

Управління освіти Ужгородської міської ради
Ужгородська філія закарпатського територіального відділення МАН України

Відділення: інженерії та матеріалознавства

Секція: аерокосмічна техніка та оборонні
технології

**АКУСТИЧНА СИСТЕМА ПОЗИЦІОНУВАННЯ ВОРОЖИХ БпЛА
НА ОСНОВІ ARDUINO**

Роботу виконав:
Куклишин Мирослав
Анатолійович,
учень 9-В класу Ужгородського
ліцею «Лідер» Ужгородської
міської ради Закарпатської
області

Науковий керівник:
Чобаль Ірина Василівна,
вчитель фізики Ужгородського
ліцею «Лідер» Ужгородської
міської ради Закарпатської
області

Ужгород – 2025

АНОТАЦІЯ



Куклишин Мирослав Анатолійович, учень 9-В класу Ужгородського ліцею «Лідер» Ужгородської міської ради Закарпатської області

Науковий керівник: Чобаль Ірина Василівна, вчитель фізики Ужгородського ліцею «Лідер» Ужгородської міської ради Закарпатської області.

Акустична система позиціонування ворожих БпЛА на основі Arduino

Дослідницьку роботу присвячено розробці акустичної системи позиціонування ворожих БпЛА. Зроблено літературний огляд технічних характеристик і можливостей ідентифікації низько літаючих об'єктів за їх акустичним портретом.

Розроблено макет та виготовлено власноруч базовий акустичний модуль на основі технології Arduino, а також написано програмні коди, проведено налаштування та калібрування звукового сенсору MAX9814, що забезпечило отримання достовірних значень акустичного шуму.

Створено розгалужену IoT систему позиціонування ворожих БпЛА за їх акустичним полем шляхом підключення базового модуля до хмарної бази даних та відображення отриманих значень на інтерактивній мапі акустичного шуму.

Ключові слова: система позиціонування, GPS координати, IoT система, акустичний портрет БпЛА, датчик звуку, бойові дрони, Arduino IDE, JavaScript, OpenStreetMap, інтерактивна мапа

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТА МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ LEGO У СУЧАСНОМУ СВІТІ.....	6
1.1. Походження та особливості конструкторів LEGO.....	6
1.2. Історія розвитку та причини популярності бренду LEGO™.....	7
1.3. Базовий набір Lego Education SPIKE™ Prime	10
1.3.1. Датчик сили.....	11
1.3.2. Датчик кольору.....	12
1.3.3. Датчик відстані.....	14
1.3.4. Реєстратор Spike Prime Hub із вбудованим гіроскопом та акселерометром.....	14
1.3.5. Великі та середні двигуни Spike Prime.....	15
РОЗДІЛ 2. ФІЗИЧНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ В LEGO-ЛАБОРАТОРІї.....	17
2.1. Дослідження різних видів механічного руху.....	17
2.2. Як “побачити” нашу потенціальну енергію?.....	19
2.3. Цифрові ваги	21
2.4. Лабораторні експерименти з механіки.....	24
2.4.1. Візуалізація сил тертя.....	24
2.4.2. Автоматизоване визначення коефіцієнта тертя ковзання.....	27
ВИСНОВКИ.....	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	32

ВСТУП

Майже кожного дня ми можемо бачити статистику від Повітряних сил ЗСУ про збиті ударні безпілотники над територією України, які несуть страшну загрозу для цивільного населення та критичної інфраструктури. Наприклад, 3 січня 2025 року було збито 60 ворожих БпЛА, 4.01 - 34, а 5.01 - 42 безпілотники. Загалом за 2024 рік - це близко 15 тисяч (!) ворожих БпЛА різного рівня і призначення [1].

Однак, на жаль, не всі безпілотники вдається збити. Наприклад, 2 січня 2025 року було запущено 72 ударні БпЛА, а збито лише - 47 [2]. Таким чином, частка збитих БпЛА цього дня була на рівні 65%. Серед причин відносно низької ефективності ППО фахівці вбачають недостатню кількість радарів (радіолокаційних станцій) та їх малу ефективність щодо низько літаючих об'єктів. З іншого боку, акустичне поле таких БпЛА має значну інтенсивність і може бути використано для їх ідентифікації.

Вищевикладені факти визначають актуальність даної науково-дослідницької роботи, яка має *прикладний характер*, і направлена на часткове розв'язання перерахованих вище проблем. *Метою роботи* є розробка базового модуля акустичної системи позиціонування літаючих об'єктів на основі Arduino та його масштабування для використання в розгалуженій IoT системі.

Для досягнення вказаної мети необхідно було виконати такі завдання:

- зробити літературний огляд основних характеристик ворожих БПЛА та можливостей їх виявлення під час польоту за акустичним шумом;
- провести спектральний аналіз акустичного поля ворожого БПЛА типу “Шахед”, використовуючи доступні відео їх польотів у мережі Youtube;
- сконструювати базовий модуль акустичної системи позиціонування літаючих об'єктів на основі Arduino;

- здійснити програмування модуля та налаштування передачі отриманих даних в хмарну Firebase Realtime Database;
- забезпечити візуалізацію даних на карті з відкритим кодом OpenStreetMap

Таким чином, *об'єктом дослідження* є системи відслідковування польотів. *Предмет дослідження* – практична реалізація розгалуженої IoT системи позиціонування літаючих об'єктів за їх акустичним полем.

При виконанні даного науково-дослідницького проекту *використано методи інформаційного пошуку, теорії розв'язання винахідницьких завдань та аналізу існуючих інженерних рішень.*

Практичне значення роботи полягає в можливості використання розробленої системи позиціонування БпЛА Повітряними силами ЗСУ для пошуку та нейтралізації ворожих об'єктів, а також як складову ефективної системи захисту цивільного населення та інфраструктури України від ворожих атак.

РОЗДІЛ 1

АКУСТИЧНИЙ ПОРТРЕТ ВОРОЖИХ БПЛА ТИПУ ШАХЕД

1.1. Основні характеристики акустичних полів

Як акустичний процес шум можна характеризувати з двох сторін - з фізіологічної і фізичної. З фізіологічної точки зору, шум характеризується такими параметрами як гучність, висота звуку, частотний діапазон, тривалість впливу на орган слуху. Як фізичне явище, він характеризується частотою та інтенсивністю звуку, що пов'язана із звуковим тиском.

Простір, в якому поширяються звукові хвилі, називається звуковим або акустичним полем. Тиск і швидкість прямування часток повітря в кожній точці звукового поля змінюються в часі. Коли джерело звуку породжує коливання повітря, то в ньому виникає звуковий тиск, що накладається на атмосферний. Частота звуку - це фізична величина, яка дорівнює кількості коливань звукової хвилі за одиницю часу. Частота звуку вимірюється в герцах (Гц). Людина чує звук, тобто сприймає звукові коливання, у частотному діапазоні від 16 до 20000 Гц. Звукові коливання, що поширяються з частотою нижче 16 Гц називаються інфразвуковими, а коливання частотою вище 20 кГц є ультразвуковими.

В акустиці вимірюють не абсолютні значення інтенсивності звуку або звукового тиску, а логарифмічні рівні L відносно граничного (нульового) значення інтенсивності звуку, або звукового тиску. Одному Белу (Б) відповідає збільшення інтенсивності звуку відносно порогу чутності в 10 разів (при $I/I_0 = 10$, $L = 1$ Б; при $I/I_0 = 100$, $L = 2$ Б і т.д.) Встановлено, що орган слуху людини спроможний розрізняти приріст звуку на 0,1 Б, тому найчастіше рівні звукового тиску вимірюють в децибелах (дБ).

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad (1.1)$$

де I — інтенсивність звуку в даній точці, $\text{Вт}/\text{м}^2$; I_0 — інтенсивність звуку, що відповідає порогу чутності (найменше значення, яке може розпізнати середньостатистична людина з нормальним слухом) на частоті 1000 Гц, $I_0=10^{-12} \text{ Вт}/\text{м}^2$

У довільному акустичному полі інтенсивність звуку і звуковий тиск зв'язані між собою таким співвідношенням:

$$I = \frac{P^2}{\rho c}, \quad (1.2)$$

де P — звуковий тиск, Па ; ρ — густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; c — швидкість звуку, $\text{м}/\text{с}$.

Таким чином, підставивши значення інтенсивності звуку з формулі (1.2) у формулу (1.1), отримаємо вираз для визначення рівнів інтенсивності звукового тиску:

$$L = 10 \lg \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \lg \frac{P}{P_0}, \quad (1.3)$$

де P — звуковий тиск у даній точці, Па ; $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — звуковий тиск на порозі чутності.

1.2. Технічні особливості ірано-російських БпЛА типу “Шахед”

Шахед-136 (англ. Shahed, пер. «свідок») — іранський дрон-камікадзе розробки Shahed Aviation. Вперше Shahed-136 (рис. 1.1) був представлений у 2020 році. Конструкція даного безпілотного літального апарату (БпЛА) заснована на ізраїльському протирадіолокаційному IAI Harpy.

Ефективна дальність польоту «Shahed-136» становить від 1000 км з можливістю доставляти бойову частину вагою до 45 кг. У той же час було заявлено, що максимальна дальність польоту — 2500 км. Тривалість польоту (без посадки) може складати — до 24 год [4]. Летить «Shahed-136» на висоті від 60 до 4000 м зі швидкістю 180 км/год. БпЛА має дуже гучний двигун MD 550 потужністю 37 кВт (50 к.с.), тому політ цього дрона можна почути за кілька кілометрів [5].

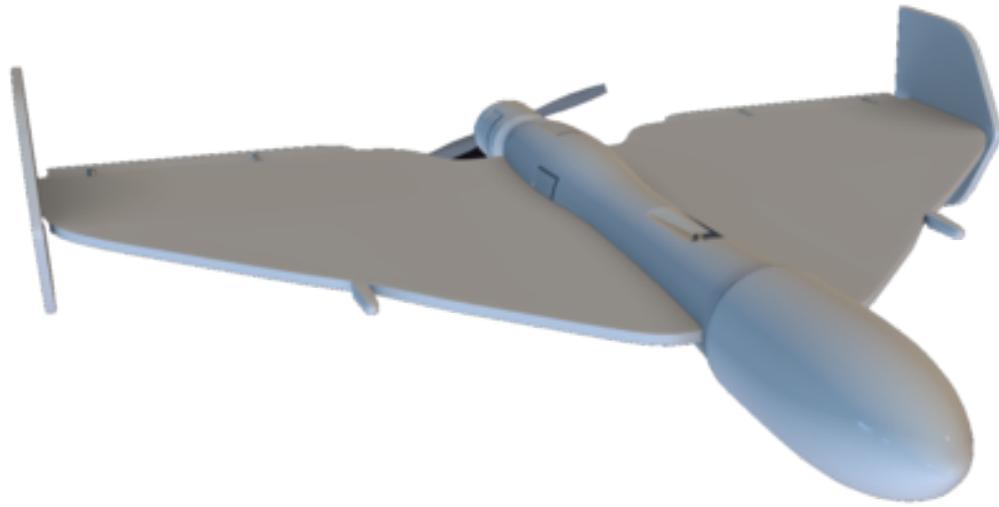


Рис.1.1. Модель БпЛА Shahed-136 [3]

Безпілотник «Shahed-136» має дельтаподібне крило, загальну масу 200 кг, довжину 3,5 м та розмах крил 2,5 м. Маса уламково - фугасної бойової частини становить 40-50 кг [5]. На думку фахівців, відсутність таких рис бойових БпЛА, як оптичні сенсори та вільне маневрування, наближає “Шахед” до крилатих ракет. Цей БпЛА має інерційну та супутникову навігацію, завдяки яким може летіти автономно, тобто є досить стійким до радіоелектронного придушення. Однак, супутникова навігація виявилась вразливою до спуфінгу, який непомітно підміняє супутникові сигнали та відводить безпілотник від цілей. За таким принципом діє українська система РЕБ «Покрова».

Окрім «Shahed-136» ворог також використовує російську модифікацію іранського БпЛА - “Герань-2”. Ця версія була створена на підприємствах заводів "Алабуга", однак вона зазнала лише невеликих конструкційних змін. Зокрема двигуни стали більш спрощені і на них вже не встановлюють стартер і маховик. Недавно стало відомо що на Герань-2 почали встановлювати оновлену систему супутникової навігації (модуль GNSS).

1.3. Спектральний аналіз шуму польоту ударного БПЛА ворога

Акустичний шум різних об'єктів може бути поданий у вигляді гармонічних коливань. Процес розкладання шуму на гармонічні складові називається спектральним аналізом. Спектри шумів можуть бути лінійчастими (дискретними), суцільними та змішаними. Відповідно, спектр шуму – це графічна залежність рівня звукового тиску (L , дБ) від частоти (f , Гц). Рівень звукового тиску також може відображатися за допомогою колірної гами частотної характеристики шуму, наприклад, на рисунку 1.2 зображені спектральний аналіз шуму під час зафіксованого на відео польоту ворожого БПЛА “Шахед” у північній частині України [6]. Як видно з рисунку, спектр шуму безпілотника має дискретний характер. Тут більш яскраві (червоно-оранжеві) частини спектру вказують на ділянки з високим значенням рівня звукового тиску.

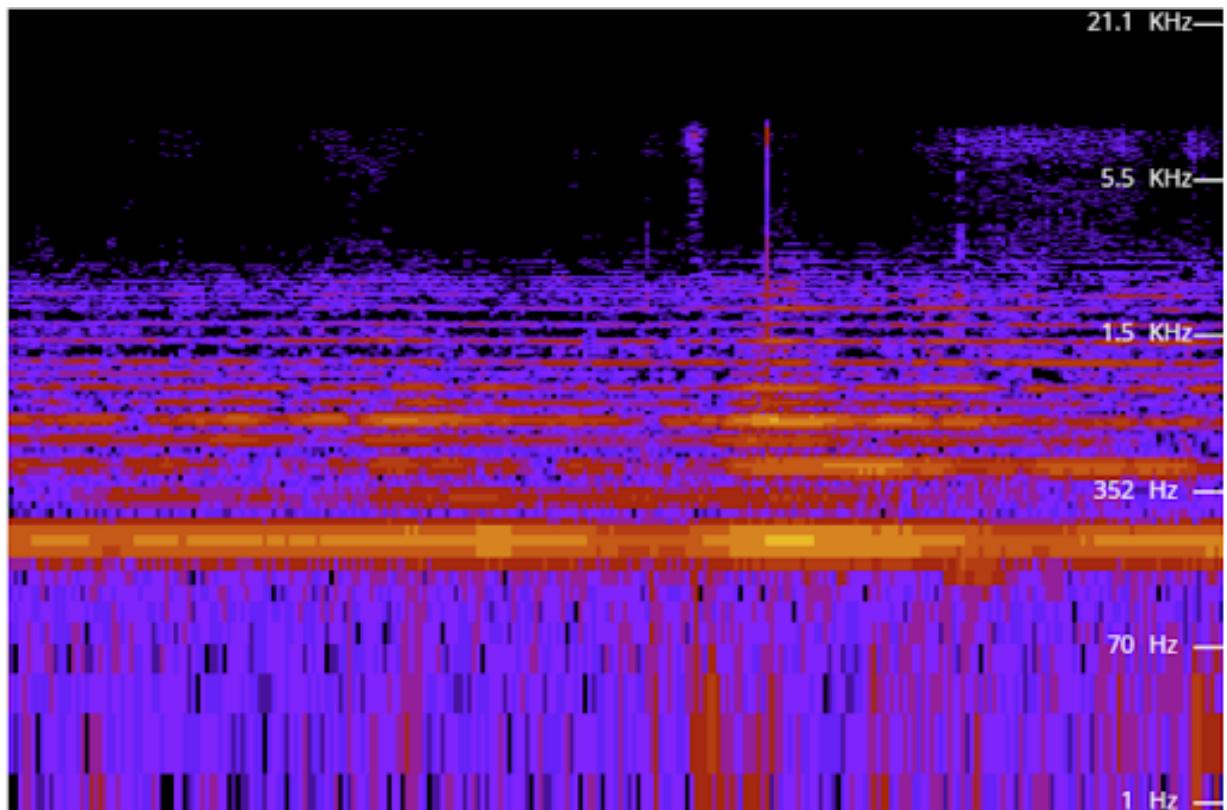


Рис. 1.2. Спектральний аналіз шуму ворожого БПЛА типу “Шахед”
під час польоту

Як видно з рисунку вся енергія акустичного поля іранського БПЛА “Шахед” в основному зосереджена в діапазоні частот приблизно від 200 до 2000 Гц. Центр основної і найбільш широкої смуги відповідає частоті близько 220 Гц. Відомо, що основна частота дорівнює оборотній частоті валу двигуна, помноженій на кількість лопатей гвинта. Оскільки БПЛА “Шахед” та “Герань 2” мають дволопатевий гвинт, то це відповідає обертовій частоті валу близько 110 Гц, або 6600 об/хв. Отримане значення обертової частоти добре співпадає із тактико-технічними характеристиками двигунів БПЛА Shahed-136 [3], згідно яких частота обертання валу двигуна під час польоту становить 5000-7000 об/хв.

Таким чином, на основі аналізу цих даних для створення системи виявлення шуму було використано чутливий мікрофон MAX 9814, на платі якого розміщено також попередній підсилювач звукового сигналу у діапазоні частот 20 - 20000 Гц.

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АКУСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ НИЗЬКО ЛІТАЮЧИХ ОБ'ЄКТІВ

2.1 ІoT архітектура системи моніторингу рівня акустичного шуму

У подібних системах, де одночасно потрібні дані з територій великої площині, для досягнення масштабованого рішення використовують підхід IoT [7, 8]. Така технологія спрощує взаємодію людини і пристройів, а також взаємодію пристрій-пристрій і може використовуватися практично у всіх галузях, таких як транспорт і логістика, енергетика, охорона здоров'я, тощо.

Основою даної дослідницької роботи стали наявні результати наукових досліджень акустичних полів. Найпростішим підходом є картографування шуму за допомогою датчиків на основі смартфона [9], однак такі рішення важко об'єднати у єдину систему. У [10] була реалізована мережа датчиків, підключених через протокол ZigBee та Wi-Fi, що збирає і передає дані у режимі реального часу. Подальша обробка інформації виконується на онлайн-хмарному сервері.

У цій дослідницькій роботі запропоновано систему збирання і відображення шумових даних у реальному часі на інтерактивній мапі, що використовує кращі ідеї розглянутих підходів у поєднанні з сучасними технологіями програмування. Використовуються безкоштовні веб-служби із відкритим вихідним кодом, що зменшує потребу у дорогих хмарних службах. Розроблений прототип вузлового пристрою складається з сучасного Wi-Fi модуля ESP8266 Arduino та чутливого мікрофону MAX9814. Така реалізація забезпечує простоту, надійність, масштабованість і велику кількість додаткових функцій. Тому запропоновану систему можна легко оновити або розширити при потребі. Перевагою запропонованої системи є використання захищеної інфраструктури IoT, яка виключає необхідність взаємодії з людиною. Вона є повністю автономною і здатна передавати дані через

мережу Інтернет без взаємодії людини з IoT-пристроїми на проміжних етапах.

IoT архітектуру розробленої системи можна розділити на апаратне забезпечення (базовий акустичний модуль), хмарну базу даних і веб-додаток. Блок-схему, що ілюструє складові частини та принцип роботи створеної системи, зображене на рис. 2.1

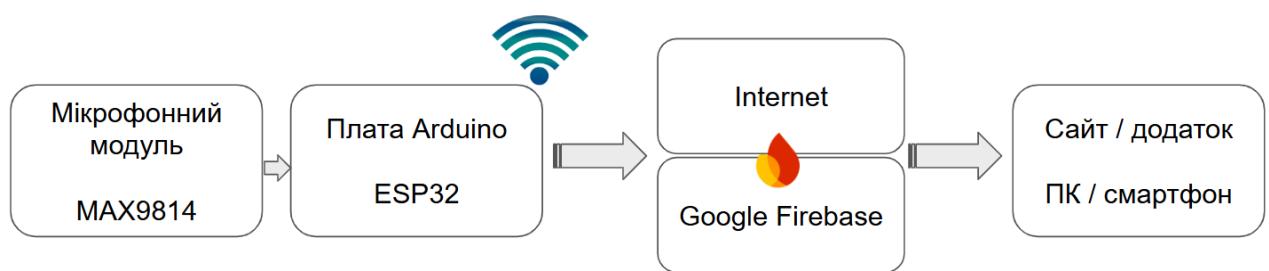


Рис. 2.1. Схема збирання і відображення даних акустичного поля за допомогою одного базового акустичного модуля

Мікрофонний модуль сприймає акустичний шум у навколишньому просторі і перетворює його в електричний сигнал, який подається на аналогово-цифровий перетворювач плати Arduino ESP8266. Після обробки дані амплітуди (гучності звуку) надсилаються через Інтернет за допомогою Wi-Fi до бази даних Google Firebase, яка забезпечує їх зберігання та обробку у реальному часі. Далі ці дані збираються веб-додатком і відображаються на картах OpenStreetMap у веб-браузері у зручному вигляді.

2.2 Базовий акустичний модуль

Електричне підключення базового акустичного модуля здійснено за схемою, що зображена на рис. 2.2, використовуючи аналоговий вихід мікрофона. Таким чином ми отримаємо напругу, що буде відповідати шуму у навколишньому середовищі. Чим більший шум тим вища напруга.

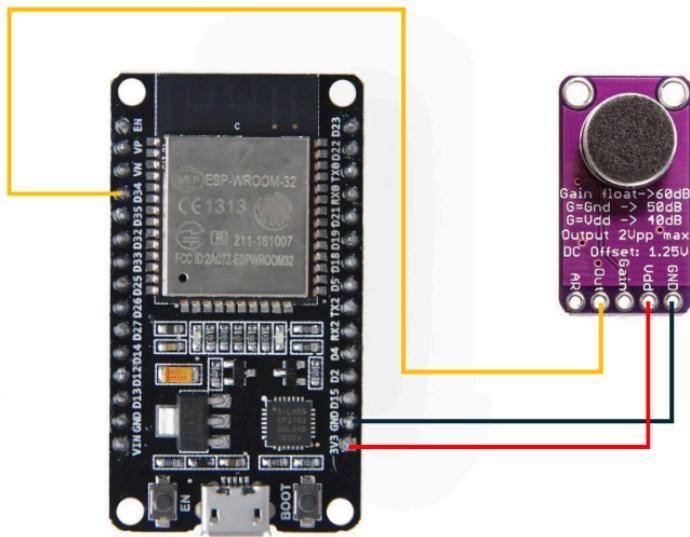


Рис. 2.2. Розроблений макет базового акустичного модуля

Для створення окремого базового акустичного модуля у роботі використовується високочутливий мікрофон MAX9814 і плата програмування Arduino ESP8266. Живлення мікрофона забезпечується самою платою Arduino, а його звуковий вихід підключено на аналоговий вхід основної плати. Розглянемо детальніше складові акустичного модуля.

2.2.1. Мікроконтролер Arduino з можливістю передачі даних у Wi-Fi мережах

Найвідомішими мікроконтролерами Arduino з можливістю роботи у бездротових мережах є плати ESP32 та ESP8266 (рис. 2.3) – це недорогі модулі Wi-Fi, які ідеально підходять для самостійних проектів у галузі Інтернету речей (Internet of Things - IoT).

Мікроконтролер ESP32 є наступником ESP8266. Обидва чіпи мають 32-бітний процесор. Однак ESP32 – двоядерний процесор з частотою від 160 до 240 МГц, а ESP8266 – одноядерний, що працює на частоті 80 МГц.

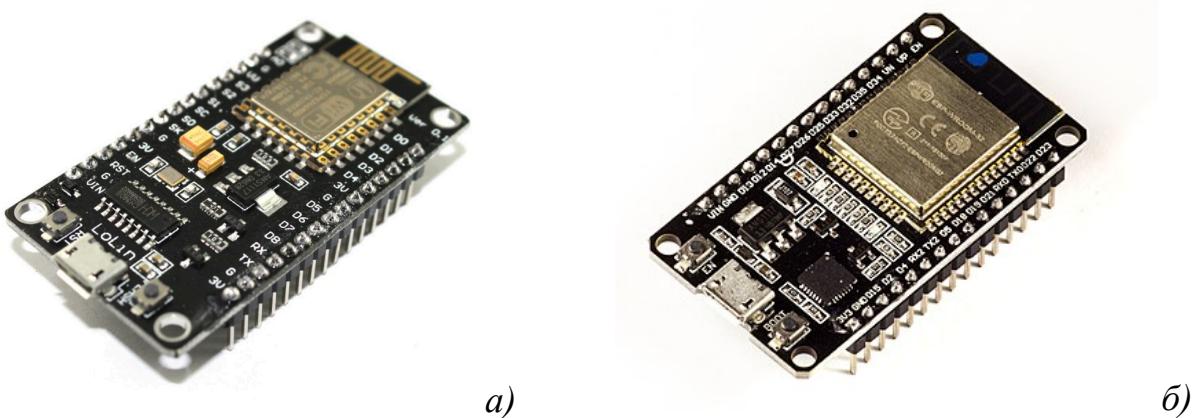


Рис. 2.3. Мікроконтролери Arduino - ESP8266 (а) та ESP32 (б)

Модуль розробника Arduino ESP32 створений на основі мікросхеми ESP32-D0WD-V3, що підтримує можливості масштабування та адаптації. Центральний процесор (ЦП) містить два ядра, якими можна керувати індивідуально. Чіп також має співпроцесор з низьким енергоспоживанням, який можна використовувати замість ЦП для економії енергії при виконанні завдань, що не потребують великих обчислювальних потужностей, таких як моніторинг стану пінів. ESP32 поєднує багатий набір периферійних пристрійв, зокрема датчики Холла, інтерфейсу SD-карти, Ethernet, високошвидкісні SPI, UART, I²S та I²C.

Таким чином, ESP32 – це мікроконтролер з інтегрованим Wi-Fi і Bluetooth контролерами. На відміну від персональних комп'ютерів мікроконтролер поєднує в одному кристалі функції процесора і периферійних пристрійв, містить оперативну пам'ять і постійний запам'ятовуючий пристрій для зберігання коду і даних, проте має значно менші обчислювальні ресурси. Плати з ESP32 мають гарну обчислювальну здатність, розвинену периферію і при цьому дуже популярні через низьку ціну в діапазоні 4 \$ - 14 \$.

2.2.2. Особливості та характеристики звукового сенсора

У роботі використовується сучасний мікрофонний модуль із підсилювачем на основі чіпу MAX9814 (рис. 2.4). Тут реалізовано функцію автоматичного регулювання підсилення.



Рис. 2.4. Мікрофонний модуль MAX9814

На практиці це означає, що фонові «гучні» звуки будуть пригнічені, щоб вони не заважали основному сигналу і не перевантажували підсилювач. У той же час тихі віддалені звуки посилюватимуться. Такий чином, цей модуль відмінно підходить для запису або виявлення звуку в умовах різної гучності звуку. Основні характеристики модуля наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Характеристики мікрофонного модуля MAX9814

Характеристика	Значення
Напруга живлення	2,7-5,5 В
Струм споживання	3 мА
Вихідна напруга	2 В при зміщенні 1,25 В
Частотна характеристика	20 Гц – 20 кГц
Коефіцієнт підсилення	40дБ, 50дБ або 60дБ
Габаритні розміри	25x14мм

Максимальний коефіцієнт підсилення за замовчуванням становить 60 дБ, але його можна встановити на рівні 40 дБ або 50 дБ, підключивши вивід регулювання підсилення до VCC або “землі”. Вихідна напруга підсилювача становить близько 2 В постійного струму при зміщенні постійного струму 1,25 В, отже цей модуль доцільно використовувати з аналого-цифровим перетворювачем, що підтримує рівень вхідного сигналу до 3,3 В. Зауважимо, що у цій науково-дослідницькій роботі використовується плата Arduino ESP 8266 з напругою живлення 3,3 В.

2.3. Методика вимірювання рівня шуму та калібрування акустичного модуля

Аудіосигнал із звукового виходу підсилювача мікрофону є змінною напругою. Для того щоб виміряти рівень звуку нам потрібно провести кілька вимірювань, щоб знайти мінімальне і максимальне значення сигналу, тобто його амплітуду. Очевидно що час вимірювань повинен становити не менше періоду звукової хвилі найменшої частоти, амплітуду якої будемо визначати. Як було описано вище, нижня межа людського слуху становить 20 Гц. Визначимо період звукової хвилі, що відповідає цій частоті:

$$T = \frac{1}{v} = \frac{1}{20 \text{ Гц}} = 0,05 \text{ с}, \quad (2.1).$$

Таким чином, ми обираємо час вимірювань 50 мілісекунд. Позначимо цю величину змінною sampleWindow у коді програми (Додаток 1), що написана у середовищі Arduino IDE. Впродовж цього часу виконується цикл вимірювань і визначається максимальне і мінімальне значення напруги (рис. 2.5). Різниця між ними (що позначена змінною PeakToPeak у коді програми) конвертується у значення напруги, що визначається середнім значенням шуму:

$$Volt = \frac{PeakToPeak * 3,3}{1024}, \quad (2.2)$$

де 3,3 (В) - максимальне значення напруги на виході мікрофона, а 1024 - роздільна здатність АЦП мікроконтролера ESP8266.

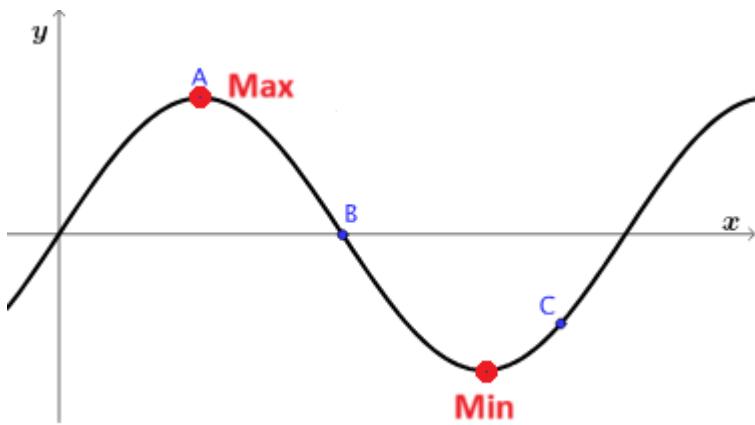


Рис. 2.5. Вимірювання напруги на звуковому виході мікрофона впродовж періоду звукової хвилі

Далі це значення переводиться у децибели - загальноприйняті одиниці вимірювання рівня звуку в акустиці, використовуючи співвідношення на основі формули (1.3):

$$L [\text{дБ}] = 20 \lg \frac{U}{U_0} + L_0, \quad (2.3),$$

де U – поточне значення напруги; U_0 – чутливість мікрофона, тобто значення напруги на його звуковому виході у повній тиші; L_0 - калібрувальне значення, що відповідає тиши у в експериментальних умовах (у дБ).

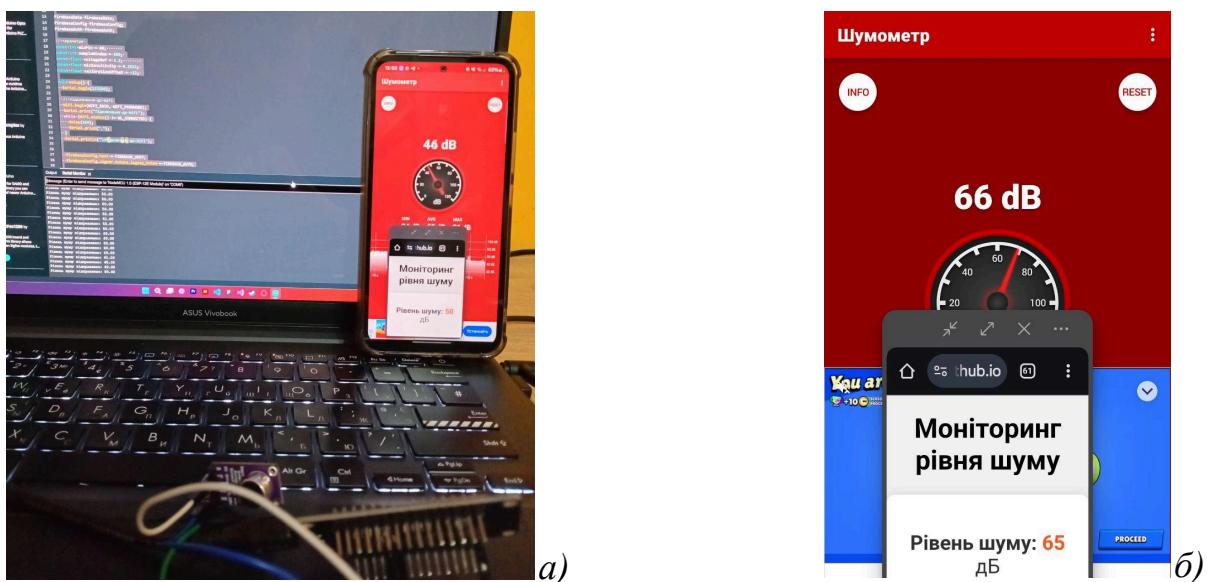


Рис. 2.6. Процес калібрування (а) та результат вимірювання (б) рівня шуму в навколишньому середовищі

Таким чином, імплементувавши ф-лу (2.3) у код Arduino (Додаток 1), було автоматизовано процес вимірювання рівня акустичного шуму у дБ. Провівши калібрування акустичного модуля за допомогою портативного шумоміру на телефоні (рис. 2.6, *a*) ми отримали значення рівня шуму на серійному моніторі у середовищі Arduino IDE, що добре співпадають із показами шумоміра (рис. 2.6, *b*) при різних значеннях звукового тиску.

2.4. Розгалужена IoT система позиціонування джерела шуму

Для забезпечення можливості одночасного відображення даних багатьох акустичних модулів різними персональними пристроями (ПК, смартфон, планшет) для багатьох користувачів ми використали підхід розгалуженої IoT системи, що використовує хмарне зберігання даних та їх відображення на веб-сайті з інтерактивною мапою. Функції бази даних розробленої системи виконує Google Firebase Realtime DB [11] — служба хмарного зберігання, що забезпечує просту взаємодію зі сторонніми веб службами. На рис. 2.7 показано веб-інтерфейс БД Firebase і передані значення шуму в одній точці, отримані базовим акустичним модулем.

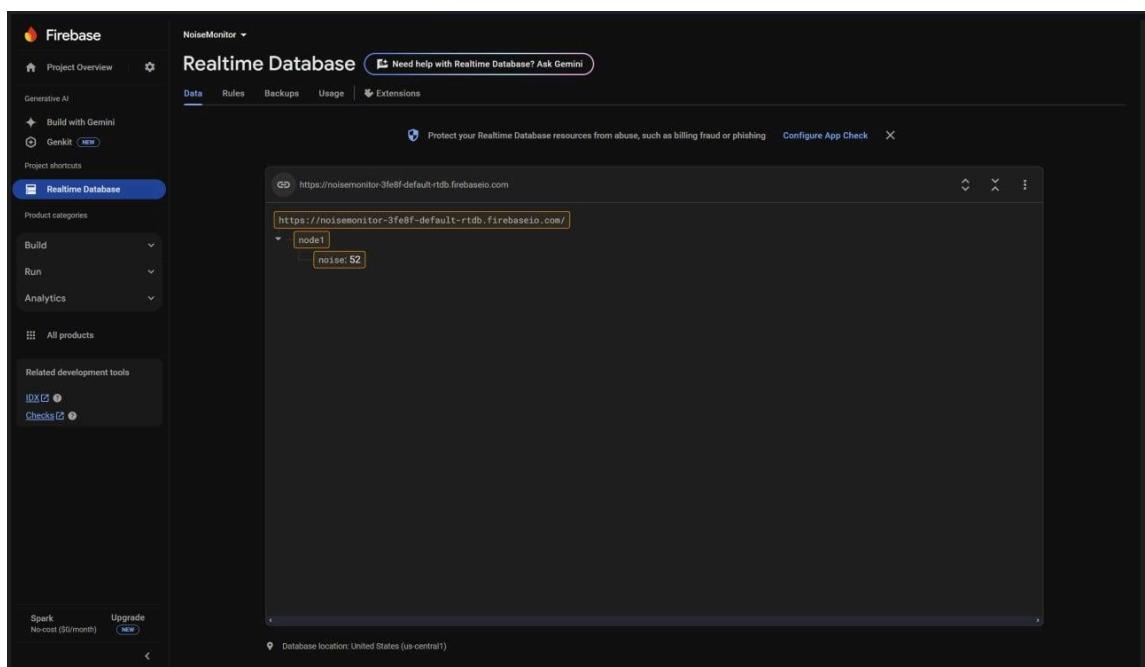


Рис. 2.7. Передані в хмарну базу даних Firebase значення шуму отримані базовим акустичним модулем

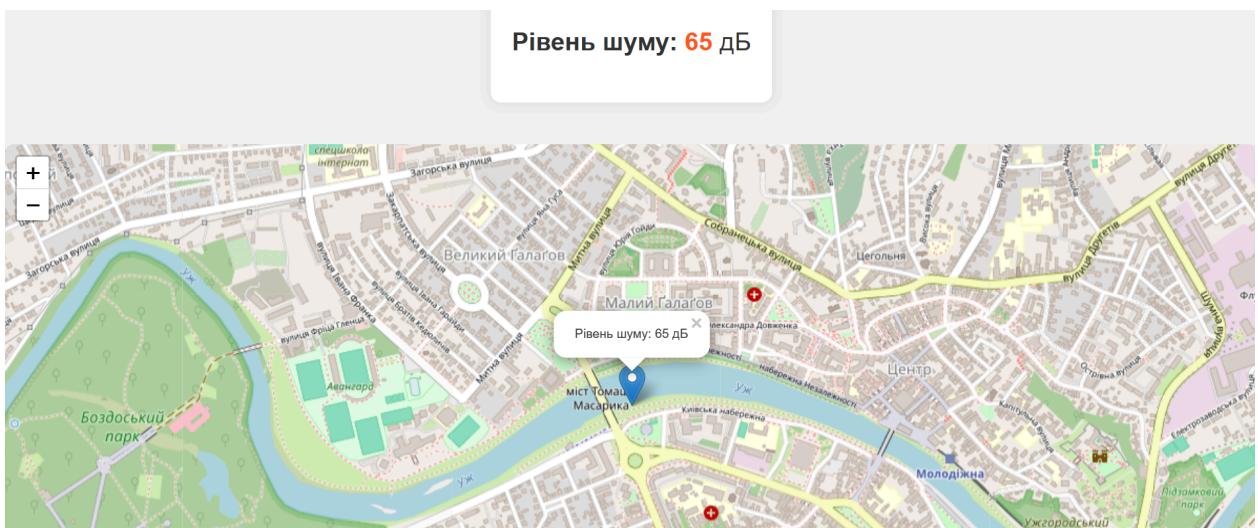


Рис. 2.8. Інтерактивна мапа акустичного шуму, що відображає позиції низько літаючих об'єктів за їх акустичним портретом

Веб-додаток розроблено на JavaScript, який використовує бібліотеку Leaflet та карти з відкритим кодом OpenStreetMap. Це забезпечує можливість отримувати з БД Firebase дані акустичного шуму в реальному часі і відображати їх на інтерактивній мапі у веб-браузері у формі накладання маркеру та сповіщення про рівень шуму у точці, що відповідає GPS координатам базового акустичного модуля (рис. 2.8).

Щоразу, коли дані оновлюються в базі даних, веб-додаток асинхронно оновлює графічне подання відповідно до поточного значення шуму, забезпечуючи візуалізацію позицій низько літаючих об'єктів.

ВИСНОВКИ

За результатами проведеного дослідження можна зробити такі висновки:

1. Проаналізовано основні технічні характеристики та можливості виявлення ворожих БпЛА за їх акустичним шумом.
2. Розроблено макет та виготовлено власноруч на основі контролера Arduino ESP8266 базовий акустичний модуль для автоматичного вимірювання рівнів звуку у навколишньому середовищі.
3. Створено програмні коди, проведено налаштування та калібрування акустичного модуля, що забезпечило отримання достовірних значень звукового тиску.
4. Реалізовано розгалужену ІoT систему позиціонування літаючих об'єктів за їх акустичним полем шляхом підключення базового модуля до хмарної бази даних та відображення отриманих значень на інтерактивній мапі акустичного шуму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Повітряні сили розповіли, скільки цілей збили за 2024 рік [Електронний ресурс] // Суспільне Новини. – 2025. – Режим доступу: <https://susplne.media/915265-povitran-sili-rozgovili-skilk-cilej-zbili-za-2024-rik> (дата звернення 03.01.2025 р.).

[2] Росія вночі запустила по Україні більше 70 безпілотників: скільки збила ППО [Електронний ресурс] // Слово і Діло. – 2025. – Режим доступу: <https://www.slovoidilo.ua/2025/01/02/novyna/bezpeka/rosiya-vnochi-zapustyla-po-ukrayini-bilshe-70-bezpilotnykiv-skilky-zbyla-ppo> (дата звернення 04.01.2025 р.)

[3] Шахед-136 [Електронний ресурс] // Вікіпедія вільна енциклопедія. – 2024. – Режим доступу: uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B0%D1%85%D0%B5%D0%B4-136

[4] На якій відстані можуть застосовуватись іранські дрони "Шахід": відповідь ЗСУ [Електронний ресурс] // РБК-Україна. – 2023. – Режим доступу:

<https://www.rbc.ua/rus/news/kiy-vidstani-mozhut-zastosovuvatis-iranski-1664965956.html> (дата звернення 20.12.24 р.).

[5] Окупанти атакували Одесу дронами-камікадзе “Shahed-136”. [Електронний ресурс] // Мілітарний. – 2022. - Режим доступу: <https://mil.in.ua/uk/news/okupanty-atakuvaly-odesu-dronamy-kamikadze-shahed-136/> (дата звернення 15.12.24 р)..

[6] Ми - Україна. НА МЕЖІ! Шахед ЛЕДЬ не задів БУДИНОК! НАДНИЗЬКИЙ політ російського дрона на СУМЩИНІ, 2024. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Hf0sbfgTlno> (дата звернення: 04.01.2025).

[7] Mishra A. K. Internet of Things (IoT) Networks: Architecture, Applications, and Future Directions. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT). 2020. Т. 11, № 3. С. 2067–2075. URL: <https://doi.org/10.17762/turcomat.v11i3.13604> (дата звернення: 15.12.2024).

[8] GEOALERT – IOT BASED WEATHER STATION. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2024. URL: <https://doi.org/10.56726/irjmets51774> (дата звернення: 15.12.2024).

[9] Maisonneuve N., Stevens M., Ochab B. Participatory noise pollution monitoring using mobile phones. Information Polity. 2010. Т. 15, № 1,2. С. 51–71. URL: <https://doi.org/10.3233/IP-2010-0200> (дата звернення: 15.12.2024).

[10] Lian K.-Y., Hsiao S.-J., Sung W.-T. Mobile Monitoring and Embedded Control System for Factory Environment. Sensors. 2013. Т. 13, № 12. С. 17379–17413. URL: <https://doi.org/10.3390/s131217379> (дата звернення: 15.12.2024).

[11] Google, Firebase — App success made simple” [Online]. URL: <https://firebase.google.com> (дата звернення: 07.12.2024).