

ВАСИЛЬ ЧИГІНЬ

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0003-1593-6832>e-mail: [vchygin@gmail.com](mailto:vchygin@gmail.com)

ФРОЛОВА АНАСТАСІЯ

Національний університет "Львівська політехніка"

## СИСТЕМА ОПАЦЮВАННЯ МНОЖИНИ СЕНСОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ ТИПУ RASPBERRY PI PICO

Дослідили альтернативні методи отримання та аналізу множинних сигналів від різних джерел, провели огляд літератури у відповідних областях. Зокрема, проаналізовано розширювальну плату типу ReSpeaker 6-Mic Circular Array Kit на основі мінікомп'ютера типу Raspberry Pi, яка оснащена шістьма мікрофонами і призначена для застосувань у сфері штучного інтелекту та голосових інтерфейсів. Показано, що плата ReSpeaker має обмежене застосування, вона призначена для стаціонарного використання з обмеженою масштабованістю. У даній роботі автори створили і випробували експериментальну електронну систему опрацювання сигналів від дванадцяти сенсорів за допомогою чотирьох мікроконтролерів типу Raspberry Pi Pico, а також програмного забезпечення, складеного з використанням мови мікропайтон, що дозволяє значно розширити сферу її застосування. У ролі високочутливих сенсорів використано конденсаторні мікрофони в комплекті з посилювачами типу модулів KY-037. Конвертація аналогового сигналу у цифровий та первинне його опрацювання відбувається за допомогою мікроконтролерів Pico для реалізації високоточних вбудованих систем. Для забезпечення обміну даними між мікроконтролерами і центральним вузлом та периферійними пристроями використали односторонню шину послідовного зв'язку I2C, яка забезпечує синхронну, багатоконтролерну мережеву комунікацію. Її використання зв'язане із заданням короткої відстанні між платами, порядку десятків сантиметрів. Основні функції мікроконтролерів - аналогово-цифрове перетворення сигналів на виході з посилювачів, обчислення усередненої інтенсивності сигналів із кожного мікрофона, порівняння усереднених сигналів для виявлення максимальної інтенсивності, формування і передавання даних у буфер або центральний вузол. Ефективність виконання експериментальної системи перевірили за допомогою складених програмних засобів, які забезпечують опрацювання звукових сигналів у реальному часі. Завдяки вдало обраним апаратним і програмним компонентам створено прототип системи, здатний ефективно працювати у польових умовах.

Ключові слова: електронна система, мікроконтролер, мікропайтон, конденсаторний мікрофон, шина послідовного зв'язку I2C

VASYL CHYHIN, FROLOVA ANASTASIIA

National University "Lviv Polytechnic"

### MULTIPLE SENSOR MEASUREMENT SYSTEM USING RASPBERRY PI PICO MICROCONTROLLERS

There were investigated alternative methods for receiving and analyzing multiple signals from different sources, and conducted a literature review in relevant areas. In particular, we analyzed an expansion board of the ReSpeaker 6-Mic Circular Array Kit type based on a Raspberry Pi minicomputer, which is equipped with six microphones and is intended for applications in the field of artificial intelligence and voice interfaces. It is shown that the ReSpeaker board has limited application, it is intended for stationary use with limited scalability. In this work, the authors created and tested an experimental electronic system for processing signals from twelve sensors using four Raspberry Pi Pico microcontrollers, as well as software compiled using the micropython language, which allows us to significantly expand the scope of its application. Condenser microphones complete with amplifiers of the KY-037 module type were used as highly sensitive sensors. The conversion of an analog signal into a digital one and its primary processing is carried out using Pico microcontrollers for the implementation of high-precision embedded systems. To ensure data exchange between microcontrollers and the central node and peripheral devices, a one-way I2C serial bus was used, which provides synchronous, multi-controller network communication. Its use is associated with setting a short distance between the boards, on the order of tens of centimeters. The main functions of microcontrollers are analog-to-digital conversion of signals at the output of amplifiers, calculation of the average intensity of signals from each microphone, comparison of averaged signals to detect the maximum intensity, formation and transmission of data to a buffer or central node. The effectiveness of the experimental system was checked using compiled software tools that provide real-time processing of sound signals. Thanks to the successfully selected hardware and software components, a prototype of the system was created, capable of operating effectively in field conditions.

Keywords: electronic system, microcontroller, micropython, condenser microphone, I2C serial communication bus

### Постановка проблеми

Актуальність виконання даної роботи виникла через необхідність створення системи колового чи циклічного опрацювання сигналів від багатьох сенсорів, типу камер, мікрофонів і т.п., наприклад, для точного вимірювання координат джерела будь-яких хвиль, в тому числі, радіо-, світлових, звукових і підвищення ефективності систем спостереження і т.п.

Звукові системи, що базуються на акустичному аналізі, є перспективним рішенням завдяки здатності розпізнавати об'єкти без візуального контакту. У ряді робіт авторів [1-3] розглядалася можливість створення експериментальної комплексної автоматизованої системи пасивного виявлення об'єктів (зародків пожеж і т.п.), їх фотозахоплення і визначення координат. Досліджувались процеси виявлення і вимірювання GPS-координат рухомих об'єктів стаціонарними звуковим і фото-засобами з використанням дороговартісних електронних та обчислювальних пристроїв. При цьому не розглядалося питання виготовлення швидкісних систем колового захоплення та аналізу сигналів від множини сенсорів. На наш погляд, використання саме

таких систем дозволило би підвищити точність обчислення координат джерел будь-яких сигналів у просторі, а також спростити і пришвидшити процедуру опрацювання сигналів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

З метою вивчення альтернативних методів отримання та аналізу множинних сигналів від різних джерел, провели огляд літератури у відповідних областях. Зокрема, проаналізовано розширювальну плату типу ReSpeaker 6-Mic Circular Array Kit [4] - це розширювальна плата (HAT) на основі мінікомп'ютера типу Raspberry Pi, яка оснащена шістьма мікрофонами і призначена для застосувань у сфері штучного інтелекту та голосових інтерфейсів. Вона дозволяє створювати голосові продукти, інтегруючи сервіси типу Amazon Alexa або Google Assistant. Основними компонентами є два аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП), один цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Плата дозволяє підтримувати 8 вхідних і 8 вихідних каналів, вона є сумісна із 40-контактними роз'ємами мінікомп'ютера Raspberry Pi. Основні характеристики плати ReSpeaker 6-Mic Circular Array Kit: вона орієнтована на голосові інтерфейси та взаємодію з голосовими помічниками; система базується на повноцінних мінікомп'ютерах типу Raspberry Pi, що дозволяє підвищене енергоспоживання та збільшення габаритів; ReSpeaker здебільшого зосереджується на опрацюванні голосових команд і шумогасінні (зниженні впливу сторонніх шумів на якість звучання в навушниках); розширювальна плата ReSpeaker призначена для стаціонарного використання з обмеженою масштабованістю.

У статті [5] "Відстеження дикої природи в режимі реального часу за допомогою рішень IoT в динамічній екології" автори аналізують сучасний стан застосування систем комплексної інтеграції апаратного, програмного забезпечення та технологій для безперебійного спілкування та обміну даними між розумними пристроями (IoT) для моніторингу дикої природи, наводячи приклади практичного впровадження таких систем. Зокрема, вивчається питання використання GPS нашийників, а також оптичних систем підводного спостереження за природою, підсумовуючи їхню безпеку та вплив на навколишнє середовище.

У статті [6] автори досліджують біоакустичне відстеження та локалізацію за допомогою гетерогенних масштабованих масивів мікрофонів. При цьому мікрофонні решітки складаються з 64-ох щільно розміщених мікрофонів. До переваг таких систем автори відносять те, що вони найменш інвазивні, на відміну від GPS нашийників, які можуть впливати на поведінку тварин. Підкреслюється, що мікрофонні решітки мають ще й ту перевагу, що можуть детектувати тварин без необхідності їх попереднього відлову. Авторами за допомогою трьох мікрофонних решіток та методу різниці в часі прибуття змогли локалізувати кілька видів співочих птахів у радіусі 75 метрів, а також дослідити властивості акустичних хвиль, що їх використовують летючі миші для ехолокації. Для створення такої системи використовувався доволі потужний персональний комп'ютер з процесором Intel Core i5 та 32 ГБ оперативної пам'яті. Програмне забезпечення написано мовою Python3. Хоча в статті згадується, що їхня архітектура може підлаштовуватись і під менш потужні комп'ютери, але прикладів такого застосування не наведено.

У наших попередніх роботах [2,3,7] при вимірюваннях звукових сигналів використовувалися зовнішні звукові карти. Зокрема, звукова карта **Alesis IO-4** [8] використовувалася для отримання звукових даних з 4 мікрофонів. Кожен звуковий канал включає підсилювач із фантомним живленням, що дозволяє прислухуватися конденсаторні мікрофони без додаткових контролерів. Ця звукова карта підтримує USB-інтерфейс для передачі даних у буфер комп'ютера. Використовується програмне забезпечення, яке спрощує налаштування та забезпечує стабільність роботи пристрою. Проте, звукова карта **Alesis iO4 обмежена** 4 каналами, що ускладнює використання у багатоканальних системах. До недоліків також відносяться зайві для пропонованої нами системи підсистеми типу аудіо опрацювання, під'єднання різних музикальних пристроїв і т.п, що в сукупності, суттєво збільшують габарити системи та її вартість.

В літературі є досить широкий вибір в області можливого використання різного типу мікроконтролерів та їх параметрів. Так, мікроконтролер типу Raspberry Pi Pico [9] створили на основі мікроконтролера RP2040, який забезпечує досить високу продуктивність завдяки двоядерній 32-бітній RISC архітектурі процесорів типу Cortex-M0+ із тактовою частотою до 133 МГц. Він оснащений *інтерфейсом для зв'язку між компонентами комп'ютерної системи, зокрема, 26 GPIO-пінами*. Має 3 аналогово-цифрові перетворювачі із 12-бітною роздільною здатністю та підтримує інтерфейс зв'язку типу I2C. Мікроконтролер Raspberry Pi Pico має *статичну оперативну пам'ять з довільним доступом (SRAM) розміром 264 КБ* і підтримує до 16 МБ флеш-пам'яті. Це дозволяє працювати з досить великими обсягами даних і складними алгоритмами, зокрема, перетвореннями звукового розкладу Фур'є. Його невеликі розміри (51x21 мм), низьке енергоспоживання (140 мА) та низька вартість дозволяє віднести його до оптимального варіанту для багатоканальних задач у реальному часі. Мікроконтролер Arduino Nano [10] базується на системі ATmega328 із тактовою частотою 16 МГц, що робить його ефективним для вирішення нескладних задач. Він забезпечений 8 аналоговими входами та інтерфейсом зв'язку типу I2C. Має 32 КБ флеш-пам'яті і досить низький об'єм *оперативної пам'яті SRAM* (2 КБ). Ці параметри, у порівнянні з відповідними параметрами Raspberry Pi Pico, не дозволяють використовувати Arduino Nano для вирішення складніших задач. Мікроконтролер ESP32 [11] є близьким до мікроконтролера Raspberry Pi Pico за основними параметрами. Проте, не дивлячись на його потужніший процесор (Tensilica LX6 з тактовою частотою до 240 МГц), та більшу оперативну пам'ять (520 КБ), енергоспоживання ESP32 становить понад 20 мА, що не є задовільним для виконання задач у польових умовах.

Враховуючи викладене, для створення експериментальної системи опрацювання множини сенсорів за допомогою мікроконтролерів обрано мікроконтролер типу Raspberry Pi Pico. Його двоядерний процесор і три

АЦП із 12-бітною роздільною здатністю повинні забезпечити швидке опрацювання масштабованих масивів сенсорів в реальному часі. Низьке енергоспоживання і малі габарити мікроконтролера Raspberry Pi Pico є оптимальними параметрами для створення компактної і функціональної системи одночасного опрацювання множини різного типу сигналів.

**Постановка задачі.** Метою дослідження є створення, відлагодження і дослідження експериментальної системи, що включає програмно-апаратний комплекс для опрацювання множини сенсорів за допомогою мікроконтролерів типу Raspberry Pi Pico та створення програмного забезпечення з використанням мови MicroPython. У ролі джерел сигналів використовуються різного типу джерела звуків, а в ролі сенсорів – чотири мікрофони з посилювачами типу модулів MAX9814. Система використовує у ролі тестових два мікропроцесори Raspberry Pi Pico для дослідження і встановлення оптимальної структури за допомогою шини послідовного зв'язку I2C. Конвертація аналогового сигналу у цифровий та первинне опрацювання інтенсивностей відбувається мікроконтролерами. Програма, обчислює і порівнює усереднені інтенсивності звуків кожного мікрофона, під'єданого до Raspberry Pi Pico, а також, встановлює I2C взаємодію між мікроконтролерами. Основними вимогами до програми є простота встановлення, масштабованість та можливість легкого використання кінцевими користувачами, а також невимогливість до ресурсів через специфіку обраних мікропроцесорів типу Raspberry Pi Pico.

## Виклад основного матеріалу

### 1. Експериментальна частина

**Методика досліджень.** Для експериментальної досліджень створили систему з коловим опитуванням сенсорів, що включає мікроконтролер Raspberry Pi Pico для захоплення даних із сенсорів – мікрофонів KY-037, алгоритми опитування АЦП, та комунікації між двома мікроконтролерами за допомогою протоколу I2C, а також програмне забезпечення для візуалізації результатів.

**Експериментальна схема і макет.** На схемі з'єднання системи (Рис.1) живлення мікроконтролерів відбувається за допомогою USB-A кабелів, а мікрофонів – ізольованих дротів, які під'єднані до акумулятора 5 Вольт. Комунікація по I2C шині з під'єднанням резисторів 4.7 кОм з підтягуванням до живлення 3 Вольт.

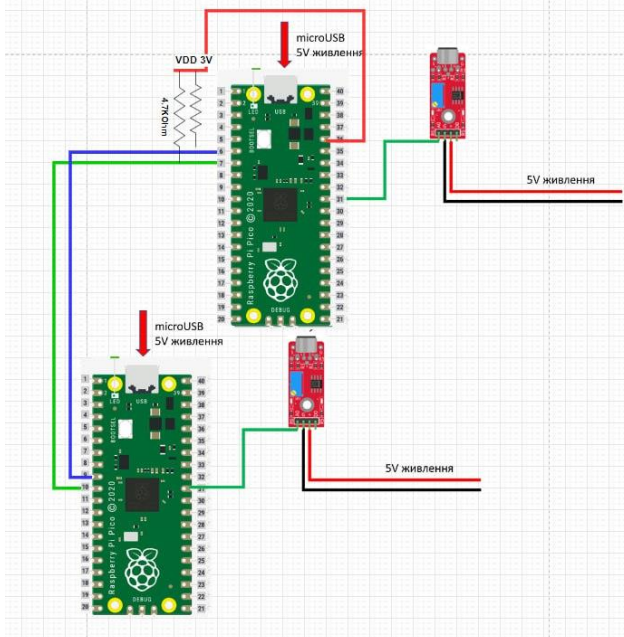


Рис.1. Схема з'єднання компонентів системи

Прототип системи, представлений на схемі Рис.1, зібраний на макетній платі, яка дозволяє без пайки створити функціональну схему для тестування (Рис.2).

Основною системою є два мікроконтролери Raspberry Pi Pico, які працюють у зв'язці — один як головний вузол (Master), інший як підпорядкований (Slave).

Вони забезпечують виконання основних функцій системи, включаючи опрацювання даних та обмін інформацією. Для під'єднання мікроконтролерів використали з'єднувальні дроти. Вони забезпечують передавання сигналів між GPIO-пінами (інтерфейсами вводу-виводу) обох пристроїв.

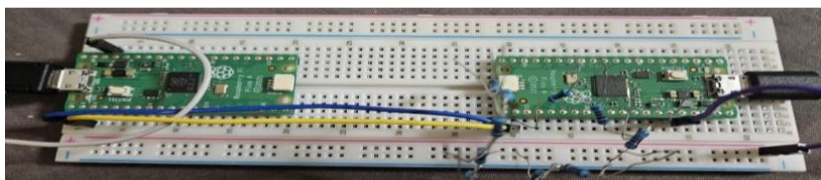


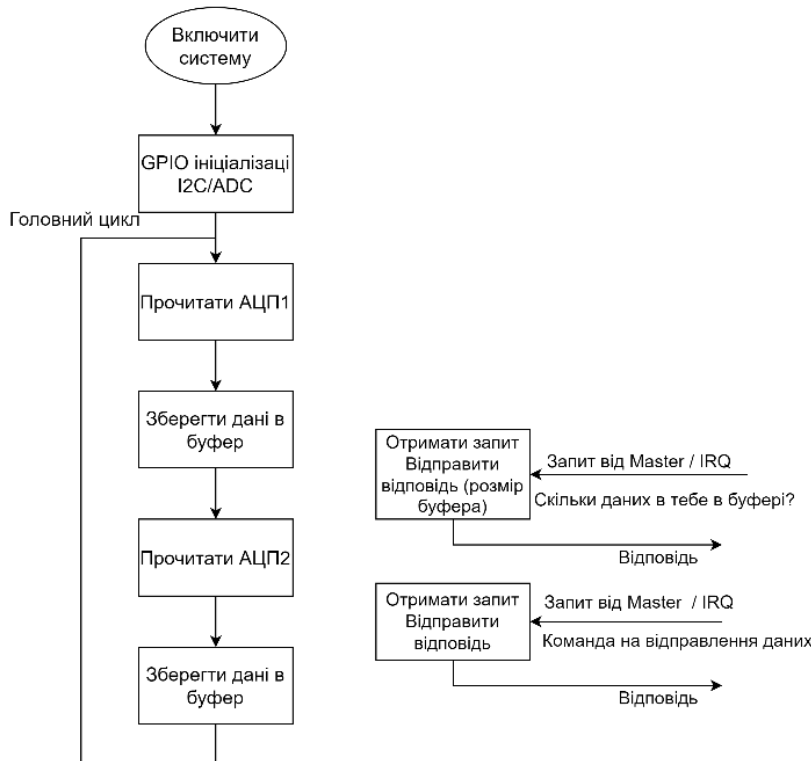
Рис. 2. Прототип системи

Основні з'єднання включають передачу даних через інтерфейс I2C, а також лінії живлення (VCC і GND), які забезпечують стабільну роботу обох мікроконтролерів. Резистори на лініях I2C виконують функцію підтягування сигналів до рівня напруги живлення для забезпечення визначеного стану сигналу, коли зовнішній пристрій не впливає на цей сигнал, що є важливим для коректної роботи інтерфейсу комунікації. Живлення системи організовано через USB-кабелі, під'єднані до обох мікроконтролерів.

Зібраний прототип дозволяє тестувати основні функції, включаючи обмін даними між вузлами, зчитування даних із сенсорів і передавання їх у реальному часі.

**Програмне забезпечення**

Написали програму за допомогою мови програмування MicroPython та склали алгоритм роботи мікроконтролера (Рис.3).



**Рис. 3. Алгоритм роботи мікроконтролера Pico #1**

Алгоритм роботи системи починається з етапу ініціалізації після подачі живлення. На цьому етапі відбувається налаштування GPIO-пінів, а також ініціалізація периферійних інтерфейсів, таких як I2C, та ADC. Ці інтерфейси забезпечують взаємодію з під'єднаними сенсорами та іншими компонентами системи, підготовлюючи систему до роботи.

Після завершення ініціалізації система переходить до зчитування даних з першого аналогово-цифрового перетворювача (АЦП1).

Зібрані дані зберігаються у спеціально виділеному буфері пам'яті, де вони очікують подальшого опрацювання.

Потім відбувається зчитування даних із другого АЦП (АЦП2), і ці дані також додаються до буфера. Такий підхід забезпечує послідовне опрацювання багатоканальних сигналів



**Рис. 4. Алгоритм роботи Pico #2**

Для першого мікроконтролера, на етапі обміну даними система чекає запити від зовнішнього пристрою. Перший запит стосується розміру буфера — система надсилає відповідь, яка інформує про кількість доступних даних. Після цього надходить запит на отримання самих даних, і система передає вміст буфера. Ця структура обміну дозволяє уникати перевантаження і забезпечує стабільну передачу даних. По завершенні передачі даних система повертається до етапу зчитування сигналів із АЦП, забезпечуючи циклічність роботи. Такий підхід дозволяє системі працювати безперервно, збираючи, опрацьовуючи та передаючи дані в реальному часі.

Алгоритм роботи другого мікроконтролера (Рис.4) відрізняється тим, що за допомогою таймерного переривання, відбувається обчислення середнього значення для даних, отриманих як від під'єднаних до другої системи мікрофонів, так і від мікрофонів першого Pico. На етапі взаємодії із першим мікроконтролером поточна система очікує запитів. На перший запит надсилається інформація про довжину буфера, що дозволяє оцінити обсяг доступних даних. Далі надсилається відповідь із самим вмістом буфера. Цей механізм забезпечує синхронізацію між основним і підпорядкованими модулями. Після завершення всіх операцій система повертається до зчитування даних, забезпечуючи безперервний цикл роботи.



### 3. Аналіз результатів дослідження

Тестування роботи системи проводилось за допомогою джерела сигналів, яке переміщували перпендикулярно по відношенню до осей мікрофонів.

Графік (Рис.5) демонструє зміну інтенсивностей сигналів у двох підсистемах (серії 1 і серії 2), в залежності від часу або положення джерела звуку.

Крива 1 (Series 1) відображає зміну інтенсивності сигналу, зафіксованого першою підсистемою. Інтенсивність має коливальний характер, з кількома піками, які вказують на максимальне наближення джерела звуку до цієї підсистеми.

Крива 2 (Series 2) відображає зміну інтенсивності сигналу, зафіксованого другою підсистемою. Графік володіє нижчими амплітудами, але має свої локальні піки, які вказують на моменти, коли джерело звуку було ближче до другої підсистеми. Періоди збільшення та спаду частково синхронізовані із кривою 1.

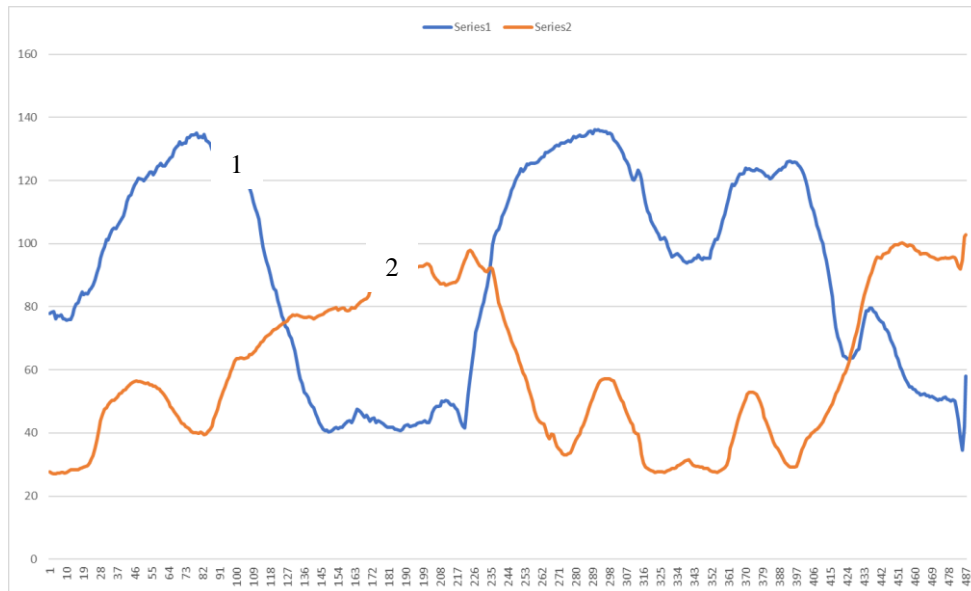


Рис. 5. Графік зміни інтенсивностей сигналів у двох підсистемах при зміні джерела звуку

### Висновки

В результаті дослідження системи опрацювання множини сенсорів визначено переваги та недоліки існуючих рішень та поставлено задачу і виділені вимоги до власної системи. У процесі проектування розглянуто та протестовано різні варіанти структурних і функціональних схем, обрано оптимальне апаратне та програмне забезпечення, на їх основі складено схему з'єднання компонентів.

Основу апаратної частини склали мікроконтролери Raspberry Pi Pico, та мікрофони KY-037. Програмне забезпечення створено на базі мови MicroPython, що дозволило реалізувати алгоритми збору, опрацювання та передавання даних у реальному часі. Завдяки вдало обраним апаратним і програмним компонентам створено прототип системи, здатний ефективно працювати у польових умовах.

Створений прототип показав високу ефективність роботи всіх компонентів. У ході досліджень вдалося створити компактну, економічну та функціональну систему, яка має значний потенціал для впровадження в реальних умовах. Існує можливість для подальшого вдосконалення та масштабування системи.

### Література

1. В.І. Чигінь, М.М. Проценко, Ю.В. Шабатура, М.В. Бугайов. Вдосконалення способу виявлення безпілотних літальних апаратів за результатами спектрального аналізу акустичних сигналів. Військово-технічний збірник АСВ, 2019. N20, стр 58-63. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.58-63>
2. Чигінь В.І., Михайлишин П.Я. Вимірювання координат безпілотних літальних об'єктів з використанням звукової і відеоапаратури. V Всеукраїнська наук.-техн. конф. у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2019» м. Славське, 29 січ.-2 лют. 2019 р. С.10-12.
3. Федішин Назар, Чигінь Василь. Дослідження звукової системи виявлення літальних об'єктів з використанням гармонік в акустичному сигналі. Міжнар. конф. молодих вчених та аспірантів "ІЕФ-2017. Інститут електронної фізики НАН України, м. Ужгород " 23- 26 трав. 2017. С.13-15.
4. ReSpeaker Microphone Array для Raspberry Pi. Офіційна документація. URL: [https://wiki.seedstudio.com/ReSpeaker\\_6-Mic\\_Circular\\_Array\\_kit\\_for\\_Raspberry\\_Pi/](https://wiki.seedstudio.com/ReSpeaker_6-Mic_Circular_Array_kit_for_Raspberry_Pi/)
5. Real-Time Tracking of Wildlife with IoT Solutions in Movement Ecology. URL: [https://www.researchgate.net/publication/374958968\\_Real-Time\\_Tracking\\_of\\_Wildlife\\_with\\_IoT\\_Solutions\\_in\\_Movement\\_Ecology](https://www.researchgate.net/publication/374958968_Real-Time_Tracking_of_Wildlife_with_IoT_Solutions_in_Movement_Ecology)

6. Bio-acoustic tracking and localization using heterogeneous, scalable microphone arrays. URL: <https://www.nature.com/articles/s42003-021-02746-2>
7. Vasyl Chyhin, Mykhailo Pazyniuk, Oleksii Menshykov. Controlling the operation of the remote device using flask python server. URL: <http://dx.doi.org/10.31891/2307-5732>
8. Alesis IO-4. Технічна документація. URL: [https://www.alesis.com/rscdn/971/documents/io4\\_\\_quickstart\\_guide\\_\\_revd.pdf](https://www.alesis.com/rscdn/971/documents/io4__quickstart_guide__revd.pdf)
9. Raspberry Pi Pico Datasheet. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/Pico-R3-A4-Pinout.pdf>
10. Arduino Nano. Технічна документація. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano/>
11. ESP32. Технічна документація. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)

### References

1. V.I. Chyhin, M.M. Protsenko, Y.V. Shabatura, M.V. Bugaev. Improving the method of detecting unmanned aerial vehicles based on the results of spectral analysis of acoustic signals. Military-technical collection of the Armed Forces of the Russian Federation, 2019. N20, pp. 58-63. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.58-63>
2. V.I. Chyhin, P.Ya. P.Ya. Mykhailyshyn. Measuring the coordinates of unmanned aerial vehicles using sound and video equipment. V All-Ukrainian scientific and technical conference in the field of metrology "Technical Using of Measurement - 2019" Slavske, 29 Jan.-2 Feb. 2019, pp. 10-12.
3. Fedyshyn Nazar, Chyhin Vasyl. Research of the sound system for detecting flying objects using harmonics in the acoustic signal. International Conference of Young Scientists and Postgraduate Students "IEF-2017. Institute of Electronic Physics of the NAS of Ukraine, Uzhhorod" May 23-26, 2017. P.13-15.
4. ReSpeaker Microphone Array для Raspberry Pi. Official documentation. URL: [https://wiki.seeedstudio.com/ReSpeaker\\_6-Mic\\_Circular\\_Array\\_kit\\_for\\_Raspberry\\_Pi/](https://wiki.seeedstudio.com/ReSpeaker_6-Mic_Circular_Array_kit_for_Raspberry_Pi/)
5. Real-Time Tracking of Wildlife with IoT Solutions in Movement Ecology. URL: [https://www.researchgate.net/publication/374958968\\_Real-Time\\_Tracking\\_of\\_Wildlife\\_with\\_IoT\\_Solutions\\_in\\_Movement\\_Ecology](https://www.researchgate.net/publication/374958968_Real-Time_Tracking_of_Wildlife_with_IoT_Solutions_in_Movement_Ecology)
6. Bio-acoustic tracking and localization using heterogeneous, scalable microphone arrays. URL: <https://www.nature.com/articles/s42003-021-02746-2>
7. Vasyl Chyhin, Mykhailo Pazyniuk, Oleksii Menshykov. Controlling the operation of the remote device using flask python server. URL: <http://dx.doi.org/10.31891/2307-5732>
8. Alesis IO-4. Technical documentation. URL: [https://www.alesis.com/rscdn/971/documents/IO4\\_quickstart\\_guide\\_rev.pdf](https://www.alesis.com/rscdn/971/documents/IO4_quickstart_guide_rev.pdf)
9. Raspberry Pi Pico Datasheet. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/Pico-R3-A4-Pinout.pdf>
10. Arduino Nano. Technical documentation. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano/>
11. ESP32. Technical documentation. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)