

ЕЛЕКТРОАКУСТИЧНИЙ ТРАКТ ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ МАЛИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Малі безпілотні літальні апарати в останні роки стають дедалі більше популярними як для комерційного, так і для рекреаційного використання. Але з початком війни почала стрімко зростати загроза використання таких дронів в незаконних цілях, таких як розвідувальні операції та терористичні атаки на найуразливіші і найважливіші об'єкти: військову техніку, урядові споруди, аеропорти або місця з великим скупченням людей. Як наслідок, розроблено багато методів для виявлення дронів, але найперспективнішим з них вважається акустичний метод. У статті розглянуто реалізацію простого та дешевого для конструювання акустичного детектора з одним мікрофоном, який дає змогу виявляти звук, що видають двигуни та лопаті дрону, і який потім можна проаналізувати, щоб визначити місцезнаходження та траєкторію руху безпілота.

Для реєстрації детектором звукових хвиль запропоновано використовувати електретний мікрофон SMA-4544PF-W із поролоновою вітрозахисною насадкою, а для забезпечення широкого динамічного діапазону та захисту детектора від перевантаження — підсилювач з системою автоматичного регулювання підсилення зі зворотним регулюванням на базі інтегральної мікросхеми MAX9814. Для подальшої цифрової обробки сигналів на ПК, використовуватиметься аналого-цифровий перетворювач з частотою дискретизації 48 кГц і розрядністю 16 біт, та зовнішня звукова карта CM6206 з лінійним входом.

За результатом тестових польотів створено базу аудіофайлів шуму квадрокоптера DJI Mavic 2 Pro, який зараз активно використовується військовими для розвідки, та досліджено точність виявлення об'єкта акустичним детектором. Відстань від дрону до мікрофона впливала на точність виявлення, максимальне значення достовірного детектування становить 40 метрів. Пристрій успішно виконує свої функції, зважаючи на його низьку вартість та простоту в експлуатації, проте для поліпшення характеристик детектор потребує вдосконалення. Спектри отриманих аудіозаписів випромінювання квадрокоптера дозволяють визначити основні частоти тонів, кількість яких збігається з кількістю електромоторів та є важливими ознаками під час розробки алгоритму класифікації безпілота.

Ключові слова: дрон, малий безпілотний літальний апарат, спектр, обробка сигналу, виявлення сигналу, підсилювач з автоматичним регулюванням підсилення, аналого-цифровий перетворювач.

1. Вступ

Малі безпілотні літальні апарати (МЛА) в останні роки стають більш популярними як для комерційного, так і для рекреаційного використання. Хоча більшість операторів дронів використовують їх для нешкідливих цілей, таких як аерофотозйомка або геодезія, зростає занепокоєння щодо потенційних загроз безпеці, які можуть нести малі безпілотні літальні апарати, особливо в найуразливіших зонах, таких як аеропорти, урядові об'єкти і місця проведення масових заходів. Як наслідок, розроблено багато методів виявлення МЛА, але найперспективнішим з них вважається акустичний метод [1]. Він передбачає використання мікрофонів для виявлення звуку, який видають двигуни та лопаті дрону, який потім можна проаналізувати, щоб визначити місцезнаходження і траєкторію руху безпілота [2]. Акустичні детектори такого типу складаються з багатоелементного масиву мікрофонів, а також потребують недешеву апаратну базу та спеціальне

програмне забезпечення. Вони можуть бути ефективним доповненням до вже наявних систем виявлення МЛА, що працюють в оптичному чи радіо діапазоні [3].

Метою дослідження є опис реалізації простого акустичного детектора з одним мікрофоном, який дає змогу виявляти малі безпілотні літальні апарати та демонстрація результатів його роботи.

Детектор складається з електроакустичного тракту, блока аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та блока цифрового оброблення сигналів на базі персонального комп'ютера (ПК) (рис. 1).

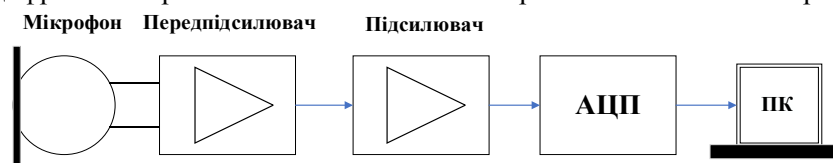


Рис. 1. Структурна схема акустичного детектора

Одним з найважливіших елементів акустичного детектора є первинний електроакустичний перетворювач, в ролі якого використано мікрофон. Від типу мікрофона залежить схема передпідсилювача. Зареєстровані акустичні сигнатури МЛА потрапляють на каскад підсилювача, тому що, в залежності від відстані до об'єкта, сигнали цілі потрібно підсилювати або послаблювати для подальшої коректної обробки на обчислювальному пристрої. Але перед подачею сигналу на вхід звукової карти його необхідно перетворити з аналогового виду в цифровий, використовуючи АЦП.

2. Схемо-технічна реалізація акустичного детектора

2.1. Огляд та вибір типу акустичного сенсора-мікрофона

Зараз найпоширенішими є динамічні і електростатичні (конденсаторні та електретні) мікрофони. Основними перевагами динамічних мікрофонів є стійкість до високого рівня звукового тиску та менша чутливість до відлуння сигналів, ніж у конденсаторних. Динамічні мікрофони надійніші, мають високий рівень стійкості до механічних пошкоджень, вологості середовища (до 95 %) та широкий діапазон робочих температур (від -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$). З недоліків можна виділити малу чутливість, слабшу реакцію на перехідні процеси та обмежену частоту реєстрації акустичних сигналів, через що динамічні мікрофони фіксують менше слабких акустичних сигналів, ніж конденсаторні. Також вони мають велику нерівномірність амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), тому для досягнення високого рівня чутливості мікрофони будуть великі за розміром та масою. На відміну від динамічних, конденсаторні мікрофони мають вищу чутливість та швидкість реакції на перехідні процеси, тому здатні записувати тихі сигнали, деталі та зміни тону звуку. До переваг можна віднести ширший частотний діапазон, малу нерівномірність АЧХ та низький рівень шуму. Недоліками використання таких мікрофонів є висока схильність до механічних пошкоджень, необхідність «фантомного» живлення 48 В та низький рівень стійкості до несприятливих погодних умов: робочі температури від -10°C до $+35^{\circ}\text{C}$, а рівень вологості середовища менше 85 %, через що більшість мікрофонів малоефективні для використання на вулиці без захисного обладнання.

Найрозповсюдженішим типом мікрофонів є електретні, що мають такі переваги: широкий частотний діапазон, малу нерівномірність АЧХ, високу чутливість та якість звукозапису, малі габаритні розміри, низьку ціну та високий рівень стійкості до механічних пошкоджень, екстремальних робочих температур та вологості. Недоліком є те, що електретні мікрофони, як і конденсаторні, потребують зовнішнього «фантомного» живлення.

У табл. 1 внесені апроксимовані середні значення основних характеристик [4], за якими, не залежно від типу, можна оцінити усі мікрофони, наявні сьогодні на ринку.

Таблиця 1

Основні характеристики мікрофонів

Тип мікрофона	Електродинамічний		Конденсаторний	Електретний
	катушковий	стрічковий		
Діапазон частот, Гц	40...20000	30...18000	20...20000	20...20000
Чутливість, дБ	-60...-45	-56...-40	-60...-30	-60...-30
Нерівномірність АЧХ, дБ	12	10	5	5
Рівень власних шумів, дБ	30...18	30...16	30...4	30...5
Внутрішній опір, Ом	150...1500	200...1000	200...2200	200...2200
Звуковий тиск, дБ	до 150	до 140	до 140	до 140

Розглянемо детальніше основні характеристики мікрофонів. Найбільший рівень чутливості мають конденсаторні та електретні типи мікрофонів — -30 дБ. Оскільки, величини чутливості мають від’ємні значення, то чим ближче це значення до 0, тим чутливішим буде мікрофон. Варто зауважити, високий рівень чутливості ще не показує високий рівень якості передачі звукових сигналів, а лише дає можливість мікрофону «чути» слабкі звуки.

Нерівномірність АЧХ показує в скільки разів або на скільки дБ потужність прийнятого сигналу (за амплітудою) зменшується у заданому частотному діапазоні. В ідеальному випадку, графік АЧХ має бути рівномірним у всьому діапазоні робочих частот мікрофона. У вимірюванні акустичних сигналів активно застосовуються конденсаторні та електретні мікрофони, через їхній малий коефіцієнт нерівномірності амплітудно-частотної характеристики.

Діапазон частот. Корисні гармоніки спектра акустичних сигналів МЛА лежать у проміжку від 100 Гц до 10 кГц [3]. Цей проміжок входить у загальний діапазон робочих частот усіх типів мікрофонів, тому за цим параметром, для детектування сигналів, підходить будь-який з них.

Звуковий тиск, що може сприймати мікрофон — максимальне значення рівня гучності звуку, за якого не виникає помітний вплив завад на прийнятий акустичний сигнал. Чим більше значення звукового тиску, тим вище якість роботи мікрофона з гучними звуками. Конденсаторні та електретні мікрофони здатні працювати в разі максимального звукового тиску 140 дБ. Згідно з класифікацією загальних рівнів звукового тиску [5], цей рівень еквівалентний шуму під час зльоту реактивного літака на відстані декількох метрів або від пострілів з вогнепальної зброї. Динамічні мікрофони є безумовними лідерами на ринку за цим параметром ($150\dots 160$ дБ), але й показники інших типів мікрофонів знаходяться в межах, прийнятних для дослідження, оскільки рівень випромінювання шумів нинішніх МЛА не вище 90 дБ.

Внутрішній опір (імпеданс) показує чи сумісним є мікрофон з підсилювачем, щоб під час роботи не відбувалися втрати потужності сигналу. Динамічні мікрофони мають мале значення імпедансу, а електростатичні — високе. Від значення імпедансу залежить конструкція підсилювача.

Рівень власних шумів показує можливості мікрофона працювати зі слабкими акустичними сигналами, чим менше значення рівня, тим тихіший акустичний сигнал може чітко передавати мікрофон. Діапазон рівнів сигналу на виході мікрофона зазвичай складає від 100 мВ до 1 В, тому відносний рівень власних шумів усієї системи визначається шумами підсилювача або передпідсилювача-коректора. У пристроях із динамічними мікрофонами, імпеданс яких лежить у межах від 200 Ом до 2 кОм, вхідні каскади підсилювачів будуються на біполярних транзисторах, а вхідні каскади підсилювачів для конденсаторних та електретних мікрофонів із вихідною ємністю $C_{дж} = 5\dots 40$ пФ — на польових транзисторах [6].

Власні шуми динамічних мікрофонів легко проаналізувати за допомогою еквівалентної шумової моделі (рис. 2). На частотах до 5 кГц та імпедансі джерела вхідного сигналу до 1 кОм завжди будуть переважати шуми напруги біполярного транзистора, тому ЕРС шуму дротів $\varepsilon_{w.l.}$, індуктивністю обмотки котушки L та міжвитковою ємністю C можна знехтувати. Отже, повна напруга шумів системи ε дорівнює сумі вхідної ЕРС шуму та напруги шуму, що утворюється проходженням вхідного струму шуму дротами динамічного мікрофона з опором R .

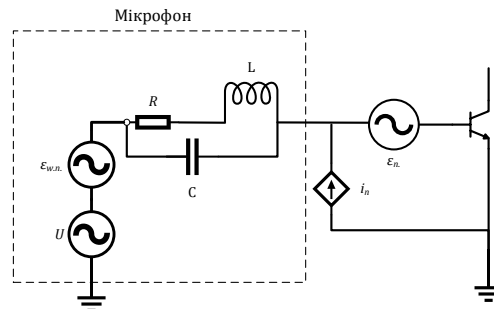


Рис. 2. Еквівалентна схема шуму системи

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_n^2 + i_n^2 R^2}, \text{ В}/\sqrt{\text{Гц}}.$$

Середнє значення рівня власних шумів для динамічних мікрофонів дорівнює приблизно 16 дБ.

На вході конденсаторних та електретних мікрофонів стоїть транзисторний перетворювач заряд-напруга, тому через високий вхідний опір рівень власних шумів загалом буде визначатися польовим транзистором, що розташований безпосередньо у капсулі мікрофона. Коефіцієнт шуму в польових транзисторах значно менший ніж у біполярних, оскільки струм транзистора утворюється носіями заряду основного типу, концентрація яких мало залежить від температури, а процеси рекомбінації не відіграють у них значної ролі. Головними складовими шуму є теплові шуми, що виникають у провідному каналі, і дробові шуми струму затвора. Середньоквадратичні значення $\varepsilon_{ш}$ та $i_{ш}$ у діапазоні частот від f_1 до f_2 для польового транзистора:

$$e_n = \sqrt{2,8kTS[f_2 - f_1 + f \cdot \ln(f_2/f_1)]}; \quad i_n = \sqrt{2qI_g[f_2 - f_1]}.$$

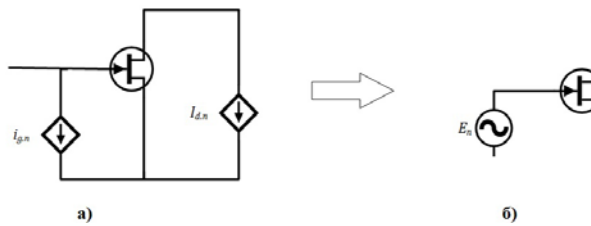


Рис. 3. Еквівалентна шумова схема польового транзистора

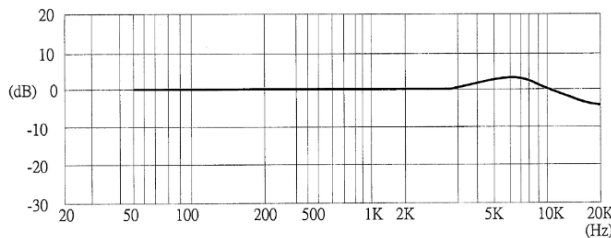


Рис. 4. АЧХ електретного мікрофона SMA-4544PF-W

Польовий транзистор описується шумовою еквівалентною схемою з одним джерелом шумової ЕДС E_n , яка ввімкнена послідовно в ланку затвору (рис. 3). Шум напруги e_n може бути зменшений шляхом збільшення i до такого значення, за якого крутизна буде найбільшою. На практиці найнижчий показник рівня власних шумів є лише у сучасних конденсаторних мікрофонах з великою діафрагмою та електретних через схожість вхідних схем внутрішньої конструкції. Середньоквадратичне значення коефіцієнта власних шумів 5 дБ.

На основі проаналізованих вище параметрів, залишаємо для подальшого розгляду конденсаторні та електретні мікрофони. Вони мають схожий принцип роботи, однаково високий рівень чутливості та якості передачі звуку, через малий коефіцієнт власних шумів. Однак конденсаторному мікрофону потрібна вища напруга живлення 48 В. Варто зауважити, що під час детектування сигналів у польових умовах за високого рівня вологості, напруга в конденсаторному мікрофоні вище 40 В призводить до пробоя. Тому для подальшого дослідження краще використовувати електретні мікрофони, по-перше, через нижчу напругу живлення; по-друге, високу надійність — вони мають більший робочий діапазон змін температури та можуть працювати за вищого рівня вологості навколишнього середовища; по-третє, такі моделі мікрофонів дешеві.

Як приймальний пристрій в прототипі акустичного детектора МЛА вибрано електретний мікрофон *SMA-4544PF-W* з такими параметрами:

- чутливість: -44 ± 2 дБ (на частоті 1 кГц та тиску 1 Па);
- АЧХ зображена на рис. 4;
- характеристика направленості: всенаправлений;
- співвідношення сигнал/шум: 60 дБ;
- діапазон частот: 20 ... 20000 Гц;
- внутрішній опір: 2,2 кОм;
- напруга живлення: 3 ... 10 В;
- робоча температура: $-20...+70$ °С.

2.2. Проектування підсилювача до мікрофона

Напруга сигналу на виході мікрофонів зазвичай має досить низький рівень, від 0,2 до 2 мВ, тому у разі використання електретного мікрофона буде достатньо коефіцієнта підсилення 50...100. Для схем мікрофонних підсилювачів залишається вимога малих нелінійних спотворень (1...2%), тому застосовують негативні зворотні зв'язки. Мікрофонні підсилювачі нерідко працюють в умовах сильних високочастотних полів, які можуть спричинити наведення високочастотної напруги на мікрофоні, шнурах та деталях. Інколи виникає самозбудження підсилювача на частотах від кількох Гц до десятків кГц, що спричиняють побічні випромінювання. Тому мікрофон потрібно екранувати металевією сіткою або окремо з'єднати із заземленням або корпусом.

Мікрофонний підсилювач повинен мати такі параметри:

- діапазон частот 50...15000 Гц;
- нерівномірність АЧХ не більше $\pm 0,5$ дБ на частоті 1 кГц;
- вхідний опір підсилювача, за якого забезпечується максимальне співвідношення сигнал/шум у всьому діапазоні частот, вибирається втричі більшим ніж повний внутрішній опір мікрофона;
- напруга власного рівня шумів та фону на вході — не більше 5 мкВ;
- великий динамічний діапазон.

Однією з особливостей роботи ресстратора МЛА є те, що амплітуди акустичних сигналів дронів можуть змінюватись в дуже широкому діапазоні в залежності від відстані або навколишнього середовища. Відповідно щоб приймач не досягав рівня насичення зі зміною вхідних сигналів у широких межах, тобто мав великий динамічний діапазон, зараз використовують *логіарифмічні підсилювачі* або *системи автоматичного регулювання підсилення* (АРП) [7].

Основними *перевагами* використання логарифмічних підсилювачів є широкий робочий динамі-

чний діапазон до 7...9 декад. Такі підсилювачі безінерційні — здатні реагувати на регулярні та випадкові завади, можуть миттєво відновлювати чутливість після впливу сильних перешкод. Низький рівень шуму, робить логарифмічні підсилювачі ідеальними для використання в додатках для підсилення сигналів низького рівня. Через нелінійний (логарифмічний) відгук такі підсилювачі є ідеальними для застосування, де вихідна потужність повинна бути пропорційна логарифму вхідного сигналу, наприклад, в обробці аудіо або радіосигналів.

Головними ж *недоліками* підсилювачів є інтермодуляційна вибірковість — через нелінійність характеристики підсилювача два слабких сигнали будуть давати додаткові «продукти» перетворення, тобто у спектрі почнуть з'являтися складові, яких у початковому сигналі не має. *Обмежена точність та обмежений частотний діапазон* не дають логарифмічним підсилювачам забезпечити достатню смугу пропускання, тому вони не підходять для деяких високочастотних застосувань. Хоча логарифмічна характеристика підсилювача може бути перевагою, через *нелінійність реакції* у деяких випадках вона також може бути і недоліком, коли потрібна лінійна характеристика. *Складніша схемотехнічна конструкція*, ніж у інших підсилювачів, може призвести до вищих виробничих витрат.

Підсилювачі з системою АРП використовують для ефективнішого придушення завад навколишнього середовища та отримання ширшого динамічного діапазону. Діапазон регулювання обмежений знизу рівнем власних шумів, а зверху — максимальною неспотвореною напругою. Точність регулювання залежить від коефіцієнта підсилення системи та обмежується її стійкістю. Глибина регулювання хорошого підсилювача з системою АРП повинна складати 40...100 дБ.

Важливою *перевагою* використання підсилювачів з АРП є *політишене співвідношення сигнал/шум* — коефіцієнт підсилення збільшується для слабких сигналів і зменшується для сильних, що значно знижує рівень шуму і спотворень у вихідному сигналі. Регулюючи коефіцієнт підсилення аудіосигналу, АРП забезпечує постійний рівень вихідного сигналу, незалежно від рівня вхідного сигналу, що дає кращу *узгодженість*. *Поліпшення чіткості* аудіосигналів відбувається шляхом зменшення спотворень, які можуть виникнути, коли рівень вхідного сигналу перевищує максимальний вихідний рівень підсилювача. АРП *зменшує зворотній зв'язок*, який виникає, коли підсилений аудіосигнал з гучномовця вловлюється мікрофоном, викликаючи небажану петлю звуку. З *недоліків* виділяють *обмежений динамічний діапазон*, якщо рівень вхідного сигналу перевищує максимальний вхідний рівень, схема АРП може бути не в змозі компенсувати підвищений рівень сигналу, що призведе до спотворення і відсікання вихідного сигналу. Схеми АРП можуть вносити *додатковий шум* в аудіосигнал через контур керування, тим самим *обмежуючи контроль*.

Для отримання широкого динамічного діапазону та захисту приймача від перевантаження використовують схеми АРП зі зворотним регулюванням. Перевагами такого виду схем є великий динамічний діапазон, малий рівень струму регулювання та мала залежність другорядних параметрів підсилювача від напруги регулювання. Але така система є інерційною, тобто їй необхідний деякий час відновлення усталеного стану на виході після стрибка напруги, однак акустичні сигнали від МЛА не є швидкозмінними, тому цим дефектом системи можна знехтувати.

Зараз існує багато різноманітних варіантів реалізації таких систем, тому для проведення експерименту доцільніше використовувати готовий підсилювач у вигляді інтегральної мікросхеми, аніж розробляти окрему електрично-принципову схему. Після аналізу ринку, пропонується модуль на мікросхемі *MAX9814*. Пристрій складається з кількох окремих схем: попереднього підсилювача з низьким рівнем шуму, підсилювача зі змінним підсиленням, вихідного підсилювача, генератора напруги зміщення мікрофона та схеми керування АРП, для пригнічення сусідніх «гучних» звуків, щоб вони не пригнічували корисні сигнали і не перевантажували підсилювач. Цей модуль відмінно підходить для запису або виявленню звуку в умовах гучних звуків, що змінюються у широких межах. Внутрішній генератор напруги зміщення мікрофона забезпечує зміщення 2 В, яке підходить для більшості електретних мікрофонів. Трирівневий цифровий вхід програмує співвідношення швидкості спрацьовування до швидкості відновлення автоматичного регулятора підсилення, встановлює значення по замовчуванню 1: 4000. Час затримки АРП фіксований і дорівнює 30 мс.

Основні характеристики модуля:

- напруга живлення: 2,7...5,5 В (за струму 3 мА);
- діапазон робочих частот: 20...20 кГц;
- співвідношення сигнал/шум: 61 дБ;
- динамічний діапазон: 60 дБ;
- малі загальні гармонічні спотворення: 0,04 %;
- низька вхідна щільність шуму 30; нВ/ $\sqrt{\Gamma\text{ц}}$
- діапазон робочих температур: -40...+85 °С;
- автоматичне регулювання підсилення, три коефіцієнта підсилення: 40 дБ, 50 дБ або 60 дБ.

Вихідна напруга підсилювача становить близько 2 В за зміщення постійного струму 1,25 В, тому його можна легко використовувати з будь-яким аналого-цифровим перетворювачем з входом до 3,3 В. Для підключення АЦП до лінійного входу просто необхідно послідовно використовувати блокувальний конденсатор 10 мкФ, щоб усунути зсув постійного струму.

2.3. Вибір АЦП для оцифрування сигналу

Аналогові акустичні сигнали від МЛА, які зареєстровані з використанням мікрофонів для подальшої обробки на обчислювальних пристроях, спочатку необхідно перевести у цифровий вид за допомогою АЦП, а далі подавати на вхід звукової карти ПК. На вибір АЦП впливає діапазон робочих частот та динамічний діапазон мікросхеми мікрофонного підсилювача. Для нормального відновлення цифрового вихідного сигналу, тобто для нормального відтворення звуку, сприйнятого мікрофоном, достатньою є частота дискретизації, яка за теоремою Котельникова, має бути в 2 рази більшою ніж максимальна робоча частота мікрофона. Зазвичай під цим позначенням розуміють максимальну частоту, за якої усі параметри перетворювача специфіковані. Варто зауважити, що підвищення частоти дискретизації позначається на обсязі переданих даних, тому високі показники не завжди є оптимальними. Оскільки вибрана модель мікрофона за технічним паспортом працює у частотному діапазоні (f) до 20 кГц, то частота дискретизації має дорівнювати 40 кГц.

Шумові характеристики АЦП відносяться до кількості небажаного шуму у вихідних даних. АЦП з низьким рівнем шуму є кращим для застосування, де потрібна висока точність. Оскільки робоча смуга частот 20 кГц, а вхідний рівень шумів мікросхеми на цій частоті $e_n = 30 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, то за мінімального коефіцієнта підсилення ($k = 40 \text{ дБ} = 100 \text{ разів}$) *ЕРС шуму* (ε_n) АЦП

$$\varepsilon_n = e_n \sqrt{f} k = 0,43 \text{ мВ.}$$

Вхідний діапазон напруги або максимальний розмах сигналу, що забезпечує мікросхема дорівнює 2 В (–1 В та 1 В — мінімальне та максимальне пікове значення), тому *опорна напруга* АЦП — 2,54 В, як найближче стандартне значення. Тоді *мінімальний рівень вхідного сигналу* буде 0 В, а *максимальний* (U) — 2,54 В. *Кількістю рівнів квантування* (N) є значення опорної напруги АЦП, поділене на ширину сходинки (величину напруги молодшого біту):

$$N = U/\varepsilon_n = 5893.$$

Розрядність (n) вихідного коду визначає кількість цифрових бітів у вихідних даних, що відображає точність АЦП, обчислюється за формулою

$$n = \log_2 (N + 1) = 12,25.$$

Відповідно необхідно брати АЦП з розрядністю не менше 12, вже шум квантування суттєво впливати не буде, але існує ймовірність втрати частини інформації через незначно меншу кількість рівнів квантування. Щоб уникнути такої ситуації, краще використовувати 14- або 16-розрядне АЦП, які на сьогодні є найприйнятнішими для перетворення звукових сигналів. Використання АЦП з більшою розрядністю є недоцільним, оскільки через імпульсні завади або теплові шуми молодші біти не будуть нести корисну інформацію.

Для отримання звуку з низьким рівнем шумів та спотворень під час запису краще використовувати зовнішню звукову карту. На експериментальному стенді аудіосигнал після підсилення з мікросхеми MAX9814 надходить на лінійний вхід 6-канальної зовнішньої звукової карти моделі CM6206, яка через інтерфейс USB під'єднана до персонального комп'ютера, де і відбувається процедура обробки прийнятих сигналів. Інтерфейс АЦП у звуковій карті використовує стандарт S/PDIF, що підтримує передавання цифрових аудіосигналів від одного пристрою до іншого без процедури перетворення в аналоговий сигнал, що дає змогу уникнути погіршення якості звуку і є цілком сумісним з рештою системи. Перевагою типу S/PDIF є відмінна стійкість до електричних перешкод. Основні технічні характеристики звукової карти CM6206:

- апаратний декодер звуку та підтримка 5.1 звук;
- інтерфейс під'єднання та енергоспоживання: USB 2.0;
- ЦАП/АЦП: розрядність 16 біт та частота дискретизації 48 кГц.

3. Експериментальна перевірка працездатності акустичного детектора

3.1. Опис вимірювальної установки

Для приймання звукових сигналів МЛА на відкритому повітрі на висоті 1 м над землею встано-

влено всеспрямований електретний мікрофон з поролоною вітрозакисною насадкою. Він підключався до недорогого мікрофонного модуля MAX9814 та, через зовнішню звукову карту CM6206, передавав отриманий сигнал на ПК, який налаштований на запис аудіо файлів з частотою дискретизації 48 кГц. Мікрофон та модуль живляться від акумулятора з напругою до 5 В, звукова карта через інтерфейс USB — від комп'ютера, який може житися від батареї або від місцевих розеток. Для створення набору аудіоданих звуків МЛА, використано дрон *DJI Mavic 2 Pro*. Цей кастомізований квадрокоптер зараз активно використовується військовими для розвідки, оскільки має малі габаритні розміри (322×242×84 мм) та вагу (907 г), а дизайн корпусу з чотирма двигунами у поєднанні з добре збалансованими легкими пропелерами створює чудові аеродинамічні характеристики, що зменшує рівень шуму та збільшує максимальну швидкість польоту до цілі. Саме тому ця модель дрону цікава для дослідження.

3.2. Умови проведення експерименту

Проведено випробування у *статичному* режимі — квадрокоптер зависав на 1 хвилину у заданіх визначених координатних точках, що змінюються за відстанню та висотою (рис. 5).

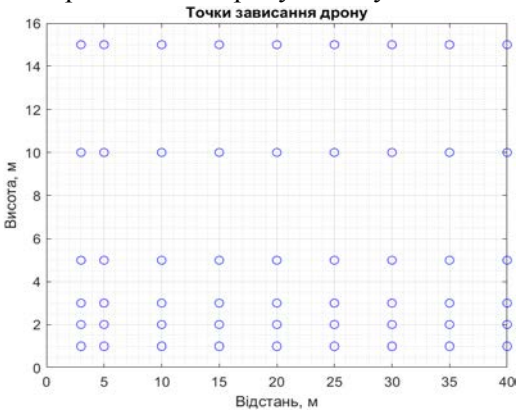


Рис. 5. Координати позицій зависання дрону

Записи позначені висотами та відстанями у 2D площині, з мікрофоном на початку координатної площини. У результаті згенеровано 2160 записів тривалістю 1 секунда кожна та площею перекриття 50 %, які у майбутньому планується використовувати для навчання штучної нейронної мережі.

Тестові польоти здійснювались на відкритій площадці полігону за містом, без промислових об'єктів поряд, в холодну погоду з температурою повітря 5°C. Під час запису відчувались невеличкі шуми поривів вітру та руху транспорту по трасі, що розташована на відстані 1 км.

3.3. Результати експерименту

З роботи [8] випливає твердження, що МЛА в режимі польоту мають періодичні спектральні компоненти, а кількість двигунів відповідає кількості основних тонів у випромінюванні (рис. 6), що є одними з найголовніших їхніх ознак, на яких базуються методи ідентифікації та класифікації дронів з використанням енергетичного підходу. Кожний гармонічний тон випромінювання дрону f_i визначається як добуток частоти обертання електричного мотора (основної гармоніки) f_0 , порядкового номера відповідної гармоніки i та числа лопатей пропелера N : $f_i = N \cdot f_0 \cdot i$.

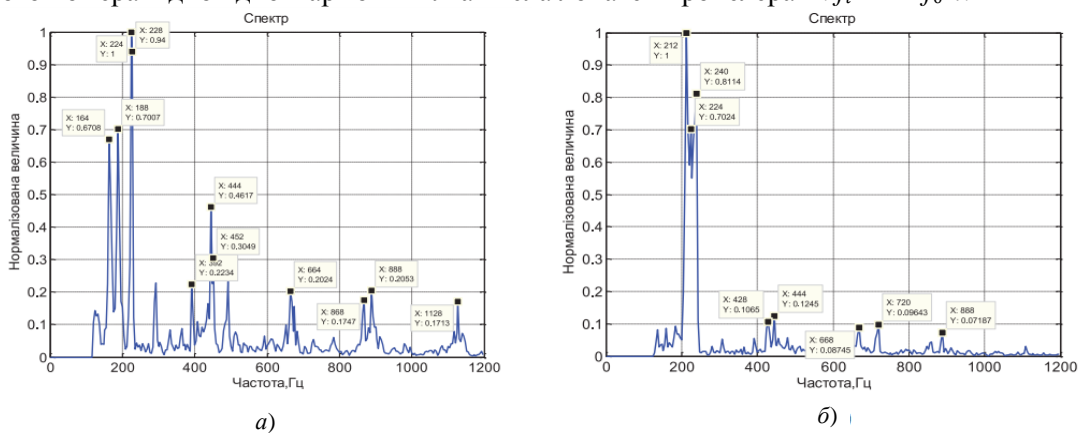


Рис. 6. Нормований спектр акустичного випромінювання МЛА на відстані від мікрофона: а — 20 м; б — 50 м

Для виявлення об'єктів на максимальній відстані краще використовувати аналіз на основі енергетичних характеристик звукових процесів [9]. Оброблення отриманих аудіозаписів відбувалось з використанням бібліотек програмного забезпечення MATLAB. Проаналізуємо підсумкові графіки спектрів щільності потужності сегментів аудіосигналів квадрокоптера, розраховані методом Велча (рис. 7).

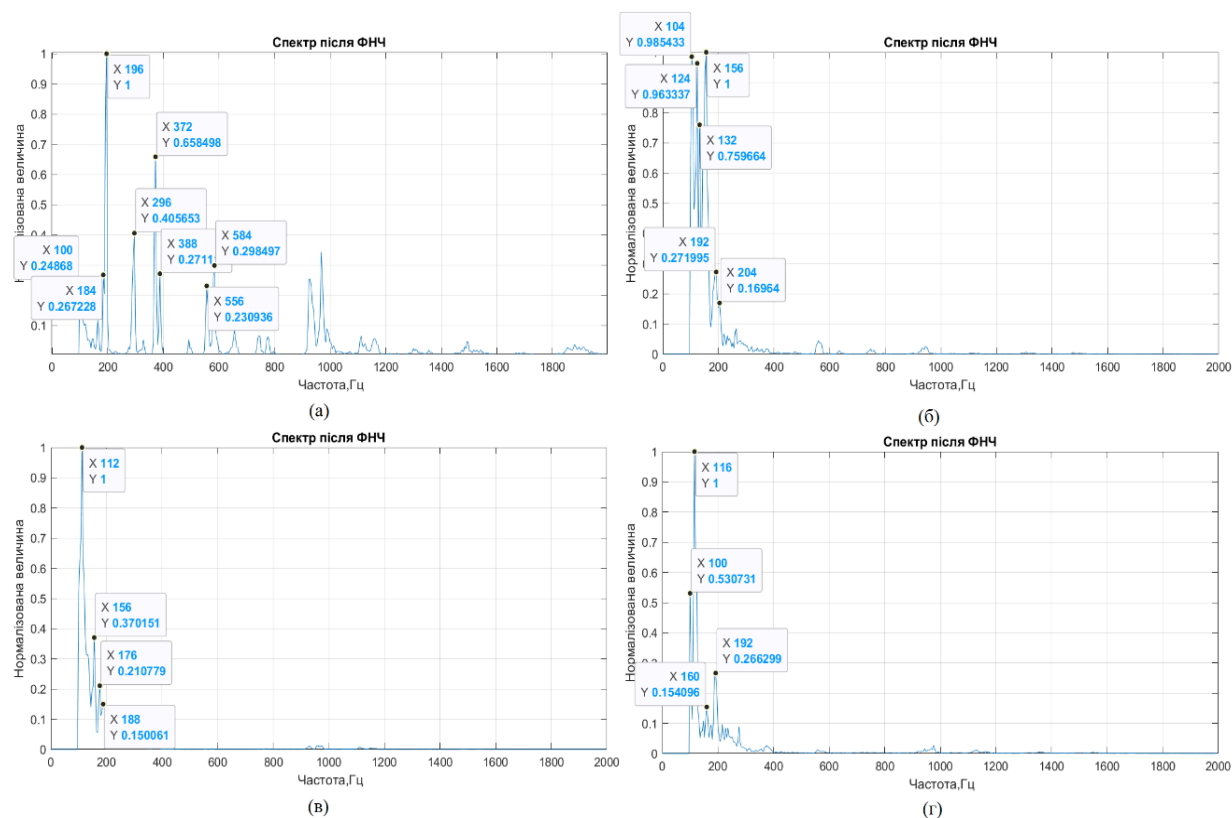


Рис. 7. Нормований спектр акустичного випромінювання квадрокоптера на відстані: а — 10 м; б 20 м; в — 30 м; г — 40 м

У порівнянні графіків акустичного випромінювання (рис. 6 та 7) підтверджується періодичність спектральних максимумів квадрокоптера, які складаються з чотирьох основних тонів та періодичних груп гармонічних складових, розташованих близько один до одного, та з часом змінюють своє положення на частотній осі, залежно від вітрового навантаження на пропелери. Через його вплив на швидкість обертання, остання є різною для кожного з електродвигунів. Також видно, що незалежно від відстані, основна інформація про об'єкт лежить у діапазоні частот від 100 Гц до 1500 Гц, це підтверджує експеримент у роботі [10]. Спектральні компоненти шуму вітру знаходяться на частотах до 500 Гц [11], тому для його компенсування варто використовувати захисну насадку на мікрофон, щоб збільшити дальність та ймовірність безпомилкового виявлення МЛА.

Варто зауважити, що зі збільшенням відстані від мікрофона до об'єкта, значно зменшується відносний рівень гармонічних складових тонів випромінювання дронів, а також відбувається ефект порушення гармонічними частотами принципу кратності основним тонам. На відстанях від 30 м, деякі складові основних тонів випромінювання, а тим більше їхні гармоніки, зникають і завдання виявлення дрону гармонічним способом сильно ускладнюється. Саме тому надійніше базувати алгоритми виявлення безпілотників на аналізі енергетичної характеристики, яка зважає на вплив усіх складових спектра випромінювання, а також незалежна від виду МЛА.

Основним критерієм оцінки роботи акустичного детектора є якість отриманих сигналів від МЛА на максимальній дальності. На відстані до 40 м дані підтверджують присутність частот основного тону випромінювання, кількість яких збігається з кількістю електромоторів дрону. Ці характеристики є одними з найголовніших ознак, на яких варто ґрунтувати методи ідентифікації та класифікації дронів з використанням енергетичного підходу.

Варто враховувати, що на дистанції до об'єкта, більшій ніж 40 м, у спектрі сигналу будуть наявні не всі головні тони випромінювання, наприклад, лише 3, у цьому випадку квадрокоптер буде класифікований, як коптер з трьома пропелерами. Незважаючи на це з упевненістю можна говорити про наявність ворожого МЛА у просторі сканування, отже із завданням виявлення об'єктів розроблювальний детектор справляється.

У майбутньому на основі бібліотеки аудіофайлів, отриманих під час експерименту, планується розробити спеціальний алгоритм аналізу сигналів з використанням методів машинного навчання для збільшення максимальної дальності детектування та ефективної класифікації МЛА.

Висновки

У статті проаналізовано компоненти для побудови дешевого та ефективного акустичного детектора та за відповідними параметрами підбрано реальні елементи для схмотехнічної реалізації прототипу пристрою. Як реєстратор звукових хвиль МЛЖ пропонується використовувати електретний мікрофон, наприклад, моделі СМА-4544PF-W, з поролоновою вітрозахисною насадкою. Для забезпечення широкого динамічного діапазону та захисту детектора від перевантаження, потрібно вибирати підсилювач з системою АРП зі зворотним регулюванням на базі мікросхеми МАХ9814. Акустичні сигнали від МЛЖ не є швидкозмінними, тому інерційністю системи АРП знехтувано. Для подальшої обробки аналогових сигналів необхідний АЦП з частотою дискретизації не менше 40 кГц та розрядністю 14 біт. Запропоновано використовувати зовнішню звукову карту СМ6206 з лінійним входом.

У підсумку польових випробувань створено базу аудіофайлів шуму квадрокоптера DJI Mavic 2 Pro. Точність виявлення об'єкта акустичним детектором зменшувалась зі зростанням відстані від МЛЖ до мікрофона. Максимальне значення відстані достовірного детектування — 40 метрів та залежить від рівнів акустичного випромінювання дрону, потужності акустичних шумів у зоні прийому, а також погодних умов. Беручи це до уваги, можна констатувати, що пристрій успішно виконує свої функції, з огляду на його низьку вартість та простоту в експлуатації. Для поліпшення характеристик виявлення дронів, такий детектор потребує вдосконалення, до прикладу, встановлення декількох якісніших мікрофонів для утворення спрямованого прийому.

Спектри отриманих аудіозаписів випромінювання квадрокоптера чітко показують наявність основних частот тону, кількість яких збігається з кількістю електромоторів МЛЖ. Така залежність та кількість лопатей пропелера є важливими ознаками для розробки алгоритму класифікації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- [1] G. C. Birch, J. C. Griffin, and M. K. Erdman, *UAS Detection, Classification, and Neutralization: Market Survey 2015*. United States: N. p., 2015. <https://doi.org/10.2172/1222445>.
- [2] S. Park, H. T. Kim, S. Lee, H. Joo, and H. Kim, "Survey on Anti-Drone Systems: Components, Designs, and Challenges," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 42635-42659, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065926>.
- [3] С. О. Сокольський, і А. В. Мовчанюк, «Огляд методів виявлення та локалізації малих безпілотних літальних апаратів», *Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, № 87, с. 46-55, Грудень, 2021. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.87.46-55>.
- [4] А. В. Коротун, Н. А. Смирнова, і Я. В. Карандась, *Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з дисципліни «Мікро- і наносенсори» для студентів спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»*. Запоріжжя, Україна: НУ «Запорізька політехніка», 2019, 85 с.
- [5] *Reclamation Managing Water in the West. Resource management plan Navajo reservoir area Colorado and New Mexico. Final environmental assessment and finding of no significant impact*. Colorado, USA: Navajo Reservoir RMP/FEA, June, 2008, pp. 295-296.
- [6] М. Є. Сухов, С. Д. Бать, В. В. Колосов, і О. Г. Чупаков, *Схмотехніка високоякісного звуковідтворення*. Київ, Україна: Техніка, 1992, 127 с.
- [7] И. М. Мыщенко, Д. Д. Халамейда, «Импульсный логарифмический усилитель с автоматической регулировкой усиления в диапазоне частот 1 МГц...8 ГГц», *Радиофизика та електроніка*, т. 23, № 1, с. 4-9, 2018. <https://doi.org/10.15407/rej2018.01.004>.
- [8] С. О. Козерук, і О. В. Коржик, «Виявлення, локалізація та ідентифікація малих літальних апаратів за акустичним випромінюванням», *Вісник НТУУ "КПІ", Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, № 89, с. 29-38, Вересень, 2022. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.89.29-38>.
- [9] С. О. Козерук, і О. В. Коржик, «Кореляційний пеленгатор малих літальних апаратів», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, № 79, с. 41-47, 2019. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.79.41-47>.
- [10] В. М. Карташов и др., «Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов», *Радіотехніка: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.*, № 191, с. 181-187, 2017.
- [11] Мінрегіон України. 1 сесія. (2013, груд. 27). Наказ № 630, *ДБН В.1.1-31:2013 Захист територій, будинків і споруд від шуму*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/0-0-0-1814-20>.

Рекомендована кафедрою радіотехніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 24.03.2023

Сокольський Сергій Олегович — аспірант кафедри прикладної радіоелектроніки, e-mail: sokolskyi@ros.kpi.ua ;

Мовчанюк Андрій Валерійович — канд. техн. наук, доцент, в. о. завідувача кафедри прикладної радіоелектроніки, e-mail: movchanuk@rtf.kpi.ua .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

Electro-Acoustic Path of the Detector for Detection of Small Unmanned Aerial Vehicles

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Small unmanned aerial vehicles have become increasingly popular in recent years for both commercial and recreational use. However, with the onset of war, the threat of using such drones for illegal purposes such as reconnaissance operations and terrorist attacks on the most vulnerable and important targets — military equipment, government buildings, airports or places with a large concentration of people — has rapidly increased. As a result, many methods have been developed for detecting drones, but the most promising of these is considered to be the acoustic method. This article discusses the implementation of a simple and inexpensive acoustic detector with a single microphone, enabling the detection of the sound emitted by the drone engines and propellers, which can then be analyzed to determine the location and trajectory of the unmanned aircraft.

To register sound waves, it was proposed to use the electret microphone CMA-4544PF-W with a foam windscreen, and to ensure a wide dynamic range and protect the detector from overload, an amplifier with an automatic gain control system with feedback regulation based on the integrated circuit MAX9814. For further digital signal processing on a PC, an analog-to-digital converter with a sampling frequency of 48 kHz and a bit depth of 16 bits will be used, as well as an external sound card CM6206 with a line input.

As a result of test flights, a database of audio files of the noise of the DJI Mavic 2 Pro quadcopter was created, which is now actively used by the military for reconnaissance, the accuracy of object detection by the acoustic detector was studied. The distance from the drone to the microphone affected the accuracy of detection, and the maximum value of reliable detection was 40 meters. The device successfully performs its functions, given its low cost and ease of use, but requires improvement to enhance its characteristics. The spectra of the obtained audio recordings of quadcopter emissions make it possible to determine the main frequencies of tones, the number of which coincides with the number of electric motors and are important features for further identification of the drone.

Keywords: drone, small unmanned aerial vehicle, spectrum, signal processing, signal detection, amplifier with an automatic gain control system, analog-to-digital converter.

Sokolskyi Serhii O. — Post-Graduate Student of the Chair of Applied Radio Electronics, e-mail: sokolskyi@ros.kpi.ua ;

Movchanyuk Andrii V. — Associate Professor, Acting Head of the Chair of Applied Radio Electronics, e-mail: movchanuk@rtf.kpi.ua