

**Міністерство освіти і науки України**  
**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**  
**Факультет інформаційних технологій**  
**Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем**

**Яремко Назарій Богданович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 638.12:681.518:004.4

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

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

(назва роботи)

**Комп'ютеризовані системи управління та автоматика**

(назва освітньої програми)

**174-Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка**

(шифр і назва спеціальності)

**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., доцент**  
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

**Допущено до захисту**  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **Заміховський Л.М.**  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ – 2025**





## 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 бджолоїної колонії, мікроконтролерної платформи, сенсорів та периферійних пристроїв. Значну увагу приділено методам цифрової обробки сигналів, зокрема застосуванню швидкого перетворення Фур'є для аналізу акустичних характеристик бджолоїної 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 бджолоїної 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 бджолоїної 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 бджолоїної 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

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ .....	с. 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 AtXМega256A3U .....	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

					<b>КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ</b>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл	Лім.	Арк.	Аркуші
Розроб.		Яремко						
Перев.		Левицький					6	108
Н. контр.		Возний				<b>ІФНТУНГ гр.АКСм-24-1</b>		
Затв.		Заміховський						

## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

- АЦП – Аналогово-цифровий перетворювач  
МК – Мікроконтролер  
ПК – Персональний комп'ютер  
ФС – Функціональна схема  
АЧХ – Амплітудно-частотна характеристика

					КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## ВСТУП

Бджільництво є однією з найдавніших форм сільського господарства тому ця галузь народного господарства поступово прогресувала разом з людськими знаннями і технологіями. Цей напрямок сільського господарства є надзвичайно важливим, оскільки дозволяє отримати низку продуктів, унікальних за хімічним складом, зокрема таких як мед, прополіс і маточне молочко.

Бджоли є надзвичайно цінними комахами ще й тому, що опилюють рослини, підтримуючи таким чином екологічний баланс. Підраховано, що медоносні бджоли відповідають за запилення понад 90% послуг глобального комерційного запилення, та приблизно 35% світових продовольчих культур [1]. Технологічний прогрес ставить нові завдання для даної галузі: моніторинг стану бджолиних сімей, що дозволить здійснювати віддалений контроль за ними. Виконання завдання по оперативному й точному визначенню стану бджолиної сім'ї дистанційним способом є актуальним, оскільки дозволяє поліпшити виробництво якісних продуктів бджільництва, зменшити втрати продуктів бджільництва та ресурсів бджоляра.

Для покращення показників виробництва і збуту продукції бджільництва, а також для підтримки екосистеми повинні бути складені системи класифікації що забезпечать виявлення типових проблем у біологічному стані бджолиної сім'ї, а саме: втрата королеви (матки), стан роїння, контроль за активністю бджіл під час медозбору, наявністю захворювання на вароатоз [2, 3]. На основі вищезгаданих систем класифікації повинна бути створена єдина система моніторингу бджолиної сім'ї. Розв'язання такого завдання складається із трьох етапів. На першому етапі створюється база даних, що складається з аудіо записів шуму бджолиної сім'ї у різних класифікаційних станах. Отримана база даних ділиться на навчальну та тестову вибірку. На другому етапі, шляхом аналізу взаємозв'язків між класифікаційним станом бджолиної сім'ї та

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

характеристиками шуму, який вона призводить, виконується вибір класифікаційних ознак. На третьому етапі будується система класифікації біологічного стану бджолої сім'ї за обраними класифікаційними ознаками, та оцінюється ефективність даної системи на навчальній та тестовій вибірці.

В рамках даної випускної магістерської роботи представлено виконання всіх зазначених етапів та створено системи моніторингу біологічних параметрів бджолої сім'ї. Система дозволяє виявити втрату бджолої королеви, втрату взятку, набір ваги і температурні параметри.

					<i>КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						9
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ

## 1.1 Бджолина сім'я як об'єкт моніторингу

Бджолина сім'я є своєрідною живою системою, яка подібна до організму вищих тварин. До складу сім'ї входить гніздо, плодова матка, каста робочих бджіл різного віку, в активний період сезону - трутні (для запліднення маток) та різновіковий бджолиний та трутневий розплід. Усі члени бджолиної сім'ї повністю залежать один від одного у всі періоди життя. Взаємозалежність всіх особин, їх споріднене походження в цілому забезпечують повноцінний загальний обмін речовин, успішне існування сім'ї та природне процвітання виду в практично будь-яких умовах довкілля. При розгляді бджолиної сім'ї як біологічної одиниці, необхідно зазначити, що гніздо бджіл, кожна бджолина та трутнева особина, матка, розплід - виконують свою, призначену саме для них роботу, спрямовану на збереження та розвиток сім'ї в цілому незалежно від того, якою мірою це корисно, шкідливо чи навіть смертельно для окремої особини.

Ні матка, ні трутні, ні бджоли не можуть жити та розмножуватися окремо без родини. Нормальне повноцінне життя і робота бджолиної колонії можлива лише за спільного співпроживання всіх вище перерахованих особин у одному гнізді. Бджолина сім'я як біологічна і господарська одиниця може жити і ділитися довгі роки (практично до нескінченності) завдяки тому, що її члени безперервно замінюються, крім зимового періоду.

Більшість свого життя кожна особина проводить на сотах свого гнізда. Бджолина сім'я як високоточний прилад підтримує в гнізді необхідну для кожного сезону температуру і вологість повітря, а матка старанно відкладає яйця (личинки). Без гнізда бджоли не можуть виростити потомство: робочих бджіл, трутнів, маток, заготовити та зберегти корм для зимівлі та годівлі

					<i>КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

потомства. У природних умовах за бджолиним гніздом можна визначити вік бджолиної сім'ї. Як правило, у старому гнізді виводяться дрібні бджоли, які у свою чергу менш працездатні та довговічні. У природних умовах, якщо бджолина сім'я оселилася в дуплі старого дерева чи норі, у старому гнізді, вона гине.

Без гнізда немає бджолиної сім'ї, є рій, що є зародком чи основою майбутньої родини. Чисельність бджолиної сім'ї досягає до 100 тис. бджіл, і всі вони пов'язані між собою і мають свою загальну форму поведінки, яка обумовлюється загальним обміном речовин через корм, феромони, звукові сигнали через температуру і вологість повітря в гнізді. Кожна одиниця сім'ї у певний момент свого життя виконує лише ту роботу, яка необхідна для комфортного функціонування сім'ї загалом. В окремі моменти свого життя кожна бджола робить ту чи іншу роботу – це залежить від її фізіологічного стану, а також від її віку.

Так склалося, що бджолярі виділяють три етапи або періоду життя робочої бджоли:

Перший етап – молода чи вулична бджола. Працює тільки в середині гнізда (вулля). Як правило, цей період становить приблизно 10 перших днів бджоли з моменту її виведення. Перші кілька днів виведені бджоли малорухливі і не можуть харчуватися самостійно, їх годуванням займаються старші бджоли. На цьому етапі свого життя бджоли займаються чисткою клітин сот, вигризаючи різне сміття і шари хітинового покриву, яке залишається внаслідок линяння розвитку личинок бджіл. Така процедура необхідна для того, щоб матка могла в чисті осередки сотень закласти нові кладки майбутнього потомства. У не очищені осередки матка ніколи не відкладе яйця. До кінця першого періоду бджоли так само займаються обігрівом запечатаного в стільниках ще не виведеного потомства.

На четвертий – п'ятий день молоді бджоли вперше вилітають із вулика, роблячи свій перший політ. Політ, зазвичай, не тривалий і триває кілька

					<i>КРМ.АКСМ-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

хвилин, іноді навіть секунд. Під час цього польоту бджоли запам'ятовують орієнтири: забарвлення житла (вулика), розташування навколишніх об'єктів, розташування щодо сонця, а також випорожнює свій кишечник. З кожним днем вильотів з вулика стає все більше, а самі польоти з кожним разом робляться все довше. Це потрібно для зміцнення м'язів бджоли, так і для розширення діапазону орієнтирів. Тобто, чим довше і довше літає бджола тим краще і далі вона орієнтується на місцевості. У цей період бджоли харчуються головним чином пилюком, заготовленим іншими бджолами у вулику. Пилюк необхідний молодим бджолам для розвитку верхньощелепних (гіпофарингеальних) залоз. Самі ж бджоли годують бджіл, що ще не сформувалися, так званих старших личинок, готуючи для них спеціальну кашу, яка складається з нектару, пилюку і меду розбавленого водою. Приблизно з п'ятого по десятий день, коли верхньощелепні залози бджоли повністю сформовані та почали функціонувати, вона перестає годувати личинки старшого віку та починає годувати личинки молодшого віку. Така бджола називається годувальницею. Перші три дні вона годує личинок робочих бджіл та трутнів, п'ять днів годує личинку матки або маточну личинку. Матковій личинці годувальниця завжди корм дає із запасом, це необхідно щоб та не голодувала під час прядіння свого кокона. Для вирощування личинок використовуються бджоли-годувальниці, яким доводиться зазирнути у комірку до кожної личинки від двох до п'яти тисяч разів! У сукупності одна бджола-годувальниця здатна вигодувати три личинки, але бджоли не прив'язані до якогось одного осередку або личинки. Кожну личинку вигодовують десятки сотень бджіл. Після того, як вулична бджола повністю зміцніла (10-11 день) у її житті починається другий період.

Другий етап – бджола-будівельник. Настає у бджіл на десятій дванадцятий день їхнього життя, після того, як у них перестає виділятися молочко і починається виділення воску. У цей період бджоли активно будують стільники. Також в їх обов'язки входить прийом у робочих бджіл нектару, який вони переробляють в мед і пресування в сотах принесеного обніжжя. Стежать

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

за чистотою у вулику, виносячи за межі гнізда різне сміття і померлих бджіл, а також надлишки трутнів. Примітно те, що бджоли дуже люблять чистоту і все непотрібне виносять з вулика на більшу відстань, іноді до 150 метрів. Так само до їх обов'язків входить підтримка мікроклімату в гнізді - охолодження, вентиляція та обігрів гнізда, а також його охорона. На 20 – 21 день закінчується другий етап життя бджоли.

Третій етап – робоча бджола або бджола збиральник. У цей період бджоли вилітають на розвідку, за взятком, пилом та нектаром квітів медоносних рослин. У ті дні, коли стоїть погана погода, і взятку просто немає, робочі бджоли не роблять нічого, відпочивають сидячи у вулику і ні куди не вилітають.

Взаємозв'язок усієї бджолиної сім'ї відбувається через маточну речовину, «суспільний шлунок і громадський мозок». За добу бджола не менше 25 разів передає будь-яку інформацію іншим бджолам або отримує її від них. Бджоли передають маткову речовину одна одній під час передачі їжі, яку виділяє матка верхньощелепними залозами. На рівних у загальному обміні речовин бере участь і бджолиний розплід. У момент годування, коли бджола дає личинці корм, як би облизує її, отримуючи феромон, що діє як феромон матки. Маточна речовина та виділення личинок діють на робочих бджіл як тимчасові стерилізатори. Доки бджоли отримують ці речовини, вони функціонують яєчники і вони здатні до розмноження. За відсутності маткової речовини бджоли закладають маточники і виводять собі нову матку, а за відсутності ще й розплідної речовини бджоли починають годувати один одного молочком, у них починають функціонувати яєчники, і вони стають трутками.

Розподіл функцій між особинами (матка тільки кладе яйця; робочі бджоли збирають корм, охороняють гніздо і виконують всі виховні функції; трутні виконують функції самців і беруть участь у тепловому балансі сім'ї) призвело до того, що у бджолиній сім'ї все залежить один від одного і ніхто не може жити самотужки. У процесі природного відбору у особин виробилися

					<i>КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ознаки, цінні сім'ї, але часто смертельні самої особини. Наприклад, охоронниця жалить ворога і гине, тому що не може витягти зі шкіри ворога жало. Вона вириває його разом з частиною нутрощів черевця і через деякий час помирає через втрату крові. Але в тілі ворога залишається один нервовий вузол, який керує дією жала, отруйні залози, зв'язок з якими не порушується, і отрута накачується в ранку, продовжуючи вражати ворога. Щоб бджола «жертвувала» собою заради сім'ї, вона позбавлена страху та болю. Сім'ї, що складається з 40-100 тис. бджіл, загибель кількох безплідних самок не завдає помітних збитків, і сім'я продовжує жити. Кожна особина грає певну роль обміні речовин, у розмноженні та формуванні спадковості. Наприклад, матка і трутні виробляють статеві клітини-зародки нових членів сім'ї. Робочі бджоли беруть участь у формуванні спадковості через молочко, що виробляється ними, що йде на побудову поживних речовин яєць, що відкладаються маткою, а також на харчування молодих личинок.

Досвідами А. С. Михайлова, А. Ф. Губіна та І. А. Халіфмана доведено, що бджоли-годувальниці передають потомству, що виховуються, спадкові ознаки через молочко. Ці досліді, повторені В. І. Шиняєвою, Н. І. Дубровенком, О. І. Авдєєвим, підтвердили початкові висновки. О. М. Мельниченко встановив, що бджоли-годувальниці впливають на формування породи у трутнів та маток і що цей вплив позначається у другому та третьому поколіннях. І. Вавілов знайшов у молочці бджіл-годувальниць спадкову речовину ДНК. На XXIII Міжнародному конгресі з бджільництва у Москві В. Енгельс (ФРН) розповів про свої досліді з міченими атомами. Він встановив, що протеїн жовтка формується повністю в організмі бджіл і що матка отримує його в готовому вигляді. Отже, висновки учених було підтверджено відкриттям У. Енгельса. Бджолина сім'я розмножується шляхом роїння. Під час підготовки до роїння вона закладає маточники, виховує майбутню матку-основу сім'ї. За порушення біологічної цілісності сім'ї роїння може відбутися.

					<i>КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Сім'ї відрізняються один від одного манерою будувати стільники, кількістю прополісу, що збирається, і воску, що виділяється, характером роботи на квітках, ройливістю, стійкістю до хвороб, поїдання корму під час зимівлі. Знання індивідуальних особливостей бджолиних сімей необхідне бджоляру для ведення племінної роботи. Наприклад, на пасіці, що спеціалізується на запиленні сільськогосподарських культур, племінну роботу треба вести з сім'ями, що легко піддаються дресируванню, оскільки одні сім'ї легко дресируються, інші важко, треті взагалі не піддаються дресируванню, рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Бджолиний вулик

Сім'ї по-різному приймають чужих маток, до них можна легко підсадити, до інших — майже неможливо. Цікаві сімейні відмінності під час підготовки до роїння. Є сім'ї, які в цей період припиняють відбудовувати стільники, але збирають нектар, інші будують стільники та збирають нектар, а деякі не роблять ні того, ні іншого.

Незважаючи на те, що в бджолиній сім'ї немає системи кровообігу, яка б розносила поживні речовини по всьому організму, їжа все ж таки рівномірно і

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15

швидко розподіляється між членами всієї родини. Це вперше було встановлено дослідами Ч. Дарвіна з фарбованим воском та дослідами академіка Н. М. Кулагіна з підфарбованим медом. Пізніше англійські вчені Ріббандс та Ніксон, застосовуючи мічені атоми, підтвердили результати досвіду Н. М. Кулагіна.

## **1.2 Аналіз сучасних систем моніторингу біологічних параметрів бджолиних сімей**

**Система моніторингу i-bee.** Система i-bee була розроблена для того, щоб полегшити роботу і допомогти бджолярам в їх справі. До складу системи входять датчики і мобільний застосунок для iOS і Android, в якому можна відслідковувати будь-які зміни по пасіці онлайн.

Інформація щодо самих датчиків.

Базова станція – HUB. Вона призначена для збору інформації від всіх обладнаних вуликів NIVE пристроями. Оскільки у HUB радіус дії від 500 до 1500 метрів, в залежності від рельєфу, вона може встановлюватися одну на пасіку і приймати інформацію до 1500 штук NIVE пристроїв. Передача зібраної інформації на сервер здійснюється 1 раз в 1 годину по WI-FI або GSM-каналу. Залежно від розміщення HUB, передбачено два варіанти підключення живлення – 220В або сонячна панель. Є можливість підключення додаткових датчиків, наприклад, зовнішніх датчиків температури і вологості на пасіці, рис. 1.2.

Центральний блок – NIVE. Цей пристрій, що встановлюється на вулик і вимірює температуру, вологість і звук всередині вулика. Також в пристрої є вбудований оптичний датчик, який сигналізує про відкриття кришки вулика. Крім цього, пристрій реалізує ряд охоронних функцій – нахил вулика і переміщення в просторі. Передача зібраної інформації здійснюється 1 раз в 30 хв і передається на базову станцію – HUB по радіоканалу LORA.

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Електронні ваги – SCALES та SCALES-PRO. Призначені для періодичного зважування вуликів і передачі даних про вагу на центральний блок – HIVE за допомогою Bluetooth, кожні 15 хвилин.

Датчик на льоток – COUNTER. Призначений для підрахунку кількості бджіл, що вилетіли та повернулись до вулику. В край важливий для тих, хто надає послуги із запилення.

Подальша робота ведеться через мобільний застосунок.

Мобільний застосунок призначений для:

- управління та налаштування обладнання;
- перегляду станів пасік і вуликів;
- отримання повідомлень про несанкціонований доступ до вуликів.



Рисунок 1.2 – Система моніторингу i-bee

Переваги системи:

- можливість контролю стану кожного обладнаного вулика з будь-якої точки світу за наявності підключення до мережі Інтернет, через мобільний застосунок iOS і Android, рис. 1.3;

					<b>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17

- ведення обліку всіх операцій і встановлених нагадувань в щоденнику бджоляра;
- моментальні повідомлення на свій смартфон у разі екстрених ситуацій по пасіці або вуликах;
- необмежене зберігання даних та їх вивантаження в Excel для подальшої роботи з ними;
- економію часу на проїзд до місцезнаходження пасік, які можуть бути в 100+ км.

Застосувавши систему i-bee, ви будете мати повний контроль над своєю пасікою.



Рисунок 1.3 – Система дистанційного моніторингу i-bee

Додатковий функціонал у формі мобільного додатку «Щоденник» дозволяє робити планування і формувати зовнішні рекомендації щодо проведення планових робіт на пасіці. Особливо це важливо для пасічників початківців, досвід яких є ще не значним і схильним до помилок, рис. 1.4.

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

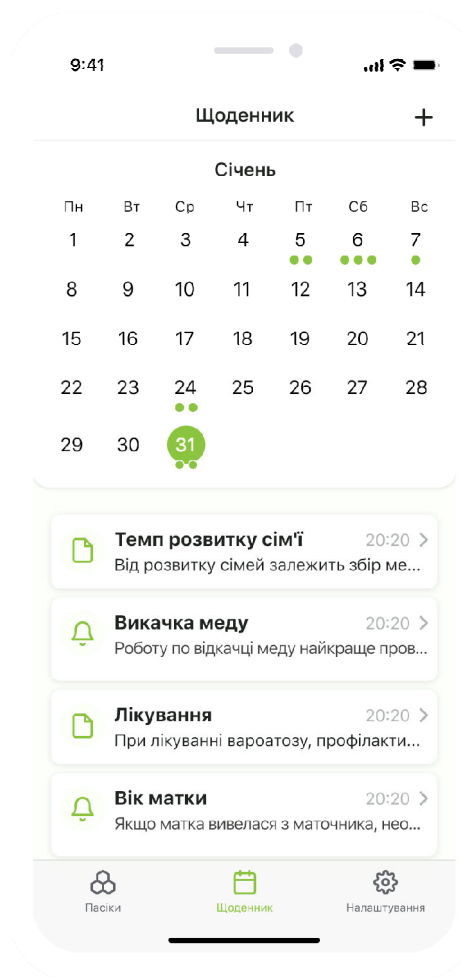


Рисунок 1.4 – Мобільний додаток «Щоденник»

**Система моніторингу Smart Sensor.** Технологія Smart Sensor контролює здоров'я бджіл та параметри життя діяльності вулика.

Завдання: контролювати медоносних бджоли віддалено і в режимі реального часу, в межах вулика. Реалізовано у 2017 р. Удостоєний нагород проект розумного вулика – унікальна платформа для моніторингу медоносних бджіл віддалено та в реальному часі, у вулику. Створена платформа, за допомогою якої можна непомітно відстежувати, збирати та аналізувати діяльність у колоніях.

У тому числі можлива реалізація за бажанням:

- контроль ваги вулика до 100 грамівих змін;

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- контроль температури, а також вологість та атмосферного тиску навколишнього середовища (від -40 до 50 град., 20-80%);
- контроль температури та вологості всередині вулика (від 0 до 50 град., 20-80%);
- підігрів (термостабілізований) у зимовий час (від зовнішнього джерела 12 ст., 20 Вт.);
- датчики цілісності вулика і блоку електроніки (у кришці, в дні, в блоці);
- датчик удару - надсилання тривожних повідомлень;
- відсилання вимірних даних;
- контроль активності за кількістю бджіл, що залетіли-вилетіли;
- запис та аналіз акустичної картини вулика;
- вивчення впливу змінного магнітного поля на поведінку бджіл;
- аналітика даних з метою автоматичного визначення та запобігання роїнню, отруєнню бджіл, нападу чужих бджіл.

**Система моніторингу і управління Beewise.** Окремої уваги заслуговує система управління і моніторингу Beewise.

Автономні вулики від Beewise, за словами розробників, дозволяють автоматизувати і підвищити прибутковість всіх видів бджільництва. Вулики працюють з мінімальним втручанням людини, використовуючи технології штучного інтелекту, рис.1.5.

Розробники додають, що їхня система — комплексне автоматизаційне рішення для бджолярів, що допомагає підвищити обсяг видобутку меду, економити на персоналі і знизити втрати бджіл, в тому числі за рахунок роботи без використання хімічних пестицидів.

					<b>КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ</b>	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 1.5 – Вулик Beewise

Безпілотний вулик являє собою модернізований транспортний контейнер, в якому міститься 40 колоній (близько 2 млн бджіл), що дозволяє бджолярам дистанційно лікувати і доглядати за бджолами.

Використовуючи комбінацію комп'ютерного зору, роботизованих маніпуляторів, датчиків і програмного забезпечення, Beehome піклується про бджіл в режимі реального часу, одночасно передаючи всі важливі дані людям, які стежать за процесом.

Програмне забезпечення вуликів, навчене на тисячах зображень, вміє визначати бджіл з кліщами варроа (кліщі, які харчуються органами медоносних бджіл і личинок, викликають слабкість, а також підвищену сприйнятливність бджіл до хвороб і вірусів). Програма визначає — чи слід поміщати вражений вулик в карантин від інших вуликів.

Beehome можуть контролювати клімат і вологість вуликів і вбивати шкідників, виявляючи їх і застосовуючи пестициди при необхідності. Використовуючи систему штучного осіменіння, програма визначає, коли колонія може готуватися до рою, і намагається запобігти цьому, коректуючи умови утримання вуликів.

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

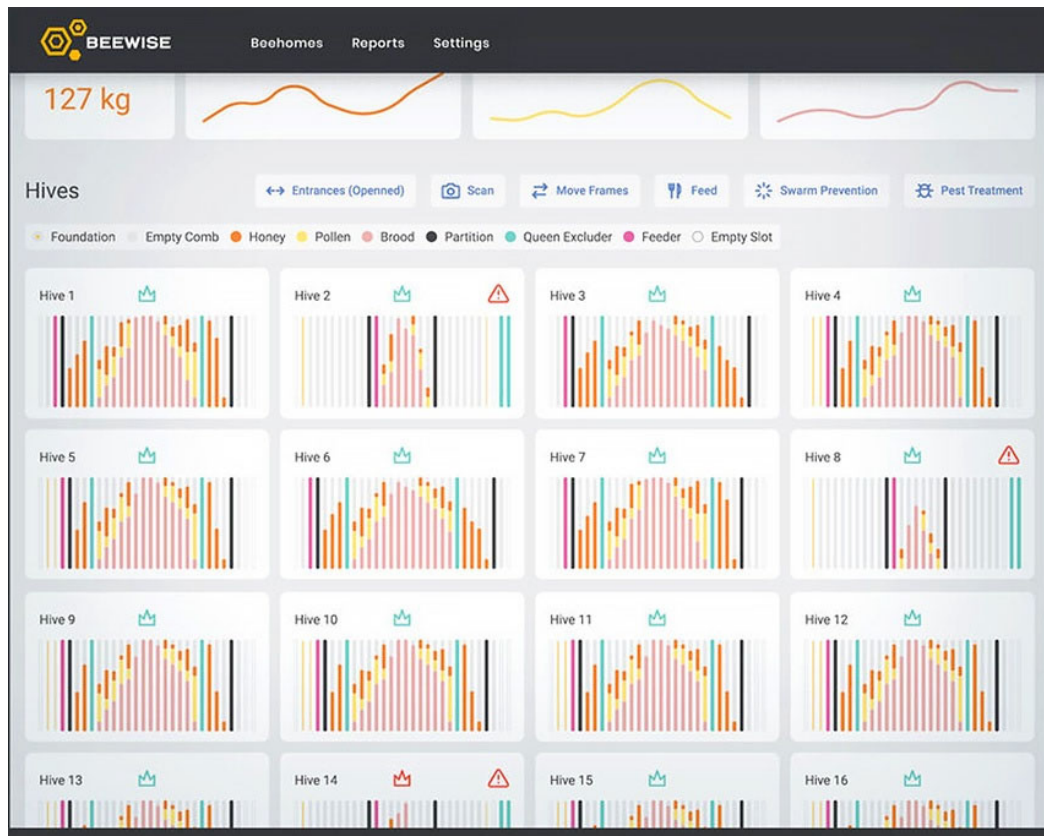


Рисунок 1.6 – Моніторингова система Beewise

Beehome також виявляє вулики, готові до збору врожаю, автоматично отримуючи мед і повідомляючи бджолярів, як тільки ємності для меду досягнуто повної місткості. Для тих проблем, які не можуть бути вирішені роботами, Beehome видає оповіщення через мобільний додаток.

### 1.3 Аналіз патентних джерел

Патентний пошук проводився серед українських патентів та патентів ЄСРР. Розробники переважно патентували способи контролю і уникнення роїння, що не цілком вирішує поставлені задачі. Наприклад патент SU 1674762 «Спосіб попередження роїння бджолоїної сім'ї» пропонує для виводу бджолоїної сім'ї із роївового стану шляхом вмикання аудіо запису шуму від сім'ї

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

із нормальним режимом роботи. Патент датується 1991 року, відсоток ефективності такого методу встановити доволі важко та й сумнівно.

Патент UA 15806 «Спосіб контролю стану бджолої сім'ї у вулику під час зимівлі» передбачає контроль з допомогою датчиків температури шляху руху бджолої клубу. Такий підхід дає інформацію тільки про температурне поле клубу, а при специфічному напрямку руху бджолої клубу, уже не має можливості його температурного контролю. Відсутність контролю вологості не надає достатньої інформації. Система актуальна при зимівлі бджіл. При літньому утриманні бджіл система взагалі слабо ефективна через моніторинг тільки одного параметру – температури.

#### 1.4 Постановка задачі

Чи колись замислювалися, скільки праці і часу витрачає кожен бджоляр на пасіці? Протягом кожного дня їм потрібно перевіряти десятки або сотні вуликів, в залежності від масштабів пасіки. Для різних пір року є свої маніпуляції, які потрібно врахувати, простежити, запобігти і проаналізувати. Чи достатня температура, чи не занадто велика волога, чи змінюється вага під час медозбору, чи не розпочалося роїння, наскільки добре працюють бджоли при наданні послуг запилення та багато іншого. На все це йде досить багато часу, особливо коли пасіка знаходиться далеко від місця проживання бджоляра.

Необхідна система для того, щоб полегшити роботу і допомогти бджолярам в їх справі. До складу системи повинні входити датчики і алгоритмічне забезпечення, в якому можна відслідковувати будь-які зміни по пасіці онлайн.

Окремо слід виділити такий важливий стан бджолої сім'ї, як роївий стан. Роїння – це хоч і природній спосіб розмноження бджіл в природі, проте у промисловому бджільництві неконтрольоване роїння це дуже негативний

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

процес. Це перш за все викликає значне послаблення основної сім'ї, веде до зменшення запасів меду, тимчасової припинення яйцекладки. Сам рій що «утік» переважно вважається втраченим. Навіть при виявленні соєвого стану бджолоїної сім'ї, виведення із даного стану - доволі складний, тривалий процес без гарантій. В роєвому стані, сама бджолоїна сім'я не працює. Бджоляр при цьому втрачає прибуток і отримує втрати.

Мною пропонується використання акустичного методу для забезпечення контролю за бджолоїною сім'єю. Такий підхід створює нові підходи до аналізу біологічних параметрів бджолоїної сім'ї. Даний процес аналізу складний в силу своєї природи. Відомо, що при різних станах бджолоїної сім'ї (наявність взятку, відсутність взятку, втрата бджолоїної матки, передроєвий стан, роєвий стан, вихід рою) акустичний фон такої сім'ї у спектральному складі має ряд діагностичних ознак, які дозволяють ідентифікувати біологічний стан бджолоїної сім'ї.

Саме поєднання вимірних основних параметрів а також акустичних ознак дозволяє значно збільшити ідентифікацію стану бджолоїної сім'ї.

Слід відмітити крайню необхідність моніторингу біологічних параметрів бджолоїної сім'ї під час її зимівлі. Такий моніторинг дозволяє уникнути втрату сім'ї. Сама інспекція сімей у зимовий період проводиться переважно дуже рідко, тому втрата бджолоїної сім'ї є негативним явищем у господарстві бджоляра.

Сам аналіз і моніторинг біологічних параметрів бджолоїної сім'ї неможливий без алгоритмічного забезпечення даної системи моніторингу і аналізу, моєю частиною роботи є розробка алгоритмічного забезпечення.

Система моніторингу біологічних параметрів вулика і сім'ї повинна забезпечувати вимірювання і обробку наступних параметрів:

- температура у вулику;
- вологість у вулику;
- вага вулика;

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- акустичний контроль;
- атмосферний тиск.

У функції системи входять наступні параметри:

- дистанційних моніторинг основних параметрів;
- прогнозування нештатних ситуацій і підказка щодо дій;
- попередження про аварійні ситуації;
- повідомлення про загальний стан бджолої сім'ї.

					<i>КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						25
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

## 2 РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ БІОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

### 2.1 Аналіз типових біологічних станів бджолої сім'ї

Як будь-яка біологічна одиниця, бджолої сім'я володіє власними кліматичними умовами існування, які можуть залежати як від пори року так і від інших факторів. До таких кліматичних параметрів слід віднести:

- температура навколишнього середовища;
- вологість навколишнього середовища;
- атмосферний тиск;
- температура в зоні проживання, тобто у вулику;
- вологість у вулику;
- вага вулика;
- акустичні характеристики;

Всі ці параметри прямо чи опосередковано впливають як на продуктивність сім'ї, так і на її спроможність до виживання і розмноження.

Окрім кліматичних параметрів, які безпосередньо впливають на стан бджолої сім'ї, біологічний стан сім'ї може мати і інший характер, тобто сам стан має певні характерні ознаки що визначають їхню поведінку. До таких станів можна віднести:

- нормальний стан бджолої сім'ї
- стан «зимівля»;
- стан тривоги при «зимівлі»;
- відсутність взятку (відсутність нектару у природі);
- відсутність бджолої матки;
- передройовий стан;
- ройовий стан.

					КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Кожен із цих станів, (звісно окрім нормального стану і стану «зимівля») має свої негативні наслідки які впливають на продуктивність бджолоїної сім'ї.

Правильне їх діагностування і визначення дає можливість пасічнику оперативно прийняти міри щоб запобігти як розвитку негативного явища так і здійснити заходи щодо збільшення продуктивності даної бджолоїної сім'ї.

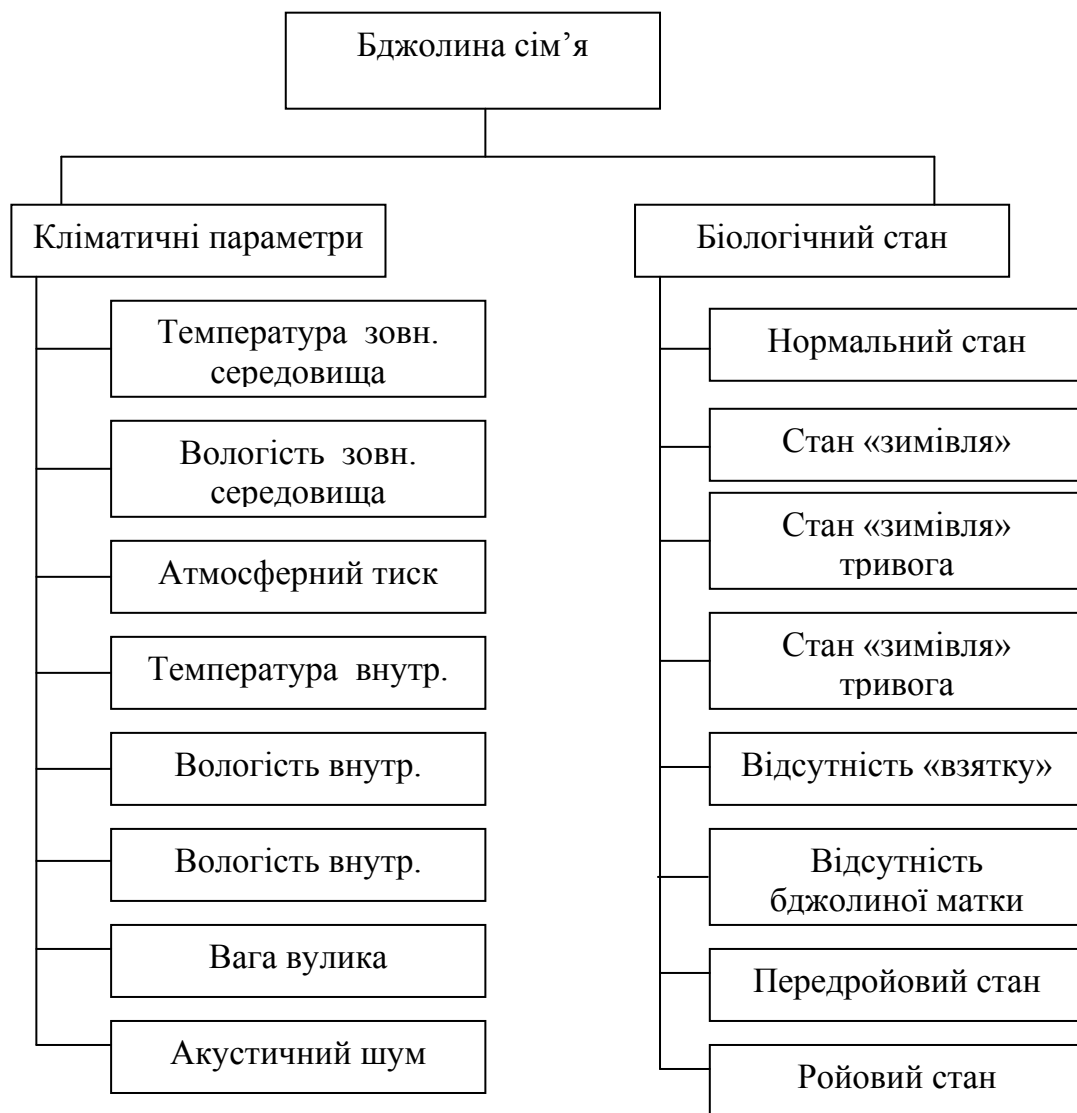


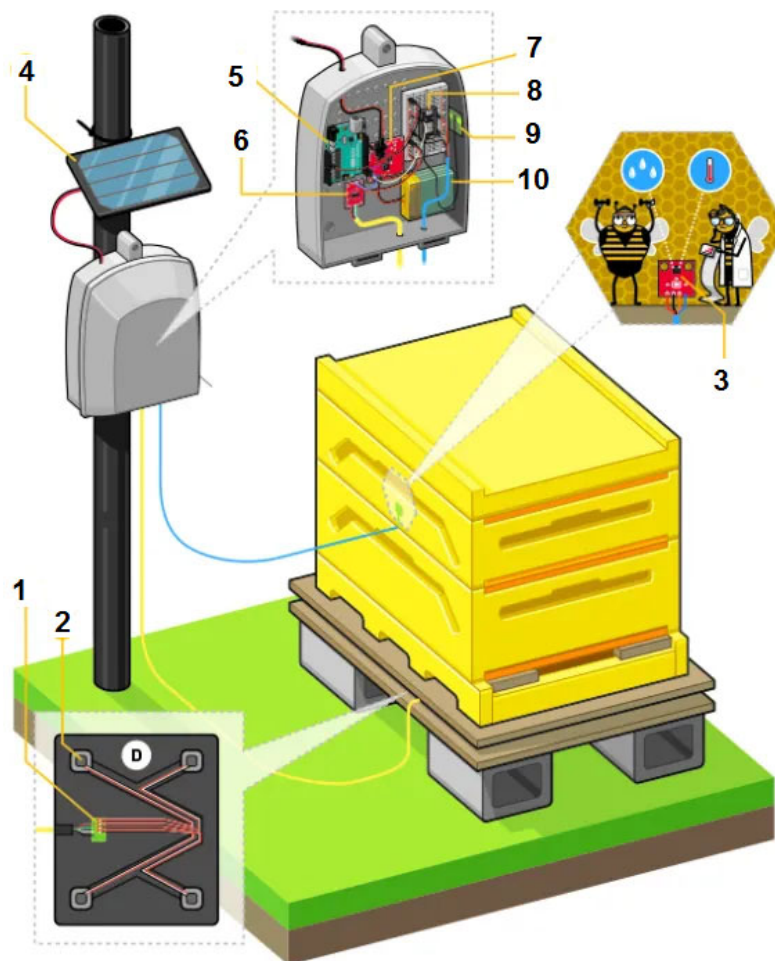
Рисунок 2.1 – Кліматичні параметри і біологічний стан бджолоїної сім'ї

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

## 2.2 Розроблення функціональної схеми системи управління

Як і будь-яка система моніторингу, система моніторингу біологічних параметрів бджолої сім'ї передбачає набір датчиків і виконавчих механізмів, при цьому мікроконтролер виконує роль вузла обробки інформації і прийняття рішення, блок резервного живлення, комунікаційний модуль, модуль енергонезалежної пам'яті, модуль виводу інформації.

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



1-АЦП датчика ваги, 2-датчики ваги, 3-датчик 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 2.2 – Функціональна схема системи моніторингу бджолої сім'ї

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

Функціональна схема передбачає комплекс датчиків для збору поточної інформації. До них входять наступні датчики:

- датчик вологості і температури;
- датчик барометр;
- датчик ваги;
- датчик аудіо-шуму.

Датчик вологості виконаний в одному корпусі із датчиком температури, що робить його мінімальним в розмірі. Датчик вологості виконаний як чотири тензометричні датчики ваги, які розміщуються під кожною ніжкою бджолиного вулика. Датчик аудіо-шуму розміщений в одному монтажному корпусі із датчиком вологості і температури.

Система передбачає наявність автономної системи живлення, яка побудована на сонячній панелі, літєвої акумуляторної батареї і контролера заряду із MPPT функцією.

### **2.3 Зв'язок між аудіо-шумом і біологічним станом бджолиної сім'ї**

Одну із перших спроб встановити зв'язок між характером звуків, що генерує бджолина сім'я, та біологічним станом бджіл за допомогою методів акустичного аналізу було виконано Е.Ф. Вудсом [4]. Автор представив аналіз звукового спектру великої здорової колонії бджіл у трьох умовах на рис. 2.3. Кожна з умов показана на кривих I, II і III, що являють собою обвідні звукового спектру. Ці криві, отримані двома методами: шляхом відтворення потрібного звуку за допомогою фільтрувального кола і прив'язки його до наближеного аналогічного тону, визначеного на слух; і використання спектро-аналізатора. Ці два методи дали схожі результати, а другий був прийнятий за основний, будучи набагато простішим і швидшим.

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

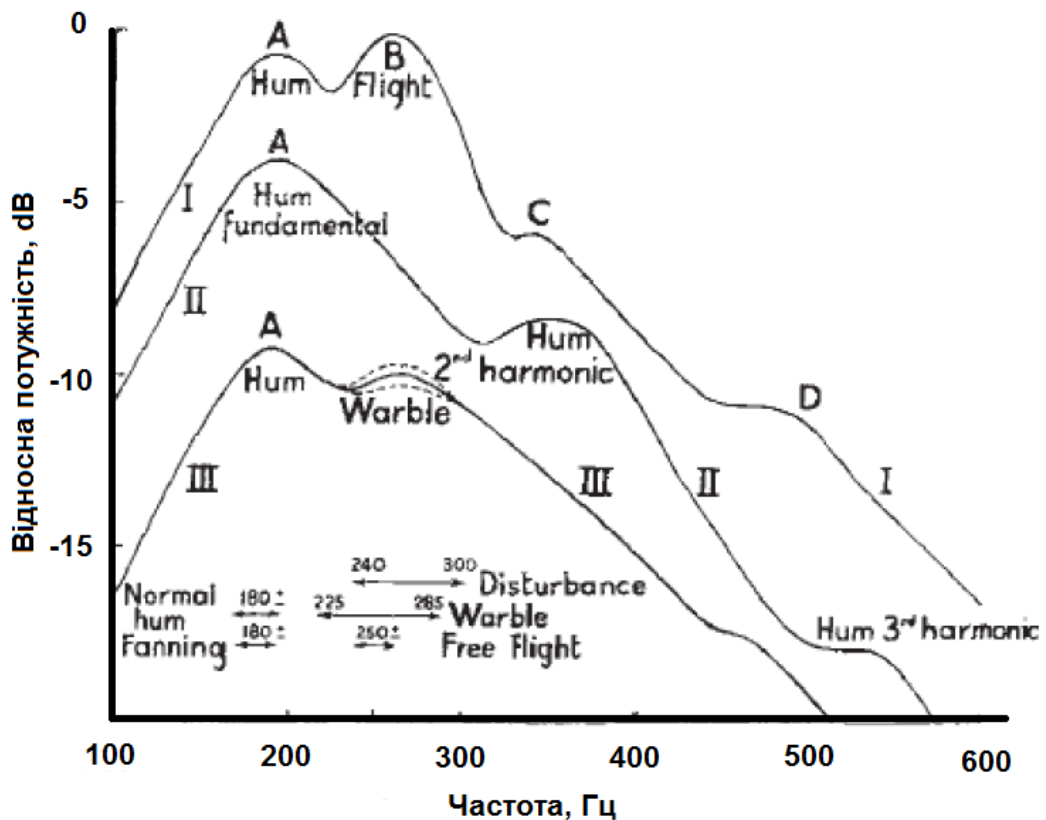


Рисунок 2.3 - Огинаючі спектру для трьох різних умов

Крива I показує огинаючу спектру під час звичайного робочого дня колонії. Складові звуків бджолоїної сім'ї знаходиться в діапазоні від 180 Гц до 3000 Гц, при цьому виділено чотири основні складові, що підписані на рис.2.3 «I» як А,В,С і D. Складова А є основною, вказує на частоту  $180 \pm 5$  Гц та породжується дихальними процесами бджіл. Складова В ( $250 \pm 1$  Гц) пов'язана зі звуками польоту та з настанням темряви зникає. С і D являють собою гармоніки А і В що зливаються на високих частотах. Четверта складова займає область частот близько 3000 Гц та генерується крилами бджіл в період підготовки бджіл до роїння, а також в період зимування бджіл.

Крива II показує огинаючу спектру тієї ж колонії після настання темряви. Рівень основних частот спадає, та зникає складова В.

Крива III показує обвідну спектру тієї ж колонії при відсутності літальної активності бджіл та при вилученні бджолоїної королеви з сім'ї. Записи були зроблені через 3 години після того як матку було вилучено. В цьому випадку

було виявлено інформаційні частоти (від 225 до 285Гц), та їх флуктуації відносно рівня на  $\pm 3$ дБ. Це пов'язує виявлені частоти саме з вилученням матки. Також сигнали на цих частотах випромінюється бджолами-годувальницями у віці від 4,5 до 6 днів в період підготовки сім'ї до роїння і протягом п'яти годин після вилучення з вулика матки.

У своєму дослідженні Дж. Джиндра [5] вказує, що бджоли створюють звук між 20 і 10кГц, але найбільш інформативна частина спектру знаходиться в смузі від 200 до 500Гц. Він описує, що бджолині колонії виробляють більш високу інтенсивність звуку при 240Гц до 21 дня перед роїнням. Цей стан означає, що бджоли почали створювати більше десятка нових королев. За 8 днів до роїння максимальна інтенсивність звуку рухається до 270Гц. За 1 день до роїння максимальна інтенсивність зареєстрована на частоті 300Гц. Автор також зауважує, що колонія бджіл виробляє більш високу інтенсивність в діапазоні 300 – 400Гц, на 4 – 5 годину після втрати королеви.

Д.Г. Дейтлейн [6] у своїх роботах досліджував розподіл рівня амплітуди рівня фонового шуму вулика у денному циклі впродовж всіх чотирьох сезонів. У більшості днів щоденний ритм мав підвищення амплітуди близько 8 години і поступово знижувався після настання темряви.

Вона є подібною до попередньо розглянутої, за винятком значно більш тривалого інтервалу між сходом сонця і збільшенням рівня звуку. Рівень фонового шуму записувався інтервалом в одну годину протягом дня і ночі, восени та влітку. Запис загального рівня звуку в травні показав чіткий щоденний цикл з часом підйому між 8 і 10 годиною. Зниження рівня звуку відбувалося близько півночі.

Схема літньої активності була схожою до весняної, у тому числі при відставанні на 3-4 години між сходом сонця і початком збільшення активності колоній. У теплу погоду, коли рясні джерела нектару були присутні, рівень фонового шуму продовжувався навіть після опівночі.

					<i>КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Рівень шуму колоній восени (на 30 вересня і 1 жовтня), з настанням осені відбувалося зменшення пікової амплітуди до тих пір, поки рівні звуку не стали рівномірними, дуже слабкими і не мали періодичності. Даний сигнал потрібно було підсилювати вдвічі, ніж влітку, щоб показати осінні амплітудні тенденції чітко. Рівні звуку мали тенденцію до зниження амплітуди, коли температура повітря ставала холоднішою, і висота основного піку також зменшувалася, поки до грудня його вже не можна було виділити.

Що стосується спектрального аналізу – автором було вказано що більшість звуків вулика мали частоту в 300, 410 і 510Гц згідно фільтрів аналізатора спектра, з невеликим звуком вище 1кГц. Спектр змінювався з сезоном. Спектри в зимуючих колоніях були подібними в грудні і на початку січня, але відрізнялися у другий тиждень січня, коли частоти нижче 300Гц були повністю виключені зі спектру колоній.

## 2.4 Розроблення спектроаналізатора

Було зроблено аудіо аналізатор спектру (0 - 1 кГц) з графічним дисплеєм та мікроконтролері ATmega32. Було реалізовано спочатку просте дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). Проте воно володіючи простотою, не задовольняє по швидкодії. ШПФ (швидке перетворення Фур'є) відрізняється від ДПФ більшою швидкістю і трохи складнішим алгоритмом. ДПФ повільний проти ШПФ.

Аналізатор спектру не вимагає великої швидкості, яку може забезпечити ШПФ, і якщо зображення на дисплеї змінюватиметься з частотою близько 30 кадрів/сек, то це більш ніж достатньо для візуалізації звукового спектру. Можна досягти частоти близько 100 кадрів/сек, проте для дисплея не рекомендується занадто висока частота оновлення в силу специфіки його будови. У випадку ДПФ звук із частотою дискретизації 20 кГц дає 32 точки.

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Оскільки результат перетворення є симетричним, потрібно використовувати лише перші 16 результатів. Відповідно, максимальна частота 1 кГц. Отже,  $1\text{кГц}/16 = 62.5\text{Гц}$ .

Були спроби збільшити швидкість обчислення ДПФ. Якщо є точка N ДПФ, то необхідно знайти синус та косинус  $(N^2)/2$ . Для 32-точкового ДПФ, необхідно знайти синус та косинус 512. Перш ніж шукати синус та косинус, нам потрібно знайти кут (градуси), який займає деякий час процесора. Для цього я зробив таблиці для синуса та косинуса. Я зробив синус і косинус 16-розрядними змінними, помноживши значення синуса і косинуса на 10000. Після перетворення я повинен розділити кожен результат на 10000. Тепер я можу розрахувати 120 32-точкових ДПФ в секунду, що більш ніж достатньо для аналізатора спектру.

Проте в наступному варіанті було використано саме ШПФ, рис.2.4. Графічний дисплей розділяється на дві частини – права і ліва частина. Права частина показує потік сигналу внутрішнього процесу. Оцифровані блоки даних перетворюються в ШПФ, і вони відображаються у вигляді смуг спектру в лівій половині (64 точки) дисплею, рис.2.5. Форми хвилі відображаються в правій половині (58 крапок) з вирівнюванням країв до нерухомих циклічних сигналів.

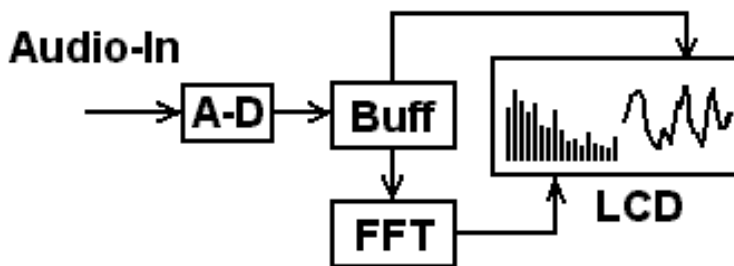


Рисунок 2.4 - Блок-схема спеуроаналізатора

Операції ШПФ виконуються в 16-розрядній фіксованій комі. Ці 128-точкові процеси ШПФ із застосуванням віконних операцій, операцій метеликів і скалярного виводу можуть виконуватися в реальному часі. Це досить швидко, враховуючи, що він обробляється лише дешевим мікроконтролером. Смуги

спектру відображаються в порядку основної частоти  $\times 0$  (компонент постійного струму), основної частоти  $\times 1$ ,  $\times 2$ ,  $\times 3$ , ... зліва направо. Частота дискретизації становить 9,6 кГц, а основна частота (роздільна здатність по частоті) становить:  $9,6\text{k} / 128 = 75$  Гц. Змінюючи верхню частоту, можна добитись необхідної роздільної здатності.

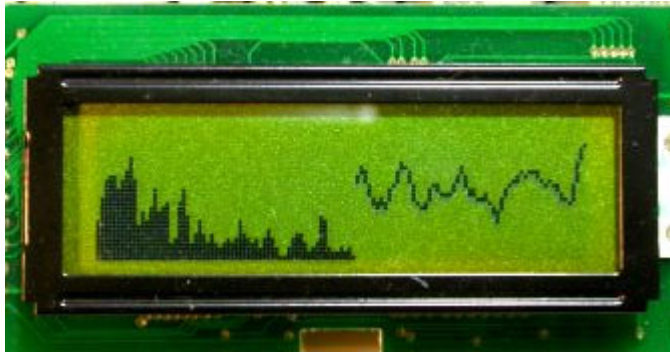


Рисунок 2.5 – Дисплей спектроаналізатора

Однією з найважливіших частин аналізатора спектра є отримання сигналу з електретного мікрофона. Особливу увагу було приділено розробці попереднього підсилювача для мікрофона. Нам необхідно встановити нульовий рівень на вході АЦП і максимальний рівень дорівнює половині напруги живлення, тобто. 2,5В. На нього може подаватися напруга від -2,5 до +2,5В. Підсилювач має бути налаштований так, щоб не перевищувати ці межі. Я використовував операційний підсилювач LM324 як попередній підсилювач для мікрофона, рис.2.6.

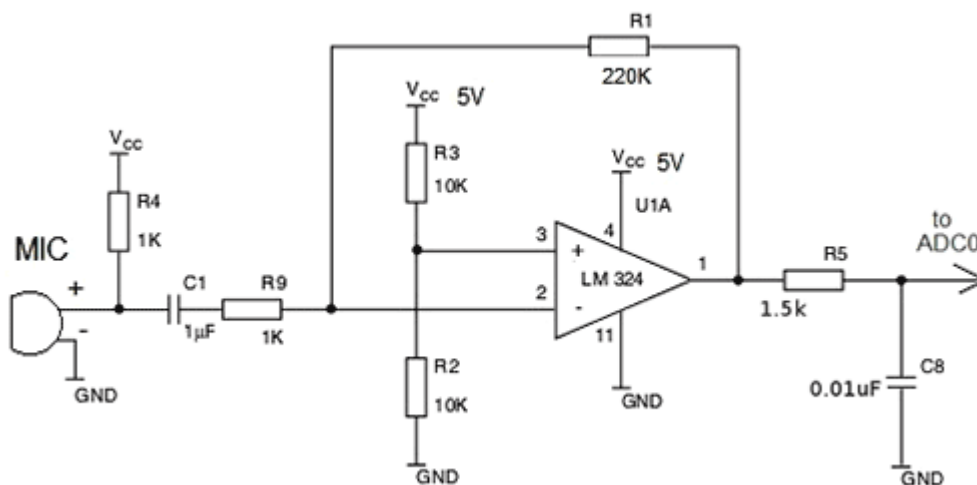


Рисунок 2.6 – Схема мікрофонного підсилювача

Для тестування спектроаналізатора я подавав на його вхід типові сигнали, так наприклад на вхід було подано синусоїду із кількома складовими, рис.2.7. Як бачимо результат підтверджує правильність алгоритму.

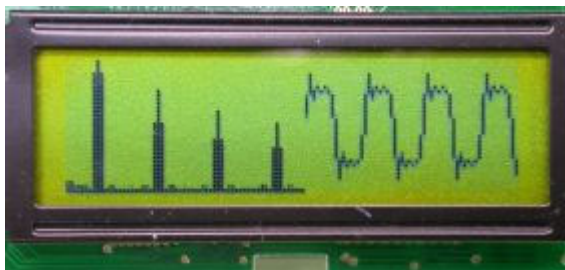


Рисунок 2.7 – Тестування спектроаналізатора

## 2.5 Виявлення ділянок спектру для оцінки стану бджолоїної сім'ї

Приклад виділення статистично однорідних ділянок [13], які несуть в собі діагностичну інформацію про ройовий стан бджіл, показаний на рис. 2.8 (ділянки виділені прямокутниками). Вважається що складені таким чином фрагменти дозволяють з високою надійністю визначати ступінь готовності до вильоту з вулика нової сім'ї.

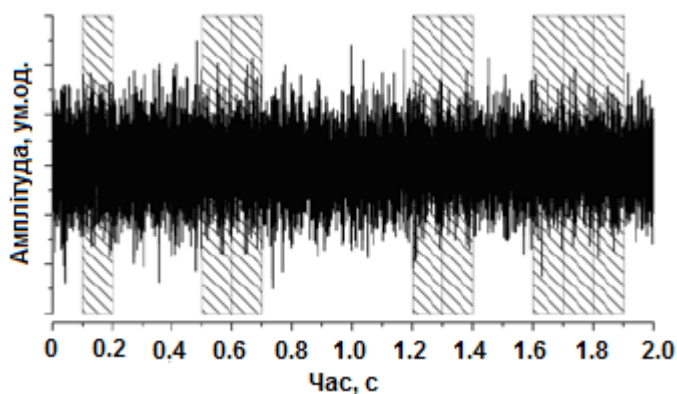


Рисунок 2.8 - Виділення статистично однорідних ділянок акустичного шуму, що несуть в собі діагностичну інформацію (за 3 дні до виходу рою)

Дослідження функції загального середнього для акустичного шуму показує, що з наближенням вильоту рою підвищується ймовірність генерації бджолами статистично однорідних ділянок шуму. На це вказує збільшення загальної довжини таких ділянок і оптимальної ширини ділянок розбиття акустичного шуму на фрагменти. Наприклад, за 10 днів до виходу рою зазначена величина дорівнювала 48 мс, а вже за день до виходу рою збільшилася до 128 мс. Загальна довжина статистично однорідних ділянок збільшилася в середньому з 0.3 до 0.5 с в кожному зразку акустичного шуму. Вважається, що це пов'язано з синхронізованим рухом крил безлічі бджолиних особин, що складають основу майбутнього рою. Таку ж динаміку зміни шуму бджіл підтверджує аналіз трендів і функцій узагальненого середнього. До моменту виходу рою інтегровані послідовності виділених ділянок акустичного шуму стають детрендованими, тобто розкид значень  $J_s$  щодо осі абсцис незначний.

Для наочності інтерпретації і візуалізації ройового стану по знайденим кількісним характеристикам побудований еліптичний класифікатор, зображений на рис. 2.9.

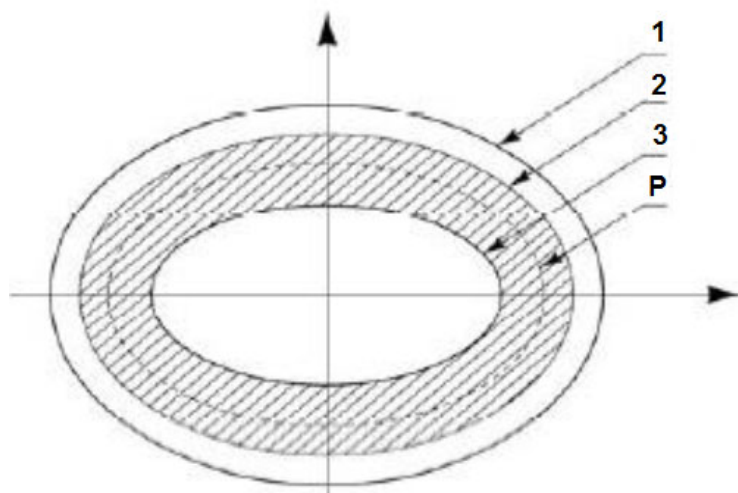


Рисунок 2.9 - Еліптичний класифікатор визначення ройового стану бджіл по акустичному шуму. Еліпси побудовані з порівняння відносних флуктуацій акустичного шуму в залежності від близькості моменту виходу рою: 1 - за 20 днів до виходу риючи; 2 - за 15 днів; 3 - день виходу рою

Заштрихована область відповідає акустичному шуму бджолою сім'ї, яка готується до розмноження.

Оцінка бджолиних сімей на наявність бджолої матки є важливим моментом при оцінці біологічного стану. Звукові дані збирали з двох колоній медоносних бджіл породи Carnica. Перша колонія мала королеву з великою кількістю бджіл. Друга колонія була без королеви зі зменшеною кількістю бджіл. Частота дискретизації вибірки для цього дослідження була встановлена 4 кГц, для зменшення частотного діапазону отриманих сигналів згідно теореми Найквіста. Кожен запис тривав 3 хв. Записи були робилися кожні 15 хв протягом 24 годин. На рис.2.10 показана спектрограма колонії із наявною маткою.

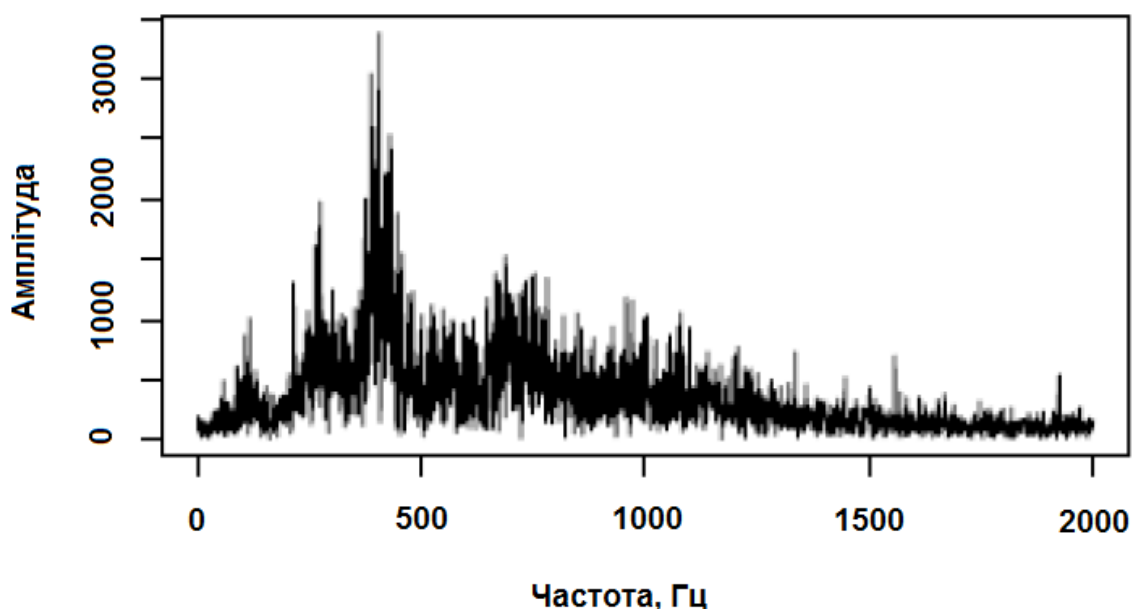


Рисунок 2.10 - Частотна характеристика колонії із наявною бджолою маткою

Більша частина інтенсивності розташована на смузі 400 Гц. На рис. 2.11 колонія без королеви має інші частотні характеристики. Така особливість дає можливість пасічнику через алгоритм мікроконтролера визначати наявність матки у колонії. В такому випадку не має потреби пасічнику повністю розбирати гніздо бджолої сім'ї що підтвердити наявність чи відсутність королеви.

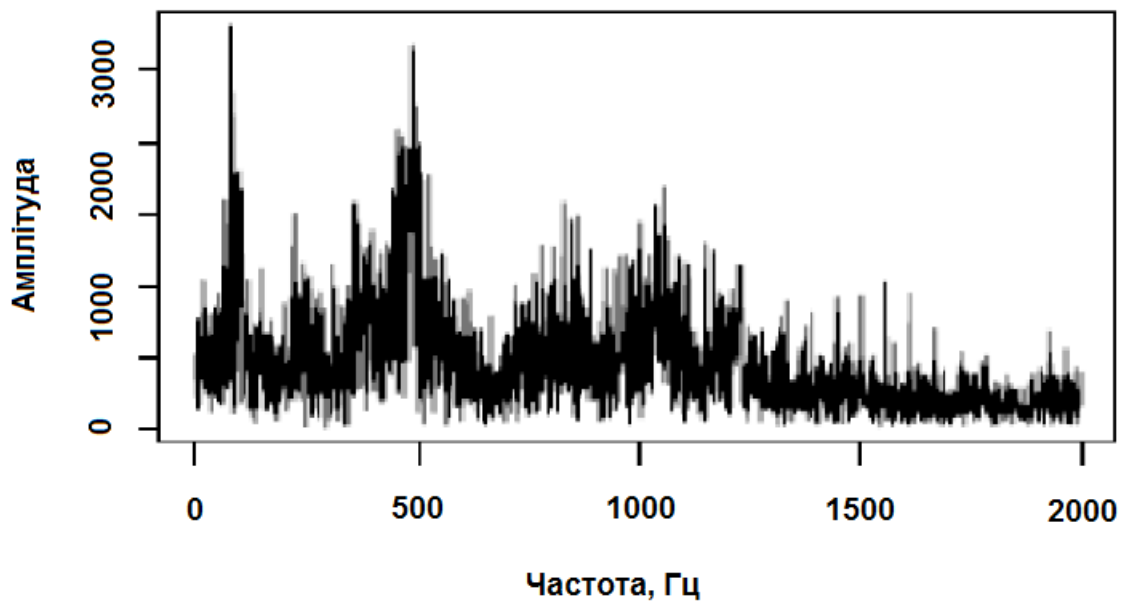


Рисунок 2.11 - Частотна характеристика колонії з відсутньою бджолоною маткою

З рис. 2.11 видно що для нездорової колонії (відсутня матка) звуковий спектр розподіляється за амплітудою в більшій кількості частотних смуг. Вибірка для MFCC (коефіцієнт мел-частотного кепстру) складалася з 88 записів звуку, для здорової колонії з королевою і 98 записів для колонії без королеви. Ці дані зібрані з 24 годин запису.

Параметри розрахунку MFCC були наступними: розмір вікна 25 мс (у цей період часу сигнал вважається квазістаціонарним), і з 10 мс перекриття, значення попереднього нахилу було встановлено на 0,94. Ці значення зазвичай використовуються для розпізнавання мовлення. Два класи були обрані в цій роботі: здорова і нездорова колонія.

Перший проведений аналіз був розкладанням сингулярної величини (SVD). SVD обчислює набір власних значень і власних векторів матриці. Це звичайна методика аналізу багатовимірних даних, яка може виявити структури в наборі даних і використовується для проведення класифікації. Аналіз SVD набору даних показаний на рисунку 2.12.

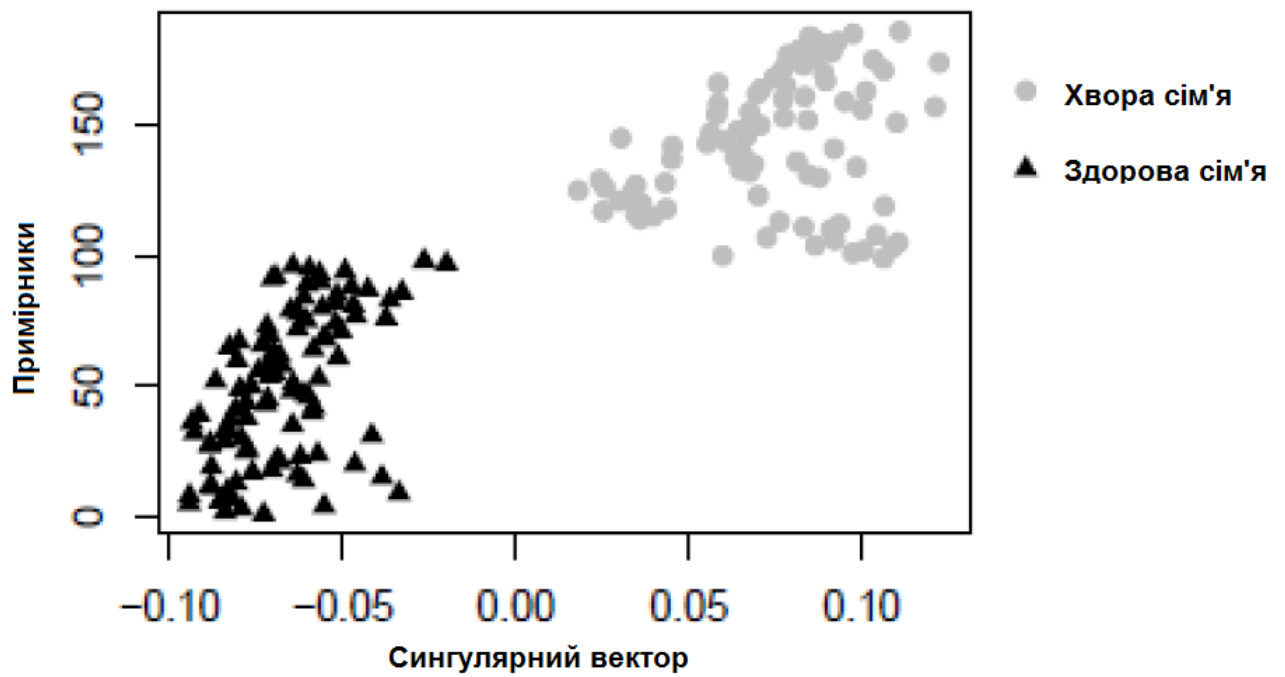


Рисунок 2.12 - Класифікація за допомогою SVD

Чорний трикутник відповідає колонії з королевою (здорова), а сірий круг - колонія без королеви (нездорова). Зразки групуються, формуючи добре сформовані кластери, що свідчить про дві чітко помітні умови.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ

Арк.

39

### 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ БДЖОЛИНОЇ СІМ'Ї

В даній роботі при розробці експериментальних досліджень ставилася наступна класифікаційна задача: знайти частотні складові звукового спектру бджолоїної сім'ї, які дозволять надійно відрізнити такі стани бджолоїної сім'ї як: стан колонії під час медозбору і його відсутності та стан колонії під час втрати королеви. Також класифікаційна задача включає в себе розробку правил прийняття відповідних рішень на основі отриманих інформаційних частотних складових. Отримані результати дозволили б у майбутньому створити програмну систему класифікації зазначених станів бджолоїних сімей породи Carnica.

Експеримент проведений в даному дослідженні був націлений на збір даних, у вигляді аудіо записів, для перевірки взаємозв'язків частотних складових звукового спектру вулика з станом бджолоїної сім'ї під час втрати королеви.

Для всіх записів частота дискретизації становить 44100Гц, формат WAV. Записи були зроблені на MEMS-мікрофон, що вбудований в смартфон. Розміщення мікрофона всередині нуклеуса було рівновіддаленим відносно стін нуклеуса. Верхня кришка та поточини вулика були зняті в ході експерименту так як смартфон був зафіксований вручну. Смартфон було розміщено між рамками з печатним розплідом, напроти льотка вулика. Таке розміщення було вибрано тому що між розплідом знаходиться велике скупчення як бджіл годувальниць, так і льотних бджіл. Саме бджоли годувальниці мають створювати інформативні частотні складові для розпізнання стану втрати королеви [7]. Також слід зазначити що саме на рамках з розплідом створювались маточники. В результаті експерименту було отримано 10 записів

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

для ситуації втратою королеви і 10 записів нормального стану колонії. Кожен запис тривав близько півтори хвилини.

Попередня обробка даних отриманих в результаті першого експерименту була виконана за допомогою метода Уелча [7]. У методі Уелча сигнал який аналізується, представлений вектором відділків, розбивається на сегменти що перекриваються. Кожен сегмент помножується на вагову функцію. Використання вагової функції дозволяє послабити розтікання спектра і зменшити зміщення отриманої оцінки спектра густини потужності ціною незначного погіршення роздільної здатності. Потім для кожного сегмента обчислюється періодограма, потім отримані періодограми усереднюються. В даному дослідженні для обчислення періодограм використовувалася вагова функція Кайзера [8]. Метод Уелча дозволяє отримати графічне відображення розподілу оцінок густини потужності сигналу відносно частоти, тобто отримати усереднену періодограму.

Отримані для кожного з вуликів усереднені періодограми були знову усереднені, щоб отримати дві періодограми для різних класифікаційних станів. Отримані в середовищі MathLab періодограми зображені на рисунку 3.1 і 3.2.

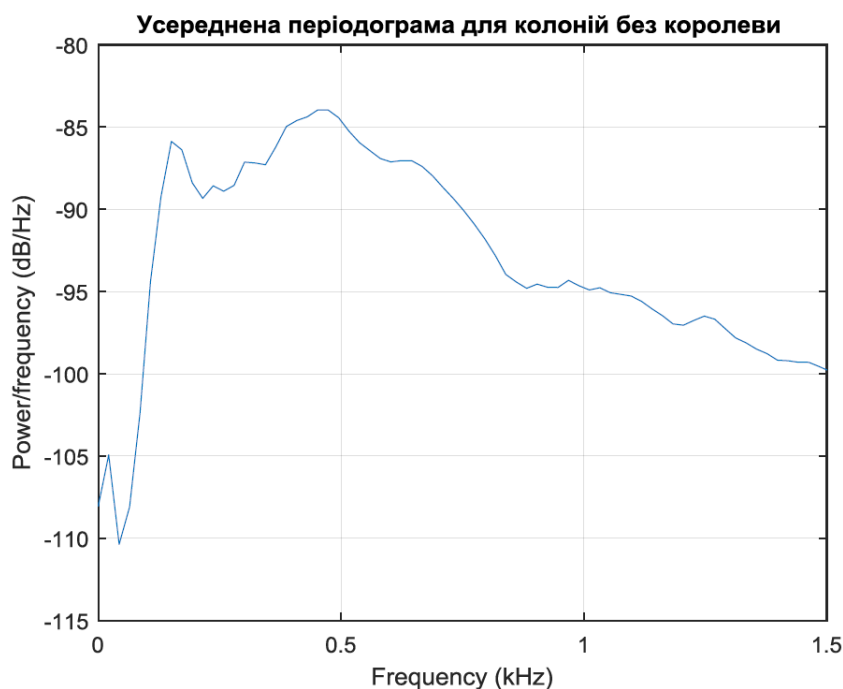


Рисунок 3.1 - Усереднена періодограма за присутності королеви у колонії

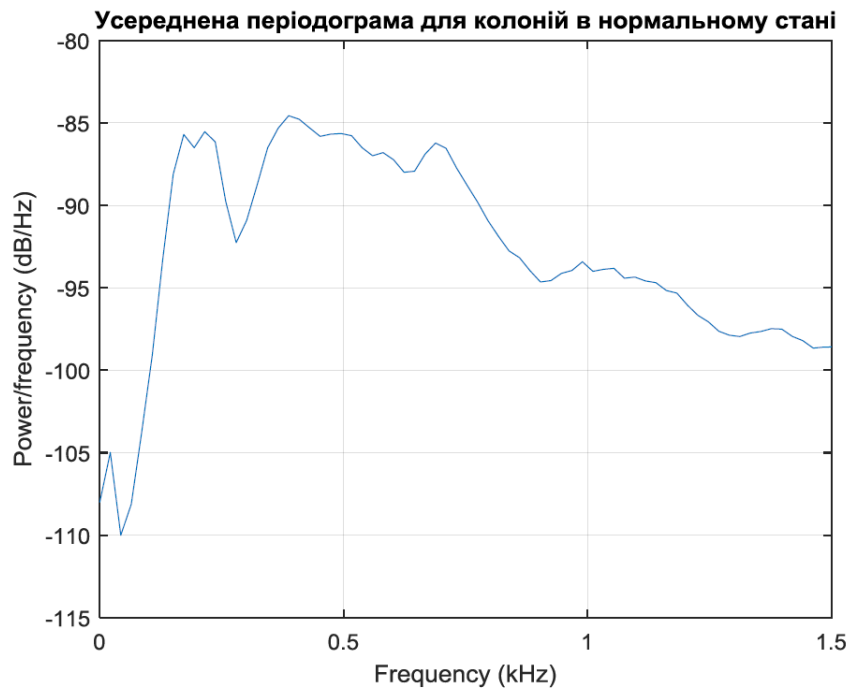


Рисунок 3.2 - Усереднена періодограма за відсутності королеви у колонії

Розглянувши рисунки 3.1 і 3.2 можна помітити що на періодограмі для нормального стану бджолої сім'ї максимуми оцінки густини потужності знаходяться на смугах частот 170-210Гц, 400Гц, та 700Гц в той час як для бджолиних сімей без королеви перший максимум оцінки густини потужності зсувається на частоту 150Гц, другий максимум зсувається на частоту 450Гц, а третій максимум зникає.

Другий експеримент був націлений на збір даних, у вигляді аудіо записів, для перевірки взаємозв'язків частотних складових звукового спектру вулика і активності бджіл під час медозбору. В експерименті брало участь чотири вулики, приблизно однакового розвитку, з племінними матками породи *Carnica*. У них були зроблені записи під час медозбору. Під час експерименту були зафіксовані такі параметри як: температура повітря, погодні умови, точний час початку і закінчення експерименту, а також приріст маси вулика, що є головним показником медозбору на першому етапі.

Мікрофон був розміщений між рамками з печатним розплодом, та ближче до льотка вулика. Таке розміщення було вибрано тому що між

розплодом що ближче до початку вулика знаходиться велике скупчення як бджіл годувальниць, так і льотних бджіл. Саме льотні бджоли мають створювати інформативні частотні складові для розпізнання активності бджіл під час медозбору [8]. В результаті експерименту було отримано 10 записів для ситуації з повною відсутністю медозбору і 10 запис для ситуації медозбору. Кожен запис тривав близько півтори хвилини.

Попередня обробка даних отриманих в результаті другого експерименту була виконана за допомогою методу Уелча. До застосування методу Уелча записи були пронормовані. В даному дослідженні для обчислення періодограм використувувалася вагова функція Кайзера [8].

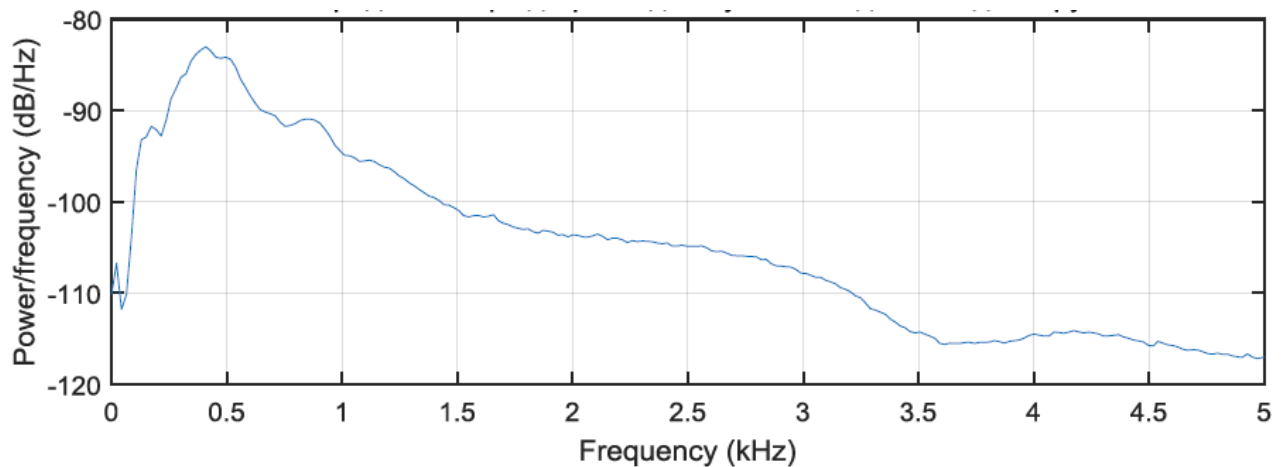


Рисунок 3.3 - Усереднена періодограма для вулика №3 під час медозбору

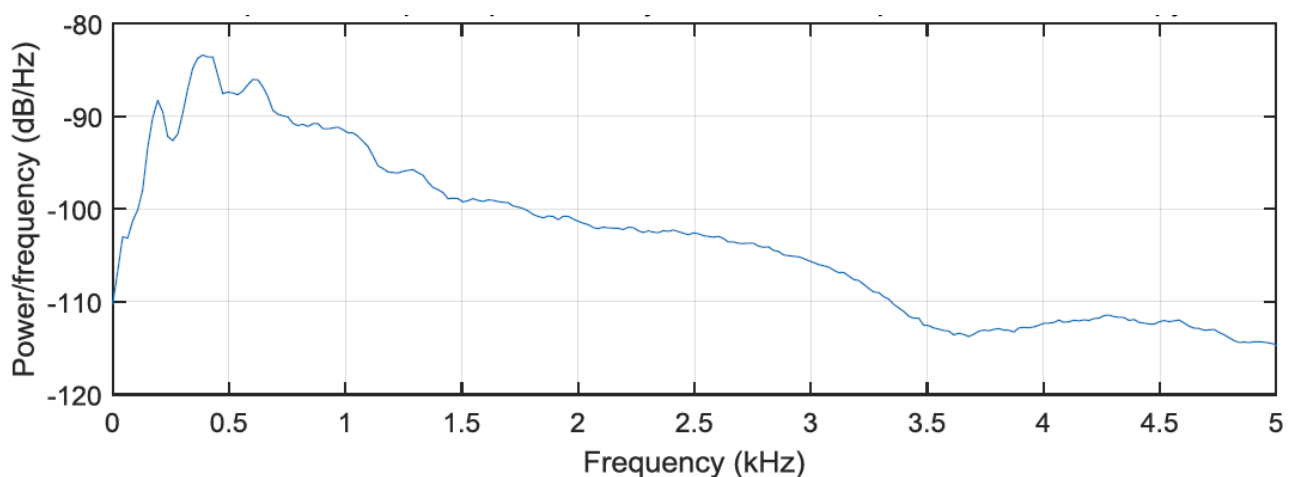


Рисунок 3.4 - Усереднена періодограма для вулика №3 під час припинення медозбору

Метод Уелча дозволяє отримати графічне відображення розподілу оцінок густини потужності сигналу відносно частоти, тобто отримати усереднену періодограму, рис. 3.3 і рис.3.4 для вулика №3 та вулика №4, рис. 3.5 і 3.6.

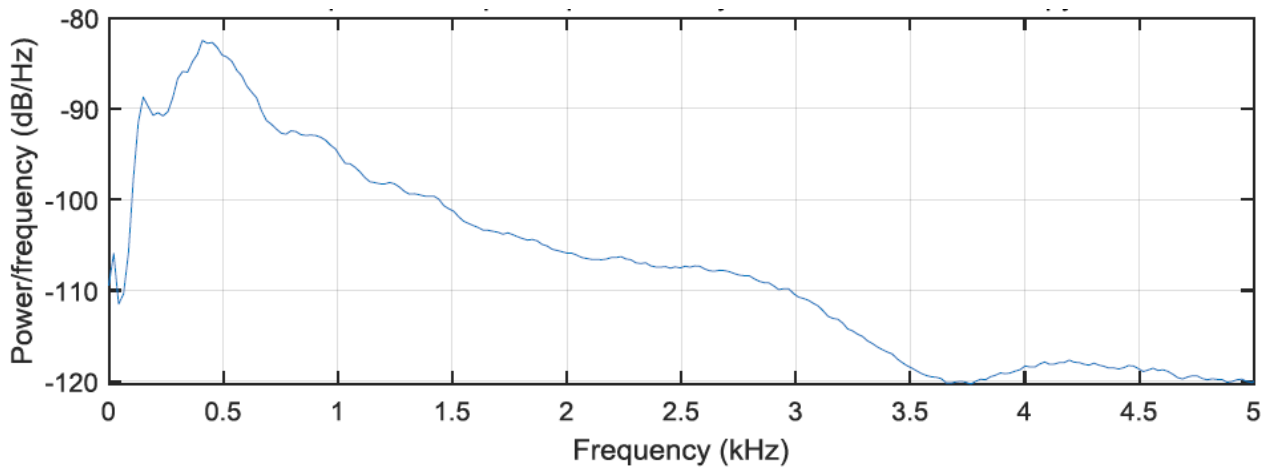


Рисунок 3.5 - Усереднена періодограма для вулика №4 під час медозбору

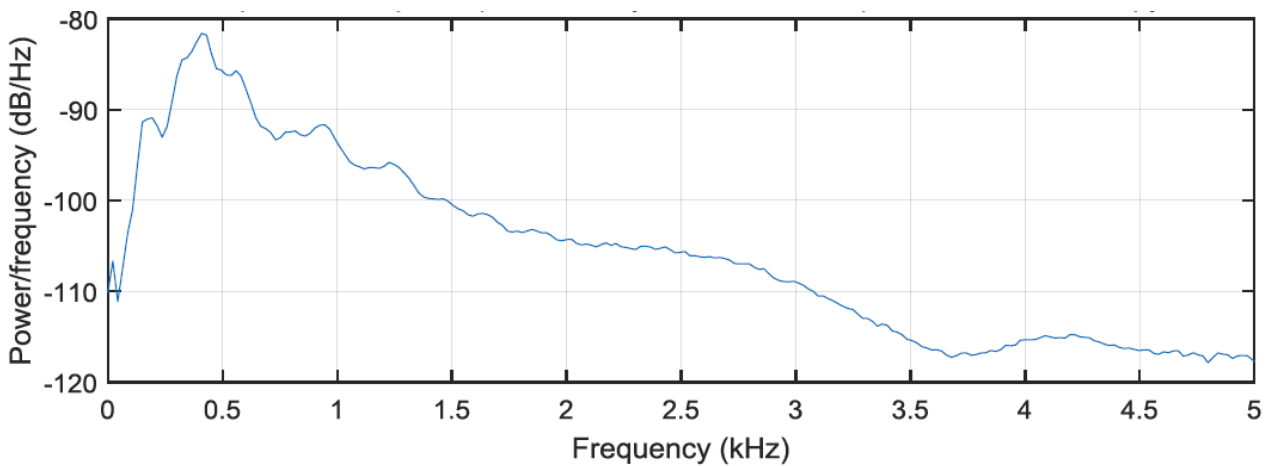


Рисунок 3.6 - Усереднена періодограма для вулика №4 під час припинення медозбору

Як видно з вищевказаних усереднених періодограм, максимуми оцінки густини потужності знаходяться на відносно однакових частотах, незалежно від класифікаційного стану колоній. Максимуми оцінки густини потужності що відслідковуються на зображеннях всіх періодограм, для кожного з вуликів

здебільшого повторюються. Також слід вказати що інформативний частотний діапазон можна скоротити до 1.5кГц.

Отримані для кожного з вуликів усереднені періодограми були знову усереднені, щоб отримати дві періодограми для різних класифікаційних станів.

Отримані періодограми зображені на рисунку 3.7 і рис.3.8.

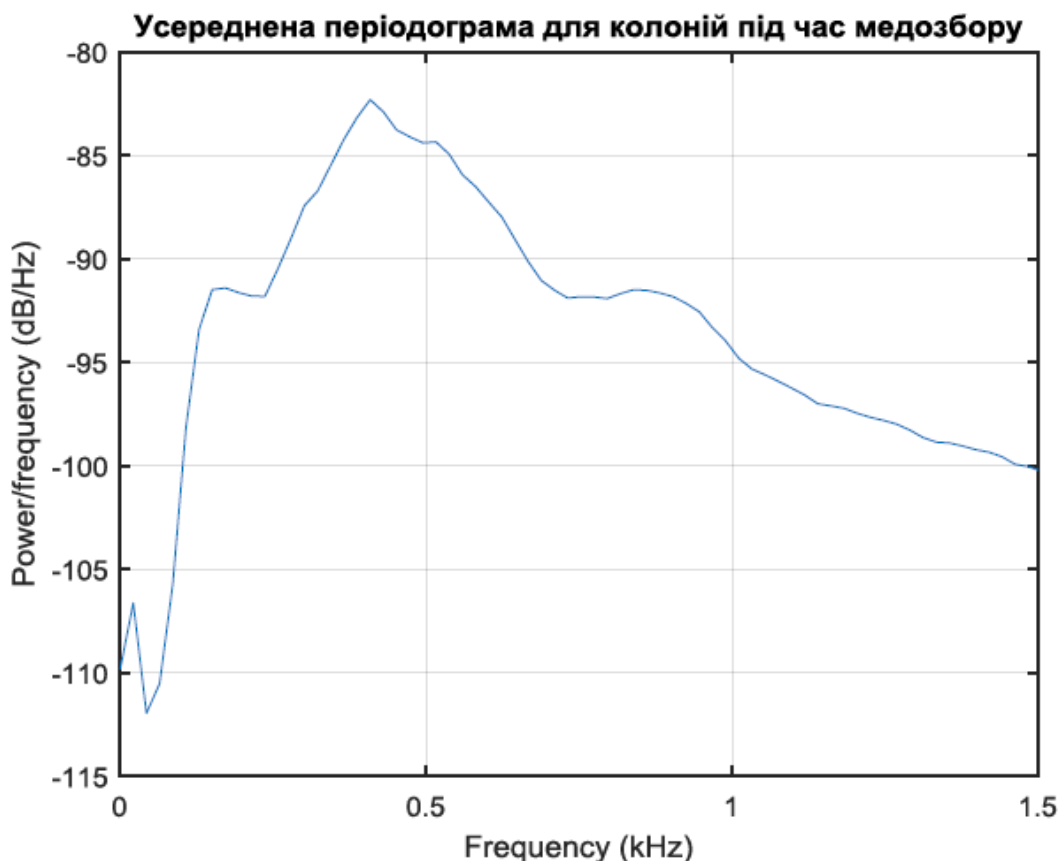


Рисунок 3.7 - Усереднена періодограма для усіх вуликів під час медозбору

Розглянувши рисунок 3.7 і 3.8 помітно що періодограми для даних двох класифікаційних станів відрізняються тільки тим, що на усередненій періодограмі, отриманій під час повного припинення медозбору, більш чітко виражений максимум оцінки густини потужності на частоті 200Гц. Слід зазначити що на обох періодограмах для даних класифікаційних станів присутній максимум оцінки густини потужності на частоті 400Гц.

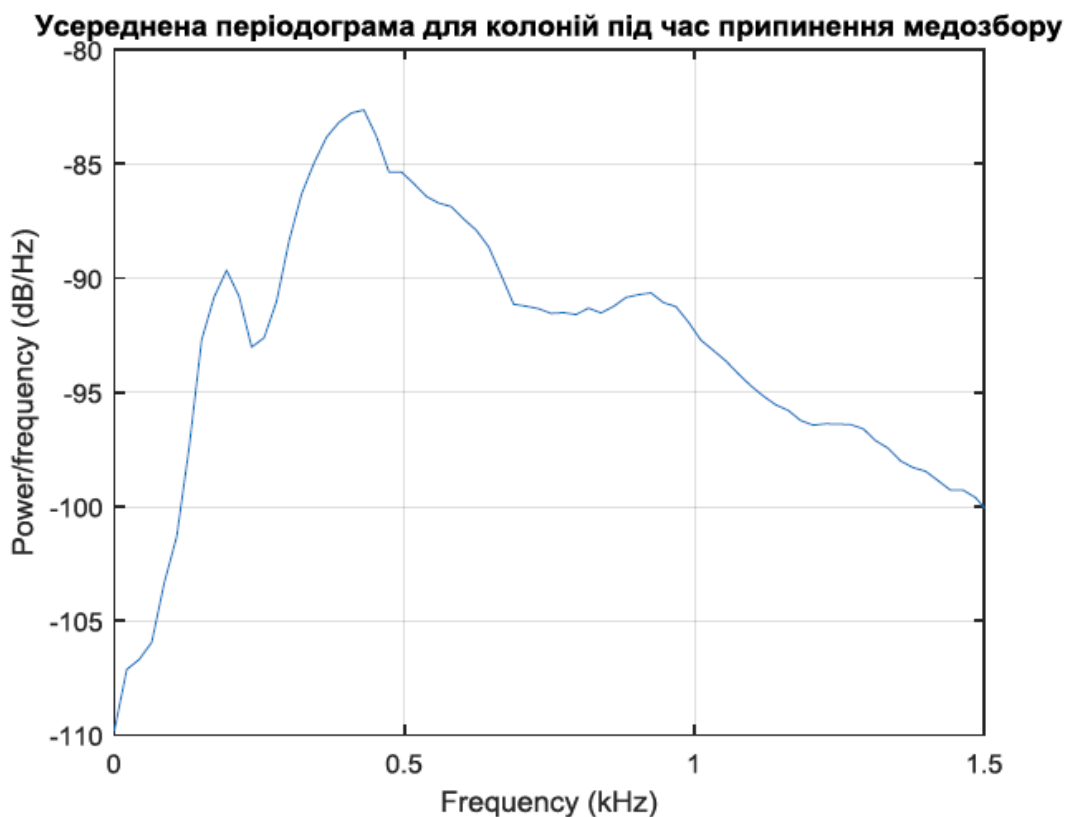


Рисунок 3.8 - Усереднена періодограма для усіх вуликів під час відсутності медозбору

Для обробки даних, отриманих у результаті експерименту було використано нерекурсивні смугові третьоктавні фільтри Чебишева другого роду. Одинадцять фільтрів, які діяли в діапазоні частот від 125 до 1250Гц. Порядок фільтрів становив 5000, що дозволило реалізувати амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) фільтрів практично прямокутної форми із низьким рівнем бокових пелюсток. З кожного запису, отриманого в результаті першого експерименту, було отримано одинадцять відфільтрованих сигналів. Було визначено середній рівень звукового тиску кожного з відфільтрованих сигналів.

Отримані значення рівнів звукового тиску були усереднені по смугам пропускання. Отримані для кожного з вуликів усереднені розподіли були знову усереднені (рисунок 3.9), щоб отримати два зображення розподілу рівнів звукового тиску по смугам пропускання для різних класифікаційних станів.

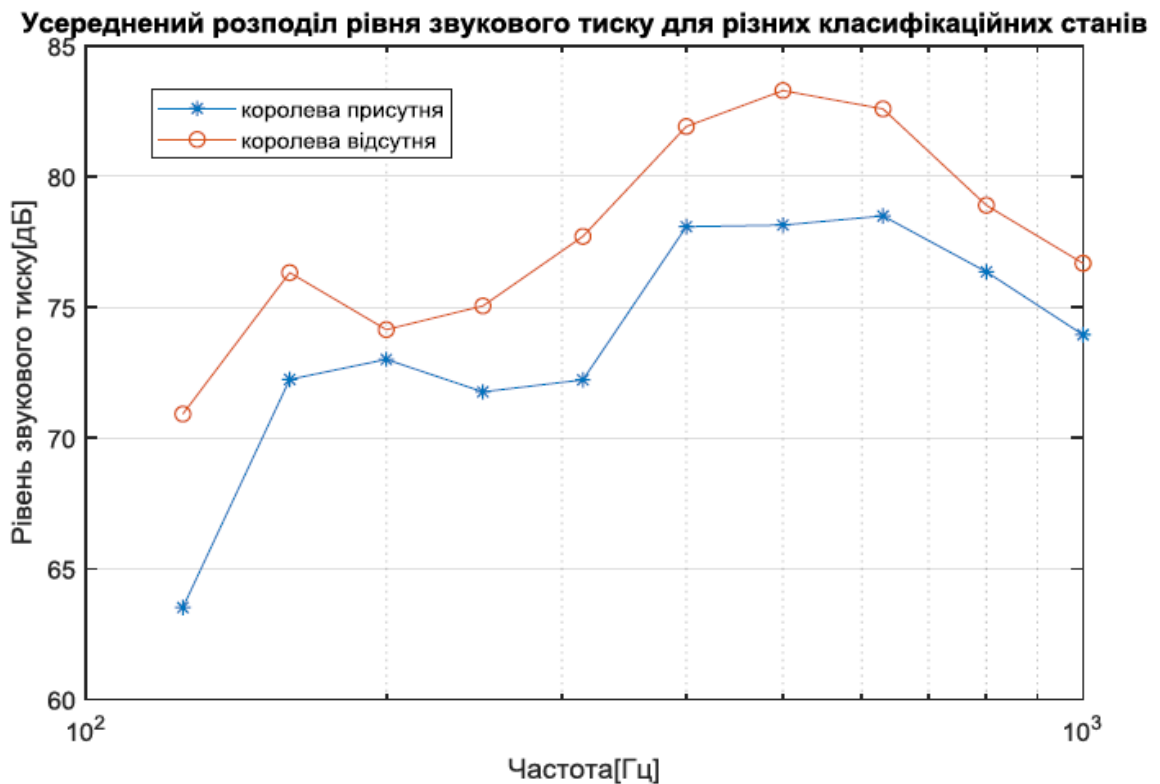


Рисунок 3.9 - Усереднений розподіл рівня звукового тиску відносно 1/3 октавних частотних смуг для двох класифікаційних станів

Розглянувши рисунок 3.9 помітно, що розподіл рівнів звукового тиску для двох класифікаційних станів відрізняються тим, що на усередненому розподілі отриманому в ситуації з відсутньою у колонії королевою, локальний максимум рівня звукового тиску знаходиться на частоті 160Гц, а в ситуації з присутньою королевою максимум зміщується на частоту 200Гц. Також в ситуації з відсутньою королевою, локальний максимум присутній на частоті 500Гц, на відміну від ситуації коли королева була присутня в колонії. Слід зазначити що усереднений розподіл в ситуації з відсутньою у колонії королевою має вищий рівень звукового тиску на всіх 1/3 октавних частотних смугах, відносно іншого класу. Отримані спектральні характеристики узгоджуються з результатами досліджень С. Фераррі, Д. Сілва і М. Гуаріно [9].

Аналогічну обробку даних було проведено для інших кваліфікаційних станів, рис. 3.10.

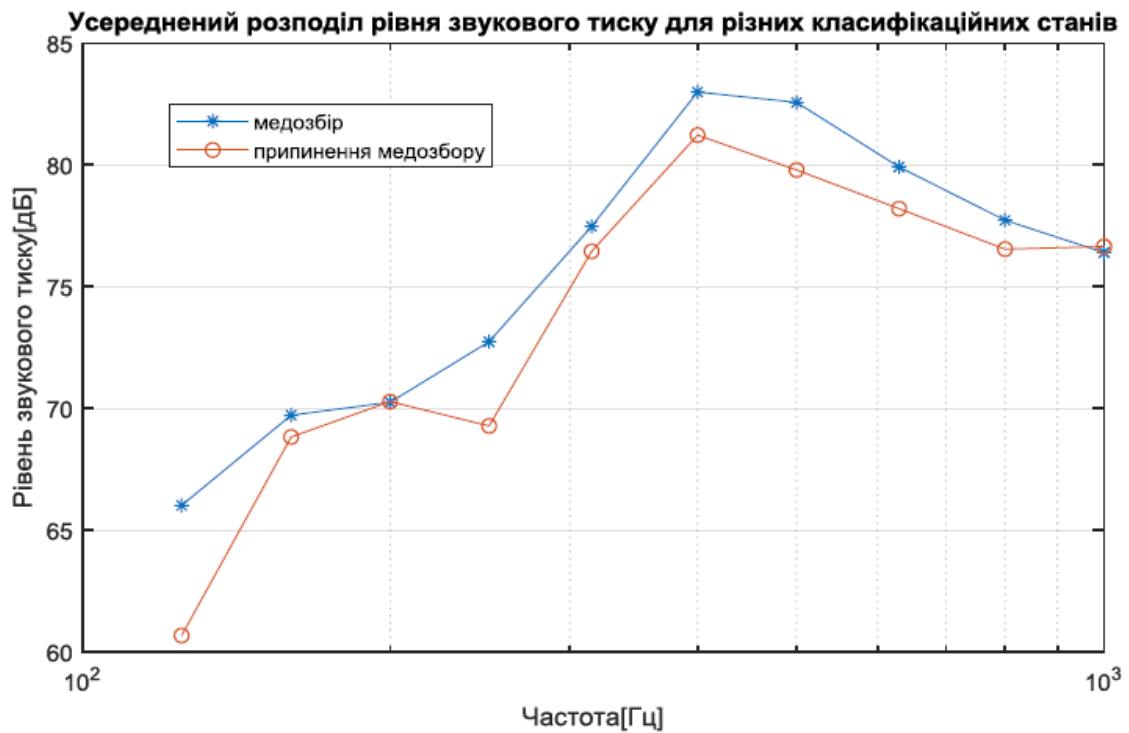


Рисунок 3.10 – Усереднений розподіл рівня звукового тиску відносно 1/3 октавних частотних смуг для двох класифікаційних станів

Розглянувши розподіл рівнів звукового тиску для двох класифікаційних станів на рисунку 3.10 слід зазначити, що міжкласові розподіли відрізняються тільки тим, що на усередненому розподілі, отриманому під час медозбору, рівень звукового тиску на всіх 1/3 октавних частотних смугах, не набагато вищий відносно іншого класу. Локальний максимум рівня звукового тиску, що знаходиться частоті 400Гц, присутній для обох класифікаційних станів.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

KPM.AКСм-27.00.00.000ПЗ

Арк.

48

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі мною було здійснено розробку алгоритмічного і програмного забезпечення для системи моніторингу біологічних параметрів бджолоїної сім'ї, що базується на використанні AVR-мікроконтролера, проведено тестові випробування із записами типових станів бджолоїної сім'ї для оцінки ефективності її роботи.

Розробка алгоритму роботи моніторингової системи було здійснена з використанням інформації і параметрів діючого об'єкту, – бджолоїного вулику. Це дозволило максимально наблизити відладку алгоритмів до реальних умов експлуатації.

Розроблені алгоритми дозволяють здійснювати моніторинг вологості, температури та ваги – це в результаті допомагає виконувати оперативний контроль за умовами клімату бджолоїної сім'ї під час зимівлі а також під час медозбору. Моніторинг цих параметрів дозволяє пасічнику реагувати на відхилення, що дає можливість ліквідації негативних ситуацій але і збільшення продуктивності сім'ї.

Спектроаналіз звукового шуму вулика дозволяє з високою ймовірністю визначити біологічний стан бджолоїної сім'ї. Це створює особливу перевагу даної моніторингової системи серед інших аналогів і робить її більш функціональною і максимально корисною для оператора-пасічника.

					<i>KPM.AKCM-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						49
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Wikipedia. Бджолина сім'я – Режим доступу:  
URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B4%D0%B6%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0\\_%D1%81%D1%96%D0%BC%27%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B4%D0%B6%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D1%81%D1%96%D0%BC%27%D1%8F) (дата звернення: 20.05.2024)
2. Бджолина сім'я, біологія – Режим доступу:  
URL: <https://buklib.net/books/34296/> (дата звернення: 21.05.2024)
3. Розумна пасіка – Режим доступу:  
URL: <https://www.i-bee.net/> (дата звернення: 20.05.2024)
4. ApisProtect – Режим доступу:  
URL: <https://www.eu-startups.com/directory/apisprotect/> (дата звернення: 20.05.2024)
5. Пасіка онлайн – Режим доступу:  
URL: <https://www.pasonline.net/> (дата звернення: 10.05.2024)
6. Honeybee varroa vibration and ccd. – Режим доступу:  
URL: <http://modernsurvivalblog.com/natural-disasters/the-honeybeevarroa-vibration-and-ccd/> (дата звернення: 10.05.2024)
7. Camazine, S., Visscher, P.K., 1999. House haunting by honey bee swarms: collective decisions and individual behaviour. *Insects Soc.* 46, 348–360.
8. D. Sammataro, U. Gerson, and G. Needham, “Parasitic mites of honey bees: life history, implications, and impact,” *Annual review of entomology*, vol. 45, no. 1, pp. 519–548, 2000.
9. E. F. Woods, Electronic Prediction of Swarming in Bees // *NATURE*, Sep. 19, 1959, vol. 184, P. 842-844.
10. JINDRA J. Využití akustické technologie pro vyhodnocování stavu včelstev. [http://jjvcela.sweb.cz/Poslouchame\\_vcely.html](http://jjvcela.sweb.cz/Poslouchame_vcely.html), 2016.

					<b>КРМ.АКСМ-27.00.00.000ПЗ</b>	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

11. D. G. Dietlein, A Method for Remote Monitoring of Activity of Honeybee Colonies by Sound Analysis, Journal of Apicultural Research, 24:3, 176-183, 1985. DOI:10.1080/00218839.1985.11100668

12. Єськов Е.К. Структура звукового фону бджолоїної сім'ї // Зоол. журн. 1972. Т. 51, № 7. С. 1018-1024.

13. Ferrari S. Monitoring of swarming sounds for early detection of the swarming period / S. Ferrari, D. Silva, M. Guarino, D. Berckmans // Computers and Electronics in Agriculture. 2008. Vol. 64. P. 72-77.

14. S. Butterworth. On the Theory of Filter Amplifiers // Wireless Engineer, vol. 7, 1930, pp. 536–541

					<i>КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## 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.

					КРМ.АКСм-27.00.00.000ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## 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;

/*
```

```

* 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_HIIVLEN_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 енодера
    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);
}

```

```

    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"

```

```

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

```

```

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) {

```

```

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, Передроевий, Роіння, 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",
    "Передроевий стан",
    "Роіння",
    "Перегрів"
};

/*****
 * 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)

```

```

((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: широкопугмовий "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));

// Передровервий: 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 < 0.0001 || std_y < 0.0001) {
        return 0.0;
    }

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

```

```

/*****
 * 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 > 5.0) {
            weight = 1.25; // +25%
        } else if (co2 > 4.0) {
            weight = 1.15; // +15%
        }
    }

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

    // Зменшення ваги для норми при високому CO2
    if (state_index == 0) { // Норма
        if (co2 > 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) {

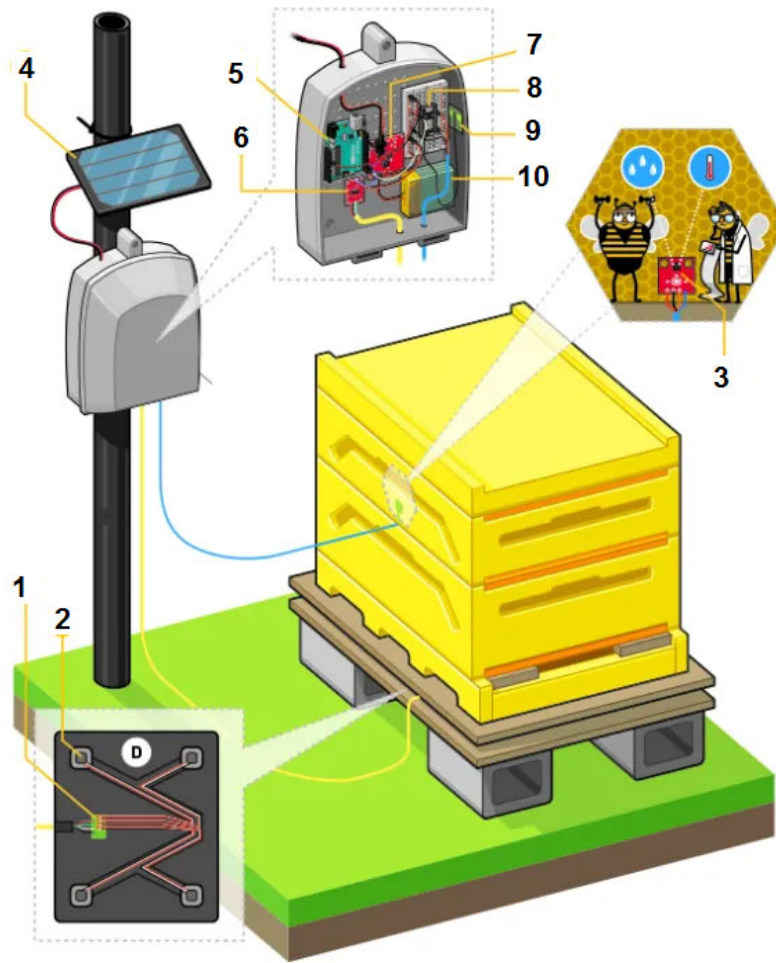
```

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

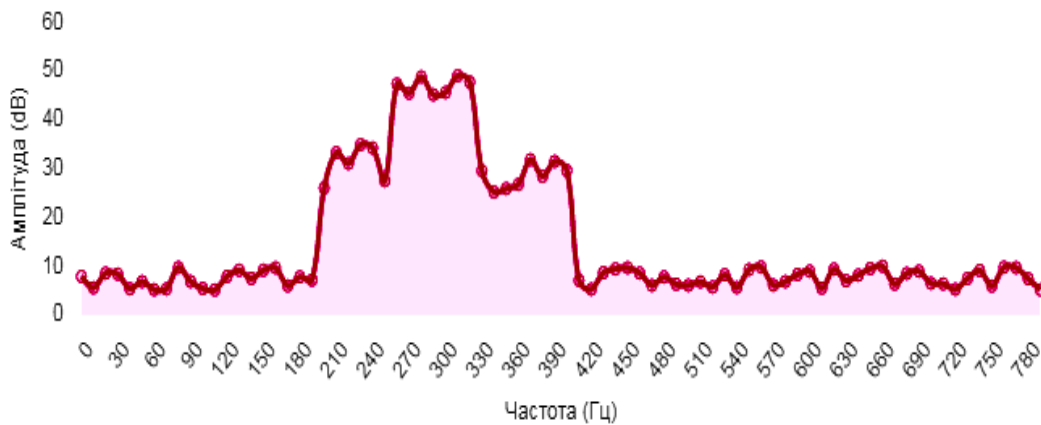
// Формування результату
if (max_correlation > 0.85) {
    sprintf(current_state, "%s (r=%.2f)",
            state_names[max_index], max_correlation);
} else {
    sprintf(current_state, "Невизначений (r=%.2f)", max_correlation);
}
}
```



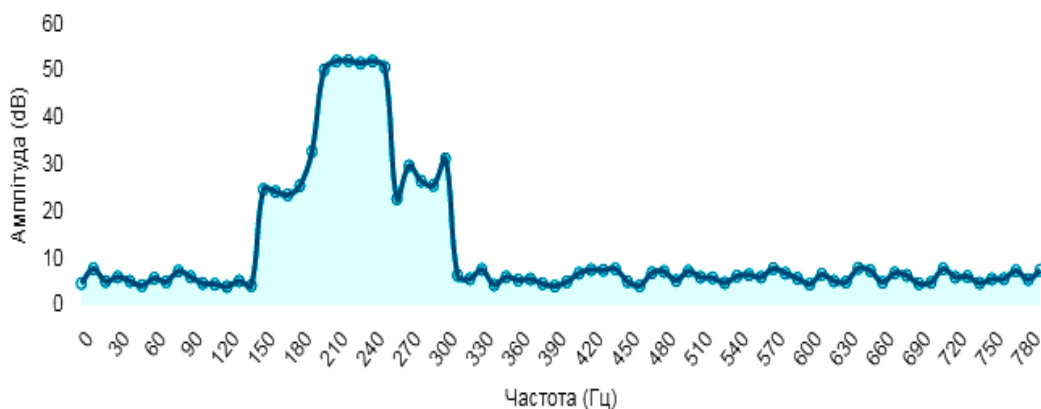
					КРМ.АКСм-27.00.00.000 Е1			
					<i>Розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл Схема структурна</i>	Літ.	Маса	Масштаб
						Н		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Аркуш	1	Аркушів
Розроб.	Яремко							
Перевір.	Левицький							
Т.контр.								
Реценз.								
Н.контр.	Возний				<b>ІФНТУНГ АКСм-24-1</b>			
Затв.	Заміховський							



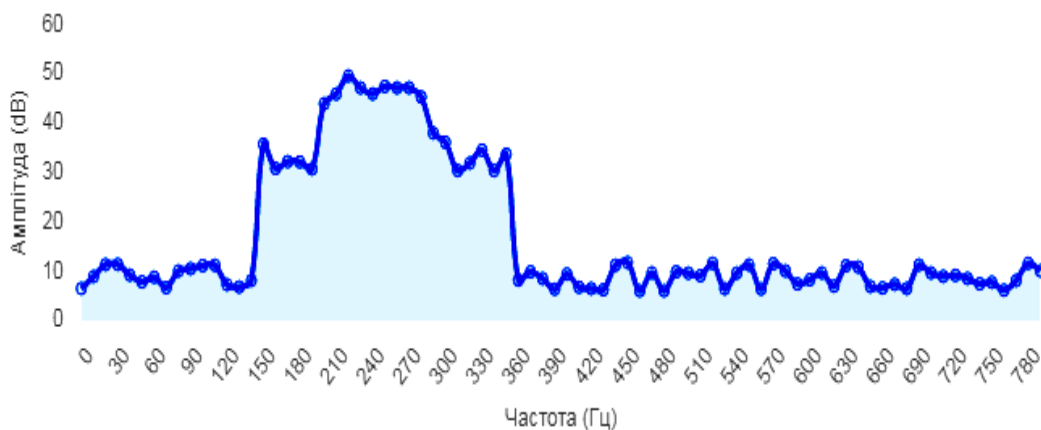
					KPM.AKCM-27.00.00.000 E2		
					<i>Розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл</i>		
					<i>Схема функціональна</i>		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.	Яремко				Н		
Перевір.	Левицький						
Т.контр.					Аркуш 1	Аркушів	
Реценз.					ІФНТУНГ		
Н.контр.	Возний				AKCM-24-1		
Затв.	Заміховський						



Частотний спектр нормальної бджолоїної сім'ї (пік 260-320 Гц)



Частотний спектр безматочної колонії (пік 200-250 Гц)

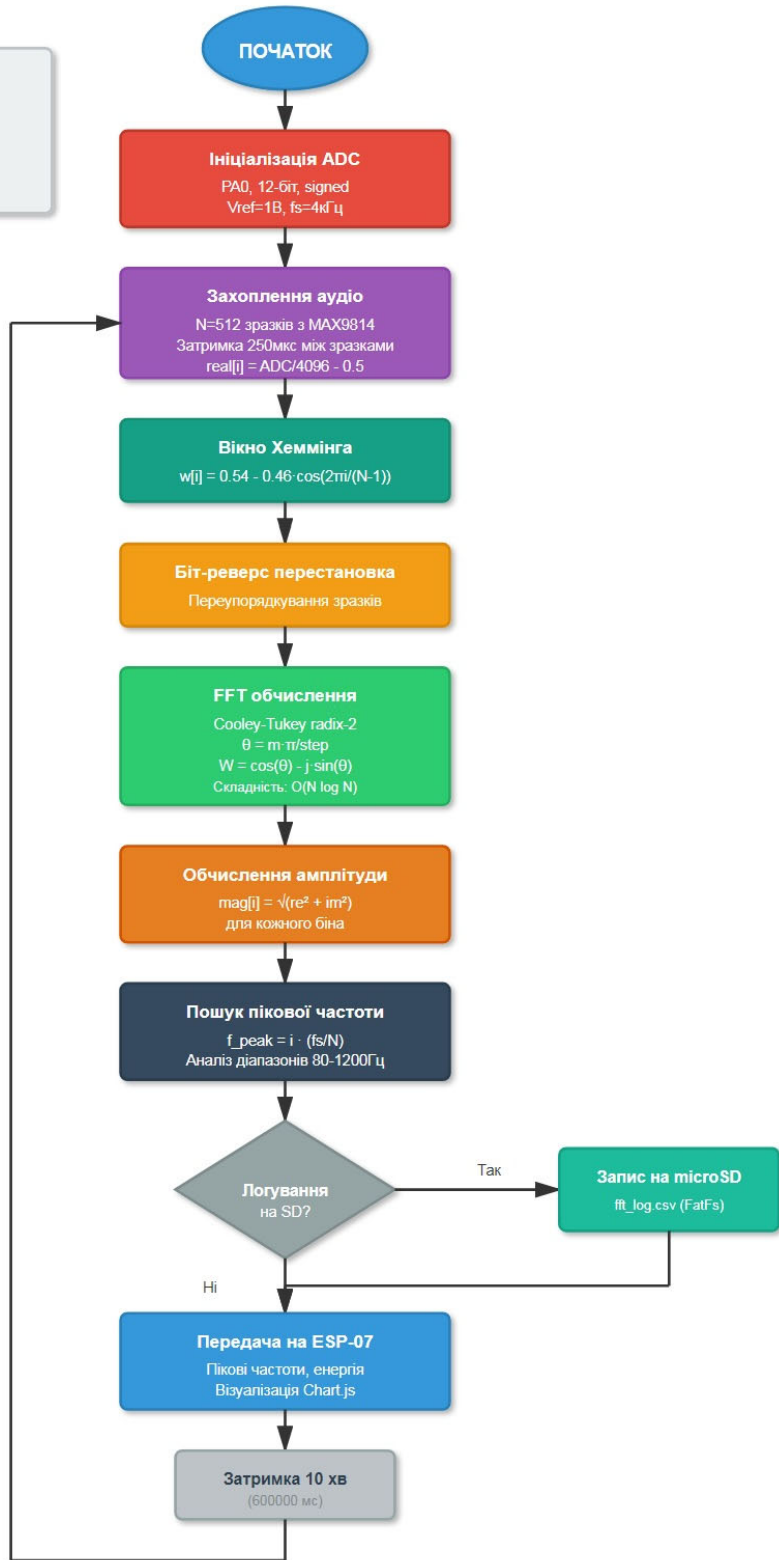


Частотний спектр передроєвого стану (підвищення 200-280 Гц)

					КРМ.АКСм-27.00.00.001		
					<i>Розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл</i>		
					<i>Графіки еталонів</i>		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Літ.	Маса	Масштаб
					Н		
Розроб.		Яремко			Аркуш 1		Аркушів
Перевір.		Левицький			<b>ІФНТУНГ</b> <b>АКСм-24-1</b>		
Т.контр.							
Реценз.							
Н.контр.		Возний					
Затв.		Заміховський					

**Параметри:**

- N = 512 точок
- fs = 4 кГц
- Час: ≤50 мс
- RAM: 16 КБ
- Точність: ≥97%
- 32 МГц тактова



					<b>KPM.AКСм-27.00.00.002</b>			
					<i>Розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл</i>			
					<i>Алгоритм</i>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Літ.	Маса	Масштаб	
					Н			
Розроб.		Яремко						
Перевір.		Левицький						
Т.контр.					Аркуш	1	Аркушів	
Реценз.					<b>ІФНТУНГ</b>			
Н.контр.		Возний			<b>АКСм-24-1</b>			
Затв.		Заміховський						

Стан колонії	Всього зразків	Правильно ідентифіковано		Помилково ідентифіковано		Accuracy, %	Precision, %	Recall, %	F1-score
		Кількість	%	Кількість	%				
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
Передроєвий 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
<b>Загалом</b>	<b>250</b>	<b>232</b>	<b>92.8</b>	<b>18</b>	<b>7.2</b>	<b>92.8</b>	<b>93.2</b>	<b>92.8</b>	<b>0.930</b>

					КРМ.АКСМ-27.00.00.003			
					<i>Розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення системи контролю життєвих параметрів колонії медоносних бджіл Результати тестування</i>	Літ.	Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Н		
Розроб.	Яремко							
Перевір.	Левицький							
Т.контр.						Аркуш 1	Аркушів	
Реценз.						<b>ІФНТУНГ АКСМ-24-1</b>		
Н.контр.	Возний							
Затв.	Заміховський							