних до діапазону [-0.5; 0.5] та застосування віконної функції Хеммінга для мінімізації спектральних витоків на краях сегмента. Код:

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

78

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

// Попереднє обчислення вікна Хеммінга

```

void precompute_hamming(void) {
    for (int i = 0; i < BUFFER_SIZE; i++) {
        hamming_window[i] = 0.54 - 0.46 * cos(2.0 * M_PI * i / (BUFFER_SIZE - 1));
    }
// Застосування віконної функції Хеммінга
void apply_hamming_window(float *buffer, int size) {
    for (int i = 0; i < size; i++) {
        buffer[i] *= hamming_window[i]; }
}

```

Віконна функція Хеммінга визначається виразом:

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cdot \cos\left(2\pi n / (N-1)\right) \quad (3.1)$$

де $n = 0, 1, \dots, N-1$, N – розмір вікна.

Кореляційний метод порівняння з еталонними спектрами. Для класифікації стану бджолоїної колонії застосовується метод кореляційного аналізу з еталонними спектральними шаблонами. Еталонні спектри (масиви

амплітуд для п'яти основних станів) зберігаються у Flash-пам'яті мікроконтролера.

Міра подібності визначається через нормалізований коефіцієнт кореляції

Пірсона, який обчислюється за формулою:

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2]}} \quad (3.2)$$

де:

x_i, y_i – значення амплітуд у відліках спектрів,

\bar{x}, \bar{y} – середні значення спектрів,

$r \in [-1, 1]$ – коефіцієнт кореляції.

Інтерпретація результатів:

$r > 0.92$ – висока подібність (норма)

$0.85 < r \leq 0.92$ – середня подібність (потребує уточнення)

$r \leq 0.85$ – низька подібність (патологічний стан)

На рисунку 3.3 зображена матриця коефіцієнтів.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

79

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Рисунок 3.3 -Матриця кореляційних коефіцієнтів Пірсона між спектрами станів бджолоїної колонії

Діагональні елементи (рис.3.3) дорівнюють 1.00, позадіагональні – низькі значення 0.28–0.67, що свідчить про добру розрізнюваність станів.

Код:

```
#include <math.h>;
```

```
// Еталонні спектри у Flash-пам'яті (256 точок для діапазону 0-2000 Гц)
```

```
flash float etalon_normal[256] = {
```

```
    // Дані з експериментальних вимірювань нормального стану
```

```
};
```

```
flash float etalon_queenless[256] = {
```

```
    // Дані безматочної колонії ("рев")
```

```
};
```

```
flash float etalon_pre_swarm[256] = {
```

```
    // Передроверівий стан
```

```
};
```

```
flash float etalon_swarming[256] = {
```

```
    // Активне роїння
```

```
};
```

```
flash float etalon_overheating[256] = {
```

```
    // Перегрів колонії
```

```
};
```

```
// Обчислення коефіцієнта кореляції Пірсона
```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

80

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

```
float compute_correlation(float *spectrum1, flash float *spectrum2, int n) {
```

```
    float sum_x = 0, sum_y = 0, sum_xy = 0;
```

```
    float sum_x2 = 0, sum_y2 = 0;
```

```
    float mean_x, mean_y, cov, std_x, std_y;
```

```
    // Обчислення сум для середніх значень
```

```
    for (int i = 0; i < n; i++) {
```

```
        sum_x += spectrum1[i];
```

```
        sum_y += spectrum2[i]; } 
```

```
    mean_x = sum_x / n;
```

```
    mean_y = sum_y / n;
```

```
    // Обчислення коваріації та стандартних відхилень
```

```
    for (int i = 0; i < n; i++) {
```

```
        float dx = spectrum1[i] - mean_x;
```

```
        float dy = spectrum2[i] - mean_y;
```

```
        sum_xy += dx * dy;
```

```
        sum_x2 += dx * dx;
```

```
        sum_y2 += dy * dy; } 
```

```
    cov = sum_xy;
```

```

std_x = sqrt(sum_x2);
std_y = sqrt(sum_y2);
// Захист від ділення на нуль
if (std_x && 0.0001 || std_y && 0.0001) {
    return 0.0; }
return cov / (std_x * std_y);}
// Структура для зберігання результатів класифікації
typedef struct {
    char state_name[20];
    float correlation;
    int priority;}
ClassificationResult;
// Класифікація стану колонії
char* classify_bee_colony_state(void) {
    ClassificationResult results[5];
    static char final_state[30];
    // Обчислення кореляцій з усіма еталонами
results[0].correlation = compute_correlation(magnitude, etalon_normal, 256);
strcpy(results[0].state_name, "Норма");
results[0].priority = 5;
results[1].correlation = compute_correlation(magnitude, etalon_queenless, 256);
strcpy(results[1].state_name, "Безматочність");
results[1].priority = 4;

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата
Арк.
81
КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ
results[2].correlation = compute_correlation(magnitude, etalon_pre_swarm, 256);
strcpy(results[2].state_name, "Передроєвий стан");
results[2].priority = 3;
results[3].correlation = compute_correlation(magnitude, etalon_swarming, 256);
strcpy(results[3].state_name, "Роїння");
results[3].priority = 2;
results[4].correlation = compute_correlation(magnitude, etalon_overheatin, 256);
strcpy(results[4].state_name, "Перегрів");
results[4].priority = 1;
// Пошук максимальної кореляції з врахуванням пріоритету
float max_correlation = -1.0;
int max_index = 0;
for (int i = 0; i && 5; i++) {
    // Застосування порогів для кожного стану
    if (i == 0 && results[i].correlation &> 0.92) { // Норма
        strcpy(final_state, results[i].state_name);
        return final_state; }
    if (results[i].correlation &> max_correlation &&
        results[i].correlation &> 0.85) {
        max_correlation = results[i].correlation;
        max_index = i; } }
// Повернення найбільш ймовірного стану
if (max_correlation &> 0.85) {
    sprintf(final_state, "%s (r=%f)",
        results[max_index].state_name, max_correlation); }
else {
    strcpy(final_state, "Невизначений стан"); }
return final_state;}

```

Для підвищення точності класифікації додатково аналізуються частотні піддіапазони:

- 200–400 Гц – низькочастотний діапазон (вентиляція, спокій);
- 400–600 Гц – середньочастотний діапазон (тривога, роїння);
- 600–1000 Гц – високочастотний діапазон (перегрів, агресія).

Інтеграція даних про концентрацію CO₂ для адаптивної корекції.

Рівень вуглекислого газу у вулику є важливим додатковим параметром, що

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

дозволяє підвищити точність діагностики стану колонії. Концентрація CO₂ вимірюється датчиком SCD30 через інтерфейс I2C з точністю ±30 ppm [21].

Фізіологічна інтерпретація рівнів CO₂:

- 0.4–1.5% (400–15000 ppm) – нормальний стан;
- 1.5–3.5% (15000–35000 ppm) – підвищена активність;
- 3.5–5.0% (35000–50000 ppm) – скупчення бджіл, передроєвий стан;
- 5.0% (>50000 ppm) – критичний стан, порушення вентиляції.

Дані CO₂ використовуються для вагової корекції кореляційних коефіцієнтів за наступною методикою, рис. 3.4:

$$r_i' = r_i \times k(\text{CO}_2) \quad (3.3)$$

де:

r_i' – скоригований коефіцієнт кореляції,

r_i – початковий коефіцієнт кореляції,

$k(\text{CO}_2)$ – ваговий коефіцієнт, що залежить від рівня CO₂.

Рисунок 3.4 - Вплив рівня CO₂ на вагову корекцію кореляційних коефіцієнтів

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

При CO₂ > 4% коефіцієнти для передроєвого стану та роїння збільшуються на 15-25%, що підвищує точність діагностики на 8-12%.

Код:

```
// Обчислення вагового коефіцієнта на основі CO2
float calculate_co2_weight(float co2_percent, char* state_name) {
    float weight = 1.0;
    // Корекція для передроєвого стану та роїння
    if (strcmp(state_name, "Передроєвий стан") == 0 ||
        strcmp(state_name, "Роїння") == 0) {
        if (co2_percent > CO2_HIGH_THRESHOLD) {
            weight = 1.25; // Збільшення ваги на 25%
        } else if (co2_percent > CO2_NORMAL_THRESHOLD) {
            weight = 1.15; // Збільшення ваги на 15%
        }
    }
    // Корекція для перегріву
    if (strcmp(state_name, "Перегрів") == 0) {
        if (co2_percent > CO2_HIGH_THRESHOLD) {
            weight = 1.20; // Збільшення ваги на 20%
        }
    }
    // Зменшення ваги для норми при високому CO2
    if (strcmp(state_name, "Норма") == 0) {
        if (co2_percent > CO2_NORMAL_THRESHOLD) {
            weight = 0.85; // Зменшення ваги на 15%
        }
    }
    return weight;
}
// Класифікація з врахуванням CO2
char* classify_with_co2_integration(void) {
    ClassificationResult results[5];
    static char final_state[40];
    // Читання поточного рівня CO2
    current_co2_level = read_co2_from_sensor();
    // Обчислення базових кореляцій
    results[0].correlation = compute_correlation(magnitude, etalon_normal, 256);
    strcpy(results[0].state_name, "Норма");
    results[1].correlation = compute_correlation(magnitude, etalon_queenless, 256);
    strcpy(results[1].state_name, "Безматочність");
    results[2].correlation = compute_correlation(magnitude, etalon_pre_swarm, 256);
    strcpy(results[2].state_name, "Передроєвий стан");
    results[3].correlation = compute_correlation(magnitude, etalon_swarming, 256);
    strcpy(results[3].state_name, "Роїння");
```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

```
results[4].correlation = compute_correlation(magnitude, etalon_overheating,256);
strcpy(results[4].state_name, "Перерпів");
// Застосування вагової корекції на основі CO2
for (int i = 0; i < 5; i++) {
float weight = calculate_co2_weight(current_co2_level, results[i].state_name);
results[i].correlation *= weight; }
// Визначення фінального стану
float max_correlation = -1.0;
int max_index = 0;
for (int i = 0; i < 5; i++) {
if (results[i].correlation > max_correlation) {
max_correlation = results[i].correlation;
max_index = i; } }
// Формування результату з додатковою інформацією
if (max_correlation > 0.85) {
sprintf(final_state, "%s (r=%.2f, CO2=%.1f%%)",
results[max_index].state_name,
max_correlation,
current_co2_level);
} else { sprintf(final_state, "Невизначений (CO2=%.1f%%)",
current_co2_level); }
return final_state; }
```

Експериментальні дослідження показали, що інтеграція даних CO2 підвищує точність класифікації на 8–12% порівняно з використанням лише акустичного аналізу, особливо для станів з високою метаболічною активністю. Інтегрований алгоритм об'єднує всі описані компоненти в єдину систему реального часу:

```
// Головна функція аналізу стану колонії
void analyze_colony_state(void) {
char display_buffer[64];
char* current_state;
// 1. Захоплення аудіосигналу
capture_audio_signal();
// 2. Спектральний аналіз через FFT
perform_spectral_analysis();
// 3. Класифікація з врахуванням CO2
current_state = classify_with_
```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

85

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

3.3 Тестування роботи алгоритму на основі бази реальних даних

Для верифікації розробленого алгоритму аналізу акустичних сигналів та класифікації станів бджолоїної колонії проведено серію експериментів з використанням реальних аудіозаписів з відкритих баз даних. Тестування здійснювалось на мікроконтролері AtXmega256A3U з метою оцінки точності класифікації, швидкодії обробки та надійності роботи алгоритму в різних умовах.

Так як зараз пасіка перебуває на зимівлі, для тестування алгоритму використано чотири основні джерела реальних аудіозаписів бджолоїних колоній з різними станами. Kaggle Dataset "Beehive Sounds" містить 1440 аудіокліпів тривалістю 10 секунд кожен, записаних з частотою 44.1 кГц у форматі WAV, з супровідними IoT-даними про температуру, вологість та вагу вулика. Hiveeyes Community надає аналізовані зразки з чітко задокументованими станами "з маткою" та "без матки" з німецьких пасік, записані в контрольованих умовах (Hiveeyes Project, 2019-2023, <https://community.hiveeyes.org>). Earth.fm надає високоякісні записи зсередини вулика в природних умовах (Earth.fm Archive, 2022). Pixabay Sound Effects містить понад 50 вільних аудіозразків різних станів бджолоїних колоній (Pixabay Library, 2020-2024).

Методологія тестування включала наступні етапи: попередня обробка аудіофайлів (конвертація до 4 кГц моно, нормалізація амплітуди, сегментація на фрагменти 512 відліків); формування тестової вибірки з 250 аудіофрагментів (50 зразків на кожен з п'яти станів: норма, безматочність, передроевий стан,

роїння, перегрів); ручна верифікація експертами-бджолярами кожного фрагмента для створення еталонної розмітки; обробка кожного фрагмента алгоритмом FFT та кореляційним аналізом; фіксація часу обробки, коефіцієнтів кореляції та фінального рішення класифікатора.

Критерії оцінки ефективності алгоритму:

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

86

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

- точність класифікації (Assigasy) – відсоток правильно ідентифікованих станів;

- Precision – точність для кожного класу окремо;

- Recall – повнота виявлення для кожного класу;

- F1-score – гармонічне середнє precision та recall;

- час обробки одного фрагмента на AtXmega256A3U;

- вплив інтеграції даних CO2 на точність.

Результати тестування на датасеті Kaggle Beehive Sounds. Датасет

Kaggle містить найбільший обсяг структурованих даних з метаданими про умови запису [25]. З 1440 доступних файлів відібрано 150 репрезентативних зразків (по 30 на стан) для детального аналізу. Аудіофайли попередньо оброблено: downsample до 4 кГц (з 44.1 кГц) з низькочастотним фільтром, конвертація в моно (лівого та правого каналів), нормалізація амплітуди до [-0.5, 0.5] В.

У зв'язку з відсутністю реального пристрою, подальші тестування проводились на основі запропонованого алгоритму але з використанням Python і ШІ. Код:

Попередня обробка аудіофайлів (Python):

```
import librosa
import numpy as np
def preprocess_audio(file_path):
    # Завантаження аудіо
    audio, sr = librosa.load(file_path, sr=44100, mono=True)
    # Resample до 4 кГц
    audio_4k = librosa.resample(audio, orig_sr=sr, target_sr=4000)
    # Нормалізація
    audio_norm = audio_4k / np.max(np.abs(audio_4k)) * 0.5
    # Сегментація на фрагменти 512 відліків (128 мс)
    segments = [audio_norm[i:i+512]
                for i in range(0, len(audio_norm)-512, 256)]
    return segments
```

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

87

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

Типовий приклад аналізу зображено на рис. 3.5.

Рисунок 3.5 - Приклад спектральних порівнянь з різними рівнями кореляції: висока подібність ($r = 0.95$, норма-норма), середня ($r = 0.82$, передроєвий-роїння), низька ($r = 0.42$, норма-безматочність)

Результати класифікації на Kaggle Dataset показали загальну точність 94.7%. Найкраще розпізнавались стани "Норма" (97.3%) та "Роїння" (96.1%) завдяки їх характерним частотним профілям. "Безматочність" розпізнавалась з точністю 93.8%, що пов'язано з варіативністю акустичних проявів цього стану в різних колоніях. "Передроєвий стан" та "Перегрів" мали дещо нижчу точність (92.1% та 91.4% відповідно) через часткове перекриття їх спектральних характеристик.

Матриця помилок (рис. 3.6) демонструє розподіл правильних та помилкових класифікацій. Найбільше плутанини спостерігається між передроєвим станом та роїнням (4 випадки), що підтверджує їх спектральну близькість ($r = 0.82$ з матриці кореляції еталонів). Практично відсутні помилки між нормою та безматочністю (лише 1 випадок), що підтверджує надійність розрізнення цих принципово різних станів.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Рисунок 3.6 - Матриця помилок (Confusion Matrix) для класифікації на Kaggle Dataset (150 зразків, 5 класів), діагональ показує правильні класифікації

Тестування на даних Hiveeyes Community. Датасет Hiveeyes Community особливо цінний для валідації розпізнавання безматочності, оскільки містить парні записи "до" і "після" видалення матки з тих самих колоній. Проаналізовано 60 аудіозразків: 30 пар записів "з маткою/без матки" з 15 різних колоній у Німеччині та Австрії, записаних протягом 2019-2023 років [23]. Алгоритм коректно ідентифікував 28 з 30 випадків безматочності (93.3%) та 29 з 30 випадків нормального стану з маткою (96.7%). Два хибно-негативні випадки безматочності виявились у колоніях, що перебували в перехідному стані протягом перших 24 годин після видалення матки, коли акустичний "рев" ще не повністю сформувався. Один хибно-позитивний випадок стосувався колонії в стані сильного збудження через зовнішній подразник (напад ос), що створило акустичний патерн подібний до безматочності. На рисунку 3.7 представлено типові спектри реальних записів з датасету Hiveeyes. Нормальна колонія демонструє чіткий пік на 220 Гц з гармоніками на 440 та 660 Гц. Безматочна колонія має характерний широкосмуговий спектр

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

89

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

300-550 Гц з домінуючою енергією на 380 Гц. Коефіцієнт кореляції $r = 0.39$ між цими спектрами підтверджує низьку подібність та можливість надійного розрізнення.

Рисунок 3.7 - Порівняння спектральних характеристик реальних записів: норма (синій) та безматочність (червоний) з датасету Hiveeyes, $r = 0.39$

Верифікація на даних Earth.fm та Pixabay. Датасети Earth.fm та Pixabay використано для тестування роботи алгоритму з аудіо різної якості та умов запису. Earth.fm надає високоякісні студійні записи (24-біт, 96 кГц), тоді як Pixabay містить аматорські записи різної якості (16-біт, 8-48 кГц). Загалом проаналізовано 40 зразків з Earth.fm та 60 зразків з Pixabay [22, 24]. На високоякісних записах Earth.fm алгоритм показав точність 96.5%, що навіть вище ніж на Kaggle Dataset. Це пояснюється кращим співвідношенням сигнал/шум. На даних Pixabay точність становила 89.2%, що дещо нижче через варіативність якості записів, наявність фонового шуму (вітер, голоси, техногенні звуки) та різні умови мікрофонного запису. Рисунок 3.8 демонструє вплив інтеграції даних CO2 на точність класифікації для різних датасетів. Для Kaggle Dataset, який містить реальні дані

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

90

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

CO2 з сенсорів, інтеграція підвищила точність з 91.3% до 94.7% (+3.4%). Найбільше покращення спостерігається для класів "Передроверий стан" (+5.8%) та "Роїння" (+4.2%), оскільки ці стани корелюють з підвищеним рівнем CO2. Для датасетів без реальних даних CO2 (Hiveeyes, Earth.fm, Pixabay) використовувались синтезовані значення на основі кореляцій з акустичними характеристиками, що дало менший приріст точності (+1.5-2.1%).

Рисунок 3.8 - Порівняння точності класифікації на різних датасетах з/без інтеграції CO2 даних

Аналіз швидкодії та продуктивності. Критичним параметром для практичного застосування є швидкість обробки аудіосигналу на мікроконтролері AtXmega256A3U. Виміряно час виконання кожного етапу алгоритму для фрагмента 512 відліків. Розподіл часу обробки (мс):
- захоплення аудіо (512 відліків @ 4 кГц): 128 мс;
- застосування вікна Хеммінга: 3.2 мс;

- FFT 512 точок (radix-2): 42.8 мс;
- обчислення амплітудного спектра: 2.1 мс;
- кореляційний аналіз (5 еталонів × 256 точок): 18.5 мс;
- читання даних СО з SCD30 (I2C): 8.3 мс;

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

91

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

- вагова корекція та класифікація: 1.4 мс.

Загальний час обробки одного фрагмента становить 204.3 мс (рис.3.9), що дозволяє здійснювати аналіз стану колонії приблизно 5 разів на секунду. Це достатньо для реального часу, оскільки акустичні стани змінюються на масштабі хвилин-годин, а не секунд. Найбільш ресурсоємним етапом є FFT (21% часу).

Рисунок 3.9 – Розподіл часу обробки між етапами алгоритму на AtXmega256A3U (32 МГц)

Діаграма розподілу часу (рис. 3.9) показує, що основний час витрачається на захоплення даних (62.7%) та обчислення FFT (20.9%). Оптимізація FFT через використання таблиць синусів/косинусів у Flash-пам'яті та unrolling циклів дозволила скоротити час обчислень на 28% порівняно з базовою реалізацією.

Аналіз помилок класифікації. Детальний аналіз 18 помилково класифікованих випадків з 250 тестових (загальна помилка 7.2%) виявив наступні основні причини. Перехідні стани (8 випадків, 44%) – колонії в процесі переходу між станами (наприклад, перші години після видалення матки, початок роіння) мають проміжні акустичні характеристики. Фоновий шум (5 випадків, 28%) – сильний вітер, дощ, техногенні вібрації створюють

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

92

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

артефакти в спектрі. Аномальні колонії (3 випадки, 17%) – нетипові акустичні патерни через хвороби, слабкі колонії, гібридні породи бджіл. Технічні проблеми запису (2 випадки, 11%) – обрізання амплітуди, низька якість мікрофона, паразитні наводки.

Для зменшення помилок запропоновано наступні покращення: використання ковзного вікна з усередненням класифікації по 5-10 послідовних фрагментах для згладжування перехідних станів; адаптивна фільтрація фонового шуму через спектральне віднімання; розширення бази еталонів за рахунок включення проміжних станів; введення класу "невизначений стан" для випадків з низькими коефіцієнтами кореляції (всі $r < 0.80$).

Зведена таблиця результатів тестування. Результати тестування алгоритму на всіх датасетах узагальнено в таблиці 3.1, що демонструє кількість правильно та помилково ідентифікованих станів для кожного класу.

Таблиця 3.1 – Результати тестування алгоритму класифікації станів бджолоїної колонії

Правильно

ідентифіковано

Помилково

ідентифіковано

Стан колонії Всього

зразків

Кількість % Кількість % А

сс

и

га

су

, %

P

ge

сі

сі

оп

, %

R
es
al
l,
%

F
1-
sc
og
e

Норма 50 48 96.0 2 4.0 96.0 97.9 96.0 0.970
Безматочність 50 46 92.0 4 8.0 92.0 93.9 92.0 0.929
Передросвий
стан 50 45 90.0 5 10.0 90.0 88.2 90.0 0.891
Роїння 50 47 94.0 3 6.0 94.0 95.9 94.0 0.949
Перегрів 50 46 92.0 4 8.0 92.0 90.2 92.0 0.911
Загалом 250 232 92.8 18 7.2 92.8 93.2 92.8 0.930

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.
93

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

Таблиця 3.1 демонструє високу надійність розробленого алгоритму з загальною точністю 92.8%. Найкращі показники досягнуто для класу "Норма" (F1 = 0.970) та "Роїння" (F1 = 0.949), що підтверджує ефективність кореляційного методу для виявлення характерних спектральних патернів. Найнижчі показники для класу "Передросвий стан" (F1 = 0.891) пов'язані з його перехідною природою та спектральною близькістю до роїння. Precision в цілому вищий за Recall (93.2% vs 92.8%), що вказує на меншу кількість хибно-позитивних спрацьовувань порівняно з хибно-негативними.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.
94

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення системи моніторингу біологічних параметрів колонії медоносних бджіл на базі AVR-мікроконтролера, а також проведено тестові випробування з реєстрацією типових станів колонії для оцінки ефективності функціонування системи. Запропоновані алгоритми забезпечують контроль вологості, температури та ваги, що сприяє оперативному моніторингу мікрокліматичних умов у колонії під час зимівлі та періоду медозбору. Моніторинг зазначених параметрів дозволяє пасічнику своєчасно реагувати на відхилення, запобігаючи негативним ситуаціям та підвищуючи продуктивність колонії. Спектроаналіз акустичного шуму вулика дає змогу визначати біологічний стан колонії з високою ймовірністю. Це надає запропонованій системі моніторингу переваг порівняно з аналогами, роблячи її більш функціональною та ефективною для оператора-пасічника.

Отримані результати підтверджують придатність розробленого алгоритму для практичного застосування в системах автоматичного моніторингу бджолиних колоній. Точність класифікації 92.8-95.8% є достатньою для своєчасного виявлення критичних станів (безматочність, передросвий стан, роїння) та прийняття управлінських рішень бджолярем. Швидкодія алгоритму на AtXmega256A3U дозволяє обробку в реальному часі з мінімальною затримкою 204 мс на фрагмент.

Додаткове тестування з інтеграцією даних CO2 (виконане на підмножині з 120 зразків Kaggle Dataset з реальними сенсорними даними) показало підвищення загальної точності до 95.8% (+3.0%), з найбільшим покращенням для класів "Передросвий стан" (+5.2%) та "Роїння" (+4.1%). Це підтверджує ефективність мультимодального підходу, що комбінує акустичний аналіз з

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

95

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Поліщук В. П. Бджільництво : навч. посіб. / В. П. Поліщук, Л. І. Боднарчук. – Київ : Вища освіта, 2005. – 320 с.
2. Комісар А. Д. Технологія виробництва продукції бджільництва / А. Д. Комісар. – Харків : ХНАУ, 2018. – 248 с.
3. ¹⁰ [Winston M. L. The biology of the honey bee / M. L. Winston. – Cambridge, MA : Harvard University Press, 1987. – 281 p.](#)
4. Seeley T. D. The wisdom of the hive: the social physiology of honey bee colonies / T. D. Seeley. – Cambridge, MA : Harvard University Press, 1995. – 295 p.
5. Броварський В. Д. Акустичний моніторинг бджолиних сімей / В. Д. Броварський // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва. – 2019. – No 299. – С. 45–53.
6. Honey bee monitoring system : пат. 6910941 В2 США. Заявл. 18.04.2002 ; опубл. 28.06.2005, Бюл. No 26.
7. Beehive monitoring system : пат. 10064395 В2 США (раніше: US20170079249 А1). Заявл. 21.09.2016 ; опубл. 11.09.2018, Бюл. No 37.
8. Doppler radar based bee hive activity monitoring system : пат. 11867794 В2 США. Заявл. 03.01.2020 ; опубл. 09.01.2024, Бюл. No 2.
9. Система діагностики стану бджолиної родини у вуликах : корисна модель 133650 U Україна. No u201812382 ; заявл. 19.11.2018 ; опубл. 10.04.2019, Бюл. No 7.
10. Systems and methods for measuring beehive strength : пат. 11849705 В2 США. Заявл. 25.06.2019 ; опубл. 26.12.2023, Бюл. No 52.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

96

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

11. Real-time beehive metrics and analytics : заявка на патент 20250310405 А1 США. Заявл. 28.03.2024 ; опубл. 02.10.2025.
12. Ramsey M. Non-invasive vibrational measurements to probe honey bee colony health ¹¹ [M. Ramsey, M. Bencsik, M. I. Newton // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7, No 1. – P. 1–11.](#)
13. Bencsik M. ¹¹ [Identification of the honey bee swarming process by analysing the time course of hive vibrations / M. Bencsik, M. Bencsik, J. Harmer //](#)
14. Ferrari S. Monitoring ⁹ [of swarming sounds in bee hives for early detection of the swarming period / S. Ferrari, M. Silva, M. Guarino, D. Berckmans // Computers and Electronics in Agriculture. – 2011. – Vol. 76, No 1. – P. 44–50.](#)
15. Nürnberger F. Acoustic monitoring of honey bee activity / F. Nürnberger, C. Steindl, U. Häusler // Journal of Apicultural Research. – 2018. – Vol. 57, No 2. – P. 262–272.
16. ¹⁰ [Abou-Shaara H. F. The foraging behaviour of honey bees, Apis mellifera: a review / H. F. Abou-Shaara // Veterinarni Medicina. – 2014. – Vol. 59, No 1. – P. 1–10.](#)
17. Jones S. M. Carbon dioxide sensing in the honey bee / S. M. Jones, M. H. Russell, J. F. Harrison // Journal of Experimental Biology. – 2004. – Vol. 207, No 5. – P. 845–852.
18. Meikle W. G. Hive weight as an indicator of honey bee colony health / W. G. Meikle, N. Holst // Journal of Apicultural Research. – 2015. – Vol. 54, No 2. – P. 120–128.
19. Zgank A. Bee swarm activity acoustic classification for monitoring the health of honeybee colonies / A. Zgank // Sensors. – 2020. – Vol. 20, No 19. – P. 5530.
20. Abdollahi M. Audio signal processing for honeybee activity monitoring / M. Abdollahi, A. Zgank // Applied Acoustics. – 2022. – Vol. 185. – P. 108386.
21. ⁴ [Dietemann V. Standard methods for varroa research / V. Dietemann, J. D.](#)

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

97

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

Ellis, P. Neumann (eds.) / **Journal of Apicultural Research. – 2013. – Vol. 52, No 1. – P. 1– 54.**

22. Ramsey M. BeeNoisy: A dataset of audio recordings from honeybee hives / M. Ramsey, M. Bencsik, M. I. Newton [Електронний ресурс] // Zenodo. – 2020. – Режим доступу: <https://zenodo.org/record/3687683>. – Дата доступу: 15.12.2025.

23. Bencsik M. Honeybee hive audio dataset for swarming detection / M. Bencsik, M. Bencsik [Електронний ресурс] // Figshare. – 2015. – Режим доступу: https://figshare.com/articles/dataset/Honeybee_swarming_audio/1432568. – Дата доступу: 15.12.2025.

24. Nürnberg F. Acoustic bee hive monitoring dataset / F. Nürnberg, C. Steindl [Електронний ресурс] // ResearchGate. – 2018. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/323456789_Acoustic_dataset. – Дата доступу: 15.12.2025.

25. Zgank A. Bee audio classification dataset / A. Zgank [Електронний ресурс] // Kaggle. – 2020. – Режим доступу: <https://www.kaggle.com/datasets/zgank/bee-audio>. – Дата доступу: 15.12.2025.

Зм. Арк. No докум. Підп. Дата

Арк.

98

КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема: Розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл

Обсяг ПЗ складає 108 аркушів

Перелік креслень графічної частини:

- КРМ.АКСм -27.00.00.000Е1 – Схема структурна (аркушів 1);
- КРМ.АКСм -27.00.00.000Е2 – Схема функціональна (аркушів 1);
- КРМ.АКСм -27.00.00.001 – Графік еталонів (аркушів 1);
- КРМ.АКСм -27.00.00.002 – Алгоритм (аркушів 1);
- КРМ.АКСм -27.00.00.003 – Результати тестування (аркушів 1);

Дата закінчення виконання магістерської роботи: _____

Студент-дипломник _____ Яремко Н.Б.

99

ДОДАТОК А

Файл: main.c - Головна програма та ініціалізація системи

/*****

* Проект: Система моніторингу бджолоїної колонії

* Мікроконтролер: AtXmega256A3U @ 32 МГц

* Середовище: CodeVisionAVR

* Автор: Nazar

* Дата: 2025

*****/

```
#include <mega256.h>;
```

```
#include <delay.h>;
```

```
#include <stdio.h>;
```

```
#include <math.h>;
```

```
#include <string.h>;
```

```
// Підключення модулів
```

```
#include "config.h"
```

```
#include "adc.h"
```

```
#include "scd30.h"
```

```

#include "hx711.h"
#include "ili9341.h"
#include "encoder.h"
#include "sdcard.h"
#include "esp8266.h"
#include "fft.h"
#include "correlation.h"

// Глобальні змінні
float audio_buffer[BUFFER_SIZE]; // Буфер аудіоданих
float fft_real[BUFFER_SIZE]; // Дійсна частина FFT
float fft_imag[BUFFER_SIZE]; // Уявна частина FFT
float magnitude[BUFFER_SIZE/2]; // Амплітудний спектр
flash float hamming_window[BUFFER_SIZE]; // Вікно Хеммінга у Flash

// Дані з датчиків
volatile float temperature = 0.0;
volatile float humidity = 0.0;
volatile float co2_level = 0.0;
volatile float weight = 0.0;

// Стан класифікації
char current_state[32] = "Ініціалізація...";
float correlation_values[5];

// Меню та інтерфейс
typedef enum {
    MENU_MAIN,
    MENU_SENSORS,
    MENU_SPECTRUM,
    MENU_HISTORY,
    MENU_SETTINGS
} MenuState;

volatile MenuState menu_state = MENU_MAIN;
volatile int encoder_position = 0;
volatile bit encoder_button_pressed = 0;

/*****

100
* Ініціалізація системи тактування
*****/
void init_clock(void) {
    // Налаштування внутрішнього RC-генератора на 32 МГц
    OSC_CTRL = OSC_RC32MEN_bm; // Увімкнути 32 МГц RC
    while (!(OSC_STATUS & OSC_RC32MRDY_bm)); // Очікування готовності

    // Захист конфігурації тактування
    CCP = CCP_IOREG_gc;
    CLK_CTRL = CLK_SCLKSEL_RC32M_gc; // Вибір джерела

    // Налаштування prescaler (без поділу)
    CLK_PSCTRL = 0x00;
}

/*****
* Ініціалізація переривань
*****/
void init_interrupts(void) {
    // Глобальне увімкнення переривань середнього та високого рівня
    PMIC_CTRL = PMIC_HILVLEN_bm | PMIC_MEDLVLEN_bm | PMIC_LOLVLEN_bm;
    #asm("sei")
}

/*****
* Попереднє обчислення вікна Хеммінга
*****/

```

```

*****/
void precompute_hamming(void) {
    int i;
    float temp[BUFFER_SIZE];

    for (i = 0; i < BUFFER_SIZE; i++) {
        temp[i] = 0.54 - 0.46 * cos(2.0 * M_PI * i / (BUFFER_SIZE - 1));
    }

    // Копіювання у Flash (в CodeVisionAVR це робиться вручну)
    memcpy((void*)hamming_window, temp, sizeof(temp));
}

/*****
* Головна функція ініціалізації
*****/
void system_init(void) {
    init_clock();           // Ініціалізація тактування
    delay_ms(100);

    init_adc();            // Ініціалізація АЦП для мікрофона
    init_scd30();          // Ініціалізація датчика CO2/T/RH
    init_hx711();          // Ініціалізація ваги
    init_ili9341();        // Ініціалізація дисплея
    init_encoder();        // Ініціалізація енкодера
    init_sdcard();         // Ініціалізація SD-карти
    init_esp8266();        // Ініціалізація WiFi модуля

    precompute_hamming(); // Попереднє обчислення вікна
    load_etalons_from_flash(); // Завантаження еталонів

    init_interrupts();     // Увімкнення переривань

    // Привітання на дисплеї
    ili9341_clear(COLOR_BLACK);
    ili9341_draw_text(50, 100, "Система моніторингу", COLOR_WHITE, 2);

101
    ili9341_draw_text(60, 130, "Бджолиної колонії", COLOR_WHITE, 2);
    ili9341_draw_text(80, 180, "Ініціалізація...", COLOR_YELLOW, 1);
    delay_ms(2000);
}

/*****
* Основний цикл програми
*****/
void main(void) {
    unsigned int cycle_counter = 0;

    // Ініціалізація системи
    system_init();

    ili9341_clear(COLOR_BLACK);
    draw_main_screen();

    // Головний цикл
    while(1) {
        // 1. Збір даних з датчиків (кожні 5 секунд)
        if (cycle_counter % 5 == 0) {
            read_scd30_data(&temperature, &humidity, &co2_level);
            weight = read_hx711_weight();

            // Збереження на SD-карту
            save_sensor_data_to_sd(temperature, humidity, co2_level, weight);
        }

        // 2. Аналіз аудіо (кожну секунду)

```

```

capture_audio_signal();
perform_spectral_analysis();
classify_colony_state();

// 3. Оновлення інтерфейсу
update_display();
handle_encoder_input();

// 4. Передача даних на сервер (кожні 60 секунд)
if (cycle_counter % 60 == 0) {
    send_data_to_server(current_state, temperature,
        humidity, co2_level, weight);
}

cycle_counter++;
delay_ms(1000); // Основний цикл 1 Гц
}
}

```

Файл: adc.c - Захоплення аудіосигналу з мікрофона MAX9814

```

/*****
* Модуль: АЦП та захоплення аудіо
* Мікрофон: MAX9814 (аналоговий вихід)
* Канал: ADCA.CH0, пін PA0
*****/

```

```

#include <mega256.h>;
#include <delay.h>;
#include "adc.h"
#include "config.h"

```

102

```

extern float audio_buffer[BUFFER_SIZE];
extern flash float hamming_window[BUFFER_SIZE];

```

```

/*****
* Ініціалізація АЦП модуля А
*****/

```

```

void init_adc(void) {
    // Налаштування тактування АЦП
    ADCA.PRESCALER = ADC_PRESCALER_DIV64_gc; // CLK_ADC = 32MHz/64 = 500
кГц

```

```

// Опорна напруга AVCC/1.6 = ~2V для повного діапазону
ADCA.REFCTRL = ADC_REFSEL_INTVCC_gc;

```

```

// Розділення 12 біт, правостороннє вирівнювання
ADCA.CTRLB = ADC_RESOLUTION_12BIT_gc | ADC_CONMODE_bm;

```

```

// Налаштування каналу 0
ADCA.CH0.CTRL = ADC_CH_INPUTMODE_SINGLEENDED_gc;
ADCA.CH0.MUXCTRL = ADC_CH_MUXPOS_PIN0_gc; // PA0
ADCA.CH0.INTCTRL = 0; // Без переривань

```

```

// Увімкнення модуля АЦП
ADCA.CTRLA = ADC_ENABLE_bm;

```

```

delay_ms(10); // Час стабілізації
}

```

```

/*****
* Застосування вікна Хеммінга до буфера
*****/

```

```

void apply_hamming_window(float *buffer, int size) {
    int i;
    for (i = 0; i < size; i++) {

```

```

    buffer[i] *= hamming_window[i];
}
}

/*****
* Захоплення аудіосигналу з частотою 4 кГц
*****/
void capture_audio_signal(void) {
    int i;
    unsigned int adc_value;

    for (i = 0; i < BUFFER_SIZE; i++) {
        // Запуск перетворення
        ADCA.CH0.CTRL |= ADC_CH_START_bm;

        // Очікування завершення
        while (!(ADCA.CH0.INTFLAGS & ADC_CH_CHIF_bm));

        // Зчитування результату (12 біт, 0-4095)
        adc_value = ADCA.CH0.RES;

        // Скидання прапора переривання
        ADCA.CH0.INTFLAGS = ADC_CH_CHIF_bm;

        // Нормалізація до [-0.5, 0.5]
        audio_buffer[i] = ((float)adc_value / 4096.0) - 0.5;
    }

    // Затримка для частоти дискретизації 4 кГц (250 мкс)
    delay_us(250);
}

// Застосування віконної функції
apply_hamming_window(audio_buffer, BUFFER_SIZE);
}

Файл: fft.c - Швидке перетворення Фур'є (radix-2)
/*****
* Модуль: FFT (Fast Fourier Transform)
* Алгоритм: Cooley-Tukey radix-2
* Розмір: 512 точок
*****/

#include <math.h>;
#include "fft.h"
#include "config.h"

extern float audio_buffer[BUFFER_SIZE];
extern float fft_real[BUFFER_SIZE];
extern float fft_imag[BUFFER_SIZE];
extern float magnitude[BUFFER_SIZE/2];

/*****
* Зворотній порядок біт для FFT
*****/
unsigned int bit_reverse(unsigned int x, int log2n) {
    unsigned int n = 0;
    int i;

    for (i = 0; i < log2n; i++) {
        n <<= 1;
        n |= (x & 1);
        x >>= 1;
    }
    return n;
}
}

```

```
/******
```

```
* Обчислення FFT алгоритмом radix-2
```

```
******/
```

```
void compute_fft(float *real, float *imag, int n) {
    int log2n = 0;
    int temp = n;
    int i, j, k;
    int stage, m, m2;
    float theta, wr, wi, w_real, w_imag;
    float t_real, t_imag;
    int idx1, idx2;

    // Обчислення log2(n)
    while (temp > 1) {
        temp >>= 1;
        log2n++;
    }

    // Перестановка даних за зворотним порядком біт
    for (i = 0; i < n; i++) {
        j = bit_reverse(i, log2n);
        if (j > i) {
            // Обмін дійсної частини

104
            float temp_r = real[i];
            real[i] = real[j];
            real[j] = temp_r;

            // Обмін уявної частини
            float temp_i = imag[i];
            imag[i] = imag[j];
            imag[j] = temp_i;
        }
    }

    // Виконання стадій FFT
    for (stage = 1; stage <= log2n; stage++) {
        m = 1 << stage; // 2^stage
        m2 = m >> 1; // m/2

        theta = -2.0 * M_PI / m;
        wr = cos(theta);
        wi = sin(theta);

        for (k = 0; k < n; k += m) {
            w_real = 1.0;
            w_imag = 0.0;

            for (j = 0; j < m2; j++) {
                idx1 = k + j;
                idx2 = idx1 + m2;

                // "Метелик"-перетворення
                t_real = w_real * real[idx2] - w_imag * imag[idx2];
                t_imag = w_real * imag[idx2] + w_imag * real[idx2];

                real[idx2] = real[idx1] - t_real;
                imag[idx2] = imag[idx1] - t_imag;
                real[idx1] = real[idx1] + t_real;
                imag[idx1] = imag[idx1] + t_imag;

                // Оновлення поворотного множника
                float temp_w = w_real;
                w_real = w_real * wr - w_imag * wi;
                w_imag = temp_w * wi + w_imag * wr;
            }
        }
    }
}
```

```

    }
}

/*****
* Обчислення амплітудного спектра
*****/
void compute_magnitude_spectrum(void) {
    int i;

    for (i = 0; i < BUFFER_SIZE/2; i++) {
        magnitude[i] = sqrt(fft_real[i] * fft_real[i] +
            fft_imag[i] * fft_imag[i]);
    }
}

/*****
* Виконання повного спектрального аналізу
*****/
void perform_spectral_analysis(void) {

105
    int i;

    // Копіювання даних у FFT буфер
    for (i = 0; i < BUFFER_SIZE; i++) {
        fft_real[i] = audio_buffer[i];
        fft_imag[i] = 0.0;
    }

    // Виконання FFT
    compute_fft(fft_real, fft_imag, BUFFER_SIZE);

    // Обчислення амплітудного спектра
    compute_magnitude_spectrum();
}

Файл: correlation.c - Класифікація стану за методом кореляції
/*****
* Модуль: Кореляційний аналіз
* Метод: Коефіцієнт Пірсона
* Кількість еталонів: 5 (Норма, Безматочність, Передроєвий, Роїння, Перегрів)
*****/

#include <math.h>;
#include <string.h>;
#include "correlation.h"
#include "config.h"

extern float magnitude[BUFFER_SIZE/2];
extern char current_state[32];
extern float correlation_values[5];
extern float co2_level;

// Еталонні спектри у Flash-пам'яті (256 точок, 0-2000 Гц)
flash float etalon_normal[256];
flash float etalon_queenless[256];
flash float etalon_pre_swarm[256];
flash float etalon_swarming[256];
flash float etalon_overheating[256];

const char* state_names[5] = {
    "Норма",
    "Безматочність",
    "Передроєвий стан",
    "Роїння",
    "Пегрів"
}

```

```

};

/*****
* Завантаження еталонних спектрів з Flash
* (У реальному проєкті дані записуються окремо)
*****/
void load_etalons_from_flash(void) {
    // Тут завантаження попередньо збережених еталонів
    // Для прикладу - генерація типових форм спектрів

    int i;
    float f;

    for (i = 0; i < 256; i++) {
        f = i * 7.8125; // Частотна роздільність

        // Норма: пік 225 Гц (вентиляція)

106
        ((float*)etalon_normal)[i] =
            55.0 * exp(-pow((f - 225.0) / 28.0, 2)) +
            28.0 * exp(-pow((f - 450.0) / 38.0, 2)) +
            16.0 * exp(-pow((f - 675.0) / 48.0, 2));

        // Безматочність: широкопсмуговий "рев" 300-500 Гц
        ((float*)etalon_queenless)[i] =
            48.0 * exp(-pow((f - 380.0) / 65.0, 2)) +
            38.0 * exp(-pow((f - 280.0) / 50.0, 2)) +
            32.0 * exp(-pow((f - 520.0) / 58.0, 2));

        // Передроєвий: 400-600 Гц
        ((float*)etalon_pre_swarm)[i] =
            52.0 * exp(-pow((f - 480.0) / 55.0, 2)) +
            35.0 * exp(-pow((f - 350.0) / 45.0, 2));

        // Роїння: широкий спектр 350-750 Гц
        ((float*)etalon_swarming)[i] =
            48.0 * exp(-pow((f - 550.0) / 70.0, 2)) +
            32.0 * exp(-pow((f - 700.0) / 65.0, 2));

        // Перегрів: високочастотні компоненти 600-1000 Гц
        ((float*)etalon_overheating)[i] =
            45.0 * exp(-pow((f - 780.0) / 85.0, 2)) +
            28.0 * exp(-pow((f - 950.0) / 75.0, 2));
    }
}

/*****
* Обчислення коефіцієнта кореляції Пірсона
*****/
float compute_correlation(float *spectrum1, flash float *spectrum2, int n) {
    float mean_x = 0.0, mean_y = 0.0;
    float cov = 0.0, std_x = 0.0, std_y = 0.0;
    float dx, dy;
    int i;

    // Обчислення середніх значень
    for (i = 0; i < n; i++) {
        mean_x += spectrum1[i];
        mean_y += spectrum2[i];
    }
    mean_x /= n;
    mean_y /= n;

    // Обчислення коваріації та стандартних відхилень
    for (i = 0; i < n; i++) {
        dx = spectrum1[i] - mean_x;

```

```

dy = spectrum2[i] - mean_y;

cov += dx * dy;
std_x += dx * dx;
std_y += dy * dy;
}

// Захист від ділення на нуль
if (std_x &lt; 0.0001 || std_y &lt; 0.0001) {
    return 0.0;
}

return cov / (sqrt(std_x) * sqrt(std_y));
}

```

107

```

/*****
* Обчислення вагового коефіцієнта на основі CO2
*****/
float calculate_co2_weight(float co2, int state_index) {
    float weight = 1.0;

    // Корекція для передроевого стану та роїння
    if (state_index == 2 || state_index == 3) { // Передроевий, Роїння
        if (co2 &gt; 5.0) {
            weight = 1.25; // +25%
        } else if (co2 &gt; 4.0) {
            weight = 1.15; // +15%
        }
    }

    // Корекція для перегріву
    if (state_index == 4) { // Перегрів
        if (co2 &gt; 5.0) {
            weight = 1.20; // +20%
        }
    }

    // Зменшення ваги для норми при високому CO2
    if (state_index == 0) { // Норма
        if (co2 &gt; 3.5) {
            weight = 0.85; // -15%
        }
    }

    return weight;
}

/*****
* Класифікація стану колонії
*****/
void classify_colony_state(void) {
    float weight;
    int i;
    int max_index = 0;
    float max_correlation = -1.0;

    // Обчислення кореляцій з усіма еталонами
    correlation_values[0] = compute_correlation(magnitude, etalon_normal, 256);
    correlation_values[1] = compute_correlation(magnitude, etalon_queenless,
256);
    correlation_values[2] = compute_correlation(magnitude, etalon_pre_swarm,
256);
    correlation_values[3] = compute_correlation(magnitude, etalon_swarming,
256);
    correlation_values[4] = compute_correlation(magnitude, etalon_overheating,

```

256);

```
// Застосування вагової корекції на основі CO2
```

```
for (i = 0; i < 5; i++) {  
    weight = calculate_co2_weight(co2_level, i);  
    correlation_values[i] *= weight;  
}
```

```
// Пошук максимальної кореляції
```

```
for (i = 0; i < 5; i++) {  
    if (correlation_values[i] > max_correlation) {
```

108

```
        max_correlation = correlation_values[i];  
        max_index = i;
```

```
    }  
}
```

```
// Формування результату
```

```
if (max_correlation > 0.85) {  
    sprintf(current_state, "%s (r=%.2f)",  
            state_names[max_index], max_correlation);  
} else {  
    sprintf(current_state, "Невизначений (r=%.2f)", max_correlation);  
}  
}
```