

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

До захисту допущено:

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«___» _____ 20__ р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»,
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: Вплив фонових шумів на ефективність акустичного виявлення БПЛА**

Виконав:
студент IV курсу, групи РЕ-22

Соломка Максим Юрійович _____

Керівник: Ст.викл.PhD Сокольський С.О. _____

Рецензент: Булашенко Андрій Васильович, ст. викл. каф. РІ _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студента

1.Тема роботи «Вплив фоновому шуму на ефективність акустичного виявлення БПЛА»

2.Керівник роботи Сокольський Сергій Олегович, затверджені наказом по університету від «__» травня 2026 р. №

Строк подання студентом роботи 08 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи: Акустичні записи безпілотних літальних апаратів з набору Drone Audio Dataset у форматі WAV, методи цифрової обробки сигналів, алгоритми спектрального аналізу FFT, моделі адитивного білого гаусового шуму (AWGN), програмне середовище MATLAB для моделювання, аналізу та обробки акустичних сигналів БПЛА.

4. Зміст пояснювальної записки 1) Аналіз сучасних методів виявлення безпілотних літальних апаратів, 2) Дослідження характеристик акустичних сигналів БПЛА та впливу фоновому шуму 3) Розробка алгоритму цифрової обробки та фільтрації акустичних сигналів 4) Експериментальне дослідження ефективності виявлення БПЛА при різних рівнях шуму, 5) Аналіз отриманих результатів та оцінка ефективності запропонованого підходу

5. Блок-схема алгоритму акустичного виявлення БПЛА, Структурна схема системи акустичного виявлення БПЛА, Презентація до захисту дипломного проєкту (10 слайдів)

6. Дата видачі завдання 14 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних методів виявлення БПЛА та огляд літературних джерел	14.04.26-06.05.26	
2	Постановка задачі дослідження та аналіз акустичних сигналів БПЛА	07.05.26-10.05.26	
3	Дослідження впливу фонового шуму на акустичні сигнали БПЛА	11.05.26-18.05.26	
4	Розробка алгоритму цифрової обробки сигналів та FFT-аналізу	19.05.26-23.05.26	
5	Реалізація алгоритму в середовищі MATLAB та проведення експериментів	24.05.26-29.05.26	
6	Аналіз результатів дослідження та оцінка ефективності фільтрації	30.05.26-05.06.26	
7	Оформлення пояснювальної записки, графічних матеріалів та підготовка презентації	06.06.26-08.06.26	

Студент

Керівник

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота присвячена дослідженню впливу фонового шуму на ефективність акустичного виявлення безпілотних літальних апаратів та підвищенню якості їх виявлення за допомогою методів цифрової обробки сигналів.

У роботі розглянуто основні методи виявлення БПЛА, проаналізовано особливості акустичного підходу та джерела фонового шуму, які впливають на якість виявлення. Виконано дослідження акустичних сигналів БПЛА та проведено оцінку впливу шуму при значеннях співвідношення сигнал/шум 20 дБ, 10 дБ та 5 дБ.

Для обробки сигналів використано швидке перетворення Фур'є та цифровий смуговий фільтр Баттерворта четвертого порядку. Результати експериментального дослідження показали збільшення співвідношення сигнал/шум з 5,04 дБ до 7,96 дБ після фільтрації, що відповідає покращенню якості сигналу на 57,91 %.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування методів цифрової обробки сигналів для підвищення якості акустичного виявлення безпілотних літальних апаратів в умовах фонового шуму.

Ключові слова: БПЛА, акустичне виявлення, фоновий шум, цифрова обробка сигналів, FFT, фільтр Баттерворта, SNR, спектральний аналіз.

ABSTRACT

The bachelor's thesis is devoted to studying the influence of background noise on the efficiency of acoustic unmanned aerial vehicle (UAV) detection and improving detection quality using digital signal processing methods. The thesis reviews the main UAV detection methods, analyzes the features of the acoustic approach, and examines background noise sources affecting detection performance. Acoustic UAV signals were investigated, and the influence of noise was evaluated for signal-to-noise ratio values of 20 dB, 10 dB, and 5 dB. Fast Fourier Transform (FFT) and a fourth-order Butterworth band-pass filter were used for signal processing. Experimental results demonstrated an increase in the signal-to-noise ratio from 5.04 dB to 7.96 dB after filtering, corresponding to a 57.91% improvement in signal quality.

The obtained results confirm the effectiveness of digital signal processing methods for improving acoustic UAV detection performance under noisy conditions.

Keywords: UAV, acoustic detection, background noise, digital signal processing, FFT, Butterworth filter, SNR, spectral analysis.

Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АКУСТИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ БПЛА	11
1.1 Загальна характеристика БПЛА як об'єктів виявлення	11
1.2 Аналіз методів виявлення БПЛА.....	13
1.3 Особливості акустичного методу, його переваги та недоліки	16
1.4 Поняття фонового шуму та його види	17
1.4.1 Вплив міського середовища на акустичне виявлення БПЛА.....	20
1.4.2 Вплив погодних умов на поширення акустичного сигналу	21
1.4.3 Співвідношення сигнал/шум у системах акустичного виявлення.....	22
1.5 Вплив шуму на процес виявлення сигналів	22
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ БПЛА ТА ВПЛИВУ ФОНОВОГО ШУМУ	25
2.1 Характеристики акустичних сигналів БПЛА.....	25
2.2 Основні види фонового шуму та їх моделювання.....	27
2.3 Методи аналізу сигналів.....	30
2.4 Дослідження впливу шуму на якість сигналу	32
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ.....	34
3.1 Попередня обробка сигналу	34
3.2 Методи фільтрації шуму.....	36
3.3 Виділення ознак сигналу	38
3.4 Побудова алгоритму виявлення БПЛА.....	40
3.5 Реалізація алгоритму.....	42

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА В УМОВАХ ШУМУ	44
4.1 Опис умов проведення експерименту	44
4.2 Оцінка ефективності виявлення при різному рівні шуму	45
4.3 Порівняння результатів до і після обробки сигналу	48
4.4 Аналіз отриманих результатів	50
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	50
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	53

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

БПЛА — безпілотний літальний апарат.

FPV (First Person View) — керування дроном від першої особи за допомогою відеотрансляції.

DSP (Digital Signal Processing) — цифрова обробка сигналів.

FFT (Fast Fourier Transform) — швидке перетворення Фур'є.

STFT (Short-Time Fourier Transform) — короткочасне перетворення Фур'є.

MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients) — мел-частотні кепстральні коефіцієнти.

SNR (Signal-to-Noise Ratio) — співвідношення сигналу до шуму.

AWGN (Additive White Gaussian Noise) — адитивний білий гаусовий шум.

WAV (Waveform Audio File Format) — формат зберігання аудіоданих.

Accuracy — загальна точність класифікації.

Precision — точність позитивних спрацьовувань.

Recall — повнота виявлення позитивних спрацьовувань.

ВСТУП

В умовах стрімкого розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) все більшої ваги набуває завдання їх своєчасного виявлення. Дрони знаходять широке застосування як у цивільному житті, так і у військовій сфері, зокрема для виконання завдань зі спостереження, розвідки, доставки вантажів та інших потреб. Водночас їхнє використання може становити загрозу для об'єктів критичної інфраструктури, безпеки громадян і інформаційної безпеки, що підкреслює важливість розробки дієвих систем виявлення безпілотних літальних апаратів [1, 2].

Серед існуючих способів виявлення безпілотних літальних апаратів, зокрема оптичного, радіолокаційного та акустичного, особливу увагу привертає саме акустичний метод. Він ґрунтується на аналізі звукових сигналів, які виникають під час роботи двигунів і пропелерів безпілотних літальних апаратів. Серед переваг цього підходу можна виділити його відносну простоту впровадження, доступну вартість обладнання та здатність функціонувати навіть за умов обмеженої видимості [1, 4]. Ефективність акустичного виявлення значно зменшується під час реального використання через вплив фонового шуму. Джерела шуму можуть включати транспорт, промислові об'єкти, природні явища, такі як вітер і дощ, а також інші фактори. Фоновий шум ускладнює виділення корисного сигналу безпілотного літального апарата, знижує співвідношення сигнал/шум і може призводити до помилок виявлення або навіть до повної втрати сигналу [7, 8].

У цьому контексті важливим є вивчення впливу фонового шуму на процес акустичного виявлення безпілотних літальних апаратів, а також розробка шляхів його мінімізації. Застосування методів обробки сигналів, таких як фільтрація та спектральний аналіз, сприяє підвищенню якості виділення корисного сигналу та забезпечує кращу ефективність його виявлення. Метою цієї роботи є дослідження впливу фонового шуму на ефективність акустичного виявлення безпілотних літальних апаратів та підвищення якості їх виявлення шляхом застосування методів цифрової обробки сигналів і спектрального аналізу.

Для досягнення визначеної мети слід виконати такі завдання:

- виконати аналіз методів виявлення безпілотних літальних апаратів;
- вивчити характеристики акустичних сигналів, притаманних БПЛА;
- дослідити, як фоновий шум впливає на якість отримуваних сигналів;
- опрацювати та застосувати методи мінімізації впливу шуму;
- провести оцінку ефективності запропонованого підходу.

Об'єкт дослідження охоплює процес акустичного виявлення безпілотних літальних апаратів. Предмет дослідження полягає у вивченні методів обробки акустичних сигналів за умов наявності фонового шуму. Практичне значення роботи полягає в можливості використання отриманих результатів для підвищення ефективності роботи систем акустичного виявлення БПЛА в реальних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АКУСТИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ БПЛА

1.1 Загальна характеристика БПЛА як об'єктів виявлення

Сьогодні існує широкий вибір безпілотних літальних апаратів, які різняться за конструкцією, призначенням, розмірами та принципами польоту. Залежно від особливостей безпілотні літальні апарати можна класифікувати на кілька основних типів. Одними з найпоширеніших безпілотних літальних апаратів є багато роторні моделі, особливо квадрокоптери. Ці пристрої оснащені кількома пропелерами, які дозволяють здійснювати вертикальний зліт, посадку та забезпечують високий рівень маневреності. Квадрокоптери активно застосовуються для зйомок відео, спостереження за територіями, доставки легких вантажів та виконання розвідувальних завдань. Цей тип БПЛА зазвичай генерує характерний звук, який можна використати для його виявлення [2, 4].

Ще одним популярним типом дронів є FPV-дрони. Їх основною особливістю є керування від першої особи за допомогою системи відеозображення у режимі реального часу. FPV-дрони широко використовуються як у спорті, так і у військових операціях. Ці пристрої вирізняються високою швидкістю, маневреністю та характерним звуком пропелерів під час польоту [3, 4].

Існують також безпілотні літальні апарати літакового типу. На відміну від квадрокоптерів, ці пристрої оснащені нерухомими крилами та можуть літати на великі відстані. Головною перевагою цих апаратів є тривалий час у повітрі та здатність ефективно функціонувати на значних висотах. Одночасно для їх запуску нерідко потрібні додаткові пристрої чи спеціальні умови [4].

Особливу групу становлять безпілотні літальні апарати військового призначення. Їх можна застосовувати для розвідки, коригування вогню, спостереження і виконання ударних завдань. Такі безпілотні літальні апарати можуть відрізнятися великими розмірами, складними навігаційними системами та наявністю спеціалізованого обладнання [1, 4]. Окрім того, безпілотні літальні апарати можна розрізняти за масою, дальністю польоту та їхнім призначенням.

Розрізняють безпілотні апарати за розмірами: малі, середні та великі. Основні типи безпілотних літальних апаратів та їх характеристики наведено в таблиці 1.1.

У цій роботі основний акцент зроблено на малогабаритні БПЛА, адже саме вони становлять найбільшу складність для виявлення за допомогою традиційних засобів і водночас генерують характерний акустичний сигнал [2, 3].

Таблиця 1.1 — Основні типи БПЛА

Тип БПЛА	Маса, кг	Швидкість, км/год	Особливості конструкції	Характерний акустичний сигнал
Квадрокоптер	0,5–5	30–80	Чотири пропелери, вертикальний зліт і посадка	Стабільний періодичний шум із вираженими гармоніками
FPV-дрон	0,3–2	60–180	Висока маневреність та швидкість польоту	Високочастотний шум пропелерів
БПЛА літакового типу	2–50	80–250	Нерухоме крило, велика дальність польоту	Рівномірний шум двигуна та повітряного потоку
Військовий БПЛА	5–1000+	100–500	Розвідувальні та ударні функції	Залежить від типу силової установки

Безпілотні літальні апарати, відомі як дрони, сьогодні знайшли широке використання в різних сферах. Вони застосовуються як у військовій сфері для

розвідки, спостереження та виконання спеціальних операцій, так і у цивільному житті для зйомки відео, моніторингу місцевості та транспортування вантажів. Завдяки компактним розмірам, високій маневреності та порівняно невисокій ціні, дрони перетворилися на доступний і ефективний інструмент для виконання різноманітних завдань. Водночас їхнє активне застосування пов'язане з певними ризиками, особливо для безпеки інфраструктурних об'єктів та захисту інформації. Тому завдання своєчасного виявлення БПЛА є актуальним [1, 2].

Особливістю дронів є їхні компактні розміри та здатність залишатися непомітними для традиційних засобів виявлення. Приклад сучасного малогабаритного БПЛА квадрокоптерного типу наведено на рисунку 1.1. Однак під час польоту БПЛА видає характерний звук, спричинений обертанням пропелерів. Саме цей звук можна використовувати для їхнього виявлення [4, 7].



Рисунок 1.1 — Приклад сучасного малогабаритного БПЛА квадрокоптерного типу

1.2 Аналіз методів виявлення БПЛА

Для виявлення безпілотних літальних апаратів використовують оптичний, радіолокаційний та акустичний методи. Кожен із цих методів має свої особливості, переваги та обмеження. Оптичний метод ґрунтується на застосуванні камер, тепловізорів та систем відеоспостереження. Головна перевага цього підходу полягає в можливості безпосереднього отримання зображення об'єкта та його ідентифікації. Оптичні системи здатні забезпечувати високу точність виявлення, особливо на малих відстанях [1, 4].

Однак, слід зауважити, що результативність застосування оптичних технік суттєво визначається факторами навколишнього середовища. Погіршення видимості через туман, опади (дощ, сніг) чи недостатнє освітлення створює значні труднощі для точної ідентифікації безпілотних літальних апаратів. Окрім цього, невеликі безпілотники буває важко побачити з великої відстані. Виявлення об'єктів за допомогою радара базується на принципі застосування радіохвиль для встановлення їхнього місцезнаходження в певному просторі. Цей метод надає перевагу у можливості здійснення операцій на великих дистанціях, незважаючи на час доби та умов освітлення. Радари знайшли широке застосування для моніторингу повітряного простору та в системах безпеки [1].

Однак, коли мова йде про компактні безпілотні літальні апарати, ефективність виявлення радаром може зменшуватися, бо їхня ефективна поверхня розсіювання є відносно малою. Додатково, нинішні дрони нерідко створюються із компонентів, що ускладнюють їх виявлення засобами радіолокації. Акустичний метод — це спосіб, який покладається на аналізі шумів, що генеруються двигунами та гвинтами безпілотних літальних апаратів під час їх функціонування. Під час експлуатації безпілотний літальний апарат видає специфічні звукові коливання. Ці звуки, своєю чергою, можуть бути зафіксовані за допомогою мікрофонних датчиків із застосуванням техніки цифрової обробки сигналів. Акустичний підхід вирізняється своєю відносною легкістю втілення, невисокою вартістю обладнання та здатністю функціонувати навіть за умов слабкої видимості. Окрім цього, сучасні системи, призначені для акустичного виявлення, активно розвиваються, застосовуючи підходи спектрального аналізу та цифрову обробку сигналів задля покращення показників їхнього функціонування [4, 7, 8].

Нинішні дослідження доводять, що акустичні системи виявлення БПЛА залишаються затребуваними та важливими. Зокрема, створюються системи, що застосовують мікрофонні решітки для запису та обробки звукових сигналів дронів. Подібні системи можуть функціонувати навіть тоді, коли радіосигнал відсутній або дрон керується за допомогою інших методів. Разом з тим, акустичний метод також має певні недоліки. Головним недоліком є наявність фонового шуму, який здатний

перекривати цільовий сигнал та ускладнювати процес виявлення дрона. Тому одним із ключових завдань є використання алгоритмів обробки сигналів з метою мінімізації впливу шумових завад [7, 8]. Порівняльну характеристику основних методів виявлення БПЛА наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 — Порівняння методів виявлення БПЛА

Метод виявлення	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Ефективність для малих БПЛА
Оптичний	Аналіз зображень з камер та тепловізорів	Висока точність ідентифікації, можливість візуального контролю	Залежність від освітлення та погодних умов	Середня
Радіолокаційний	Виявлення об'єкта за відбитими радіохвилями	Велика дальність виявлення, робота в будь-який час доби	Низька ефективність для малорозмірних БПЛА, висока вартість обладнання	Середня
Акустичний	Аналіз звукових сигналів двигунів та пропелерів	Простота реалізації, невисока вартість, робота при обмеженій видимості	Значний вплив фонового шуму та погодних умов	Висока

1.3 Особливості акустичного методу, його переваги та недоліки

Акустичний спосіб виявлення БПЛА ґрунтується на фіксації та опрацюванні звукових хвиль, що виникають у процесі польоту безпілотної. Головними джерелами звуку слугують електромотори та пропелери, які в процесі обертання генерують характерний акустичний сигнал у визначеному діапазоні частот. Характерною рисою акустичного сигналу безпілотної є його повторюваний, періодичний характер. У процесі обертання гвинтів утворюються гармонічні компоненти, які можна зафіксувати за допомогою мікрофонів та застосувати для подальшого опрацювання. Наявність специфічних частотних складових дає змогу відрізнити сигнал дрона від інших шумових джерел. Для акустичного виявлення, як правило, застосовуються окремі мікрофони або їх решітки, що забезпечують запис звукового сигналу. Отримані дані надалі опрацьовуються із застосуванням цифрових методів аналізу сигналів. У сучасних системах широко використовується спектральний аналіз, шумова фільтрація та алгоритми автоматичного розпізнавання сигналів [7, 8].

Однією з ключових переваг акустичного методу є відносна простота його реалізації. Для створення системи виявлення достатньо застосувати порівняно доступне обладнання та програмні інструменти цифрової обробки сигналів. Це робить даний підхід придатним для широкого практичного використання. Додатковою перевагою є здатність системи функціонувати в умовах поганої видимості. На відміну від оптичних систем, акустичний метод залишається ефективним вночі або за несприятливих погодних умов. До того ж акустичні системи не прив'язані до радіоканалу керування БПЛА, що є суттєвою перевагою при виявленні автономних дронів. Сучасні дослідження свідчать про те, що акустичні методи виявлення продовжують активно вдосконалюватися. Зокрема, розробляються системи на базі мікрофонних решіток, які дають змогу не лише виявляти безпілотної, а й визначати напрямок на джерело звукового сигналу. Подібні системи можуть розгортатися як у стаціонарному режимі, так і на мобільних платформах [4, 7].

Проте акустичний метод має певні недоліки. Головною проблемою залишається суттєвий вплив фонового шуму на якість виявлення. У реальних умовах сигнал безпілотної техніки може перекриватися шумом транспорту, вітром, роботою різноманітної техніки чи іншими сторонніми джерелами звуку. Це ускладнює процес виділення цільового сигналу та знижує точність виявлення дрона. Крім того, ефективність акустичного методу безпосередньо залежить від відстані до джерела звуку. Зі збільшенням відстані рівень сигналу послаблюється, а вплив шумових перешкод стає більш відчутним. До того ж погодні умови здатні впливати на розповсюдження звукових хвиль та змінювати параметри акустичного сигналу [7, 8].

1.4 Поняття фонового шуму та його види

Однією з ключових проблем акустичного виявлення безпілотної техніки є присутність фонового шуму. У реальних умовах навколишнє середовище насичене численними сторонніми звуками, що можуть негативно впливати на якість прийому та опрацювання акустичного сигналу. Тому вивчення фонового шуму є невід'ємною складовою розробки систем акустичного виявлення.

Фоновим шумом вважають сукупність звуків, що наявні в навколишньому середовищі та не мають прямого відношення до роботи безпілотної техніки. Основні джерела фонового шуму, що впливають на процес акустичного виявлення БПЛА, показано на рисунку 1.2. Такі шуми можуть бути як постійними, так і випадковими за своїм характером. Їх наявність погіршує співвідношення сигнал/шум та ускладнює виокремлення корисного сигналу безпілотної техніки. У задачах акустичного виявлення безпілотної техніки шум є одним із визначальних чинників, що впливають на ефективність роботи системи [7, 8]. Якщо рівень шуму є значним, характерні частотні складові сигналу безпілотної техніки можуть перекриватися сторонніми звуками, внаслідок чого система виявиться нездатною коректно ідентифікувати об'єкт.

Фонові шуми можна систематизувати за їх походженням. Серед основних груп виділяють природні, техногенні та побутові шуми.

До природних шумів належать:

- шум вітру;
- дощ;
- шум рослинності;
- грім;
- шум водойм.

Подібні шуми здатні суттєво змінювати характеристики акустичного середовища. Наприклад, сильний вітер породжує широкосмуговий шум, який нерідко пригнічує корисний сигнал безпілотної.

До техногенних шумів відносяться:

- транспорт;
- промислове обладнання;
- генератори;
- робота будівельної техніки;
- шум енергетичних систем.

Техногенні шуми є особливо характерними для міського середовища. Значна кількість автомобілів, громадського транспорту та інших шумових джерел формує складні умови для акустичного виявлення безпілотної.

Окрему групу складають побутові шуми:

- людська діяльність;
- музика;
- побутова техніка;
- звуки тварин;
- шум натовпу.

Подібні шуми, як правило, мають непередбачуваний характер та можуть стрімко змінюватися з часом.



Рисунок 1.2 — Основні джерела фонових шумів, які можуть впливати на процес акустичного виявлення БПЛА

З точки зору цифрової обробки сигналів шуми також поділяються на стаціонарні та нестаціонарні. Стаціонарні шуми характеризуються незмінними параметрами протягом часу. До них можна зарахувати шум працюючого двигуна або рівномірний промисловий шум. Такі сигнали є більш прогнозованими та простішими для подальшої фільтрації. Нестационарні шуми відзначаються хаотичними змінами амплітуди та частотних характеристик. Прикладом можуть слугувати пориви вітру, інтенсивний рух транспорту або звуки людської діяльності. Саме такі шуми становлять найбільшу складність для систем акустичного виявлення безпілотників. Головним чинником також є відстань між джерелом звукового сигналу та мікрофоном. Зі зростанням відстані рівень корисного сигналу знижується, тоді як рівень шуму може залишатися практично сталим.

Внаслідок цього співвідношення сигнал/шум погіршується, що негативно позначається на точності виявлення. Окрім цього, на розповсюдження звукових хвиль суттєво впливають погодні умови. Температура повітря, вологість,

атмосферний тиск і вітер здатні змінювати параметри сигналу та його інтенсивність. У певних випадках це може спричиняти спотворення або часткове затухання акустичного сигналу безпілотної [7, 8].

У сучасних системах акустичного виявлення для подолання шумових перешкод застосовуються різноманітні методи цифрової обробки сигналів. До них відносяться:

- фільтрація;
- спектральний аналіз;
- адаптивні алгоритми;
- методи згладжування;
- використання масивів мікрофонів.

Використання таких методів дає змогу знизити вплив шумових перешкод та підвищити точність виявлення безпілотних літальних апаратів.

1.4.1 Вплив міського середовища на акустичне виявлення БПЛА

Міське середовище є одним із найскладніших для акустичного виявлення безпілотників. У великих містах постійно функціонує значна кількість шумових джерел, які утворюють складний акустичний фон.

Основними джерелами шуму у міському середовищі є:

- автомобільний транспорт;
- громадський транспорт;
- будівельна техніка;
- промислові об'єкти;
- велика кількість людей.

Приклад типових джерел шуму в міському середовищі наведено на рисунку 1.3. Такі шуми нерідко охоплюють широкий частотний діапазон та можуть частково перекривати спектральні складові сигналу безпілотної. Унаслідок цього характерні піки сигналу стають менш вираженими, що ускладнює процес їх виокремлення. До того ж у міському середовищі виникають численні відбиття звукових хвиль від

будівель та інших споруд. Це може спричиняти додаткові спотворення сигналу та ускладнювати визначення напрямку на джерело звуку.



Рисунок 1.3 — Приклад джерел шуму у міському середовищі

1.4.2 Вплив погодних умов на поширення акустичного сигналу

Атмосферні умови також значною мірою впливають на ефективність акустичного виявлення безпілотників. Звукові хвилі під час поширення в атмосфері можуть змінювати свої параметри під дією температури, вологості повітря, вітру та опадів. Одним із найвагоміших чинників є вітер. Пориви вітру генерують додатковий шум у мікрофоні та здатні перекривати корисний сигнал безпілотника. Окрім цього, напрямок вітру впливає на розповсюдження звукових хвиль та може змінювати рівень прийнятого сигналу.

Підвищена вологість повітря також впливає на поглинання звукових хвиль. У ряді випадків це призводить до скорочення дальності виявлення безпілотника. Дощ та інші атмосферні опади породжують додаткові шумові складові, що здатні пригнічувати сигнал дрона. Тому при розробці систем акустичного виявлення необхідно передбачати можливість їх роботи у несприятливих погодних умовах.

1.4.3 Співвідношення сигнал/шум у системах акустичного виявлення

Одним із головних показників якості акустичного сигналу є співвідношення сигнал/шум. Воно відображає, наскільки рівень корисного сигналу перевищує рівень шумових перешкод. За високого співвідношення сигнал/шум корисний сигнал впевнено виділяється на тлі шуму, що забезпечує ефективне його опрацювання. За низького співвідношення сигнал безпілотної може бути частково або повністю пригнічений шумом. У системах акустичного виявлення безпілотної вкрай важливо забезпечити належний рівень співвідношення сигнал/шум.

З цією метою застосовуються:

- методи фільтрації;
- спектральний аналіз;
- цифрова обробка сигналів;
- мікрофонні масиви [10].

1.5 Вплив шуму на процес виявлення сигналів

Однією з головних проблем акустичного виявлення безпілотної є негативний вплив фонового шуму на якість прийнятого акустичного сигналу. У реальних умовах акустичний сигнал дрона рідко надходить в ізольованому вигляді, оскільки одночасно присутня значна кількість сторонніх звуків. Тому задача виокремлення корисного сигналу на тлі шуму є невід'ємною складовою систем акустичного виявлення безпілотної. Під час польоту БПЛА створює характерний акустичний сигнал, який містить основну частоту та гармонічні складові. Проте за наявності шуму ці компоненти можуть частково або повністю перекриватися сторонніми звуками. Внаслідок цього система виявлення може функціонувати нестабільно або хибно ідентифікувати наявність безпілотної [7, 8]. Вплив шуму на акустичний сигнал БПЛА проілюстровано на рисунку 1.4.

У часовій області шум проявляється у вигляді випадкових коливань амплітуди сигналу. Внаслідок цього структура сигналу стає менш вираженою, а його аналіз суттєво ускладнюється. За значного рівня шуму часовий сигнал може набувати хаотичного вигляду.

У частотній області вплив шуму проявляється у вигляді:

- появи додаткових випадкових спектральних складових;
- зменшення вираженості основних піків;
- “розмиття” спектру;
- ускладнення визначення характерних частот БПЛА.

Особливо складною є ситуація, коли шум містить частотні складові, близькі до частот сигналу безпілотної. У такому разі система може виявитися нездатною відрізнити корисний сигнал від сторонніх звуків.



Рисунок 1.4 — Зміни сигналу БПЛА під впливом шуму

Фоновий шум значно впливає на ефективність акустичного виявлення БПЛА, істотно ускладнюючи процес аналізу сигналів. Для забезпечення стабільної роботи системи слід застосовувати сучасні методи цифрової обробки сигналів. Вони сприяють підвищенню точності виявлення та мінімізації впливу шумових перешкод.

Висновок до розділу 1

У розділі проведено аналіз безпілотних літальних апаратів як об'єктів виявлення та розглянуто основні методи їх виявлення. Встановлено, що акустичний метод є перспективним завдяки відносній простоті реалізації, невисокій вартості обладнання та можливості роботи в умовах обмеженої видимості.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ БПЛА ТА ВПЛИВУ ФОНОВОГО ШУМУ

2.1 Характеристики акустичних сигналів БПЛА

Акустичні сигнали безпілотних літальних апаратів мають низку специфічних характеристик, що робить їх придатними для завдань виявлення та аналізу цих апаратів. Основні джерела акустичного сигналу включають електродвигуни, пропелери та повітряні потоки, що утворюються під час польоту. Під час роботи пропелерів утворюється характерний періодичний шум. Ця характеристика сприяє виділенню сигналу БПЛА серед інших акустичних звуків навколишнього середовища. У більшості випадків акустичний сигнал складається з основної частоти та кількох гармонійних компонентів.

Основна частота сигналу залежить від швидкості обертання пропелерів. Зі збільшенням швидкості польоту або навантаження частота акустичного сигналу може також зазнавати змін. Гармонічні коливання з'являються внаслідок складної структури звукових хвиль і специфіки функціонування двигунів.

Акустичний сигнал безпілотного літального апарата можна досліджувати як у часовій, так і у частотній площинах. У часовій області сигнал характеризує зміну амплітуди залежно від часу. Застосування такого підходу сприяє детальному аналізу загальної структури сигналу, а також дозволяє визначити можливу присутність шумових компонентів [6, 7, 8].

У частотній області сигнал представляється у формі спектра. Спектральний аналіз допомагає визначити характерні частоти та гармоніки, які можуть використовуватися для виявлення безпілотних літальних апаратів. Для аналізу спектра зазвичай застосовується швидке перетворення Фур'є (FFT).

Малогабаритні безпілотні літальні апарати зазвичай характеризуються наявністю чітко виражених спектральних піків у низькочастотному та середньочастотному діапазонах. Акустичні характеристики сигналів БПЛА мають важливе значення для побудови систем автоматичного виявлення. Наявність стійких частотних компонентів дозволяє формувати набір ознак, за якими може

здійснюватися подальша ідентифікація безпілотних літальних апаратів. Тому аналіз таких характеристик є необхідним етапом під час розроблення алгоритмів акустичного моніторингу.

Значення частот можуть залежати від:

- типу БПЛА;
- кількості пропелерів;
- швидкості обертання;
- режиму польоту;
- конструкції двигунів.

Квадрокоптери зазвичай генерують стабільний періодичний шум із виразними гармоніками. FPV-дрони здатні генерувати сигнал з вищою частотою, що зумовлено високою кутовою швидкістю обертання їхніх пропелерів. Основні характеристики акустичних сигналів БПЛА наведено в таблиці 2.1.

Однією з ключових характеристик сигналу виступає його амплітуда. Її значення визначається потужністю двигунів, віддаленістю до мікрофона та характеристиками навколишнього середовища. Зі збільшенням відстані рівень сигналу поступово знижується, що ускладнює його виявлення.

Для підвищення якості аналізу сигналів застосовуються методи цифрової обробки сигналів:

- фільтрація;
- FFT-аналіз;
- адаптивні алгоритми обробки.

FFT-аналіз є одним з головних методів дослідження акустичних сигналів БПЛА. Його використання дозволяє визначати характерні частоти та гармонійні компоненти сигналу, що застосовуються для подальшого виявлення та аналізу безпілотних літальних апаратів.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики акустичних сигналів БПЛА

Характеристика	Фізичний зміст	Вплив на виявлення БПЛА
Частота	Визначається швидкістю обертання пропелерів та режимом роботи двигунів	Дозволяє ідентифікувати тип БПЛА за характерними частотами
Амплітуда	Залежить від потужності двигунів, конструкції БПЛА та відстані до мікрофона	Впливає на дальність та надійність виявлення
Гармоніки	Кратні складові основної частоти сигналу	Використовуються для підтвердження наявності БПЛА
Рівень шуму	Відображає інтенсивність зовнішніх акустичних перешкод	Визначає якість виявлення та значення SNR
Спектр сигналу	Сукупність частотних компонентів акустичного сигналу	Використовується для FFT-аналізу та виявлення характерних ознак

2.2 Основні види фонового шуму та їх моделювання

Під час вивчення систем акустичного виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) однією з ключових стадій є моделювання того, як шуми впливають на отриманий сигнал. В умовах ретельно спланованих експериментів з'являється можливість визначити, наскільки дієвими є методи оцифрування та аналізу сигналів, а також встановити, наскільки вони витривалі до зовнішніх шумів. В реальному житті акустичний слід безпілотника може бути спотворений різними типами

фонового шуму. Серед найчастіших умов навколишнього середовища, що впливають на звук, можна виділити: звуки транспорту, шум вітру, промислові шуми та інші звуки навколишнього середовища.

Для того, аби здійснити експериментальні дослідження, постає потреба у розробці математичної моделі шуму. Ця модель дасть змогу симулювати аналогічні умови в комп'ютерному середовищі. У цьому дослідженні виникнення шумів було змодельовано за допомогою адитивного білого гаусового шуму (AWGN – Additive White Gaussian Noise) [11]. Цей тип шуму знаходить широке застосування під час вивчення систем, що займаються цифровою обробкою сигналів. Його використання дає змогу об'єктивно оцінити ефективність роботи впроваджених алгоритмів за наявності сторонніх перешкод [10, 11].

Модель зашумленого сигналу описується виразом:

$$x(n) = s(n) + w(n) \quad (2.1)$$

де $x(n)$ – зашумлений сигнал;
 $s(n)$ – корисний акустичний сигнал БПЛА;
 $w(n)$ – шумова складова.

Для оцінювання рівня шуму використовувався показник співвідношення сигнал/шум (SNR), який визначається за формулою:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{сигнал}}}{P_{\text{шум}}} \right) \quad (2.2)$$

де $P_{\text{сигнал}}$ – потужність корисного сигналу;
 $P_{\text{шум}}$ – потужність шуму.

У рамках дослідження розглядалися три рівні шумових перешкод:

- низький рівень шуму – $SNR = 20$ дБ;
- середній рівень шуму – $SNR = 10$ дБ;
- високий рівень шуму – $SNR = 5$ дБ.

Ці параметри надають можливість відтворювати різноманітні сценарії використання системи акустичного виявлення безпілотних літальних апаратів. Це охоплює як ідеальні умови роботи, так і складні акустичні оточення, де присутній значний рівень шуму. Результат моделювання впливу шуму на акустичний сигнал БПЛА наведено на рисунку 2.1.

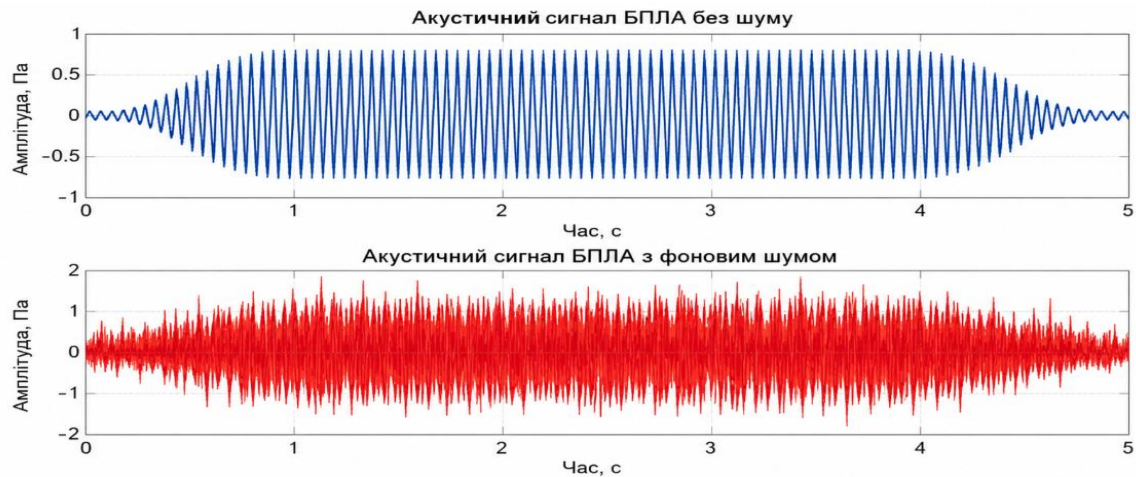


Рисунок 2.1 — Вплив шуму на акустичний сигнал БПЛА

Після того, як до сигналу було внесено шум, було виконано його частотний аналіз, скориставшись методом швидкого перетворення Фур'є. Зміни спектра сигналу БПЛА при різних рівнях шуму показано на рисунку 2.2.

Завдяки цьому стало можливим виміряти, наскільки змінюються спектральні властивості сигналу в залежності від інтенсивності сторонніх шумів.

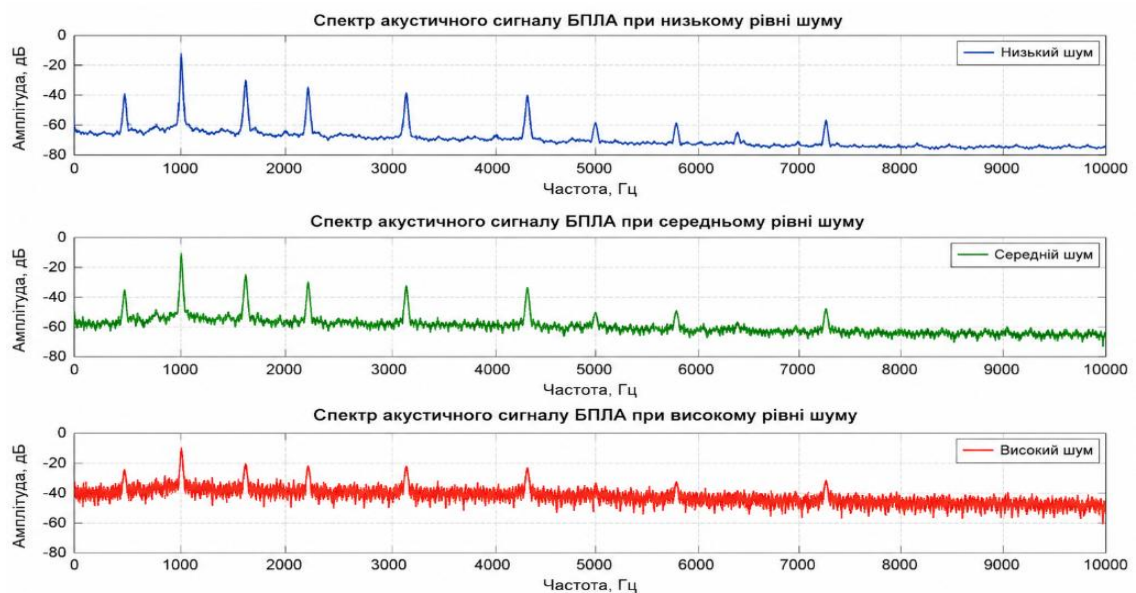


Рисунок 2.2 — Зміни спектру сигналу БПЛА при різному рівні шуму

З аналізу отриманих даних випливає, що зі зниженням співвідношення сигнал/шум (SNR) спостерігається зростання амплітуди шумів у спектральній області. Паралельно з цим, ключові частотні складові сигналу втрачають свою чіткість та інтенсивність. Це збільшує складність подальшого виявлення та дослідження акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів.

2.3 Методи аналізу сигналів

Для підвищення ефективності акустичного виявлення безпілотних літальних апаратів застосовують різноманітні методи цифрової обробки сигналів. Основним завданням таких методів є виокремлення корисного сигналу серед шумових перешкод та підвищення якості аналізу акустичних даних. У реальних умовах акустичний сигнал безпілотного літального апарата зазвичай супроводжується значною кількістю сторонніх шумів. Загальну схему цифрової обробки акустичного сигналу БПЛА наведено на рисунку 2.3.

Це можуть бути звуки транспорту, погодні умови, робота обладнання чи інші шумові перешкоди. Саме з цієї причини цифрова обробка сигналів відіграє важливу роль у сучасних системах акустичного виявлення [5, 7].

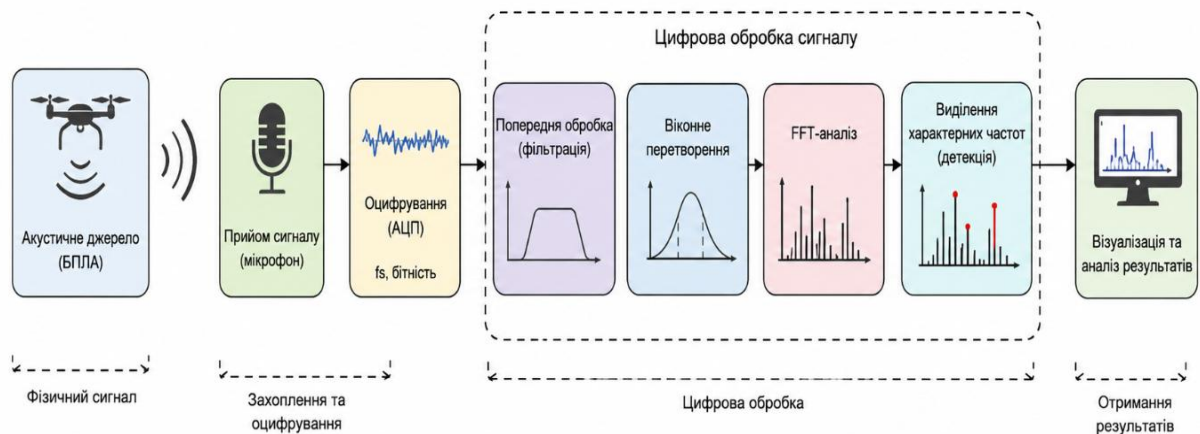


Рисунок 2.3 — Схема цифрової обробки акустичного сигналу БПЛА

Одним із найпоширеніших методів обробки є фільтрація сигналу. Фільтрація допомагає знижувати небажані частотні компоненти та підвищувати якість корисного сигналу.

У системах акустичного виявлення зазвичай застосовуються такі методи та технології [5, 7]:

- низькочастотні фільтри;
- високочастотні фільтри;
- смугові фільтри;
- адаптивні фільтри.

Низькочастотні фільтри застосовуються для усунення шумів високої частоти. Високочастотні фільтри застосовуються для зменшення впливу низькочастотних завад. Смугові фільтри слугують для виділення конкретного діапазону частот, що містить ключові компоненти сигналу безпілотного літального апарата. Особливу важливість мають адаптивні фільтри. Вони здатні автоматично адаптувати свої параметри відповідно до особливостей сигналу і рівня шуму. Такі методи виявляються ефективними у ситуаціях із нестационарним шумом. Одним із ключових методів аналізу акустичних сигналів вважається перетворення Фур'є. Це дає змогу перетворювати сигнал із часової області у частотну, дозволяючи визначати його спектральні компоненти.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.3)$$

де $x(t)$ — сигнал у часовій області; $X(f)$ — спектр сигналу; f — частота сигналу.

Застосування перетворення Фур'є дає змогу ефективно виділяти характерні частотні компоненти сигналу безпілотного літального апарата, навіть за присутності шумових перешкод. Спектральний аналіз є одним із ключових етапів у процесі акустичного виявлення безпілотних літальних апаратів. Після проведення спектрального аналізу в сигнальному спектрі помітні чіткі піки на характерних частотах. Ці пікові значення свідчать про роботу пропелерів і двигунів безпілотного літального апарата. Ці компоненти дають змогу розпізнавати сигнал дрона серед інших джерел шуму. Окрім FFT-аналізу, для вивчення акустичних сигналів застосовуються також спектрограми. Спектрограма дає змогу одночасно оцінювати зміну частотних компонентів у часовій динаміці. Цей підхід добре підходить для коригування режиму польоту чи зміни швидкості БПЛА [7].

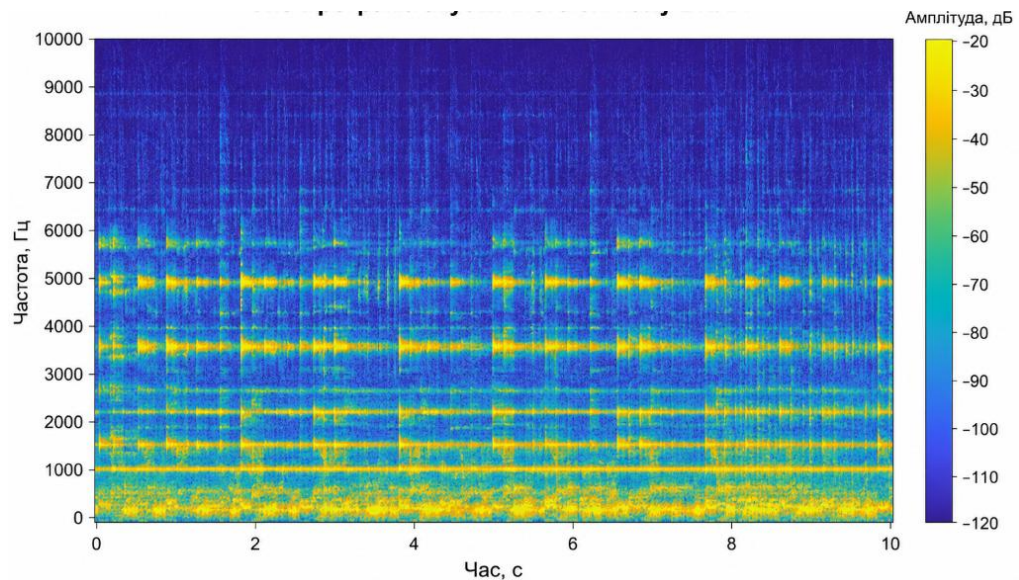


Рисунок 2.4 — Спектрограма акустичного сигналу БПЛА

Для мінімізації впливу випадкових шумів застосовуються також методи згладжування сигналу. Одним із найпростіших підходів є застосування методу рухомого середнього. Цей метод дозволяє згладити випадкові коливання сигналу та покращити його сприйняття при візуальному аналізі. У сучасних системах акустичного виявлення дедалі частіше використовуються методи машинного навчання та автоматичної класифікації сигналів. Такі алгоритми здатні автоматично визначати характерні ознаки сигналу безпілотної та відрізнити його від інших шумових джерел.

Для підвищення точності виявлення також застосовуються мікрофонні решітки. Застосування кількох мікрофонів дає змогу визначати напрямок на джерело звуку та підвищувати якість прийому сигналу.

У середовищі MATLAB методи цифрової обробки сигналів можуть бути реалізовані з використанням вбудованих функцій аналізу та фільтрації. MATLAB надає можливість моделювати сигнали, проводити спектральний аналіз, будувати графіки та досліджувати вплив шумових перешкод на характеристики сигналу.

2.4 Дослідження впливу шуму на якість сигналу

Фоновий шум суттєво впливає на можливість виявлення безпілотної. При накладанні шуму на сигнал його характерні особливості стають менш вираженими.

У спектрі це проявляється у вигляді:

- зменшення вираженості піків;
- появи додаткових випадкових компонентів;
- загального “розмиття” спектру.

У часовій області сигнал також набуває більш хаотичного вигляду, що суттєво ускладнює його аналіз. Чим вищий рівень шуму, тим важче відрізнити сигнал безпілотної від інших сторонніх звуків. У певних випадках сигнал може бути повністю пригнічений шумом. Тому для ефективного виявлення необхідно застосовувати методи обробки, які дають змогу мінімізувати вплив шуму та виокремити корисну інформацію [7, 8].

Для дослідження впливу шуму в роботі використовувалося середовище MATLAB, у якому було змодельовано акустичний сигнал безпілотної та проведено його спектральний аналіз. Отримані результати засвідчили, що зі зростанням рівня шуму спектральні піки сигналу стають менш вираженими, що ускладнює процес виявлення безпілотної. Для підвищення якості сигналу застосовувалася цифрова фільтрація. [5, 6, 11].

Висновок до розділу 2

Досліджено акустичні характеристики сигналів безпілотних літальних апаратів та встановлено, що вони містять характерні частотні компоненти і гармоніки, які можуть використовуватися для їх виявлення та аналізу. Проаналізовано вплив фонових шумів різного рівня на спектральні характеристики акустичного сигналу БПЛА. Показано, що зі зменшенням співвідношення сигнал/шум характерні спектральні компоненти стають менш вираженими, що ускладнює їх подальше виділення та ідентифікацію.

Розглянуто основні методи аналізу акустичних сигналів та обґрунтовано доцільність використання швидкого перетворення Фур'є для дослідження спектрального складу сигналу. Отримані результати підтвердили необхідність застосування методів цифрової обробки та фільтрації для зменшення впливу шуму і підвищення ефективності акустичного виявлення БПЛА.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ

3.1 Попередня обробка сигналу

Попередня обробка сигналу є одним із важливих етапів у роботі системи акустичного виявлення безпілотників. Головним завданням цього етапу є підготовка сигналу до подальшого аналізу та зниження впливу шумових перешкод. У реальних умовах акустичний сигнал безпілотника містить значну кількість сторонніх шумів, що можуть суттєво ускладнювати процес його опрацювання. Джерелами таких шумів можуть бути транспортні засоби, вітер, робота різноманітної техніки та інші звуки навколишнього середовища. Тому перед проведенням спектрального аналізу необхідно здійснити попередню обробку сигналу. Одним із початкових етапів обробки є оцифрування сигналу. Акустичний сигнал, зафіксований за допомогою мікрофона, перетворюється на цифрову форму для подальшого опрацювання у середовищі MATLAB [5].

Після оцифрування здійснюється нормалізація сигналу. Нормалізація дає змогу привести амплітуду сигналу до визначеного діапазону значень та забезпечити стабільність подальшого аналізу. Наступним кроком є фільтрація сигналу. Головним завданням фільтрації є зниження впливу небажаних шумових складових та виокремлення корисного сигналу безпілотника. У роботі застосовувався смуговий фільтр, який забезпечує пропускання лише визначеного діапазону частот. Такий підхід є ефективним, оскільки основні частоти акустичного сигналу безпілотника зосереджені у певному частотному діапазоні. Після проведення фільтрації сигнал стає більш стабільним, а рівень шумових перешкод знижується. Це дає змогу покращити результати FFT-аналізу та підвищити точність визначення характерних частот сигналу безпілотника [5, 7]. Для попередньої обробки сигналу у MATLAB застосовувались стандартні функції цифрової обробки сигналів.

У ході дослідження виконувалися:

- Завантаження та обробка акустичних записів БПЛА;
- Моделювання впливу шуму;

- Цифрова фільтрація сигналів;
- Побудова часових та спектральних характеристик;
- Спектральний аналіз сигналів методом FFT;
- Оцінювання співвідношення сигнал/шум (SNR).

Результати попередньої обробки акустичного сигналу до та після фільтрації наведено на рисунку 3.1.

У часовій області після обробки сигнал набуває менш хаотичного вигляду, а його основні коливання стають більш чітко вираженими. У частотній області після фільтрації кількість випадкових спектральних складових помітно зменшується.

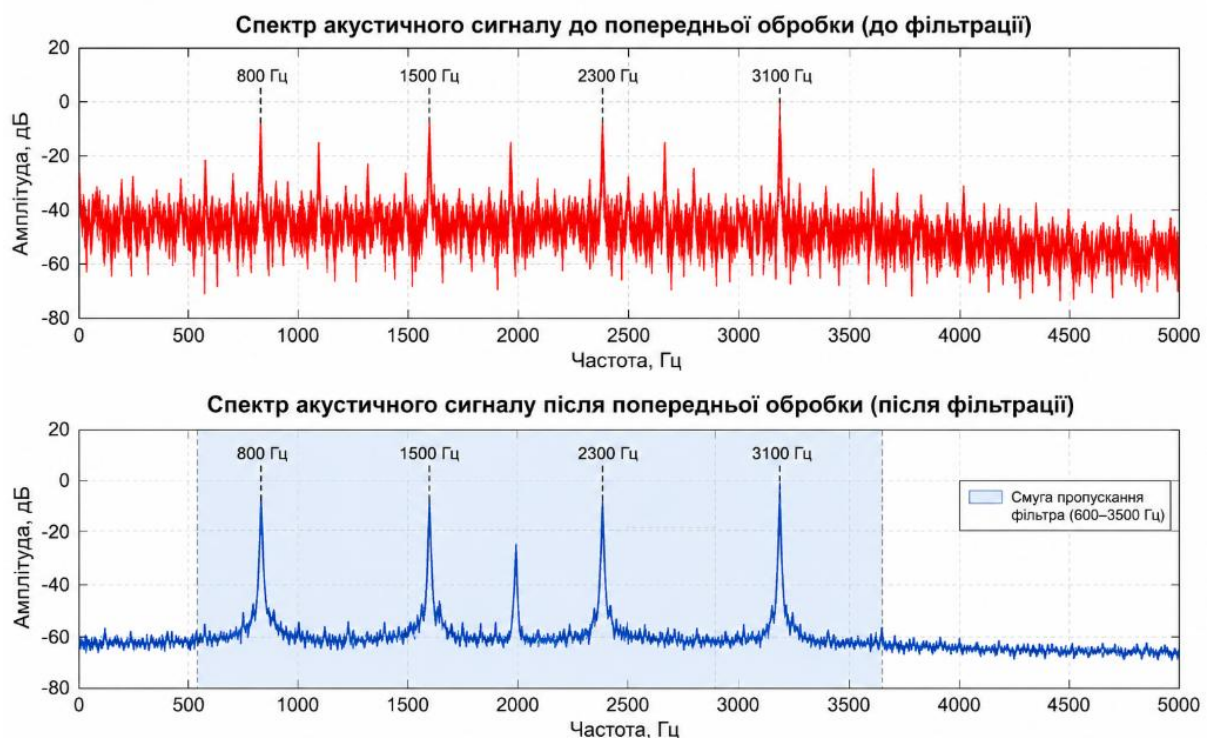


Рисунок 3.1 — Спектр акустичного сигналу до та після попередньої обробки

Одним із ключових параметрів під час обробки є правильний вибір частотного діапазону фільтра. Якщо діапазон виявиться занадто вузьким, частина корисного сигналу може бути втрачена. Якщо ж діапазон виявиться надто широким, до сигналу проникатиме значна кількість шумових перешкод. За результатами проведеної попередньої обробки вдалося досягти підвищення якості сигналу та зниження впливу шумових перешкод. Це дало змогу підвищити ефективність подальшого спектрального аналізу та виявлення акустичного сигналу безпілотної.

3.2 Методи фільтрації шуму

Для зниження впливу фонового шуму використовуються різноманітні методи фільтрації сигналів. Головне завдання фільтрації полягає у збереженні корисного сигналу безпілота та пригніченні небажаних шумових складових. Одним із найпростіших методів є застосування смугового фільтра. Він пропускає лише визначений діапазон частот, у межах якого зазвичай зосереджений сигнал дрона, та пригнічує решту частотних складових [5, 7]. Принцип роботи смугового фільтра проілюстровано на рисунку 3.2.

$$\omega_1 < \omega < \omega_2 \quad (3.1)$$

де ω_1 та ω_2 — нижня та верхня межі робочого діапазону частот.

Застосування смугового фільтра дає змогу знизити вплив низькочастотних та високочастотних шумів, що не несуть корисної інформації про сигнал безпілота.

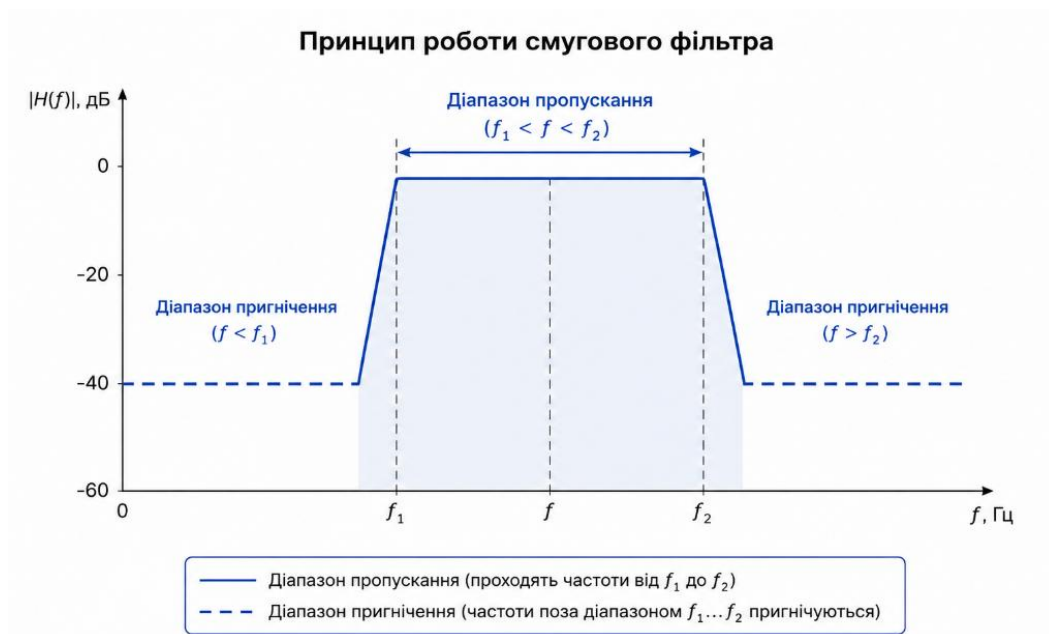


Рисунок 3.2 — Принцип роботи смугового фільтра

Крім смугових фільтрів, у цифровій обробці сигналів також використовуються:

- низькочастотні фільтри;
- високочастотні фільтри;
- адаптивні фільтри.

Низькочастотні фільтри застосовуються для придушення високочастотних шумових складових. Високочастотні фільтри дають змогу зменшити вплив

низькочастотних перешкод, зокрема шуму вітру або транспортних засобів. Особливу роль відіграють адаптивні фільтри. Вони вирізняються здатністю автоматично підлаштовувати свої параметри залежно від характеристик вхідного сигналу та шуму. Їх перевагою є можливість автоматично коригувати власні параметри відповідно до рівня шуму та характеристик вхідного сигналу. Такі методи є особливо ефективними в умовах нестаціонарного шуму [5, 7].

У даній роботі для фільтрації акустичного сигналу застосовувався смуговий цифровий фільтр, реалізований у середовищі MATLAB. У процесі реалізації алгоритму використовувався смуговий фільтр Баттерворта четвертого порядку з нижньою частотою зрізу 20 Гц та верхньою частотою зрізу 500 Гц. Вибір даного діапазону обумовлений тим, що основні спектральні складові акустичних сигналів БПЛА знаходяться саме в межах цих частот. Частоти нижче 20 Гц переважно містять низькочастотні завади та коливання навколишнього середовища, тоді як компоненти вище 500 Гц у даному дослідженні не містили суттєвої інформації для виявлення безпілотної.

Важливим кроком є коректний вибір параметрів фільтра. Якщо смуга пропускання виявиться занадто вузькою, частина корисного сигналу може бути відсічена. Якщо ж смуга пропускання буде занадто широкою, до сигналу проникатиме значна кількість шумових перешкод.

Порядок фільтра $n = 4$ було обрано як компроміс між ефективністю пригнічення шуму та обчислювальною складністю алгоритму. Збільшення порядку забезпечує крутіший спад амплітудно-частотної характеристики, проте призводить до зростання обчислювальних витрат. Обраний порядок дозволив отримати достатній рівень фільтрації без суттєвого спотворення корисного сигналу.

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}} \quad (3.2)$$

де ω_c — частота зрізу фільтра, n — порядок фільтра.

3.3 Виділення ознак сигналу

Одним із ключових етапів акустичного виявлення безпілотних літальних апаратів є виокремлення характерних властивостей сигналу. Головною метою цього етапу є ідентифікація параметрів сигналу, які забезпечують можливість відокремлення акустичних сигналів дрона від шумів, що виникають від інших джерел.

У процесі аналізу акустичних сигналів найбільш значущими ознаками є:

- характерні частоти;
- спектральні піки;
- амплітуда сигналу;
- гармонічні складові;
- форма спектру [6].

Для виокремлення ознак сигналу у роботі застосовувався спектральний аналіз із використанням перетворення Фур'є. Такий підхід дає змогу перетворювати сигнал із часової області у частотну та визначати його спектральні характеристики. Приклад спектрального аналізу акустичного сигналу БПЛА наведено на рисунку 3.3.

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.3)$$

де $x(t)$ — акустичний сигнал у часовій області;

$x(f)$ — спектр сигналу у частотній області;

f — частота, Гц;

t — час, с;

j — уявна одиниця.

Після проведення спектрального аналізу у спектрі сигналу можна спостерігати виражені піки, що відповідають частотам роботи гвинтів та двигунів безпілотної літальної апаратури. Саме ці компоненти є основними діагностичними ознаками для виявлення сигналу дрона. Для автоматизованого пошуку характерних частот після побудови спектра застосовувався алгоритм пошуку локальних максимумів. У середовищі MATLAB для цього використовується функція `findpeaks`, яка дозволяє визначити положення та амплітуди найбільш виражених спектральних піків. Отримані піки відповідають

основним гармонікам акустичного сигналу БПЛА та використовуються як інформативні ознаки під час аналізу.

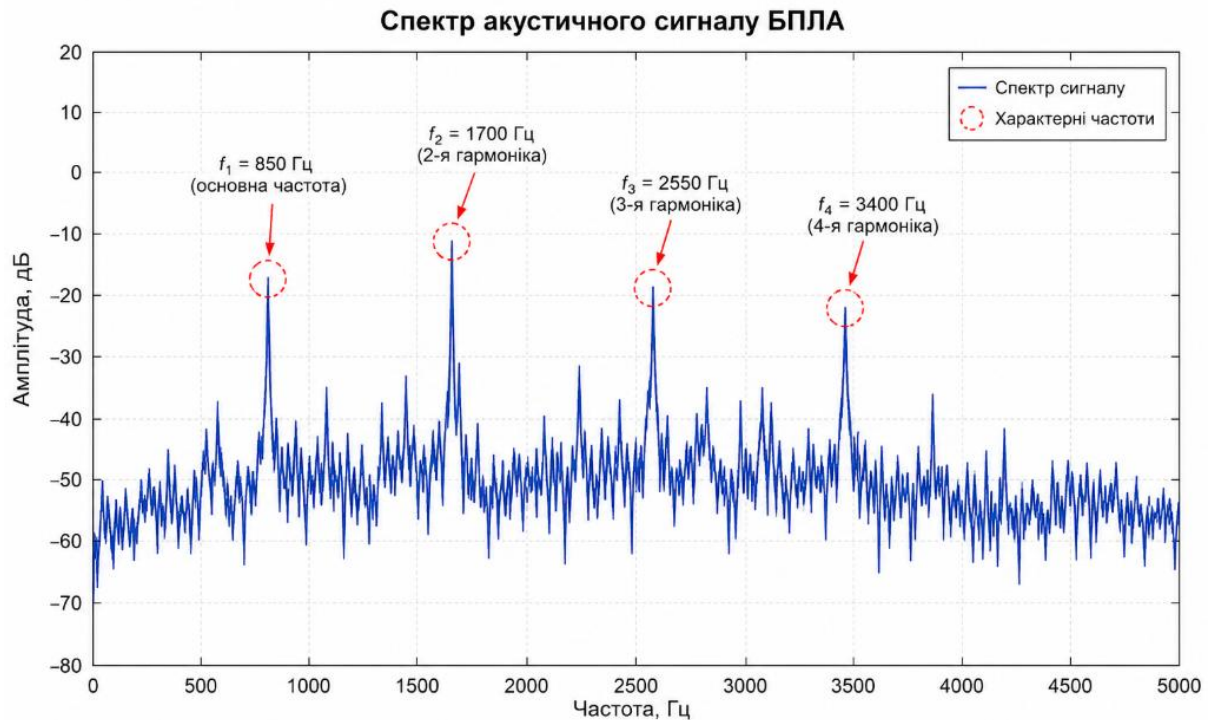


Рисунок 3.3 — Приклад виділення характерних частот акустичного сигналу БПЛА

Аналіз спектрів досліджуваних записів показав наявність декількох виражених гармонік у діапазоні від 20 до 500 Гц, що відповідає характерним частотам роботи пропелерів та електродвигунів БПЛА.

Значення вказаних частот може варіюватися залежно від таких чинників:

- типу дрона;
- швидкості обертання пропелерів;
- режиму польоту;
- рівня навантаження двигунів.

Амплітуда окремих спектральних піків є одним із важливих показників під час аналізу акустичних сигналів БПЛА. Зі збільшенням рівня шуму виразність спектральних піків зменшується, що ускладнює їх виявлення та подальший аналіз. Тому перед виконанням спектрального аналізу здійснювалася попередня фільтрація сигналу для зменшення впливу шумових складових та підвищення точності виділення інформативних ознак. [6, 7, 8].

За результатами проведеного аналізу встановлено, що найбільш інформативними характеристиками акустичного сигналу БПЛА є:

- положення спектральних піків;
- кількість гармонік;
- форма спектру;
- зміна амплітуди сигналу у часі.

Таким чином, для виділення інформативних ознак акустичного сигналу БПЛА у роботі використовувалися FFT-аналіз та пошук спектральних піків за допомогою функції `findpeaks`. Основними ознаками було обрано положення спектральних максимумів, їх амплітуди та кількість гармонічних складових.

3.4 Побудова алгоритму виявлення БПЛА

Виходячи з попереднього аналізу та ідентифікації ключових характеристик сигналу, можна розробити універсальну методику для акустичної детекції безпілотних літальних апаратів. Головним викликом для цього алгоритму є ідентифікація акустичного сигналу БПЛА серед фонових шумових перешкод. Процедура виявлення безпілотних літальних апаратів охоплює низку взаємопов'язаних кроків. Насамперед, звуковий сигнал вловлюється мікрофоном, або ж застосовується вже наявний аудіозапис. Згодом сигнал піддається попередній ґрунтовній обробці, яка охоплює як нормалізацію, так і фільтрацію. Далі виконується спектральний аналіз. Аби здійснити це, сигнал трансформується з його тимчасового представлення до частотного, застосовуючи перетворення Фур'є. Блок-схему розробленого алгоритму акустичного виявлення БПЛА наведено на рисунку 3.4. У спектрі можна простежити виразні піки, які, ймовірно, свідчать про функціонування пропелерів та силових установок безпілотних літальних апаратів [6, 7, 8].

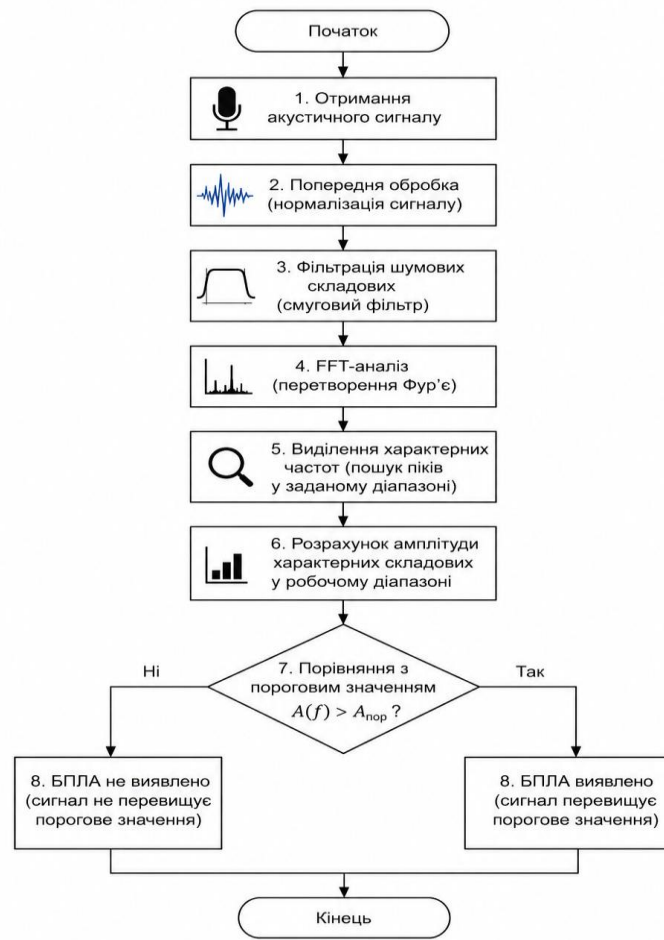


Рисунок 3.4 — Блок-схема алгоритму акустичного виявлення БПЛА

Основні етапи алгоритму:

- отримання акустичного сигналу;
- попередня обробка сигналу;
- фільтрація шумових складових;
- FFT-аналіз;
- виділення характерних частот;
- порівняння з пороговим значенням;
- прийняття рішення про наявність або відсутність БПЛА.

У реалізованому алгоритмі нормалізація сигналу виконувалась шляхом ділення всіх відліків на максимальне абсолютне значення амплітуди. Це дозволило привести сигнали різного рівня гучності до єдиного масштабу та забезпечити коректність подальшого аналізу.

Для прийняття рішення застосовується пороговий метод. Коли амплітуда складових спектру в межах певного частотного діапазону долає визначене порогове

значення, система ідентифікує присутність БПЛА. Пороговий метод було обрано завдяки простоті реалізації та низьким обчислювальним витратам. Для задачі попереднього виявлення БПЛА цього підходу достатньо, оскільки рішення приймається на основі наявності виражених спектральних піків у характерному частотному діапазоні.

$$A(f) > A_{th} \quad (3.4)$$

де $A(f)$ — амплітуда спектральної складової, A_{th} — встановлений поріг.

У MATLAB перевірка порогової умови здійснювалася для спектральних компонентів, виявлених за допомогою функції `findpeaks`. Якщо амплітуда знайденого піка перевищувала встановлене порогове значення, сигнал класифікувався як такий, що містить ознаки БПЛА.

У разі перевищення встановленого порогу сигнал класифікується як такий, що містить ознаки БПЛА. Вибір порогового значення є важливим етапом алгоритму, оскільки занадто низький поріг може призвести до хибних спрацювань через сторонні шуми, тоді як надто високий — до пропуску корисного сигналу. Тому під час налаштування порогу необхідно враховувати рівень фонового шуму та особливості умов експлуатації системи. Розроблений алгоритм було реалізовано у середовищі MATLAB. Його структура забезпечує послідовне виконання етапів нормалізації, фільтрації, спектрального аналізу та виділення ознак сигналу. Це дозволяє оцінити вплив фонового шуму на процес акустичного виявлення БПЛА та ефективність застосованих методів цифрової обробки сигналів.

3.5 Реалізація алгоритму

Реалізацію алгоритму акустичного виявлення БПЛА виконано у середовищі MATLAB. Для аналізу використовувалися аудіозаписи акустичних сигналів безпілотників, до яких додавалися шумові складові із заданим рівнем SNR. Алгоритм включає етапи нормалізації сигналу, фільтрації, спектрального аналізу та виділення характерних ознак.

Після нормалізації та фільтрації сигналу виконувався FFT-аналіз за допомогою функції `fft()`. Для виділення характерних частот використовувалася

функція `findpeaks()`, яка дозволяла визначати положення та амплітуди основних спектральних максимумів. Отримані значення використовувалися для прийняття рішення щодо наявності ознак БПЛА у сигналі.

В мові програмування MATLAB для втілення цього алгоритму були застосовані функції, призначені для цифрової обробки сигналів:

- `fft()` — спектральний аналіз;
- `butter()` — створення цифрового фільтра;
- `filtfilt()` — фільтрація сигналу;
- `findpeaks()` — пошук спектральних піків.

Результатом роботи алгоритму є визначення наявності або відсутності характерних спектральних ознак БПЛА. Для оцінювання ефективності роботи алгоритму виконувалося порівняння спектрів до та після фільтрації, а також розрахунок співвідношення сигнал/шум (SNR).

Висновок до розділу 3

У розділі 3 розроблено алгоритм акустичного виявлення БПЛА на основі методів цифрової обробки сигналів. Реалізовано етапи нормалізації, смугової фільтрації, FFT-аналізу та автоматизованого виділення спектральних піків. Для зменшення впливу шумових завад використано смуговий фільтр Баттерворта, а для виділення характерних частот — FFT-аналіз та функцію `findpeaks()`. Розроблений алгоритм використано для подальшого дослідження впливу фонового шуму на ефективність акустичного виявлення БПЛА.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА В УМОВАХ ШУМУ

4.1 Опис умов проведення експерименту

Для випробувань було застосовано фактичні акустичні дані, отримані від безпілотних літальних апаратів, у форматі WAV [12]. У даному дослідженні використовувалися акустичні записи безпілотних літальних апаратів, отримані з відкритого набору даних Drone Audio Dataset. Ці відомості є фрагментом публічно доступного масиву звукових файлів. Записи було виконано з частотою дискретизації 16 кГц і файли збережено з розширенням WAV. Для проведення аналізу було застосовано низку аудіозаписів, тривалістю приблизно в одну секунду кожен. Застосування декількох зразків дає змогу брати до уваги природні варіанти звукового сигналу та досягати вищої точності досліджень[12].

На початковому етапі виконувалося завантаження WAV-записів у середовище MATLAB та визначення їх основних параметрів: тривалості сигналу, частоти дискретизації та амплітудних характеристик. Після цього здійснювався спектральний аналіз сигналів за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT) [6, 12].

Щоб встановити, як шум впливає на точність виявлення, було додано білий шум різної потужності. Цей метод дає можливість оцінити функціонування системи виявлення за різноманітних обставин, від помірних до таких, що характеризуються значним рівнем перешкод. Рівень шуму змінювався таким чином, щоб сформувати сигнали з різними значеннями співвідношення сигнал/шум ($SNR = 20$ дБ, 10 дБ та 5 дБ), що дозволило оцінити роботу алгоритму за різних умов зашумлення.

Якість отриманого сигналу, що визначає ефективність дослідження, головним чином оцінювалася за показником співвідношення сигналу до шуму (SNR). Щоб обчислити це значення, застосовується співвідношення потужності цільового сигналу до рівня шуму. Структуру проведення експериментальних досліджень у середовищі MATLAB показано на рисунку 4.1. Для зменшення впливу шумових складових застосовувався смуговий фільтр Баттерворта. [5, 10].

Проведення фільтрації відбувалося в діапазоні частот, де сконцентрована значна частина акустичних складових сигналу, що випромінюється безпілотним літальним апаратом. Після проведення обробки було здійснено повторний аналіз спектра сигналу, що дозволило виявити модифікації його властивостей.

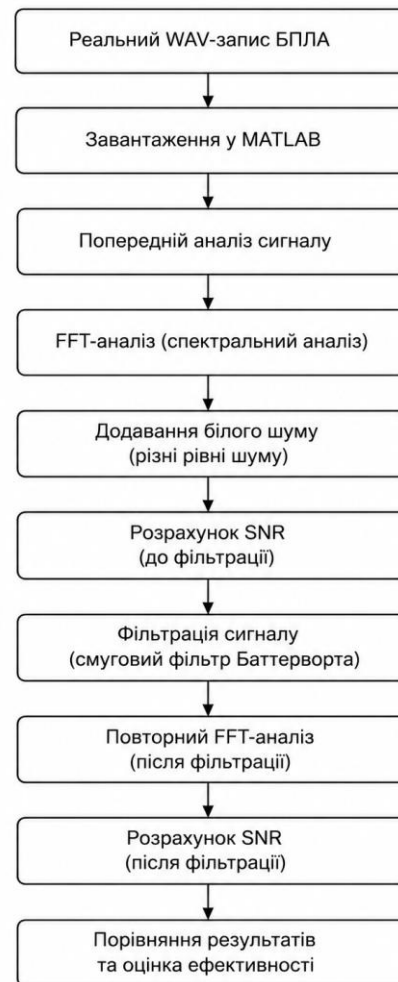


Рисунок 4.1 — Структура проведення експериментальних досліджень у середовищі MATLAB

4.2 Оцінка ефективності виявлення при різному рівні шуму

Для оцінювання впливу фонового шуму на ефективність акустичного виявлення БПЛА було проведено дослідження сигналів із різними значеннями співвідношення сигнал/шум (SNR) [7, 8].

До вихідних аудіозаписів БПЛА додавався білий шум різної інтенсивності, що дозволило сформувати сигнали з різними значеннями співвідношення сигнал/шум та оцінити роботу алгоритму за різних умов зашумлення.

Для визначення кількісної оцінки якості сигналу застосовувався показник співвідношення сигналу до шуму (Signal-to-Noise Ratio), що розраховується за формулою [10]:

$$SNR = 10\log_{10}\left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}}\right) \quad (4.1)$$

де P_{signal} – потужність корисного сигналу;

P_{noise} – потужність шуму.

У рамках дослідження було розглянуто три рівні шуму:

- низький рівень шуму (SNR = 20 дБ);
- середній рівень шуму (SNR = 10 дБ);
- високий рівень шуму (SNR = 5 дБ).

Для кожного значення SNR виконувався FFT-аналіз сигналу та визначалися положення й амплітуди основних спектральних піків. Результати FFT-аналізу сигналу при різних рівнях шуму наведено на рисунку 4.2. Побудова спектрів сигналу БПЛА при різних рівнях шуму виконувалася за допомогою програми, наведеної у додатку А.

Під час аналізу оцінювалися зміни форми спектра, рівня шумового фону та виразності характерних спектральних піків при зменшенні значення SNR.

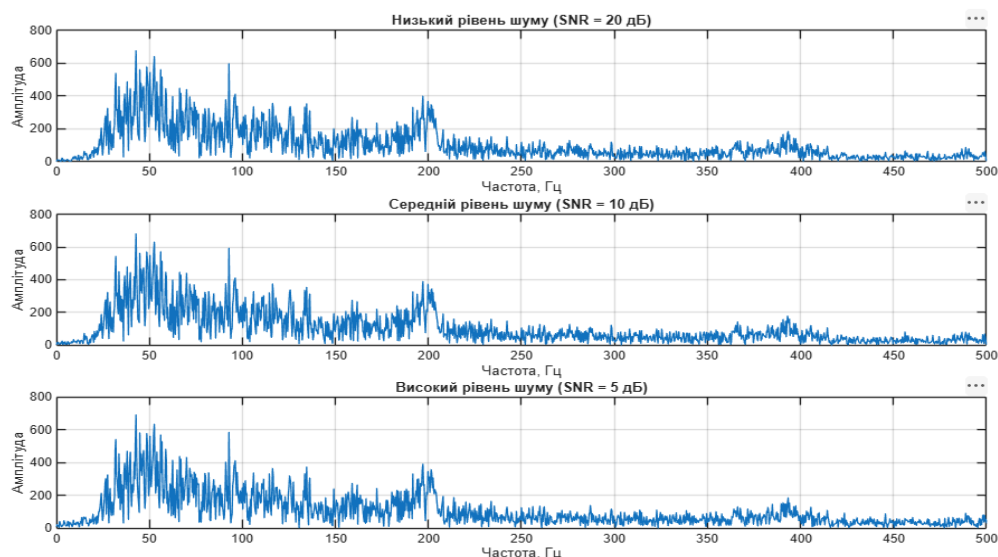


Рисунок 4.2 — Результати FFT-аналізу сигналу при різних рівнях шуму

Аналіз наявних спектрів продемонструвало, що за умови співвідношення сигнал/шум біля 20 дБ вдається чітко виділити головні частотні складові сигналу, відділивши їх від загального шуму. В оптичному діапазоні видно виразні максимуми, що співвідносяться з акустичними компонентами функціонування силових установок та гвинтів безпілотного літального апарату.

Коли показник співвідношення сигнал/шум знижується до 10 дБ, помітно посилюється гучність шуму. Однак, головні спектральні компоненти, попри це, все ще можна ідентифікувати за допомоги FFT-аналізу, хоча їхня відносна значущість знижується.

Найбільш критичною ситуація виявляється тоді, коли співвідношення сигнал/шум наближається до 5 децибел. У цьому контексті, компоненти шуму поглинають суттєву частку спектральних даних, що, своєю чергою, ускладнює процес ідентифікації специфічних частот, притаманних безпілотним літальним апаратам. Однак, навіть за цих обставин, окремі піки в спектрі залишаються виразними. Незважаючи на значне зростання рівня шуму, окремі спектральні піки залишаються помітними, що дозволяє виконувати виявлення БПЛА навіть за несприятливих умов. Основні результати дослідження наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Вплив рівня шуму на якість акустичного сигналу БПЛА

Рівень шуму	SNR, дБ	Максимальна амплітуда піка	Результат виявлення
Низький	20	675,75	Характерні частоти чітко визначаються
Середній	10	680,06	Частоти визначаються з незначним впливом шуму
Високий	5	691,53	Виявлення ускладнюється через значний рівень шуму

Отримані результати показали, що зі зменшенням значення SNR погіршується контрастність спектральних піків відносно шумового фону. При цьому максимальна амплітуда окремих піків суттєво не змінюється, однак їх виділення на фоні шуму стає складнішим. Результати дослідження підтверджують, що FFT-аналіз забезпечує виявлення характерних частот БПЛА навіть при $\text{SNR} = 5$ дБ, проте точність їх виділення знижується через збільшення рівня шумового фону.

4.3 Порівняння результатів до і після обробки сигналу

Для оцінювання ефективності цифрової фільтрації виконувалося порівняння спектральних характеристик сигналу та значень SNR до і після обробки. Для обробки сигналу застосовувався смуговий фільтр Баттерворта четвертого порядку. Порівняння спектрів до та після фільтрації наведено на рисунку 4.3. Після фільтрації виконувалося повторне спектральне дослідження сигналу для оцінювання змін його характеристик та ефективності застосованого методу обробки.

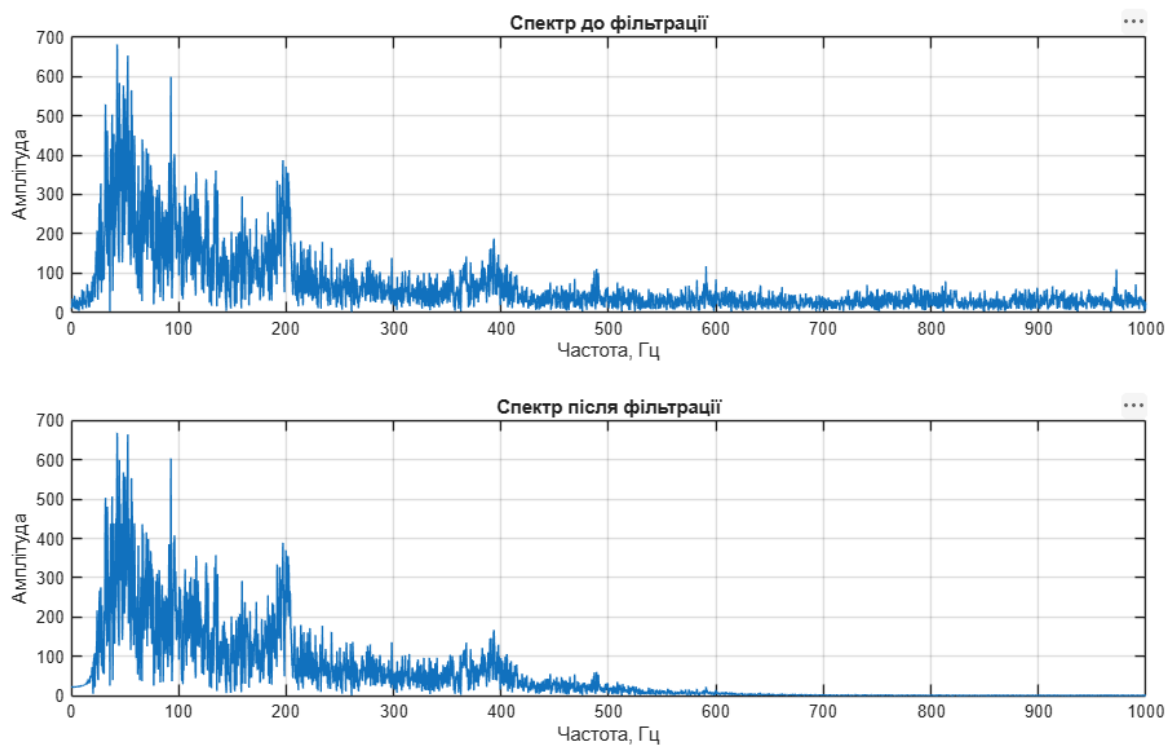


Рисунок 4.3 — Спектр акустичного сигналу до та після застосування цифрової обробки

Для визначення чисельних результатів застосовувався коефіцієнт співвідношення сигналу до шуму (SNR). Визначення показника SNR проводилося до застосування фільтра та після його обробки.

Щоб визначити, наскільки добре був оброблений сигнал, був застосований коефіцієнт, який показує ступінь поліпшення його якості:

$$K = \frac{SNR_{\text{after}} - SNR_{\text{before}}}{SNR_{\text{before}}} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

де K — відсоток покращення якості сигналу;

SNR_{before} — співвідношення сигнал/шум до фільтрації;

SNR_{after} — співвідношення сигнал/шум після фільтрації.

Дослідження виконувалося для різних рівнів співвідношення сигнал/шум. Найбільший ефект застосування цифрової фільтрації спостерігався при високому рівні шуму ($SNR \approx 5$ дБ), тому саме цей випадок наведено в таблиці 4.2 як найбільш показовий для оцінювання ефективності фільтрації.

Таблиця 4.2 – Результати оцінювання якості сигналу до та після фільтрації

Параметр	До фільтрації	Після фільтрації
SNR, дБ	5.04	7.96
Покращення якості сигналу, %	—	57.91

Розрахунок показників SNR та оцінювання ефективності фільтрації здійснювалися за допомогою програми, наведеної у додатку Б.

Результати проведеного експерименту продемонстрували, що використання цифрового смугового фільтра Баттерворта дозволило поліпшити показник співвідношення сигналу до шуму, збільшивши його з 5,04 дБ до 7,96 дБ. Відчутне зростання показників якості сигналу досягло 57,91 %.

4.4 Аналіз отриманих результатів

Під час експериментального вивчення проведено розбір фактичних аудіоданих від безпілотних літальних апаратів та здійснено оцінку дієвості цифрової обробки сигналів при наявності перешкод у вигляді шуму. Згідно з результатами FFT-аналізу, спостерігається ускладнення ідентифікації значущих спектральних компонентів звукового сигналу, коли співвідношення сигнал/шум зменшується. Якщо рівень шуму високий, деякі корисні відомості можуть бути приховані шумовими відхиленнями, що погано позначиться на точності наступних досліджень.

Ефективність фільтрації визначається показником співвідношення сигналу до шуму. Після обробки показник SNR зріс з 5,04 дБ до 7,96 дБ.

Абсолютний приріст співвідношення сигнал/шум визначається за формулою [10]:

$$\Delta \text{SNR} = \text{SNR}_{\text{до фільтрації}} - \text{SNR}_{\text{після фільтрації}} \quad (4.3)$$

де ΔSNR – абсолютний приріст співвідношення сигнал/шум, дБ;

$\text{SNR}_{\text{до фільтрації}}$ – співвідношення сигнал/шум до фільтрації;

$\text{SNR}_{\text{після фільтрації}}$ – співвідношення сигнал/шум після фільтрації.

Підставивши отримані значення у формулу (4.3), отримаємо:

$$\Delta \text{SNR} = 7,96 - 5,04 = 2,92 \text{ дБ}$$

Як свідчить отримане зростання показника SNR, вплив шумів було зменшено, а якість сигналу після цифрової обробки покращилася. Було також встановлено, що покращення якості сигналу становило 57,91 відсотка. Цим самим демонструється, що застосований спосіб очищення сигналів є дієвим і підходить для етапів препарування звукових даних, отриманих з дронів.

Висновок до розділу 4

У розділі проведено експериментальне дослідження ефективності акустичного виявлення БПЛА при різних рівнях фонового шуму. Виконано аналіз спектральних характеристик сигналу та оцінено результати застосування цифрової смугової

фільтрації. Встановлено, що зі зменшенням значення SNR ускладнюється виділення характерних спектральних піків БПЛА. Застосування фільтра Баттерворта дозволило підвищити співвідношення сигнал/шум з 5,04 дБ до 7,96 дБ, що відповідає покращенню якості сигналу на 57,91 %. Отримані результати підтвердили ефективність використання методів цифрової обробки сигналів для підвищення надійності акустичного виявлення БПЛА.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломній роботі досліджено вплив фонового шуму на ефективність акустичного виявлення безпілотних літальних апаратів та оцінено можливість підвищення якості виявлення шляхом застосування методів цифрової обробки сигналів.

У результаті виконаної роботи отримано такі результати:

- Акустичний метод виявлення БПЛА дозволяє використовувати характерні спектральні ознаки роботи двигунів і пропелерів для ідентифікації безпілотних літальних апаратів.
- При значенні SNR 20 дБ спектральні складові сигналу чітко виділяються на фоні шуму, при SNR 10 дБ їх ідентифікація ускладнюється, а при SNR 5 дБ значна частина корисної інформації маскується шумовими компонентами.
- FFT-аналіз забезпечує виявлення характерних частот БПЛА навіть за наявності значного фонового шуму, що підтверджує доцільність його використання в системах акустичного моніторингу.
- Застосування цифрового смугового фільтра Баттерворта підвищило співвідношення сигнал/шум з 5,04 дБ до 7,96 дБ.
- Покращення якості сигналу після цифрової обробки склало 57,91 %, що забезпечило більш чітке виділення спектральних компонентів БПЛА та підвищило надійність їх виявлення.
- Отримані результати підтверджують ефективність використання цифрової фільтрації для підвищення якості акустичного виявлення БПЛА в умовах фонового шуму.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Даник Ю. Г., Бугайов М. В. Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Psvz_2015_10_3
2. Skolnik M. I. Introduction to Radar Systems / M. I. Skolnik. — 3rd ed. — New York : McGraw-Hill, 2008. — Режим доступу: [https://soaneemrana.org/onewebmedia/INTRODUCTION%20TO%20RADAR%20SYSTEM%20BY%20MERRIL,%20I%20SKLOINK%20\(4\).pdf](https://soaneemrana.org/onewebmedia/INTRODUCTION%20TO%20RADAR%20SYSTEM%20BY%20MERRIL,%20I%20SKLOINK%20(4).pdf)
3. DroneUA. Класифікація та види безпілотників [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://drone.ua>
4. Луцький М. Г. та ін. Безпілотні авіаційні системи та комплекси : навчально-методичний посібник [Електронний ресурс]. — Київ, 2022. — Режим доступу: <https://ru.scribd.com/document/801189999/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA-%D0%91%D0%90%D0%A1-2022-%D0%9D%D0%90%D0%A3>
5. Signal Processing Toolbox Documentation [Електронний ресурс] / MathWorks. — Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/signal/>
6. Fast Fourier Transform (FFT) [Електронний ресурс] / MathWorks. — Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>
7. Lyons R. Understanding Digital Signal Processing / R. Lyons. — Pearson Education, 2011. — Режим доступу: <https://www.iro.umontreal.ca/~mignotte/IFT3205/Documents/UnderstandingDigitalSignalProcessing.pdf>
8. Proakis J. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications / J. Proakis, D. Manolakis. — Pearson, 2007. — Режим доступу: <https://uvceee.wordpress.com/wp->

content/uploads/2016/09/digital_signal_processing_principles_algorithms_and_applications_third_edition.pdf

9. Cooley J. W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series / J. W. Cooley, J. W. Tukey // Mathematics of Computation. — 1965. — Режим доступу: <https://scispace.com/papers/an-algorithm-for-the-machine-calculation-of-complex-fourier-2mwjmk0q9u>

10. Kay S. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory / S. Kay. — Upper Saddle River : Prentice Hall, 1993. — Режим доступу: <https://ru.scribd.com/doc/242022135/Steven-M-Kay-Fundamentals-of-Statistical-Signal-Processing-Volume-I-Estimation-Theory-Prentice-Hall-1993>

11. Add White Gaussian Noise (AWGN) [Електронний ресурс] / MathWorks. — Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/awgn.html>

12. Drone Audio Dataset [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://github.com/saraalemadi/DroneAudioDataset>

13. MathWorks GitHub Repository [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://github.com/mathworks>

14. Jeon S., Shin J.-W., Lee Y.-J., Kim W.-H., Kwon Y., Yang H.-Y. Empirical Study of Drone Sound Detection in Real-Life Environment with Deep Neural Networks // Proceedings of the 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). — 2017. — P. 1858–1862. — Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/1701.05779>

15. Hassanalain M., Abdelkefi A. Classifications, Applications, and Design Challenges of Drones: A Review // Progress in Aerospace Sciences. — 2017. — Vol. 91. — Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376042116301348>

16. Al-Emadi S., Al-Ali A. Drone Detection Systems: A Review // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10696847>

17. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://kubg.edu.ua/images/stories/podii/2017/06_21_posylannia/dstu_8302.pdf

18. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://science.kname.edu.ua/images/dok/derzhstandart_3008_2015.pdf

ДОДАТОК А

Лістинг програми FFT-аналізу акустичного сигналу БПЛА при різних рівнях шуму

```

clc;
clear;
close all;

[x1,Fs] = audioread('B_S2_D1_096-bebop_000_.wav');
[x2,~] = audioread('B_S2_D1_079-bebop_004_.wav');
[x3,~] = audioread('mixed_40-bebop_003_.wav');

x1 = mean(x1,2);
x2 = mean(x2,2);
x3 = mean(x3,2);
x = [x1; x2; x3];
x = x ./ max(abs(x));

signal_20 = awgn(x,20,'measured');
signal_10 = awgn(x,10,'measured');
signal_5 = awgn(x,5,'measured');

N = length(x);
f = (0:N-1)*(Fs/N);
FFT20 = abs(fft(signal_20));
FFT10 = abs(fft(signal_10));
FFT5 = abs(fft(signal_5));

[p20,~] = findpeaks(FFT20,'MinPeakProminence',280);
[p10,~] = findpeaks(FFT10,'MinPeakProminence',280);

```

```
[p5,~] = findpeaks(FFT5,'MinPeakProminence',280);
```

```
fprintf('20 dB: %d\n', length(p20));
```

```
fprintf('10 dB: %d\n', length(p10));
```

```
fprintf('5 dB: %d\n', length(p5));
```

```
subplot(3,1,1)
```

```
plot(f,FFT20,'LineWidth',1)
```

```
title('Низький рівень шуму (SNR = 20 дБ)')
```

```
xlabel('Частота, Гц')
```

```
ylabel('Амплітуда')
```

```
xlim([0 500])
```

```
grid on
```

```
subplot(3,1,2)
```

```
plot(f,FFT10,'LineWidth',1)
```

```
title('Середній рівень шуму (SNR = 10 дБ)')
```

```
xlabel('Частота, Гц')
```

```
ylabel('Амплітуда')
```

```
xlim([0 500])
```

```
grid on
```

```
subplot(3,1,3)
```

```
plot(f,FFT5,'LineWidth',1)
```

```
title('Високий рівень шуму (SNR = 5 дБ)')
```

```
xlabel('Частота, Гц')
```

```
ylabel('Амплітуда')
```

```
xlim([0 500])
```

```
grid on
```

```
sgtitle('FFT-аналіз акустичного сигналу БПЛА при різних рівнях шуму')
```

ДОДАТОК Б

Лістинг програми смугової фільтрації Баттерворта та оцінювання співвідношення сигнал/шум

```
clc;
clear;
close all;

[x1,Fs] = audioread('B_S2_D1_096-bebop_000_.wav');
[x2,~] = audioread('B_S2_D1_079-bebop_004_.wav');
[x3,~] = audioread('mixed_40-bebop_003_.wav');

x1 = mean(x1,2);
x2 = mean(x2,2);
x3 = mean(x3,2);

signal = [x1; x2; x3];

signal = signal ./ max(abs(signal));

Psignal = mean(signal.^2);

SNR_target = 5;

Pnoise = Psignal/(10^(SNR_target/10));

noise = sqrt(Pnoise)*randn(size(signal));

signal_noisy = signal + noise;
```

```
low_cutoff = 20;
high_cutoff = 500;

[b,a] = butter(4,[low_cutoff high_cutoff]/(Fs/2),'bandpass');

signal_filtered = filtfilt(b,a,signal_noisy);

N = length(signal);

f = (0:N-1)*(Fs/N);

FFT_before = abs(fft(signal_noisy));
FFT_after = abs(fft(signal_filtered));

figure('Color','white');

subplot(2,1,1)
plot(f,FFT_before)
title('Спектр до фільтрації')
xlabel('Частота, Гц')
ylabel('Амплітуда')
xlim([0 1000])
grid on

subplot(2,1,2)
plot(f,FFT_after)
title('Спектр після фільтрації')
xlabel('Частота, Гц')
ylabel('Амплітуда')
xlim([0 1000])
grid on
```

```
sgtitle('Порівняння спектра сигналу до та після фільтрації')
```

```
noise_before = signal_noisy - signal;
```

```
noise_after = signal_filtered - signal;
```

```
SNR_before = 10*log10(mean(signal.^2)/mean(noise_before.^2));
```

```
SNR_after = 10*log10(mean(signal.^2)/mean(noise_after.^2));
```

```
improvement = (SNR_after - SNR_before)/SNR_before*100;
```

```
fprintf('SNR до фільтрації = %.2f дБ\n',SNR_before);
```

```
fprintf('SNR після фільтрації = %.2f дБ\n',SNR_after);
```

```
fprintf('Покращення = %.2f %%\n',improvement);
```