

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
ФАКУЛЬТЕТ НАУК ПРО ЗДОРОВ'Я
КАФЕДРА ЦИВІЛЬНОЇ ТА ПРОМИСЛОВОЇ БЕЗПЕКИ
ІМ. ГЕРОЯ УКРАЇНИ ЧУБА ОЛЕКСАНДРА СЕРГІЙОВИЧА

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
Батир ХАЛМУРАДОВ
« ____ » _____ 2025р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 263 «ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА»

Тема: Акустичні критерії для оцінки безпілотних транспортних засобів

Виконавець: студент групи М-263-24-1-ТП Ярослав ЛЕГУШ
(студент, група, ім'я, прізвище)

Керівник: _____
(підпис) к.т.н., Катерина КАЖАН
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

Консультанти:
Охорона праці _____
(підпис) Олексій КОЗЛІТІН
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

Охорона навколишнього
середовища _____
(підпис) д.т.н., професор Оксана ТИХЕНКО
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

Нормоконтролер: _____
(підпис) Віталій НЕЧИПОРУК
(ім'я, прізвище)

КИЇВ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
ФАКУЛЬТЕТ НАУК ПРО ЗДОРОВ'Я
КАФЕДРА ЦИВІЛЬНОЇ ТА ПРОМИСЛОВОЇ БЕЗПЕКИ
ІМ. ГЕРОЯ УКРАЇНИ ЧУБА ОЛЕКСАНДРА СЕРГІЙОВИЧА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач випускової кафедри

_____ Батир ХАЛМУРАДОВ

« ____ » _____ 2025р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Ярослава ЛЕГУШ

1. Тема роботи «Акустичні критерії для оцінки безпілотних транспортних засобів» затверджена наказом в.о. президента від «28» серпня 2025 р. №1562/ст.
2. Термін виконання роботи: з 28.08.2025р по 19.12.2025р.
3. Вихідні дані роботи: наукові та науково-технічні публікації вітчизняних і зарубіжних авторів з питань акустики, шуму транспортних систем і безпілотних літальних апаратів; матеріали щодо конструктивних особливостей та режимів експлуатації БПЛА; дані про джерела і характеристики їх акустичного випромінювання; методики оцінювання акустичного та шумового впливу відповідно до національних і міжнародних стандартів; нормативно-правові документи у сфері охорони навколишнього середовища, акустичної безпеки та експлуатації безпілотних транспортних засобів.

4. Зміст пояснювальної записки: аналіз сучасного стану застосування безпілотних транспортних засобів, їх класифікації та сфер використання; дослідження джерел і особливостей формування акустичного випромінювання БПЛА; систематизація та оцінка основних груп акустичних критеріїв для визначення акустичної помітності та шумового впливу безпілотних транспортних засобів; аналіз методів акустичного виявлення та ідентифікації БПЛА; оцінка впливу шуму БПЛА на людину і навколишнє середовище; визначення сучасного стану, проблематики та розроблення рекомендацій щодо зменшення шумового впливу і підвищення безпеки експлуатації безпілотних транспортних засобів.

5. Календарний план-графік

№ з/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1	Затвердження теми магістерської роботи, формування завдання	28.08.25	
2	Аналіз наукових джерел, нормативної та методичної літератури з теми дослідження	02.10.2025- 03.10.2025	
3	Дослідження класифікації БПЛА, аналіз джерел та особливостей формування акустичного випромінювання	04.10.2025- 05.10.2025	
4	Вивчення техногенних і акустичних аспектів експлуатації БПЛА, методів оцінювання шуму	06.10.2025- 08.10.2025	
5	Систематизація основних груп акустичних критеріїв оцінювання БПЛА	09.10.2025- 19.10.2025	

6	Аналіз методів акустичного виявлення та ідентифікації БПЛА	20.10.2025-30.10.2025	
7	Дослідження впливу шуму БПЛА на людину та навколишнє середовище	31.10.2025-10.11.2025	
8	Оформлення пояснювальної записки, підготовка висновків	11.11.2025-21.11.2025	
9	Перевірка роботи керівником, доопрацювання за зауваженнями	22.11.2025-26.11.2025	
10	Передзахист кваліфікаційної роботи	19.12.2025	
11	Захист кваліфікаційної роботи	22.12.2025	

Дата видачі завдання: «28» серпня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи: _____ Катерина КАЖАН

Завдання прийняв до виконання: _____ Ярослав ЛЕГУШ

РЕФЕРАТ

Магістерська робота присвячена дослідженню та систематизації акустичних критеріїв оцінювання безпілотних літальних апаратів з урахуванням фізичних, психоакустичних, екологічних та експлуатаційних аспектів. Актуальність теми зумовлена зростанням використання БПЛА у цивільній і спеціальній сферах, що супроводжується підвищенням шумового навантаження на людину і довкілля та потребою вдосконалення методів акустичного виявлення й ідентифікації.

У роботі проаналізовано підходи до класифікації безпілотних транспортних засобів, розглянуто джерела та особливості формування їх звукового випромінювання. Основну увагу приділено енергетичним, спектральним, структурним, подієвим і психоакустичним критеріям, які забезпечують комплексну оцінку шумового впливу та акустичної помітності БПЛА.

Розглянуто методи акустичного виявлення, принципи побудови систем акустичного спостереження та алгоритми обробки сигналів, зокрема спектральний аналіз і застосування методів машинного навчання. Показано ефективність акустичних методів для виявлення малорозмірних БПЛА з низькою радіолокаційною помітністю. Окремо проаналізовано вплив шуму БПЛА на навколишнє середовище, людину і тваринний світ. Наведено рекомендації зі зменшення негативного акустичного впливу шляхом оптимізації режимів польоту та застосування інженерних заходів шумозниження. Також розглянуто питання охорони праці та безпечної експлуатації БПЛА.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для оцінювання ефективності БПЛА, удосконалення систем акустичного виявлення, екологічного моніторингу та забезпечення акустичної безпеки під час проектування й експлуатації безпілотних систем.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, БПЛА, акустичні критерії, шум, акустичне виявлення, психоакустика, вплив на довкілля, охорона праці.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	11
1.1.Методи ідентифікації безпілотних літальних апаратів.....	11
1.2.Класифікація безпілотних літальних апаратів.....	12
1.3.Структура та основні компоненти БПЛА.....	14
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ БПЛА.....	22
2.1. Основні чинники техногенного впливу безпілотних літальних апаратів.....	24
2.2. Нормативне регулювання техногенного впливу БПЛА.....	25
2.3. Акустичне забруднення при експлуатації БПЛА.....	27
2.4. Охорона праці при роботі з безпілотними літальними апаратами.....	31
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ КРИТЕРІЇВ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БПЛА.....	35
3.1. Подразненість шумом від БПЛА.....	37
3.2. Особливості акустичного випромінювання БПЛА.....	47
3.3. Акустичні критерії оцінювання ефективності БПЛА.....	48
3.4. Акустичне виявлення безпілотних літальних апаратів.....	59
3.5. Визначення акустичних характеристик БПЛА експериментальним шляхом...60	
3.6. Результати моделювання шуму для різних типів БПЛА.....	73
3.7. Акустична помітність БПЛА та акустичне маскування.....	88
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	93
4.1. Охорона навколишнього середовища: шумове забруднення від БПЛА.....	94
4.2. Вплив шуму БПЛА на довкілля та людину.....	94
ВИСНОВКИ.....	102
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	105

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЛА — безпілотний літальний апарат

UAS — Unmanned Aircraft System (безпілотна авіаційна система)

UAV — Unmanned Aerial Vehicle (безпілотний літальний апарат)

LAЕ — рівень акустичної експозиції (Sound Exposure Level)

LDE — рівень акустичної дози шуму

EPNL — ефективний сприйманий рівень шуму (Effective Perceived Noise Level)

LN — рівень гучності шуму

LN5 — рівень гучності з 5-відсотковою перевищуваністю

T5 — показник тональності шуму

S — показник гостроти звуку

R — показник шорсткості звуку

SQM — психоакустичні метрики (Sound Quality Metrics)

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

RF — радіочастотний (Radio Frequency)

CO₂ — діоксид вуглецю

R²c — умовний коефіцієнт детермінації

R²m — маргінальний коефіцієнт детермінації

pHA — імовірність високого рівня шумового подразнення

ICAO — Міжнародна організація цивільної авіації

EASA — Європейське агентство з авіаційної безпеки

WHO — Всесвітня організація охорони здоров'я

ДБН — державні будівельні норми України

ДСН — державні санітарні норми України

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімке поширення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у цивільних і спеціальних сферах застосування (моніторинг, інспекція інфраструктури, логістика, охорона периметрів, пошуково-рятувальні роботи) зумовлює підвищені вимоги до контролю повітряного простору та оцінювання впливу таких систем на людину і навколишнє середовище. На відміну від традиційної авіації, БПЛА часто експлуатуються на малих висотах у межах населених пунктів, створюючи подієві шумові навантаження, які можуть сприйматися як більш помітні та дратівливі через тональність і виразну періодичність «лопатевого» спектра. У зв'язку з цим зростає практична потреба у формуванні впорядкованої системи акустичних критеріїв, здатних описувати фізичні параметри звукового випромінювання БПЛА, забезпечувати порівнюваність результатів вимірювань, пояснювати суб'єктивне сприйняття шуму та пов'язані з ним ризики для здоров'я, а також бути сумісними з чинними стандартами і нормативами акустики довкілля. Особливої актуальності дана проблематика набуває для України з огляду на масштаб застосування БПЛА та необхідність підвищення безпеки їх експлуатації в умовах міської забудови і поблизу об'єктів критичної інфраструктури.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконано в межах тематики підготовки фахівців за напрямом техногенної та цивільної безпеки, а також актуальних завдань зменшення шумового впливу технічних систем і підвищення ефективності методів виявлення малорозмірних повітряних цілей.

Мета роботи – обґрунтувати та систематизувати акустичні критерії для оцінювання безпілотних транспортних засобів, показати їх застосування для аналізу шумового впливу, акустичної помітності та задач виявлення й ідентифікації БПЛА, а також сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення ефективності акустичного контролю і зменшення негативного впливу шуму на довкілля.

Завдання дослідження:

1. виконати аналітичний огляд безпілотних літальних апаратів, їх класифікації та методів ідентифікації;
2. узагальнити підходи до оцінювання техногенного та шумового забруднення від БПЛА і методи розрахунку акустичного поля;
3. систематизувати основні групи акустичних критеріїв (енергетичні, спектральні, структурні, подієві, довгострокові, психоакустичні, просторово-моделювальні) та показати їх інтерпретацію для задач оцінювання ефективності БПЛА;
4. розглянути акустичне виявлення БПЛА та алгоритми обробки сигналів з точки зору формування ознак і підвищення дальності та точності;
5. проаналізувати екологічні аспекти шумового впливу БПЛА на людину і тваринний світ та окреслити шляхи шумозниження;
6. сформуванати вимоги з охорони праці та безпечної експлуатації БПЛА під час підготовки, польотів і технічного обслуговування.

Об'єкт дослідження - акустичні прояви експлуатації безпілотних транспортних засобів у реальних умовах застосування. Предмет дослідження – показники та критерії (метрики) опису, вимірювання й оцінювання акустичних характеристик БПЛА, які використовуються для аналізу шумового впливу, акустичної помітності та задач виявлення й ідентифікації.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи аналізу і синтезу науково-технічної інформації, методи прикладної акустики та теорії сигналів (часовий і спектральний аналіз, перетворення Фур'є, виділення гармонічних складових), підходи до оцінювання шуму довкілля відповідно до міжнародних і національних стандартів, а також елементи статистичного аналізу для інтерпретації залежностей типу «вплив–реакція».

Наукова новизна полягає у комплексній систематизації акустичних критеріїв оцінювання БПЛА з урахуванням фізичних параметрів джерела та поширення

звуку, спектрально-структурних ознак акустичного підпису, подієвих і довгострокових індикаторів шумового навантаження, аспектів акустичного виявлення та екологічних і санітарно-гігієнічних вимог.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання сформованого набору критеріїв і рекомендацій для оцінювання шумового впливу БПЛА в міських і природних умовах, планування «тихих» режимів експлуатації, екологічного моніторингу, побудови та налаштування акустичних систем виявлення, а також обґрунтування інженерних заходів шумозниження.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, наведені в магістерській роботі, отримані особисто здобувачем. Автором виконано аналіз наукових джерел за тематикою дослідження, систематизовано акустичні критерії оцінювання безпілотних літальних апаратів, проаналізовано особливості акустичного випромінювання БПЛА, узагальнено підходи до акустичного виявлення та оцінювання шумового впливу, а також сформульовано практичні рекомендації щодо зниження негативного акустичного впливу та підвищення ефективності акустичного контролю.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

1.1. Методи ідентифікації безпілотних літальних апаратів

Ідентифікація безпілотних літальних апаратів (БПЛА) полягає у встановленні їх типу, класу, моделі та функціонального призначення на основі аналізу сукупності технічних ознак. Для цього застосовуються різні методи, ефективність яких залежить від умов експлуатації та характеристик апарата [1].

Радіолокаційні методи забезпечують визначення координат і швидкості БПЛА за відбитими радіосигналами та відзначаються великою дальністю і незалежністю від погодних умов. Водночас їх ефективність знижується для малорозмірних дронів із малою ефективною площею розсіювання [8, 10].

Радіочастотні (RF) методи ґрунтуються на аналізі сигналів управління та передачі даних. Вони дозволяють ідентифікувати модель БПЛА і навіть локалізувати оператора, однак є малоефективними для автономних апаратів або в режимі радіомовчання [2, 10].

Акустичні методи використовують аналіз шуму пропелерів і силової установки, що формує унікальну спектральну сигнатуру дрона. Цей підхід ефективний у міських умовах, але має обмежену дальність і залежить від рівня фонового шуму [4, 9].

Оптичні та інфрачервоні методи базуються на візуальному або тепловому спостереженні БПЛА з використанням систем комп'ютерного зору. Вони забезпечують високу точність за доброї видимості, однак залежать від метеорологічних умов.

Комбіновані (мультисенсорні) системи поєднують радіолокаційні, RF, акустичні та оптичні засоби, що істотно підвищує надійність ідентифікації. Такі системи є найбільш ефективними, проте складними та дорогими в реалізації [3, 7].

Системи Remote ID забезпечують цифрову ідентифікацію БПЛА шляхом автоматичної передачі ідентифікаційних і навігаційних даних. Вони підвищують прозорість використання повітряного простору, однак неефективні проти автономних або навмисно модифікованих апаратів і потребують поєднання з іншими методами [3].

1.2. Класифікація безпілотних літальних апаратів

Безпілотні літальні апарати класифікуються за низкою ознак, зокрема за функціональним призначенням, масою, дальністю та висотою польоту, типом силової установки, конструктивною схемою і рівнем автономності керування. Такий підхід дозволяє систематизувати різноманіття БПЛА та визначити специфіку їх застосування у військовій і цивільній сферах [3].

За функціональним призначенням виділяють тактичні, стратегічні, міні-, мікро-, комерційні та нанодрони. Тактичні й стратегічні БПЛА використовуються переважно у військовій сфері для розвідки та спостереження, тоді як міні- та мікродрони орієнтовані на локальні й цивільні завдання [3].

За способом керування розрізняють дистанційно пілотовані та автоматичні БПЛА. Перші керуються оператором через наземні станції, другі виконують політ за задалегідь заданими програмами із використанням навігаційних і сенсорних систем [1–4].

За масою та дальністю дії БПЛА поділяються на малорозмірні, середні та важкі, а також на тактичні, оперативно-тактичні та оперативно-стратегічні. За типом енергоживлення виділяють апарати з електричними, паливними або комбінованими силовими установками [2, 5, 6].

За конструктивною схемою розрізняють БПЛА літакового та гелікоптерного типів, а також конвертоплани, що поєднують вертикальний зліт із горизонтальним

польотом. За висотою польоту апарати поділяються на маловисотні, середньовисотні, висотні та стратосферні [2, 7].

Загалом військові БПЛА характеризуються більшою дальністю та тривалістю польоту, тоді як цивільні переважно представлені мультикоптерами, що застосовуються для моніторингу, зйомки, логістики та інших прикладних завдань [3].

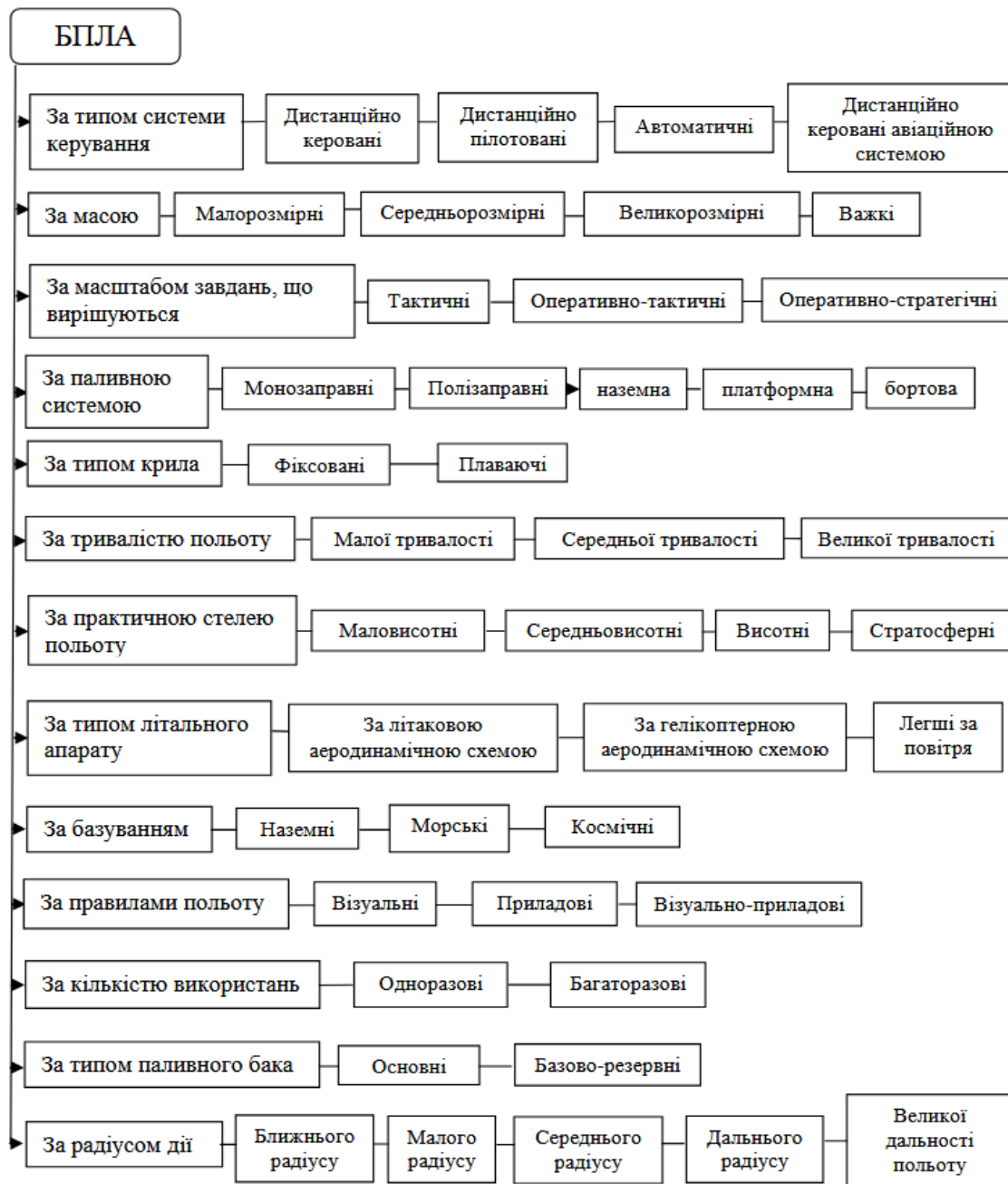
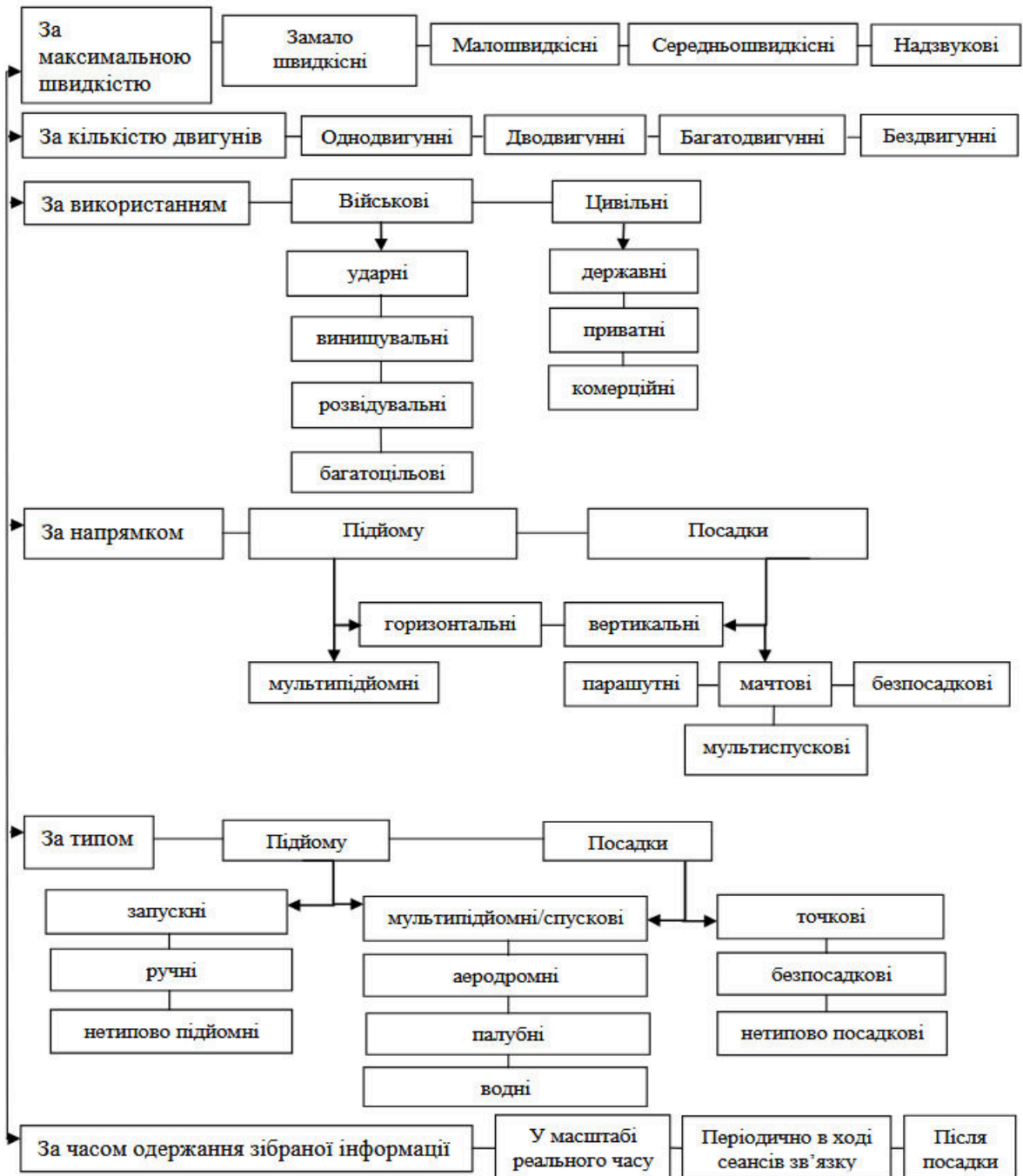


Рис. 1.1. Класифікація безпілотних літальних апаратів [3]



Продовження рис. 1.1. Класифікація безпілотних літальних апаратів [1–3]

1.3. Структура та основні компоненти БПЛА

Сучасні безпілотні літальні апарати являють собою багатокомпонентні технічні системи з високим рівнем інтеграції апаратних і програмних елементів.

Кожен БПЛА функціонує як єдиний комплекс, у якому всі підсистеми перебувають у тісній взаємодії та забезпечують виконання польотних, навігаційних і цільових завдань [3].

Усвідомлення внутрішньої структури безпілотного літального апарата має вирішальне значення для проектування, модернізації та впровадження ефективних автономних алгоритмів керування. Саме аналіз складу й принципів роботи основних компонентів дозволяє підвищити надійність системи, оптимізувати енергоспоживання та забезпечити стабільність роботи БПЛА в різних умовах експлуатації (рис. 1.2) [3].



Рис. 1.2 Структура БПЛА

Сучасний безпілотний літальний апарат являє собою багатокomпонентну технічну систему, у якій окремі елементи тісно взаємодіють між собою, забезпечуючи виконання польотних і функціональних завдань. Усвідомлення внутрішньої структури БПЛА є необхідною передумовою для проектування

ефективних автономних, напіваавтономних та дистанційно керованих систем, а також для підвищення їх надійності й функціональності [3].

Як показано на рис. 1.2, типовий безпілотний літальний апарат складається з п'яти базових підсистем, кожна з яких виконує окрему, але критично важливу роль у загальній архітектурі апарата [2].

Першою ключовою складовою є **силова установка**, яка забезпечує необхідну енергію для створення підйомної сили, руху апарата та живлення всіх бортових систем. Залежно від призначення БПЛА, як джерело енергії можуть застосовуватися електричні двигуни або двигуни внутрішнього згорання. Електричні силові установки характеризуються низьким рівнем шуму, високою маневреністю та простотою обслуговування, проте мають обмежений час автономної роботи. Двигуни внутрішнього згорання, у свою чергу, забезпечують значно більшу тривалість польоту - до 8–10 годин, однак поступаються електричним системам за екологічністю та надійністю. Окремим перспективним напрямом є розробка БПЛА з іонними двигунами, які вирізняються високою енергоефективністю, але наразі мають недостатню тягу для широкого практичного застосування.

Другою важливою складовою є **система управління**, яка відповідає за стабілізацію польоту, виконання команд оператора та реалізацію автономних алгоритмів. Центральним елементом цієї системи виступає бортовий комп'ютер, що обробляє інформацію від численних датчиків - гіроскопів, акселерометрів, магнітометрів, датчиків швидкості та положення. Сучасні БПЛА використовують відкриті операційні системи або спеціалізовані системи реального часу, що дозволяє забезпечити високу швидкодію та гнучкість програмного забезпечення. Тенденцією останніх років є інтеграція основних елементів управління на єдиній платі з використанням процесорів архітектури RISC ARM [5].

Обмін інформацією між БПЛА та наземним пунктом управління реалізується за допомогою **системи зв'язку**. Вона включає командні радіолінії, канали передачі

телеметрії та відеоданих. Для польотів на великі відстані можуть застосовуватися супутникові канали або спеціальні БПЛА-ретранслятори. У простіших апаратах широко використовуються стандарти мобільного зв'язку, а також технології Wi-Fi, WiMAX і LTE. У випадку втрати каналу зв'язку безпілотник автоматично переходить у режим автономного керування відповідно до заданого алгоритму [3].

Не менш важливою є **навігаційна система**, яка забезпечує визначення просторового положення апарата та побудову маршруту польоту. Основу цієї системи складають супутникові навігаційні комплекси GPS або ГЛОНАСС, що дозволяють досягати точності позиціонування в межах 1–2,5 м. Для підвищення точності застосовуються інерціальні навігаційні системи, барометричні датчики висоти, лазерні та ультразвукові висотоміри. Водночас точні навігаційні комплекси мають значну масу, тому на малих БПЛА використовуються полегшені мікромеханічні датчики, точність яких компенсується програмними методами корекції [6].

Окрему групу елементів становить **корисне навантаження**, яке визначається функціональним призначенням безпілотника. Залежно від завдань, на борту можуть встановлюватися оптико-електронні та тепловізійні камери, радіолокаційні та радіотехнічні комплекси, сенсори для хімічної або радіаційної розвідки, засоби радіоелектронної боротьби, апаратура наведення та корекції озброєння, а також транспортні модулі для доставки вантажів. Перелік можливого оснащення БПЛА наведено в табл. 1 [3].

Сучасні безпілотні літальні апарати активно інтегрують новітні технологічні рішення, серед яких особливе місце займають системи автоматичного керування польотом, високоточні сенсори, сучасні засоби зв'язку, енергоефективні джерела живлення, композитні матеріали та алгоритми штучного інтелекту. Поєднання цих компонентів дозволяє значно розширити функціональні можливості БПЛА та підвищити ефективність їх використання у цивільній і військовій сферах (рис. 1.3) [3].



Рис. 1.3. Ключові технології БПЛА

Системи керування польотом сучасних безпілотних літальних апаратів базуються на використанні високорівневих автопілотів, які інтегрують дані з багатьох сенсорів для точного визначення просторового положення, швидкості та орієнтації апарата. Для забезпечення стійкості та надійності польоту в змінних умовах застосовуються інтелектуальні алгоритми, зокрема методи нечіткої логіки та штучних нейронних мереж. Такі підходи дозволяють БПЛА адаптуватися до впливу зовнішніх факторів, компенсувати збурення та оптимізувати керування в реальному часі [3].

Основні системи БПЛА

Системи БПЛА	Ключові характеристики	Особливості
Силова установка	<ul style="list-style-type: none"> - Електричні двигуни - Двигуни внутрішнього згорання - Ракетні двигуни - Іонні двигуни (розробляються) 	<ul style="list-style-type: none"> - ДВЗ: тривалий час роботи (8-10 год) - Електродвигуни: 3-4 год роботи, надійні, легкі - Іонні: економічні, тривалий час роботи, слабка тяга
Електронна система управління	<ul style="list-style-type: none"> - Бортовий комп'ютер - ОС: Linux або спеціалізовані системи реального часу 	<ul style="list-style-type: none"> - Обробка даних з датчиків - Управління двигуном та зв'язком - Тенденція до інтеграції на одній платі - Процесор: архітектура RISC ARM
Система зв'язку «телеметрії»	<ul style="list-style-type: none"> - Командна радіолінія - Діапазони: УКХ, L, S, C, X - Для малих БПЛА: мобільні мережі, WiFi, WiMAX, LTE 	<ul style="list-style-type: none"> - Дальній зв'язок: БПЛА-ретранслятори, супутниковий зв'язок - Автопілот при втраті зв'язку
Навігаційна система	<ul style="list-style-type: none"> - Супутникові радіонавігаційні системи - Частоти: 1,1-1,6 ГГц - Додаткові елементи: акселерометри, гіроскопи, барометри, лазерні висотоміри 	<ul style="list-style-type: none"> - Точність для малих БПЛА: 1-2,5 м - Проблема: висока маса точних систем - Рішення для малих БПЛА: мікромеханічні датчики - Похибка без корекції: до 3 м за 1 хв
Додаткові системи	<ul style="list-style-type: none"> - Системи розвідки - Засоби радіоелектронної боротьби - Пристрої наведення зброї - Засоби ураження цілей - Апаратура автопілотування та посадки 	Встановлюються залежно від конкретних завдань БПЛА

Сучасні безпілотні літальні апарати оснащуються інтелектуальними системами управління польотом на основі автопілотів із багаторівневою

сенсорною підтримкою. Інтеграція даних гіроскопів, акселерометрів, магнітометрів і барометрів забезпечує точне визначення просторового положення апарата, а використання алгоритмів нечіткої логіки та нейронних мереж дозволяє адаптувати керування до змінних умов польоту та зовнішніх збурень [3].

Розширення функціональних можливостей БПЛА забезпечується застосуванням сенсорних систем, зокрема лідарів, мультиспектральних і радіолокаційних датчиків, що дозволяє виконувати завдання моніторингу, зйомки та екологічного контролю. Отримані дані інтегруються в єдину інформаційну систему для підвищення точності аналізу [10].

Надійний зв'язок між БПЛА та наземними пунктами управління реалізується за допомогою захищених цифрових протоколів, багатоканальних радіоліній і супутникових систем, що забезпечує стабільне керування навіть за наявності радіоперешкод [10].

Енергетичні підсистеми безпілотників базуються переважно на літій-полімерних акумуляторах, а для апаратів великої дальності застосовуються гібридні силові установки. Використання композитних матеріалів сприяє зменшенню маси та підвищенню міцності конструкції [3].

Застосування методів штучного інтелекту й машинного навчання дозволяє БПЛА виконувати автоматичне розпізнавання об'єктів, аналіз сцен і прийняття автономних рішень у реальному часі. Особливе значення має автономна навігація, що поєднує інерціальні системи, візуальну одометрію та картографування місцевості й забезпечує надійне функціонування за відсутності сигналів супутникової навігації [3, 6].

Висновки до РОЗДІЛУ 1

У першому розділі виконано комплексний аналіз сучасних методів ідентифікації безпілотних літальних апаратів, зокрема радіолокаційних, радіочастотних, акустичних, оптичних та комбінованих підходів. Показано, що

кожен із методів має власну область ефективного застосування, яка визначається умовами експлуатації, типом БПЛА та вимогами до дальності, точності й прихованості виявлення. Особливу увагу приділено акустичним методам, які є перспективними для виявлення малорозмірних БПЛА з низькою радіолокаційною та радіочастотною помітністю.

Проведено детальну класифікацію безпілотних літальних апаратів за функціональним призначенням, масо-габаритними характеристиками, типом силової установки, конструктивною схемою та режимами експлуатації.

Установлено, що різноманіття класів БПЛА зумовлює значні відмінності в акустичних характеристиках, що необхідно враховувати під час формування універсальних критеріїв оцінювання їх шумового впливу та акустичної помітності

Розглянуто структуру та основні компоненти сучасних БПЛА, що дозволило встановити ключові джерела формування акустичного випромінювання. Показано, що вирішальний внесок у створення шуму вносять силова установка та пропелерні системи, а особливості їх конструкції й режимів роботи безпосередньо впливають на спектральний склад і рівень звукового випромінювання. Отримані висновки створюють теоретичне підґрунтя для подальшого аналізу акустичних критеріїв оцінювання безпілотних літальних апаратів.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ БПЛА

Забруднення навколишнього середовища є однією з ключових причин сучасних екологічних проблем, що негативно впливають на здоров'я населення та підвищують рівень передчасної смертності. Значна частина глобальних ризиків для здоров'я пов'язана з впливом токсичних забруднювачів, концентрація яких у довкіллі з року в рік зростає [13].

В Україні особливої актуальності набуває моніторинг антропогенних факторів, що впливають на водні та лісові екосистеми.

Основною перевагою використання БПЛА є віддалене або автономне керування, що мінімізує ризики для персоналу, особливо в умовах техногенних і природних катастроф. Ефективність екологічного моніторингу значною мірою залежить від правильного вибору типу дрона та його технічних характеристик відповідно до поставлених завдань [13].

У цивільному секторі найчастіше використовуються дрони загального призначення, які придатні для фото- та відеомоніторингу, але мають обмежену дальність польоту (100–300 м) і тривалість роботи до 30 хвилин. Спеціалізовані системи контролю, зокрема DJI Aeroscope, дозволяють ідентифікувати апарати та операторів, однак через високу вартість застосовуються переважно державними структурами.



Рис. 2.1. DJI Aeroscope

Така система забезпечує контроль повітряного простору поблизу об'єктів критичної інфраструктури, де недозволені польоти сторонніх безпілотників.

Ще одним напрямом розвитку є комерційні БПЛА - зокрема дрони-кур'єри. Використання таких апаратів здешевлює та прискорює доставку замовлень, оскільки зменшує залежність від людської праці. Наприклад, компанія Amazon почала тестувати систему доставки дронами ще у 2016 році, що стало кроком до оптимізації логістичних ланцюгів та зниження викидів CO₂ за рахунок скорочення руху автомобільного транспорту.



Рис. 2.2. Дрон-кур'єр

Сучасні технології застосовуються не лише у логістиці, але й у відновленні екосистем після стихійних лих. Наприклад, спеціальні БПЛА використовуються для розповсюдження насіння мангрових рослин на постраждалих територіях - до 750 кульок на гектар за 5 хвилин, що сприяє швидшому відновленню флори та фауни.

Крім того, дрони використовуються для екологічного моніторингу, зокрема для контролю концентрації викидів сірки та азоту у прибережних зонах Північного моря. Це дозволяє оперативно оцінювати вплив промислової та транспортної діяльності на морське довкілля, а також координувати риболовні та судноплавні операції [13].

Отже, аналіз областей застосування БПЛА демонструє, що ці технології відіграють все важливішу роль у збереженні навколишнього середовища, запобіганні катастроф та підвищенні ефективності екологічного контролю [13].

2.1. Основні чинники техногенного впливу безпілотних літальних апаратів

Безпілотні літальні апарати дедалі активніше застосовуються у цивільній, науковій, комерційній, військовій та пошуково-рятувальній діяльності, істотно змінюючи підходи до екологічного моніторингу, логістики, картографування та охорони природних територій [13]. Водночас масове впровадження БПЛА супроводжується появою нових екологічних викликів, пов'язаних з акустичним, енергетичним, хімічним і візуальним впливом на довкілля.

БПЛА доцільно розглядати як джерела локального антропогенного навантаження, для яких визначальним є не масштаб впливу окремого апарата, а його кумулятивний характер. За умов одночасної експлуатації великої кількості дронів, особливо в міських агломераціях або на територіях із підвищеною екологічною чутливістю, сумарний вплив може призводити до порушення екологічної рівноваги [13].

Одним із ключових факторів негативного впливу є акустичне навантаження. Шум, що генерується електродвигунами та пропелерними системами БПЛА, має виражені тональні та високочастотні компоненти. Рівень звукового тиску невеликого електричного мультикоптера на відстані близько 5 м становить у середньому 70–80 дБА, що співмірно з шумом побутових приладів або автомобільного руху [11]. Для людини такий шум може спричиняти психоемоційний дискомфорт, підвищення стресу, зниження концентрації уваги та порушення сну, особливо за повторюваних або нічних польотів.

Акустичний вплив БПЛА є ще більш відчутним для тваринного світу. Дослідження свідчать, що рівні шуму понад 55 дБА викликають уникання територій гніздування птахами, а високочастотні компоненти шуму (понад 3 кГц)

можуть спричиняти дезорієнтацію та стресові реакції у ссавців [11]. Особливу небезпеку становить кумулятивний акустичний ефект при одночасній роботі великої кількості БПЛА, коли рівень шуму може перевищувати природний фон на 20–25 дБ і впливати на поведінку тварин у радіусі кількох сотень метрів [13].

Хоча більшість цивільних БПЛА використовують електричні акумулятори й не створюють прямих викидів у повітря під час експлуатації, екологічні ризики пов'язані з виробництвом і утилізацією батарей, видобутком рідкісних металів та небезпекою займання. Для дронів із двигунами внутрішнього згоряння додатковим чинником є локальні викиди CO₂, NO_x і CO, особливо при тривалих польотах на малих висотах [13].

Окремої уваги потребує візуальний і світловий вплив БПЛА. Нічні польоти з використанням LED-освітлення можуть порушувати біоритми тварин, дезорієнтувати птахів і комах, а в міських умовах створювати додаткове навантаження на зір і психоемоційний стан людини [11].

Таким чином, масове застосування безпілотних літальних апаратів потребує комплексного екологічного регулювання з урахуванням акустичного, енергетичного, світлового та соціального впливу. Особливої актуальності набуває розроблення нормативів, що обмежують рівень шуму, висоту й тривалість польотів, а також визначають умови експлуатації БПЛА в чутливих природних і міських середовищах.

2.2. Нормативне регулювання техногенного впливу БПЛА

Нормативне регулювання техногенного впливу безпілотних літальних апаратів на навколишнє середовище перебуває на етапі активного формування та істотно відрізняється залежно від юрисдикції. На відміну від пілотованої авіації, для більшості класів БПЛА відсутні обов'язкові стандартизовані вимоги щодо сертифікації рівнів шуму, тому регулювання їх акустичного впливу ґрунтується на

поєднанні міжнародних рекомендацій, регіональних регламентів і національного екологічного законодавства [11, 13].

На міжнародному рівні ключову роль відіграє Міжнародна організація цивільної авіації (ІСАО), екологічні вимоги якої систематизовані в Додатку 16 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію. Однак зазначені положення орієнтовані переважно на пілотовані повітряні судна і не містять обов'язкових норм сертифікації шуму для малорозмірних БПЛА. Водночас ІСАО наголошує на необхідності ризик-орієнтованих і гнучких підходів до екологічного регулювання безпілотних систем [11].

Важливим кроком уніфікації методів вимірювання шуму є стандарт ISO 5305:2024 «Noise measurements for UAS (<150 kg)», який визначає процедури акустичних вимірювань роторних БПЛА в типових режимах польоту. Стандарт має методичний, а не сертифікаційний характер і спрямований на забезпечення порівнюваності результатів вимірювань [11].

У Європейському Союзі регулювання експлуатації БПЛА базується на ризик-орієнтованому підході, закріпленому в Регламенті (ЄС) 2019/947. Акустичні характеристики не є об'єктом прямої сертифікації, проте можуть враховуватися під час надання дозволів на польоти, особливо в категорії specific. Делегований регламент (ЄС) 2019/945 встановлює вимоги до конструкції, маркування та технічної документації БПЛА, включно з наданням інформації про шум. Рекомендаційні матеріали EASA щодо вимірювання шуму застосовуються на добровільній основі, але широко використовуються під час оцінювання польотів у чутливих зонах [11].

В Україні екологічні аспекти експлуатації БПЛА регулюються в межах загального екологічного та авіаційного законодавства. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» визначає базові вимоги екологічної безпеки, а Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» застосовується у випадках системної або масштабної діяльності із використанням БПЛА. За

результатами процедури ОВД можуть встановлюватися обмеження щодо маршрутів, часу польотів і контролю шуму [11, 13]. Додатково поводження з акумуляторами регламентується Законом України «Про управління відходами» [13].

Аналіз нормативних підходів свідчить, що мінімізація техногенного впливу БПЛА досягається поєднанням технічних і організаційних заходів, зокрема розробкою малошумних конструкцій, оптимізацією маршрутів і режимів польоту, застосуванням інтелектуальних систем керування та екологічно безпечною утилізацією акумуляторів. Перспективним напрямом є впровадження спеціалізованих стандартів екологічної сертифікації БПЛА [11, 13].

2.3. Акустичне забруднення при експлуатації БПЛА

Шумове забруднення, створюване безпілотними літальними апаратами, розглядається як небажаний акустичний вплив, що негативно позначається на людині та природному середовищі. Актуальність цієї проблеми зростає в умовах щільної міської забудови, активного цивільного використання дронів і в районах бойових дій. Тривалий або інтенсивний шум БПЛА може спричинити психоемоційний дискомфорт, порушення сну, підвищення рівня стресу, а також негативно впливати на поведінку та життєдіяльність дикої фауни [11].

Акустичні характеристики БПЛА переважно визначаються роботою гвинтово-моторної групи. Основними джерелами шуму є силова установка та пропелери, які формують аеродинамічні й тональні складові акустичного випромінювання. Додатковий внесок можуть робити корпус і бортове обладнання, що зазнають вібрацій унаслідок дисбалансу обертових елементів або конструктивних недоліків, що призводить до підсилення загального рівня шуму [11].

У БПЛА типу FPV Raptor застосовуються електричні двигуни, які за умови якісного монтажу характеризуються низьким рівнем власного шуму. У таких апаратах домінуючим джерелом акустичного випромінювання є пропелер, тому

оптимізація геометрії лопатей, кількості гвинтів і режимів їх обертання є ключовим напрямом зниження акустичного впливу [11].

Для оцінювання шумових характеристик застосовуються теоретичні моделі аеродинамічного шуму та спеціалізовані програмні засоби, зокрема MathCad, що дозволяє виконувати розрахунки рівнів звукового тиску, які виникають у процесі обертання лопатей у повітрі. Такі розрахунки є важливим етапом проєктування малошумних БПЛА та оцінювання їх екологічного впливу [12].

Для розробки методики розрахунку акустичного поля використовується математична модель Л. Я. Гутіна, згідно з якою аеродинамічні сили, що діють на елементарні ділянки лопатей гвинта, зумовлюють виникнення звукового випромінювання. За умови малої товщини лопаті порівняно з довжиною хвиль перших гармонік джерело шуму може бути апроксимоване як точкове, що дозволяє визначати звуковий тиск за відповідним аналітичним виразом (1).

$$P_m = Q \frac{\partial \varphi}{\partial t} \approx \frac{mn\omega}{2\pi c_n L_1} \left[-P_E \cos \vartheta + \frac{c_n M_{кр}}{\omega R_n} \right] J_{mn} \left(\frac{mn\omega}{c_n} R_n \sin \vartheta \right) \quad (1)$$

для розрахунку звукового тиску, необхідні такі вхідні дані:

- m – номер гармоніки,
- ω - кутова швидкість обертання, що визначається через частоту обертання двигуна;
- $n = 5827$ об/хв – частота обертання валу,
- j – кількість лопатей гвинта. (у даному випадку $j = 2$),
- R – довжина лопаті гвинта. ($R = 0,1325$ м),
- W – потужність двигуна, ($W = 260$ Вт).

Математичні обчислення виконуються за допомогою програмного пакету MathCad. У програмі послідовно задаються параметри середовища (швидкість звуку, густина повітря, атмосферний тиск), геометричні характеристики гвинта та режимні параметри двигуна. На основі цього визначаються аеродинамічні сили,

обертальний момент, хвильове число та залежність звукового тиску від кута обертання [12].

Для кожної з п'яти гармонік формується окрема функція, після чого будуються полярні діаграми спрямованості звукового тиску (рис. 2.3). Отримані значення переводяться у децибели, оскільки логарифмічна шкала є зручною для аналізу широкого діапазону акустичних величин. Відомо, що при вільному поширенні звуку рівень звукового тиску зменшується приблизно на 6 дБ при кожному подвоєнні відстані від джерела.

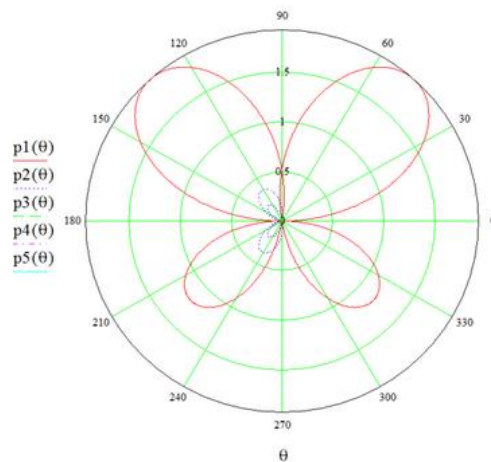


Рис. 2.3. Полярний графік спрямованості звукового тиску для основного тону – $p1$, та для його гармонік – $p2$, $p3$, $p4$ та $p5$.

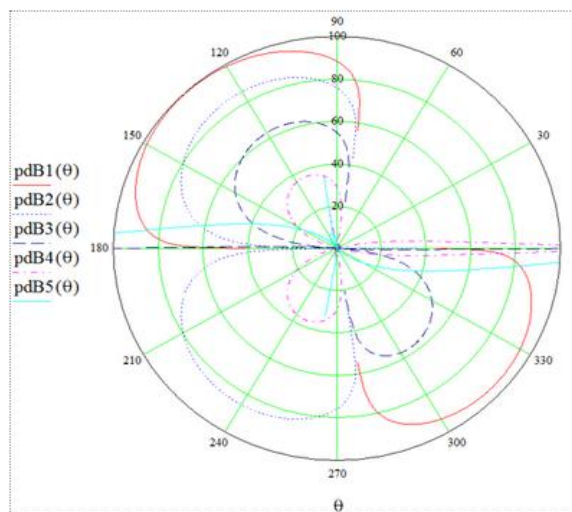


Рис. 2.4. Полярний графік направленості акустичного поля для основного тону та його гармонік (рівень звукового тиску в dB).

Аналіз результатів (рис. 2.3–2.4) показав, що максимальний рівень звукового тиску припадає на основний тон, тоді як амплітуди гармонік поступово зменшуються. Для основного тону зафіксовано максимальний звуковий тиск 1,9222 Па, що відповідає рівню 99,655 дБ, при кутах близько 48° та 132°.

Ефективним способом зниження шуму є застосування гвинтів більшого діаметра з меншим кутом встановлення лопатей, що за умови збереження підйомної сили дозволяє зменшити частоту обертання і, відповідно, рівень акустичного випромінювання, особливо в області перших гармонік. Додатковими перевагами є зниження енергоспоживання та збільшення тривалості польоту. Доцільним також є використання карбонових лопатей, які характеризуються малою масою, високою міцністю та стабільністю експлуатаційних характеристик [11].

У розділі проаналізовано екологічні аспекти застосування безпілотних літальних апаратів і показано, що за умов масового використання БПЛА можуть створювати помітне антропогенне навантаження. Встановлено, що основним негативним чинником є шумове забруднення, джерелами якого виступають пропелери, двигуни та конструктивні вібрації. Шум БПЛА має виражений тональний і високочастотний характер, що підвищує його акустичну помітність і дратівливість для людини та негативно впливає на тваринний світ.

Проаналізовано також вплив БПЛА на якість повітря та енергетичні ресурси. Визначено, що електричні дрони не створюють прямих викидів під час експлуатації, проте екологічні ризики пов'язані з виробництвом і утилізацією літєвих акумуляторів. Для апаратів із двигунами внутрішнього згоряння характерні локальні викиди забруднювальних речовин.

Розрахунки акустичного поля пропелера з використанням математичної моделі та програмного пакета MathCad підтвердили, що визначальний внесок у формування шуму забезпечує гвинт, а максимальні рівні звукового тиску відповідають основному тону та нижчим гармонікам. Отримані результати обґрунтовують доцільність конструктивних заходів зі зниження шуму, зокрема

оптимізації геометрії гвинта, зменшення частоти обертання та застосування композитних матеріалів.

2.4. Охорона праці при роботі з безпілотними літальними апаратами.

Охорона праці під час експлуатації безпілотних літальних апаратів є важливою складовою системи управління безпекою праці та невід'ємним елементом безпечної організації виробничих процесів. З огляду на зростання масштабів використання БПЛА у промисловості, наукових дослідженнях, моніторингу довкілля, логістиці та сфері безпеки, підвищується актуальність питань, пов'язаних із запобіганням виробничому травматизму, аваріям і негативному впливу технічних засобів на персонал [19].

Основною метою заходів з охорони праці є створення безпечних умов роботи для оператора та допоміжного персоналу, мінімізація ризиків виникнення аварійних ситуацій, а також збереження матеріальних ресурсів і технічної справності обладнання. Особливість експлуатації БПЛА полягає у поєднанні електричних, механічних, акустичних та психофізіологічних факторів небезпеки, що потребує комплексного підходу до організації безпечної праці [19].

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при роботі з БПЛА

Під час експлуатації безпілотних літальних апаратів на персонал можуть впливати такі основні групи небезпечних і шкідливих факторів:

- **механічні фактори** - обертіві повітряні гвинти, рухомі частини двигунів, можливе падіння апарата з висоти;
- **електричні фактори** - ураження електричним струмом при роботі з акумуляторними батареями, зарядними пристроями та електричними з'єднаннями;
- **пожежна небезпека** - займання або вибух літій-іонних та літій-полімерних акумуляторів у разі перегріву, механічного пошкодження або короткого замикання;

- **акустичний вплив** - підвищений рівень шуму, що може викликати втому, зниження концентрації уваги та психоемоційний дискомфорт;
- **психофізіологічні фактори** - підвищене нервово-емоційне навантаження, пов'язане з необхідністю постійного контролю польоту та швидкого прийняття рішень;
- **фактори навколишнього середовища** - несприятливі погодні умови, обмежена видимість, сильний вітер, низькі або високі температури.

Урахування зазначених факторів є необхідною умовою для розроблення ефективних заходів з охорони праці.

Вимоги перед початком експлуатації. Перед початком робіт оператор повинен пройти попередній огляд технічного стану безпілотного літального апарата та допоміжного обладнання. Особливу увагу слід приділяти справності повітряних гвинтів, відсутності тріщин або деформацій корпусу, надійності кріплень, стану електричних з'єднань та рівню заряду акумуляторів [19].

Місце зльоту та посадки БПЛА повинно бути підготовлене відповідно до вимог безпеки: очищене від сторонніх предметів, із забезпеченням безпечної зони радіусом не менше 30–50 м. Не допускається розміщення в зоні польоту людей, тварин, транспортних засобів або легкозаймистих матеріалів [19].

Перед виконанням польоту оператор зобов'язаний оцінити метеорологічні умови, зокрема швидкість і напрямок вітру, температуру повітря та можливість опадів, а також перевірити відповідність польоту вимогам чинного законодавства щодо обмежень повітряного простору.

Вимоги безпеки під час керування БПЛА. Під час виконання польотів оператор повинен постійно підтримувати візуальний контакт із безпілотним літальним апаратом, контролювати параметри польоту та рівень заряду акумуляторних батарей. Керування БПЛА дозволяється лише у тверезому стані та за відсутності ознак перевтоми або погіршення самопочуття [19].

Категорично забороняється:

- виконувати польоти над людьми, будівлями та транспортними засобами;
- торкатися рухомих частин апарата під час роботи двигунів;
- залишати працюючий БПЛА без нагляду;
- експлуатувати апарат у несприятливих погодних умовах, що перевищують допустимі параметри.

У разі виникнення нештатної ситуації оператор зобов'язаний негайно припинити політ і здійснити безпечну посадку або аварійне вимкнення систем.

Вимоги безпеки після завершення польотів. Після завершення польоту необхідно відключити живлення БПЛА, пульта керування та допоміжного обладнання. Апарат слід очистити від забруднень і провести післяпольотний огляд із метою виявлення можливих пошкоджень або відхилень у роботі [19].

Акумуляторні батареї повинні зберігатися у спеціальних вогнетривких контейнерах у сухому приміщенні з дотриманням температурного режиму, встановленого виробником. Усі виявлені несправності підлягають фіксації у журналі технічного обслуговування.

Засоби індивідуального та колективного захисту. Для зниження рівня ризику під час експлуатації БПЛА оператору рекомендується використовувати засоби індивідуального захисту: захисні окуляри, рукавички, світловідбивний жилет, захисну каску або головний убір. У разі тривалої роботи в умовах підвищеного шуму доцільно застосовувати засоби захисту органів слуху. До засобів колективного захисту належать огороження зон запуску, попереджувальні знаки, сигнальні стрічки та автоматизовані системи контролю стану апарата [18].

Організаційні та профілактичні заходи. Підвищенню рівня безпеки експлуатації БПЛА сприяє впровадження таких організаційних заходів:

- регулярне навчання та перевірка знань персоналу з охорони праці;
- планове технічне обслуговування апаратів;
- оновлення програмного забезпечення систем керування;
- розроблення інструкцій та планів дій у разі аварійних ситуацій;

- дотримання вимог чинного законодавства України щодо використання безпілотних літальних апаратів.

Висновки до РОЗДІЛУ 2

У другому розділі досліджено основні напрями техногенного впливу безпілотних літальних апаратів на навколишнє середовище. Показано, що за умов масового та регулярного використання БПЛА їх локальний вплив може набувати кумулятивного характеру та негативно позначатися на екосистемах, міському середовищі й якості життя населення. Встановлено, що провідним чинником техногенного навантаження є акустичний вплив.

Проаналізовано особливості шумового забруднення, створюваного БПЛА, та визначено, що їхній шум має виражений тональний і високочастотний характер, який сприймається людиною як більш дратівливий порівняно з традиційними транспортними джерелами за однакових рівнів звукової енергії. Показано негативний вплив акустичного навантаження на людину та тваринний світ, зокрема на птахів і дрібних ссавців.

Розглянуто нормативно-правові аспекти регулювання техногенного впливу БПЛА в Україні, Європейському Союзі та на міжнародному рівні. Встановлено відсутність уніфікованих обов'язкових стандартів сертифікації шуму для більшості класів БПЛА, що зумовлює необхідність застосування адаптованих методик оцінювання та рекомендаційного підходу.

Отримані результати підтвердили, що основний внесок у формування акустичного випромінювання забезпечують основний тон і нижчі гармоніки шуму гвинта, що дозволяє обґрунтувати конструктивні заходи зі зниження шуму.

Таким чином, результати другого розділу підтверджують необхідність комплексного підходу до оцінювання техногенного впливу безпілотних літальних апаратів з акцентом на акустичний чинник та створюють підґрунтя для подальших досліджень у цій сфері [19].

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ КРИТЕРІЇВ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БПЛА

Акустичне випромінювання безпілотних літальних апаратів формується переважно внаслідок роботи силової установки та обертання пропелерів і має нестационарний характер, оскільки швидкість обертання роторів змінюється залежно від режимів польоту та маневрування. Лише за умов стабільних обертів можливе формування квазістационарного гармонічного сигналу [18].

У багатороторних БПЛА різні ротори можуть працювати з неоднаковими частотами, що призводить до появи кількох фундаментальних складових, не пов'язаних простими гармонійними співвідношеннями. Це зумовлює складну, неперіодичну структуру акустичного сигналу та ускладнює його аналіз у часовій області [18].

Більш інформативним є аналіз у частотній області, який дозволяє виявити характерні закономірності акустичних сигнатур БПЛА. Основна енергія шуму зосереджена у визначених частотних діапазонах, пов'язаних із роботою пропелерів, при цьому домінує низькочастотна складова спектра [19].

Для дослідження нестационарних сигналів широко застосовується спектрограма на основі короткочасного перетворення Фур'є (STFT), яка дає змогу відстежувати зміну частотного складу в часі. Гармонічні компоненти проявляються у вигляді характерних смуг, пов'язаних зі швидкістю обертання роторів [18].

Взаємодія сигналів від кількох джерел у багатороторних БПЛА призводить до інтерференційних ефектів і формування квазіперіодичних спектральних максимумів і мінімумів. Різні типи дронів характеризуються відмінними спектральними патернами, що обумовлено конструктивними особливостями та параметрами силових установок. Частотний склад і форма спектральної оболонки

можуть ефективно використовуватися для виявлення, класифікації та ідентифікації БПЛА [16].

На рис. 3.1 наведено приклади спектрів і спектрограм сигналів дронів DJI Phantom 3 та Hobbyking FPV250, які демонструють суттєві відмінності їх акустичних сигнатур, незважаючи на схожий принцип роботи.

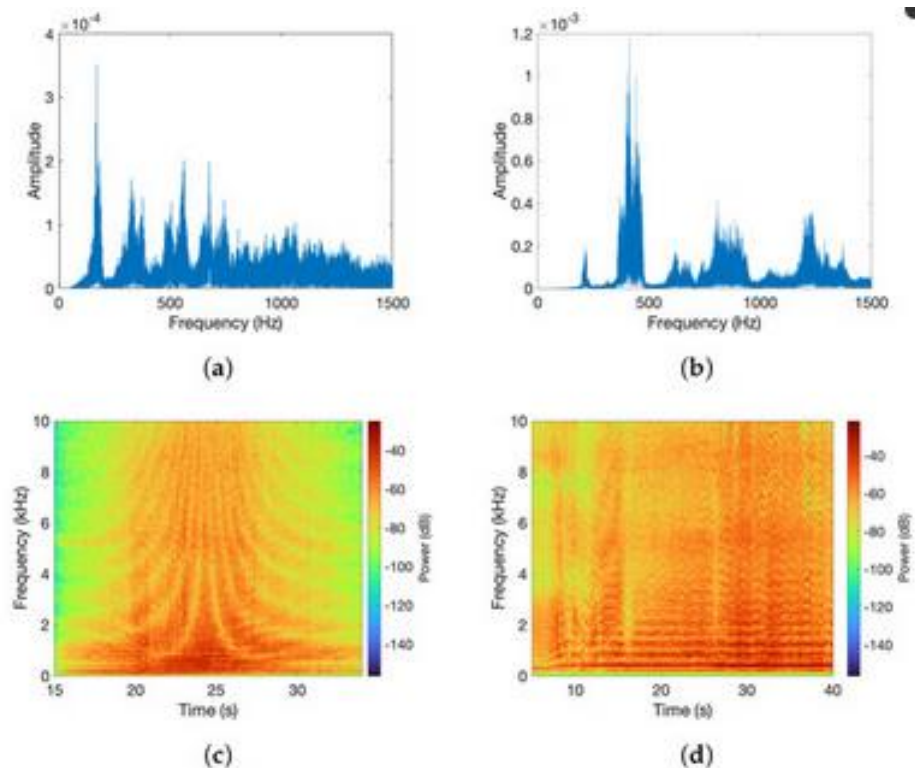


Рис. 3.1 Аналіз сигналу, що випромінюється дронами DJI Phantom 3 і Hobbyking FPV250. (а) спектр магнітуда сигналу дрона DJI P3; (б) спектр магнітуди сигналу безпілотної FPV250; (в) Спектрограма сигналу дрона DJI P3; (г) Спектрограма сигналу дрона FPV250

Особливу увагу слід звернути на низькочастотний діапазон спектра, в якому зосереджена основна частина енергії сигналу. У спектрограмі цей ефект проявляється у вигляді квазігоризонтальних ліній, відомих як модуляція вертольотного типу (Helicopter Envelope Modulation, HERM). Такі структури

виникають за умови використання достатньо довгих часових вікон STFT, що охоплюють кілька циклів обертання пропелерів [18].

Низькочастотні акустичні компоненти мають особливе практичне значення, оскільки вони зазнають меншого ослаблення під час поширення у повітрі порівняно з високочастотними складовими. Це підвищує ефективність акустичного виявлення дронів на значних відстанях і робить даний частотний діапазон перспективним для побудови систем пасивної акустичної детекції.

3.1. Подразненість шумом від БПЛА

Останнім часом безпілотні літальні апарати перебувають у центрі уваги науковців і регуляторних органів, зокрема через їх акустичний вплив, який усе частіше розглядається як джерело дискомфорту та чинник соціальної прийнятності технологій БПЛА. Рівень шумового навантаження може суттєво обмежувати масштаби практичного застосування дронів [16].

У наукових дослідженнях відзначається недостатня вивченість порівняльної шумової подразненості, що створюється БПЛА та традиційними транспортними джерелами, а також впливу різних режимів експлуатації, зокрема зльоту й посадки. Важливу роль відіграють і психоакустичні характеристики сигналів та контекстні умови їх сприйняття, які визначають суб'єктивне відчуття дискомфорту [17].

Для кількісної оцінки шумової подразненості було сформовано набір експериментальних сценаріїв із використанням БПЛА різних габаритів і маневрів, а також інших транспортних джерел шуму. Аналіз проводився в діапазоні А-зважених рівнів звукової експозиції (LAE), що відповідають реалістичним умовам повсякденного середовища [19].

Експеримент для дронів реалізовано за повним факторним дизайном із варіюванням розміру апарата, типу маневру, швидкості руху та бічної відстані до приймача. До порівняльного аналізу також залучалися сигнали від реактивних і гвинтових літаків, гелікоптерів та легкових автомобілів, що дозволило коректно

оцінити відмінності у рівнях шумової подразненості між різними видами транспорту [19].

1) Дрони

Для формування акустичних стимулів у дослідженні застосовано метод **ауралізації**, який поєднує експериментальні записи шуму БПЛА з математичним моделюванням поширення звуку. Такий підхід забезпечив гнучкість у виборі геометрії поширення та мінімізував вплив сторонніх шумів, формуючи реалістичні акустичні стимули [19].

Було згенеровано 40 стимулів для двох типів БПЛА, що істотно відрізняються за масо-габаритними характеристиками: DJI Mavic 2 (907 г) та DJI Matrice 300 (6300 г). Записи виконувалися під час зльоту, посадки та горизонтальних прольотів за двох швидкісних режимів [19].

Моделювання поширення звуку здійснювалося для висот польоту 80, 20 і 6 м та бічних відстаней до приймача 10 і 50 м. Схеми геометрії поширення наведено на рис. 3.2 і 3.3, при висоті приймача 1,2 м.

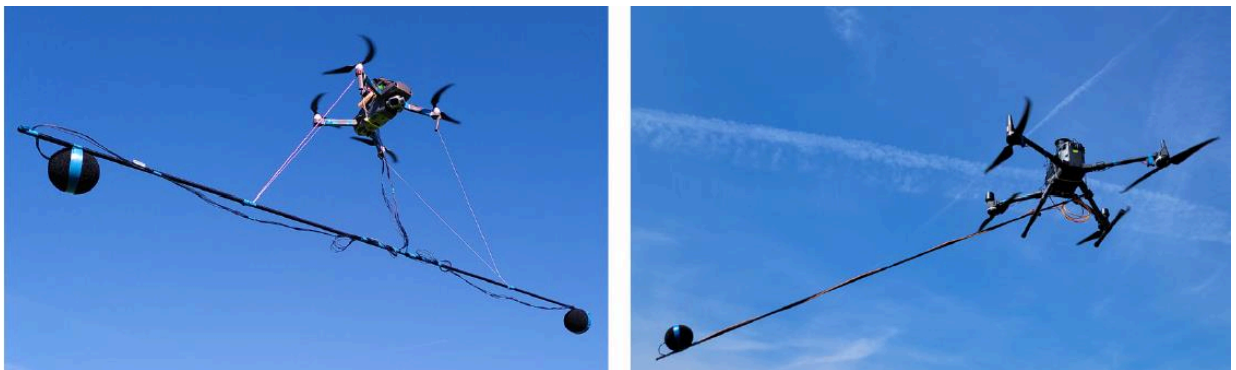


Рис. 3.2. DJI Mavic 2 (ліворуч) та DJI Matrice 300 (праворуч) зі спеціальним пристроєм збору даних, включаючи мікрофонний кронштейн.

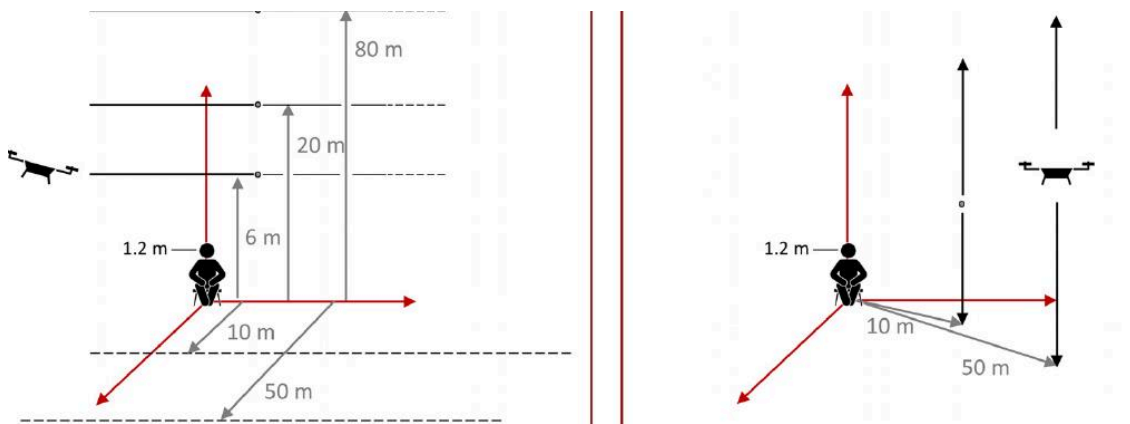


Рис. 3.3. Геометрія поширення для ауралізації горизонтальних та вертикальних маневрів.

Нижчі швидкості руху дронів відносно землі становили 4 км/год для вертикальних маневрів і 14 км/год для горизонтальних прольотів, тоді як вищі швидкості наближалися до максимально допустимих для кожної моделі. Такий підхід дозволив охопити реалістичний діапазон експлуатаційних режимів.

Акустичні сигнали випромінювання реєструвалися безпосередньо на борту дронів і використовувалися як вихідні джерельні дані для подальшої ауралізації. Це забезпечило високий рівень співвідношення сигнал/шум і дало можливість після завершення вимірювань вільно змінювати параметри розташування приймачів і траєкторій поширення. Для перевірки достовірності отриманих результатів паралельно виконувалися наземні вимірювання з використанням каліброваних мікрофонів, які слугували еталонними даними для валідації синтезованих сигналів [16].

Польові експерименти проводилися на відкритому майданчику за температури повітря близько 7 °C та швидкості вітру 2 м/с з поривами до 4 м/с. Для бортових записів застосовувалися MEMS-мікрофони, попередньо відкалібровані в безлунній камері та скориговані за характеристиками вільного поля в діапазоні частот від 100 Гц до 10 кГц. Власний шум вимірювальної системи не перевищував 30 дБА, тоді як рівні сигналів від дронів у точках реєстрації перевищували 68 дБА. Додатково

контролювалися частоти обертання всіх роторів оптичним методом, а також просторове положення апаратів із використанням високоточної супутникової навігації [18].

На етапі ауралізації до джерельних сигналів застосовувалися часозмінні фільтри, що враховували директивність випромінювання, ефект Доплера, геометричне затухання, атмосферне поглинання, взаємодію із ґрунтом і амплітудні модуляції, зумовлені турбулентністю повітря. Коректність відтворення підтверджувалася шляхом порівняння рівнів звукової експозиції та часових залежностей між синтезованими сигналами й реальними наземними записами, що показало відхилення не більше 2 дБ. Експертна оцінка також засвідчила високу акустичну правдоподібність отриманих стимулів [18].

2) Інші транспортні джерела шуму

Для забезпечення порівняльного аналізу до набору акустичних стимулів було включено сигнали інших джерел транспортного шуму. Використовувалися польові записи гелікоптерів і гвинтових літаків у різних режимах експлуатації, а також синтезовані сигнали реактивних літаків, адаптовані до умов горизонтального прольоту. Шум автомобільного транспорту представлено проходами легкових автомобілів за різних швидкостей і відстаней з урахуванням прискорення та наявності шумозахисних екранів [16].

Для підвищення реалістичності всі ауралізовані сигнали поєднувалися з фоновими шумами природного середовища низького рівня. Акустичні стимули мали фіксовану тривалість і плавні переходи на початку та в кінці. Відтворення здійснювалося за допомогою багатоканальної акустичної системи з просторовою імітацією руху джерела. У підсумку сформовано розширений набір стимулів, що охоплював шість категорій джерел шуму з частково перекривними діапазонами рівнів LAE, що забезпечило коректність подальшого статистичного аналізу [16].

Окрім А-зваженого рівня звукової експозиції (LAE), у дослідженні визначено психоакустичні параметри, зокрема гостроту звучання, шорсткість, силу коливань,

а також п'ятий перцентиль гучності й тональності. Додатково застосовано метрики EPNL та LDE-D, адаптовані для оцінювання шуму БПЛА. Їх використання дозволило врахувати тональні та високочастотні складові шуму, що істотно впливають на суб'єктивне сприйняття [16–19].

Для аналізу суб'єктивної шумової подразненості застосовано лінійні моделі зі змішаними ефектами та логістичні моделі. Отримані результати підтвердили, що за однакових рівнів LAE шум БПЛА викликає вищу подразненість порівняно з більшістю традиційних транспортних джерел [19].

Аналіз середніх значень подразненості показав чітку лінійну залежність між LAE та рівнем сприйнятої незручності. Найбільш дратівливим виявився малогабаритний БПЛА, далі - більший дрон, гелікоптери та гвинтові літаки. Найменшу подразненість спричиняли легкові автомобілі. Статистичний аналіз підтвердив значущість впливу як типу джерела шуму, так і рівня звукової експозиції ($p < 0,01$), водночас міжіндивідуальні відмінності також мали істотний внесок у результати [16, 19].

Соціально-демографічні чинники, зокрема чутливість до шуму, стать, вік, рівень освіти та тип середовища проживання, не мали істотного впливу на оцінки подразненості та були виключені з остаточної моделі [16].

Модель (1):

$$Y_{ijk} = B_0 + S_{Src,i} + B_1 * LAE_{ijk} + U_{0k} + U_{1k} * LAE_{ijk} + E_{ijk}$$

де Y_{ijk} - короткочасна подразненість, $S_{Src,i}$ - іксований ефект типу джерела (6 рівнів); LAE - коваріата; U_{0k} , U_{1k} - випадкові перетин і схил для учасника k

Застосування моделі (1) дало змогу визначити **еквівалентні зсуви рівня звуку** для різних типів джерел за умови фіксованого рівня подразненості (наприклад, при значенні $Y=5$ $Y=5$ $Y=5$). Такі зсуви інтерпретуються як різниця в рівні LAE LAE LAE, на яку одне джерело шуму має бути тихішим або гучнішим порівняно з іншим, щоб викликати однаковий рівень суб'єктивного подразнення [16].

Результати показали суттєві міжтипові відмінності. Зокрема, шум від малого безпілотного літального апарата є еквівалентним за подразнювальною дією шуму від більшого дрона при зниженні рівня LAELAE приблизно на 6 дБ. Порівняно з гвинтовими та гелікоптерними джерелами відповідний зсув становить близько 11–12 дБ, із реактивними повітряними суднами - близько 14 дБ, а з легковими автомобілями - до 17 дБ [19].

Таким чином, малий БПЛА досягає рівня суб'єктивної подразненості, еквівалентного шуму реактивного літака, вже за умови зниження показника LAELAE приблизно на 14 дБ, що відповідає лише близько 4 % звукової енергії реактивного джерела. Це свідчить про підвищену психоакустичну чутливість людини до шуму малих безпілотних літальних апаратів порівняно з традиційними транспортними засобами [19].

На рис. 3.5 наведено прогнозовані та експериментально спостережувані значення шумової подразненості для кожного типу джерела як функцію рівня LAELAE, усереднені за всією вибіркою учасників дослідження [16].

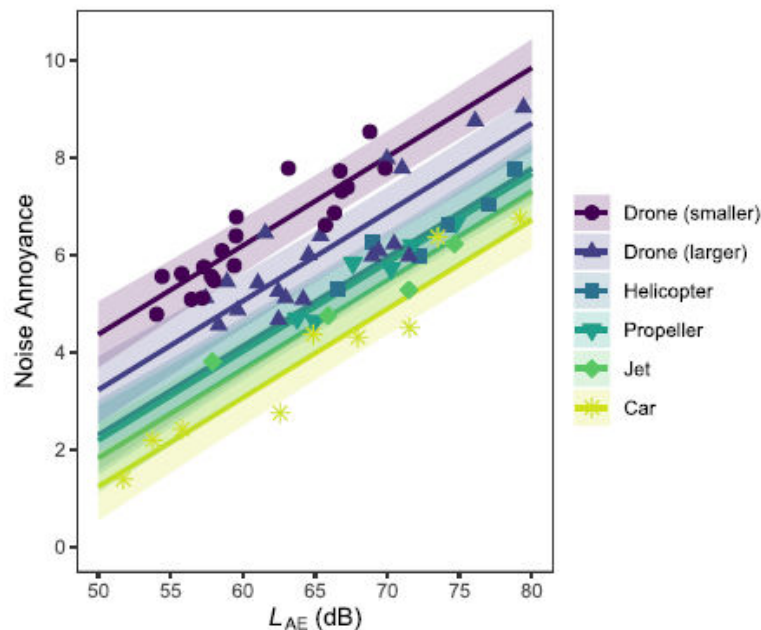


Рис. 3.5. Прогнозовані та спостережувані оцінки шумового подразнення для кожного типу джерела як функція LAE, усереднені для всіх учасників [16].

Модель (2):

$$\text{Logit}(p_{\text{HA}}) = B_0 + S_{\text{Src},i} + B_1 * L_{\text{AE}}_{ijk}$$

Модель дає 67% правильних класифікацій і псевдо R^2 Тьюра = 0,16. Криві рНА (LAE) для кожного джерела - на Рис. 10. Підтвердилося: обидва дрони викликають вищу рНА, ніж інші джерела ($p < 0,05$); різниці між авто, гелікоптерами, гвинтовими і реактивними менш виразні ($p \approx 0,08$), окрім авто vs гелікоптер (авто менш дратівливі; $p = 0,03$).

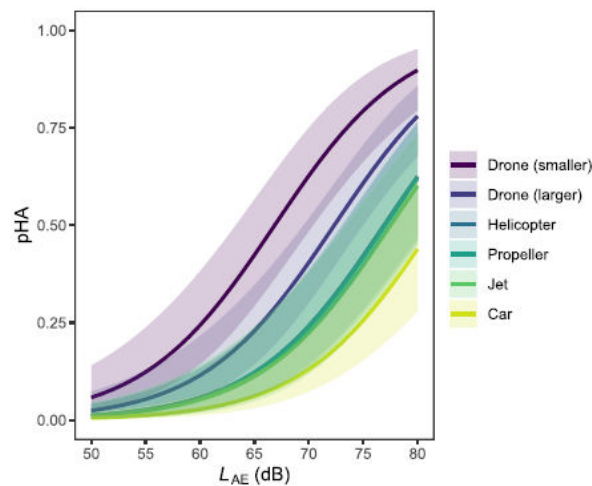


Рис. 3.6. Криві залежності впливу шуму від реакції для ймовірності високого рівня незручності (рНА) для всіх шести категорій транспортних засобів [16].

Фактори подразненості від шуму дронів

1) Операції дронів (маневри, швидкість, висота)

Попередній аналіз показав, що менший дрон дратує більше за більший на однаковому LAE. Далі вивчали ефекти маневру, швидкості, і (для прольотів) висоти.

На Рис. 3.7. (без нормування на LAE) видно: для обох дронів (а) вертикальні маневри (зліт/посадка) є дратівливішими, ніж горизонтальні прольоти; (б) нижча

швидкість дещо зменшує подразненість при зльотах, але збільшує — при прольотах (особливо на великій висоті).

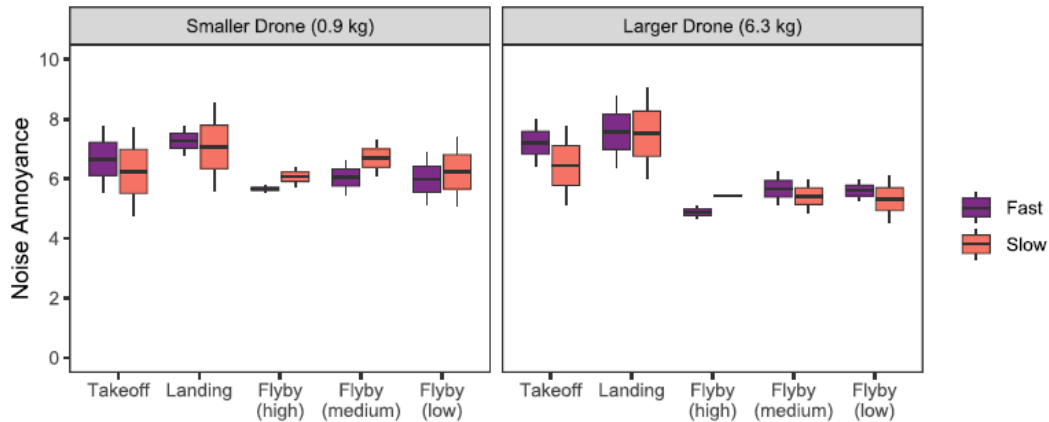


Рис. 3.7. Коробчасті діаграми, що показують оцінки шумового подразнення для 40 стимулів дрона (без корекції LAE, об'єднані за обома версіями навколишнього звуку) для меншого та більшого дрона, агреговані за маневром та швидкістю.

Статистично ці ефекти описані LMM:

Модель (3):

$$Y_{ijkl} = B_0 + B_1 LAE_{ijkl} + S_{Size,i} + S_{Spd,j} + S_{Mnv,k} + S_{Spd * Mnv,jk} + u_{0l} + u_{1l} LAE_{ijkl} + e$$

де фіксовані ефекти: розмір (2), швидкість (2), маневр (5: прольоти *high/medium/low*, посадка, зліт), взаємодія швидкість×маневр; випадкові ефекти - перетин і схил по учасниках. Якість: $R^2_c = 0,74$, $R^2_m = 0,24$.

Після вирівнювання по LAE (див. рис. 3.8. для меншого дрона; для більшого — ті самі нахили, але зсув униз на ~6 дБ за подразненістю):

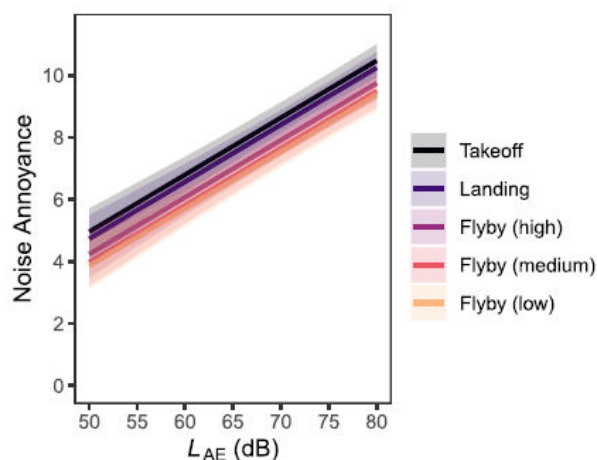


Рис. 3.8. Середній рівень шумового роздратування для всіх маневрів

- Зліт - найдратівливіший, далі посадка ($p=0,030$), усі вертикальні > прольоти ($p<0,001$).
- Серед прольотів: високий > середній/низький за подразненістю ($p<0,05$ при однаковому LAE); середній vs низький — без значущої різниці ($p=0,243$).

Швидкість діє по-різному залежно від маневру:

- Швидкі зльоти більш дратівливі, ніж повільні ($p<0,001$) - «бонус» ≈ 3 дБ для повільних.
- Повільні прольоти більш дратівливі, ніж швидкі ($p\approx 0,061$ для всіх висот; найсильніший ефект на високих).
- Для посадок різниці від швидкості немає ($p=0,864$).

Еквівалентні зсуви рівнів (Табл. V; «Fast–Slow»):

- Зліт: $-3,3$ дБ (повільний менш дратівливий);
- Посадка: $-0,1$ дБ (практично нуль);
- Прольоти: високий $+4,4$ дБ, середній $+1,9$ дБ, низький $+1,4$ дБ (повільний більш дратівливий; «штраф» $1-4$ дБ) - це і є ефект «loitering».

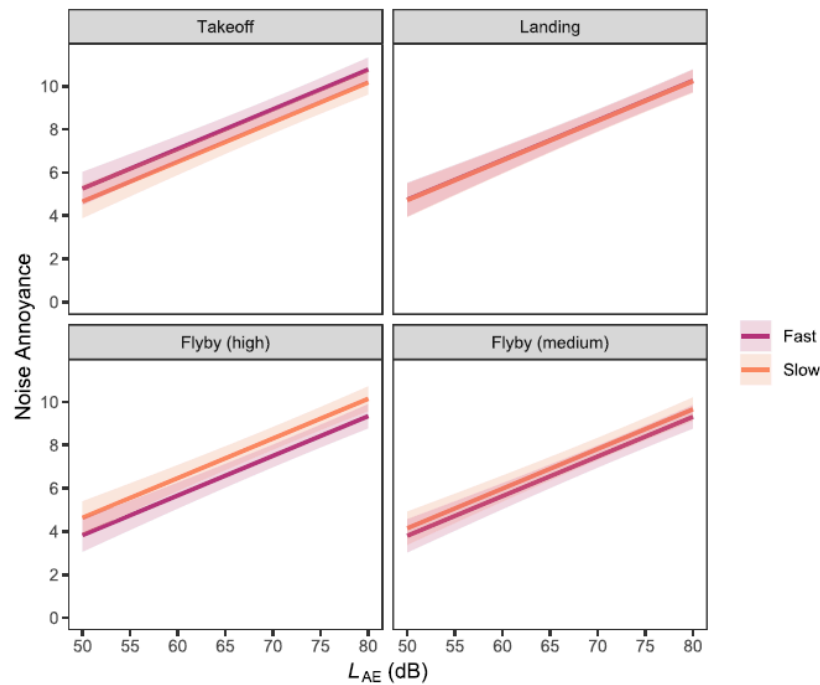


Рис. 3.9. Візуалізація взаємодії швидкісного маневру для меншого дрона: прогнозований шум під час злетів та посадок (верхній ряд), а також прольоти на великій та середній висоті (нижній ряд), виконувані на низькій та високій швидкості [16].

2) Маніпуляція контекстом

Три групи (медичний, комерційний, нейтральний контекст у вступній інструкції) - значущих відмінностей у оцінках не виявлено. Фактор виключено з подальшого аналізу.

3) Інші метрики «гучності»

Модель (3) перевірили, замінивши LAE на LDE, EPNL або LN (рівень гучності). Усі чотири варіанти дали подібну підгонку:

- з LAE: $R^2c=0,74$; $R^2m=0,24$;
- з LDE: $R^2c=0,74$; $R^2m=0,24$;
- з EPNL: $R^2c=0,74$; $R^2m=0,25$;
- з LN: $R^2c=0,73$; $R^2m=0,24$.

Тобто жодна з альтернатив суттєво не перевершила LAE.

4) Психоакустичні параметри (SQM)

Оскільки категоріальні фактори (розмір/маневр/швидкість) не завжди зручно відтворювати в полі, перевірили модель на безперервних SQM:

Модель (4):

$$Y_{ij}=B_0+B_{LN}LN_{ij}+B_T T_{ij}+B_S S_{ij}+B_R R_{ij}+u_{0j}+e_{ij}$$

Значущі предиктори: рівень гучності (LN5), тональність (T5), гострота (S) - всі $p < 0,001$. Шорсткість (R) - незначуща ($p = 0,267$). Якість: $R^2_c = 0,67$; $R^2_m = 0,21$ - трохи нижча за модель (3), але значно простіша (5 ступенів свободи проти 12).

Внесок предикторів (зменшення R^2 при виключенні): найбільше падає при виключенні тональності ($\Delta \approx -0,04$), далі гостроти ($-0,03$), потім LN ($-0,02$). Для шорсткості падіння немає.

3.2. Особливості акустичного випромінювання БПЛА

Акустичне випромінювання безпілотних літальних апаратів має складну спектральну структуру та формується як сукупність гармонічних складових, частоти яких кратні частотам обертання ротора та/або двигуна. Амплітуди гармонік зазвичай зменшуються зі зростанням частоти, що зумовлює домінування низькочастотних компонентів у спектрі шуму БПЛА [16].

У режимі рівномірного прямолінійного польоту спостерігається закономірне зменшення амплітуди послідовних гармонік, тоді як під час маневрів зміна орієнтації апарата відносно приймача призводить до коливань інтенсивності звукового поля через спрямований характер випромінювання [18].

Тип силової установки істотно впливає на акустичні характеристики БПЛА. Електричні двигуни, як правило, є менш шумними, ніж двигуни внутрішнього згорання, однак в обох випадках основним джерелом шуму залишається повітряний гвинт. Його акустичне випромінювання зростає зі збільшенням розмірів і швидкості обертання та включає гармонічний шум обертання і широкосмугову складову, зумовлену турбулентними процесами [16].

Для БПЛА з двигунами внутрішнього згорання значну частку шуму формує вихлопна система. У крейсерському режимі рівень гармонік, пов'язаних із роботою двигуна, перевищує шум гвинта на 2–3 дБ, а за режиму повного газу - на 10–18 дБ. Для електричних мультикоптерів характерна наявність щільно розташованих гармонік, що інколи призводить до формування майже суцільного спектра.

Дальність акустичного виявлення БПЛА визначається властивостями джерела шуму, характеристиками приймальних систем і умовами поширення звуку в атмосфері. Зменшення амплітуди хвиль зумовлюється геометричним розходженням, атмосферним згасанням, а також впливом вітру й турбулентності [19].

Акустичний сигнал БПЛА має просторово спрямований характер: перша гармоніка є майже ізотропною, тоді як шум повітряного гвинта демонструє виражену напрямну залежність, що проявляється зміною інтенсивності парних гармонік залежно від орієнтації апарата.

3.3. Акустичні критерії оцінювання ефективності БПЛА

Акустичні характеристики безпілотних літальних апаратів є важливою складовою їхнього фізичного портрета. Вони формуються у результаті взаємодії механічних, аеродинамічних та електромагнітних процесів, що відбуваються під час польоту.

Акустичний аналіз дозволяє не лише ідентифікувати тип дрона, а й оцінити ефективність його роботи, рівень технічного стану, енергоефективність, наявність несправностей чи дисбалансу у пропелерах.

Під ефективністю БПЛА у цьому контексті розуміється сукупність характеристик, які забезпечують оптимальне функціонування апарата з мінімальним рівнем шуму, стабільною частотою обертання та збалансованою акустичною потужністю [18].

Для кількісного опису цих параметрів вводяться акустичні критерії, що відображають якісні особливості сигналів.

Таблиця 2

Основні групи акустичних критеріїв оцінювання БПЛА

№	Група критеріїв	Приклади показників	Для БПЛА – сфера застосування
1	Енергетичні	Рівень звукового тиску L_p , потужність шуму P_n , рівень звукової потужності L_w	Базові «скільки шумить»; вимір на землі (подія/фон) і/або розрахунок L_w для порівняння моделей і пропелерів
2	Спектральні	Частота F_o , спектральна густина $S(f)$, гармонічні спотворення K_n	Виявляють «дзиччання»: тони на ВРФ та гармоніках; використовуй 1/3- октавні спектри й вузькосмуговий аналіз
3	Структурні	Індекс акустичної помітності A_j , інтегральний коефіцієнт ідентифікації K_i	Корисні для порівняння «читабельності» дрона на фоні міста/природи; зафіксувати метод у звіті
4	Подієві	L_{Amax}/L_{AFmax} , SEL (LAE), тривалість події, $T > X$ дБ	Для зльоту/посадки/прольоту на різних висотах і швидкостях; потрібні для «разових» оцінок у містах
5	Довгострокові	Середній за період T ; добові індикатори з вечірньо-нічними штрафами; кількість подій вище порогу	Для регулярних сервісів/маршрутів флоту: планування «тихих вікон», нормування по фасадах
6	Психоакустичні	Гучність/рівень гучності	Пояснюють підвищену дратівливість дронів;

			додай хоча б Tonality і Sharpness до базового набору
7	Просторові/мод елювальні	Ізофони LAmax/SEL/LAeq, директивність, ослаблення з відстанню	Карти шуму для маршрутів; показати буферні зони, вплив висоти/швидкості/трека
8	Біоакустичні	Перекриття частот з вокалізаціями, SEL у буферах, нічні індикатори	Для природних територій: планувати сезони/висоти/відстані, обґрунтувати обмеження
9	Якість вимірювань	Клас приладу, калібрування, фон/метео, повторюваність, невизначеність	Щоб дані прийняли регулятори/рецензенти; додавай СІ та опис метео-вікна

1. Енергетичні критерії

Енергетичні показники відображають базову «силу» акустичного впливу БПЛА. Вони відповідають на просте запитання: наскільки інтенсивним буде звук у конкретній точці простору і в конкретний момент часу. Ці значення зручні для зіставлення режимів польоту (зліт, проліт, посадка), для перевірки дотримання порогів біля житлової забудови та для швидкої комунікації з зацікавленими сторонами. Саме на енергетичні критерії зазвичай спираються при ухваленні оперативних рішень - коригуванні висоти, швидкості чи траєкторії [19].

Вони базуються на визначенні рівня звукового тиску (L_p), який обчислюється за формулою: $L_p = 20 \cdot \log_{10} (p/p_0)$,

де p - дійсне ефективне значення звукового тиску (Па),

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — порогове значення звукового тиску.

Для оцінки акустичної потужності БПЛА використовується співвідношення:

$$P_a = 4\pi r^2 I,$$

де r - відстань до джерела

I - інтенсивність звукової хвилі.

Інтерпретація: чим вищий рівень звукового тиску, тим більша акустична помітність дрона.

Ефективний дрон має мінімальне значення L_p при збереженні стабільних аеродинамічних характеристик.

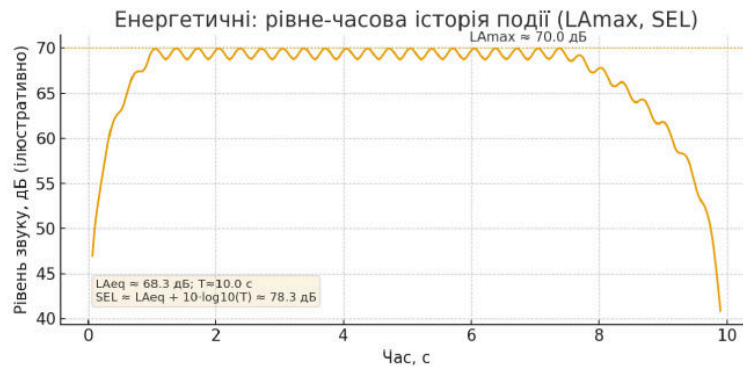


Рис. 3.10. Енергетичні критерії: рівне-часова історія

2. Спектральні критерії

Спектральні критерії показують «структуру» звуку: де зосереджена енергія за частотами, які наявні тональні компоненти і як вони співвідносяться з фоновим шумом. Для БПЛА особливо важливі частоти, пов'язані з проходженням лопатей, та їхні гармоніки - саме вони часто визначають впізнаваний «підпис» дрона. Спектральний аналіз допомагає зрозуміти, чому суб'єктивно однаковий за гучністю звук може сприйматися по-різному, і вказує, на що впливати інженерно: геометрію гвинтів, оберти, керування двигунами [19].

Спектральні характеристики визначаються на основі аналізу частотного складу сигналу, отриманого за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT) [18].

Це дозволяє виявити основні гармоніки, побічні частоти, а також шумові компоненти [16].

Основними показниками є:

Основна частота f_0 - відповідає частоті обертання пропелерів:

$f_0 = n/60 \cdot N_p$, де n - оберти на хвилину, N_p - кількість лопатей пропелера.

Коефіцієнт гармонічних спотворень (K_h)

$$K_h = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^m A_i^2}}{A_1} \quad \text{де } A_i \text{ – амплітуди гармонік сигналу}$$

Спектральна ширина Δf :

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$$

Висока спектральна концентрація (мала Δf) свідчить про стабільність роботи двигуна.

Наявність виражених побічних гармонік або розширення спектра є ознакою дисбалансу або зносу лопатей пропелера.

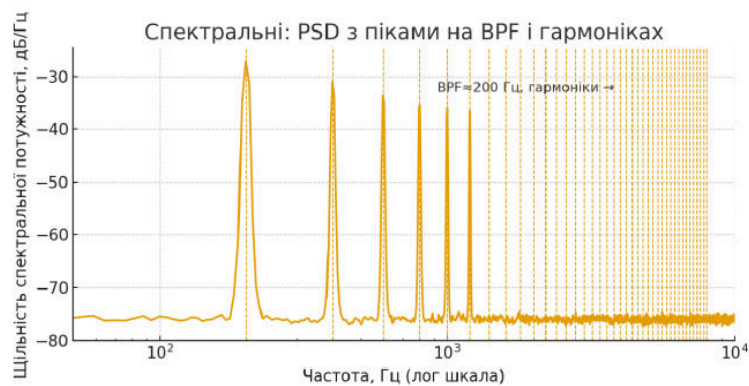


Рис. 3.11. Спектральні критерії - PSD з піками на основі BPF і її гармоніках (лінії)

3. Структурні критерії

Структурні індекси характеризують те, наскільки легко звук БПЛА вирізняється на тлі довкілля і чи схильний привертати увагу. Йдеться не стільки про рівень, скільки про помітність і впізнаваність акустичного образу. У міських умовах саме «структурність» шуму часто визначає комфорт: навіть помірний за рівнем, але виразно тональний і «читабельний» сигнал сприймається настирливіше. Оцінка структурних ознак дає змогу зменшувати «акустичну контрастність» - робити звук менш нав'язливим без радикальної зміни експлуатаційних параметрів [18].

Для комплексної оцінки ефективності БПЛА використовуються інтегральні критерії, що враховують сукупність акустичних параметрів [19].

Індекс акустичної помітності (A_i)

$$A_i = \frac{\sum_{f=f_1}^{f_2} P_f \cdot W_f}{N},$$

де P_f - потужність сигналу на частоті f ;

W_f - ваговий коефіцієнт значущості частоти;

N - кількість частотних інтервалів.

Чим більший A_i , тим легше виявити дрон акустичними засобами.

У контексті ефективності польоту бажано, щоб A_i був мінімальним.

Коефіцієнт шумової потужності (K_n) [16].

$$K_n = \frac{P_{\text{шум}}}{P_{\text{заг}}},$$

де $P_{\text{шум}}$ - потужність шумової складової сигналу, $P_{\text{заг}}$ - повна потужність акустичного поля.

Невелике значення K_n (< 0.2) свідчить про якісну конструкцію двигуна і зменшення паразитних коливань.

Індекс стабільності частоти (S_f)

$$S_f = \frac{\sigma_f}{f_{\text{ср}}},$$

де σ_f - середньоквадратичне відхилення частоти, $f_{\text{ср}}$ - середня частота сигналу [18].

Малі значення S_f вказують на стабільну роботу двигуна і відсутність флуктуацій у системі живлення.

Інтегральний коефіцієнт ідентифікації (K_i)

Для системного аналізу акустичних характеристик вводиться узагальнений показник:

$$K_i = \alpha_1 L_p + \alpha_2 K_n + \alpha_3 S_f + \alpha_4 K_h$$

де $\alpha_1 \dots \alpha_4$ — вагові коефіцієнти, визначені експертним шляхом.

Цей коефіцієнт дозволяє проводити порівняльну оцінку ефективності різних моделей БПЛА.

Наприклад, при $K_i < 0.5$ апарат вважається енергоефективним і малошумним.

Акустичні критерії можуть бути використані для вирішення низки завдань:

Оцінка технічного стану - збільшення спектральної ширини або нестабільність частоти свідчить про дисбаланс чи дефект двигуна.

Порівняння моделей - дозволяє визначити, які конструкційні рішення забезпечують нижчий рівень шуму [16].

Оптимізація параметрів польоту - зниження частоти обертання пропелерів або використання багатолопатевого гвинтів змінює акустичний підпис.

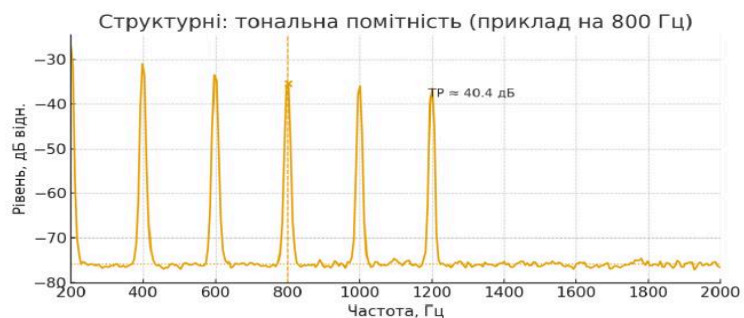


Рис. 3.12. Структурні критерії: приклад оцінки тональної помітності навколо 800 Гц (різниця між піком і «фоном» у смузі 1/3 октави)

4. Подієві критерії

Подієві метрики описують окрему акустичну подію - проліт або маневр - як завершений сюжет із наростанням, кульмінацією та згасанням. Вони важливі тоді, коли має значення не «середній за день» вплив, а конкретний епізод біля вікон чи у дворах. Саме подієвий погляд дозволяє побачити уразливі моменти: різкий старт на зльоті, надто довге перебування над чутливою зоною, повільний прольот уздовж фасаду. На основі таких даних коректують мікротраєкторії, швидкості та висоти в найбільш критичних місцях.

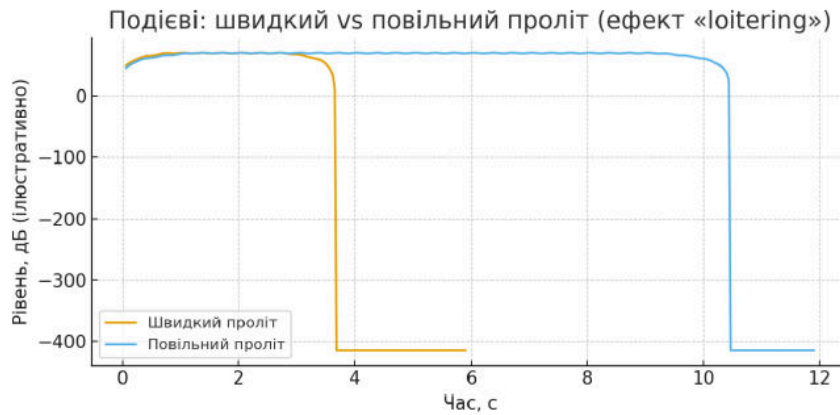


Рис. 3.13. Подієві критерії: порівняння швидкого та повільного прольотів (видно довшу тривалість і потенційний ефект)

5. Довгострокові критерії

Довгострокові показники агрегують акустичний вплив у часових масштабах доби, тижня чи сезону. Вони потрібні для планування сервісів, встановлення «тихих годин», порівняння сценаріїв маршрутизації і аргументації перед громадою та регуляторами. На відміну від подієвих метрик, довгострокові відображають звичний режим роботи - частоту подій, їхню кумуляцію і нічну складову - і дозволяють вибудувати баланс між потребами сервісу та комфортом населення.

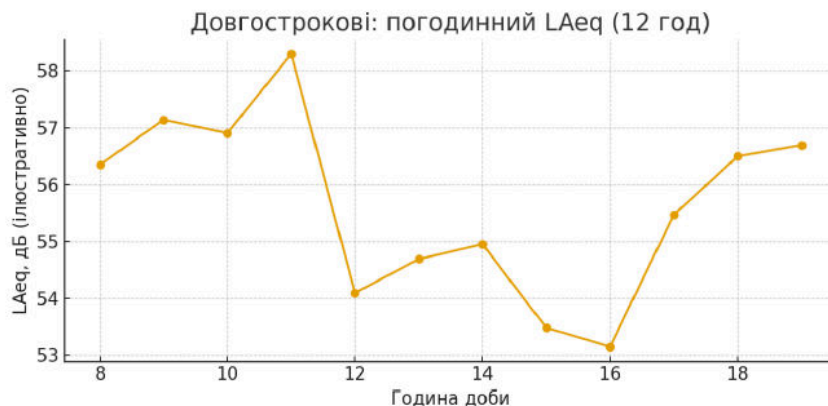


Рис. 3.14. Довгострокові критерії: погодинний LAeq за 12 год (синтетичний приклад)

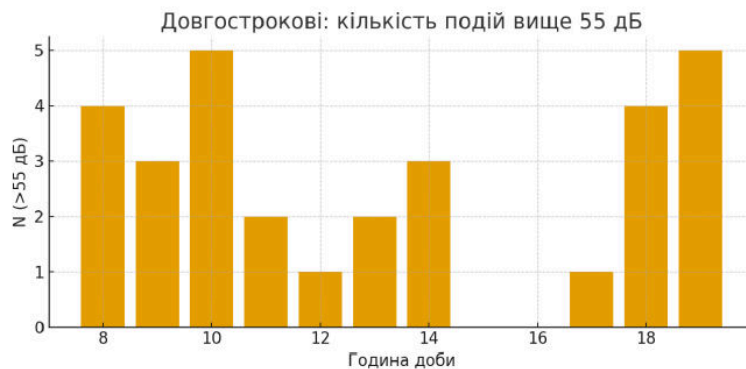


Рис. 3.15. Довгострокові критерії: кількість подій вище 55 дБ за годину N(>55)

6. Психоакустичні критерії

Психоакустика описує не лише «скільки» звуку, а й «який» він: чи звучить «гостро», наскільки виражені тони, чи помітні модуляції. Для БПЛА ці властивості часто визначають сприйняття сильніше, ніж сам по собі рівень у децибелах. За допомогою психоакустичних показників можна цілеспрямовано зменшувати дратівливі риси - налаштовуючи частоти обертання, вибираючи іншу криву тяги, змінюючи конструкцію пропелера або алгоритми керування і тим самим досягати кращої прийнятності без втрати функціональності [17].

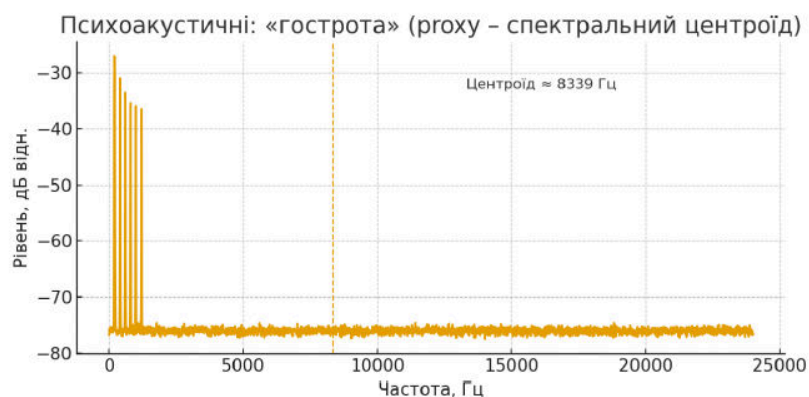


Рис. 3.16 Психоакустичні критерії: проксі «гостроти» як спектральний центроїд (вище центроїд – «гостріший» звук) [17]

7. Просторові та моделювальні критерії

Просторовий аналіз показує, як поширюється звук у реальній геометрії міста: де він підсилюється, де затінюється, як впливають рельєф, забудова та висота польоту. Карти ізофон і просторові моделі дозволяють заздалегідь побачити «чутливі» фасади, двори, парки, а також оцінити ефект невеликих корекцій маршруту чи висоти. Це інструмент стратегічного проектування коридорів польотів, коли завдання - мінімізувати вплив без суттєвих втрат у ефективності операцій.



Рис. 3.17. Просторові критерії: карта Latax в межах міської забудови [32]

8. Біоакустичні критерії

Біоакустичні аспекти фокусуються на взаємодії з живою природою: чи не перекриватиме спектр дрона комунікаційні сигнали птахів, чи не турбуватиме нічних тварин, наскільки безпечними є маршрути щодо колоній та місць гніздування. Такі оцінки допомагають впроваджувати обґрунтовані сезонні обмеження, визначати буферні зони і узгоджувати висоти та часові вікна, аби інтеграція БПЛА у середовище не порушувала екологічні ритми [19].

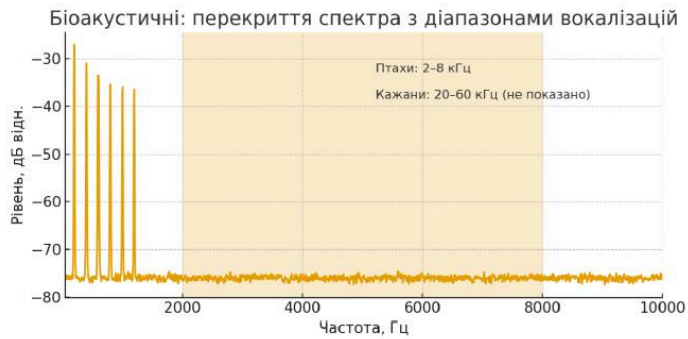


Рис. 3.18. Біоакустичні критерії: перекриття спектра дрона з діапазоном вокалізацій птахів (2-8 кГц) і примітка щодо кажанів (20-60 кГц)

9. Якість вимірювань і невизначеність

Надійність будь-яких висновків спирається на якість вимірювань: відповідний клас обладнання, коректні умови, повторюваність та прозоре оцінювання похибок. Чітко задокументована методика, калібрування, облік метеофакторів і фонового шуму, а також подання довірчих інтервалів дозволяють перетворити дискусію про сприйняття на розмову про факти. Це формує довіру до результатів і робить рекомендації операційно застосовними [16].

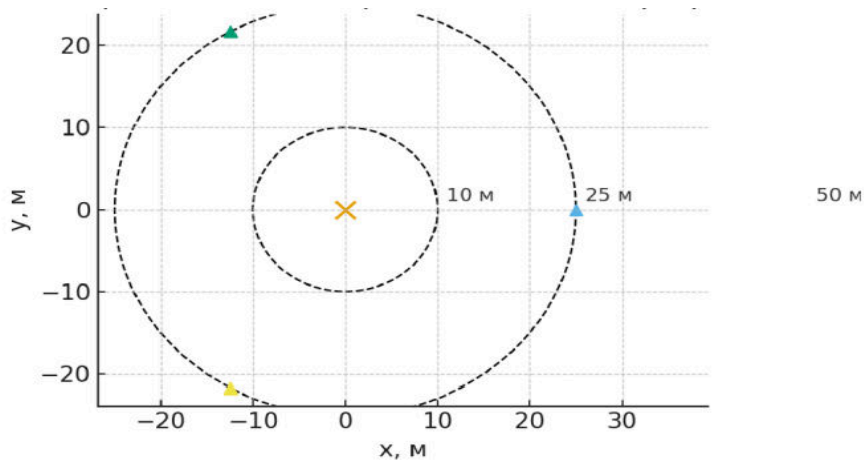


Рис. 3.19. Якість вимірювання: приклад розстановки мікрофонів на 10/25/50 м (план зверху)

3.4. Акустичне виявлення безпілотних літальних апаратів

Акустичне спостереження є одним із перспективних напрямів контролю повітряного простору для виявлення безпілотних літальних апаратів. Метод ґрунтується на реєстрації та аналізі звукових хвиль, що формуються внаслідок роботи пропелерів, силової установки та аеродинамічної взаємодії БПЛА з повітряним середовищем [19].

Порівняно з радіолокаційними й оптичними засобами, акустичні методи забезпечують виявлення малорозмірних БПЛА з низькою радіолокаційною помітністю, можуть працювати в умовах радіомовчання та характеризуються невеликим енергоспоживанням і відносною простотою реалізації. Обмеження методу пов'язані з впливом метеорологічних умов, фоновим шумом і напрямком вітру, що зумовлює залежність ефективності від якості сенсорів та алгоритмів обробки сигналів [19].

Типова система акустичного виявлення включає мікрофонні сенсори або акустичні антени, що працюють у діапазоні приблизно 50–8000 Гц, блок попередньої обробки сигналів і модулі спектрального аналізу. Найбільш інформативними є частоти до 1 кГц, де зосереджені основні гармоніки шуму пропелерів. Ідентифікація БПЛА здійснюється шляхом порівняння спектральних ознак із базами еталонних акустичних сигнатур, а локалізація - за допомогою триангуляції або аналізу різниці часу надходження сигналу до кількох сенсорів [19]. Кожен БПЛА має унікальний акустичний портрет, який визначається кількістю та геометрією пропелерів, швидкістю обертання ротора, типом силової установки та режимом польоту. Акустичний спектр зазвичай складається з основної гармоніки $f_0 = N_\beta \cdot f_r$, її вищих гармонік та широкосмугового турбулентного шуму. Для мультикоптерів характерні спектральні піки в діапазоні 100–500 Гц і додаткові компоненти в зоні 1–3 кГц, що є ключовими для ідентифікації [20].

Для виділення сигналів БПЛА в зашумленому середовищі застосовується багаторівнева система обробки. На першому етапі виконується смугова фільтрація (приблизно 100–5000 Гц), далі - спектральний аналіз із використанням швидкого перетворення Фур'є у часових вікнах 0,5–1 с. На основі спектра обчислюються інформативні ознаки, зокрема середня частота, спектральна дисперсія та коефіцієнт гармонічності. Для аналізу нестационарних режимів застосовуються спектрограми. Класифікація здійснюється з використанням методів машинного навчання - опорних векторів, випадкових лісів і нейронних мереж [18, 19].

Ефективна дальність акустичного виявлення залежить від рівня шуму БПЛА, фонового шуму та умов поширення звуку. У середньому дальність становить 200–300 м для малих електричних дронів, 500–800 м - для середніх і до 1,5–2 км - для великих або апаратів із двигунами внутрішнього згоряння. Оцінка дальності може бути виконана за емпіричною залежністю

$$R_{det} = R_0 \cdot 10^{(LA_{eq} - L_{bg} - \Delta)/20},$$

де R_0 — еталонна відстань, а Δ - втрати на поглинання.

Подальший розвиток акустичних систем виявлення пов'язаний із застосуванням методів глибокого навчання, адаптивних мікрофонних решіток і нейромережевої фільтрації сигналів, що дозволяє підвищити дальність і надійність виявлення. Найбільшу ефективність демонструють мультисенсорні системи, які поєднують акустичні, оптичні та радіолокаційні канали [19].

3.5. Визначення акустичних характеристик безпілотних літальних апаратів експериментальним шляхом

Використання автономних безпілотних літальних апаратів є перспективним напрямом, оскільки в майбутньому вони відіграватимуть дедалі важливішу роль у різних сферах цивільної діяльності. Разом із цим БПЛА формують нове джерело шумового навантаження в міському середовищі. У найближчій перспективі їх масове застосування, особливо на малих висотах поблизу житлових районів, може

стати суттєвим фактором акустичного впливу на населення. Саме тому екологічні аспекти, пов'язані з шумом БПЛА, здатні значною мірою визначати суспільне сприйняття та прийнятність цих технологій [19].

Для підвищення надійності та точності оцінювання шумових характеристик малих БПЛА експериментальні вимірювання проводилися в контрольованих умовах ревербераційної камери Київського національного авіаційного університету. Досліджувані зразки восьми малих безпілотних апаратів наведено на рис. 3.21, а результати вимірювань подано в табл. 3 [19].

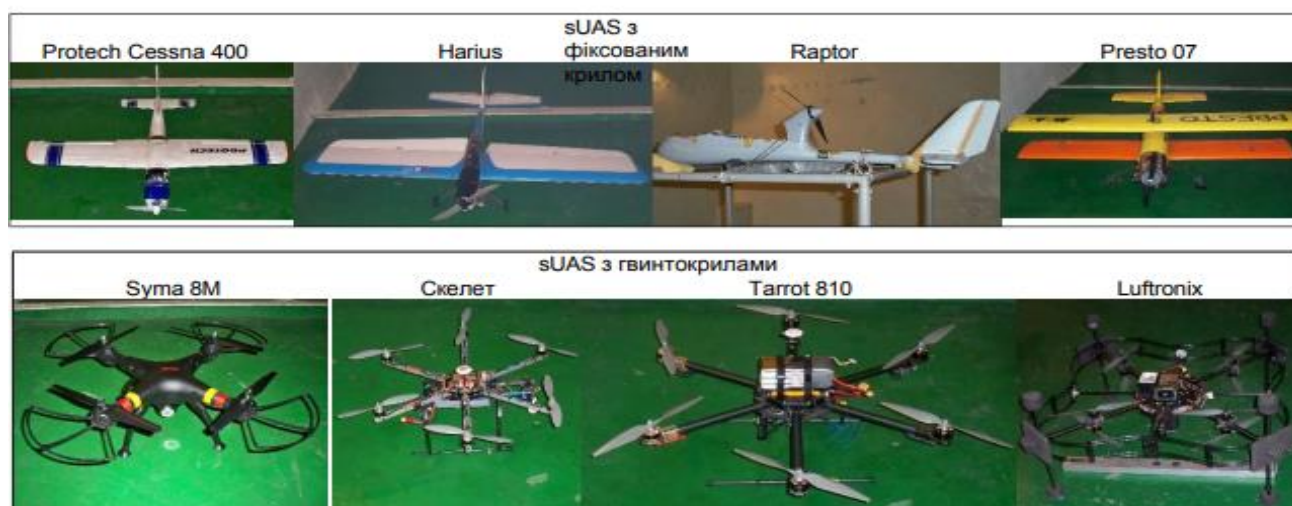


Рис. 3.21. Фотографії малих БПЛА, випробуваних у ревербераційної камери НАУ

Таблиця 3

Характеристики малих БПЛА випробуваних у ревербераційній камері НАУ [19]

Назва БПЛА	Тип	Вага, кг	Потужність
Protech Cessna 400	Фіксоване крило	0,43	Електричний безщітковий двигун
Harius	Фіксоване крило	2	Внутрішній двигун внутрішнього згоряння
Раптор	Гелікоптерний тип	1	Електричний безщітковий двигун

Presto 07	Фіксоване крило	7	Бензиновий двигун
Syma 8M	Квадрокоптер	0,6	Електродвигун
Skalet	Гексакоптер	1,5	Електродвигун
Tarrot 810	Гексакоптер	1,9	Електродвигун без щіток
Luftronix	Октокоптер	12	Електродвигун

Передбачається, що експлуатація гвинтокрилих безпілотних літальних апаратів здійснюється в міській забудові на висотах до 120 м. Дослідження шуму, що створюється малими БПЛА, виконувалися шляхом моделювання типових режимів вертикального зльоту та посадки (табл. 4). Типовий цикл зльоту передбачає короткочасне зависання біля поверхні землі, вертикальний підйом на висоту до 90 м і подальше зависання перед переходом у крейсерський політ. Під час посадки апарат після крейсерського польоту знижується до висоти 30 м, переходить у режим зависання та здійснює приземлення. Тривалість фаз підйому і спуску становить по 2 хвилини кожна.

Таблиця 4

Типові режими зльоту та посадки

Зліт малих БПЛА		
Режим роботи/ діапазон висот	Час, сек.	Режим роботи двигунів
Запуск двигуна/ 0м	10	Холостий хід
Підйом/ 0-10 м	10	Зліт
Навігація/ 10м	10	Паріння
Підйом/ 10-90 м	80	Зліт
Паріння/ 90м	10	Паріння
Посадка малих БПЛА		

Режим роботи/ діапазон висот	Час, сек.	Режим роботи двигунів
Паріння/ 90м	10	Зліт
Посадка типу вертольота/ 90-30м	60	Холостий
Паріння/ 30 м	10	Паріння
М'яка посадка/ 30-0м	35	Холостий
Вимкнення двигуна	5	Холостий

Експериментальне дослідження акустичних характеристик малих БПЛА було проведено в ревербераційній камері НАУ з використанням методу порівняння відповідно до стандарту ISO 3741:2010. Було досліджено рівень шуму, що створюється малими БПЛА в умовах статичної тяги для БПЛА з фіксованим крилом та гвинтокрилих. Рівень шуму під час зльоту і посадки був прийнятий рівним вимірюваному рівню в умовах статичної тяги, оскільки їх вертикальна швидкість польоту, як передбачається, менше 1 м/с. Загальні та спектральні значення для різних режимів роботи малих БПЛА наведено в таблиці 3. Характеристики шуму малих БПЛА залежать від режиму роботи двигунів. Розроблена модель дозволяє дати попередню оцінку шуму малих БПЛА в міській місцевості. Експериментальні вимірювання шуму, що створюється гексакоптером під час зависання та польоту, показали схожі результати (табл. 5), особливо для широкопasmового шуму середньої та високої частоти [19].

Рівні звукової потужності 1/3 октави для малих БПЛА [23]

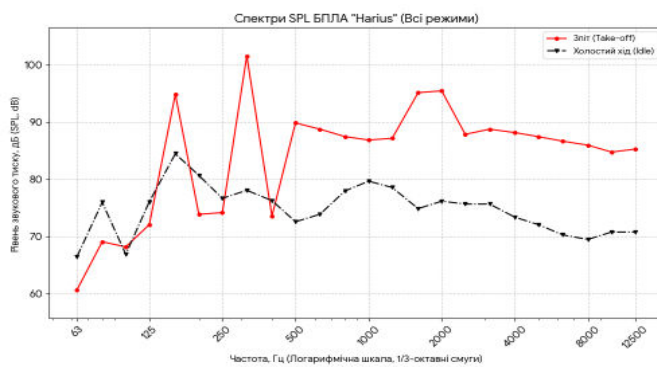
Третьюоктавні смуги	Harius		Protech Cessna 400			Raptor			Presto 07			Сума 8М			Скалет			Tarrot 810			Луфронікс	
	Зліт	Холостий хід	Зліт	Крейсерство	Холостий хід	Зліт	Крейсерство	Холостий хід	Зліт	Крейсерство	Холостий хід	Зліт	Навігація	Холостий хід	Зліт	Навігація	Холостий хід	Зліт	Навігація	Холостий хід	Парина	Холостий хід
63	60,7	66,5	55,1	49,2	38,7	50,3	42,9	45,6	80,1	75	86,8	38,1	32,3	44	62,8	53,3	47,6	72	54,3	40,7	65,7	56,8
80	69,1	76	56,6	63,1	36	52,6	45,9	52,7	78,2	76,3	70,4	48,6	53,4	46,4	58,4	51,5	36,8	70,9	64,3	37,4	70,4	72,4
100	68,2	66,9	52	63,7	35	48,1	74,3	38,9	93,8	105,6	71,6	52,3	57,5	56,7	68	62,9	51,6	77,6	59,3	44,4	70	55,3
125	72,1	76,1	61,1	51,2	42,1	67,1	63,1	66,5	105,1	90,1	88,1	66,1	55,1	62	73	61,3	42,4	75,7	59,8	41,7	75,5	65,9
160	94,9	84,5	63,5	52,8	36,8	81,2	50,3	78,7	87,7	84,1	86,7	65,8	64,6	52,1	65,6	78,2	50,6	86	69	46	97,3	80,1
200	73,9	80,7	59,1	53,6	45,4	54,4	75,7	56,9	95,7	108,1	81,9	56,6	56,6	55,7	88	77,2	56,1	96	64,1	45,9	71,9	75,8
250	74,2	76,7	63,5	65,4	52,3	71,9	62,4	61,5	105	91,3	87	69,2	58,9	62,7	90,5	58,6	52	70,4	67,6	45,3	80	77,3
315	102	78,1	65,7	56	53,4	86,2	63,3	73,9	105,2	106,5	87,3	68,9	67,6	56,3	70	72,3	56	83,7	67	45,6	97,4	80,8
400	73,6	76,3	67,7	67,5	58,6	83,3	81,3	71,5	97,5	100	85,8	68	66,7	66,6	86,2	71,4	61,7	89,5	65,5	47,7	86,1	78,5
500	89,9	72,6	66,2	68,8	59,1	79,8	69,2	62,4	100,6	101,1	85,8	73,9	67,7	65,3	87,6	69,3	62,1	81,6	64,6	48,9	91,6	76
630	88,8	73,9	66,6	61,9	63,2	92,5	76,3	66,3	100,6	95,6	83,5	73,9	70	66,3	83	70,4	65,6	88	64,7	49	90	73,7
800	87,5	78	66,7	73,6	65,9	88,2	79,1	65,2	102,9	100,9	82,1	71,3	70,6	68,5	84	72,1	59,4	88,7	66,5	54,9	90,1	74,5
1000	86,9	79,7	70,3	69,8	69,3	80,8	74,7	64,8	99,3	96,6	78,5	73,2	70,3	67,5	86,7	73	59,8	88,1	66,4	48,4	90,3	74,9
1250	87,2	78,6	74	69,3	65,5	85,4	75,7	61	96,6	95,3	77,5	74,3	72	70,3	88	74	59,7	89,1	66,1	52,2	89,7	74,4
1600	95,2	74,9	80,4	76,8	70,5	84,7	70,8	66,6	94,7	95,3	79,1	72,7	71,4	69	87,7	74,2	59,6	89,5	66,4	51,2	90,1	73,5
2000	95,5	76,2	80,1	77,1	65,3	81,9	71,5	64,6	96,2	95,8	74,9	71,7	71,2	70,1	88,2	74,6	60,6	90,6	67,5	51,4	90,9	73,5
2500	87,9	75,7	72,9	67,4	53,1	79,5	71	61,5	94,9	93,4	74,5	73	74,1	70	87,6	74,2	60,9	89,6	67,9	50,5	90,4	73
3150	88,8	75,7	79,6	71,4	58,3	79,8	70,2	65,6	95,2	93,3	75,4	75,2	73,1	70,5	87,5	76,9	64,3	89,9	70,2	52,4	90,3	73,2
4000	88,2	73,4	81,1	71,3	56,5	80,5	70,7	64,2	94,7	92,8	75,3	82	79,8	75,9	89,8	82	65,4	89,6	73,3	55,1	90,2	74
5000	87,5	72,1	78,9	67,2	54,2	80,6	72,3	63	94,6	92,9	77,1	76,3	75,6	73,7	88,3	79,1	65	90	73,3	46	90,5	75,5
6300	86,7	70,3	67,1	60,2	44,4	81,4	72,9	65	93,1	93	77	75,4	73,6	72,4	86	73	59,7	89,6	73	44,5	89,5	76
8000	86	69,5	69,4	63,4	50,3	81,8	74,2	73,4	92,8	93,1	77	76,8	73,9	72,4	85,1	73,1	57,8	89,1	72,5	46,9	88,9	76,5
10000	84,8	70,8	66,1	63,7	49,5	82,2	73,9	65,2	91,7	91,9	77,1	67,7	67,1	65,4	83,5	71,9	56,2	88,3	71,5	51	88,1	75,1
12500	85,3	70,8	66,8	62,3	43,1	82,9	73,9	63,6	92,9	92,8	79,3	58,6	56,7	54,6	83,6	73	57,7	88,9	70,6	46,8	89,3	74,4
Разом	111	94,7	97,9	92,6	83,2	100,8	90,6	83,5	114,5	113,4	95,2	95,1	93,7	90,6	107,2	96	81,6	109	88,8	71,1	109,5	92,7
Зважена	105	90,6	87,9	83,2	75,6	97,2	87,6	82,6	112,9	113,4	96,6	87,1	85,2	82,6	99,8	88,4	74,2	103	82,6	63,4	104,3	89,3

Отримані в ході експериментальних вимірювань спектральні характеристики шуму малих безпілотних літальних апаратів у третоктавних смугах частот є важливими для аналізу їх акустичних властивостей. На відміну від інтегральних показників, спектральний розподіл звукової енергії дає змогу виявити особливості формування шуму, зумовлені конструкцією БПЛА, типом силової установки, геометрією пропелерів і режимами роботи.

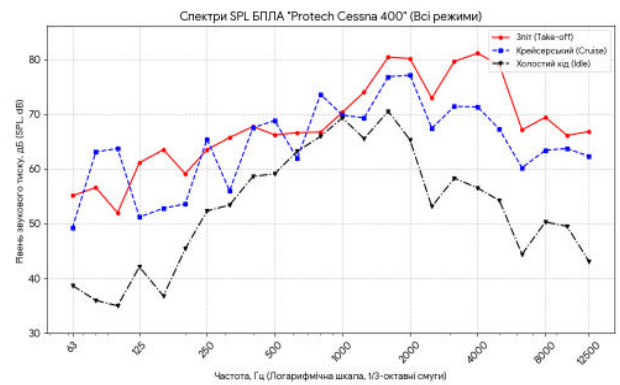
Наявність повторюваних спектральних ознак у різних режимах експлуатації (рис. 3.22) підтверджує доцільність використання третоктавних спектрів не лише для оцінювання акустичного впливу, а й для ідентифікації малих БПЛА за їх акустичними характеристиками.

Подальший аналіз спрямовано на порівняння третоктавних спектрів шуму різних типів малих БПЛА (рис. 3.22) з метою оцінки їх інформативності як акустичних критеріїв класифікації.

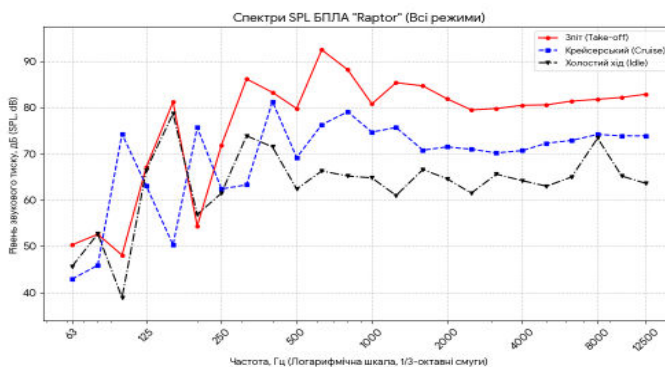
Для БПЛА **Narius** спектр шуму (рис. 3.22, а) має нерівномірний характер із локальними максимумами в низько- та середньочастотному діапазоні. У режимі зльоту спостерігається істотне зростання рівнів звукового тиску в окремих третоктавних смугах, що свідчить про домінування тональних складових, пов'язаних із роботою пропелерів. Порівняно з режимом холостого ходу, спектр зльоту характеризується не лише підвищенням рівнів, але й зміною спектральної форми, що формує індивідуальний акустичний профіль апарата.



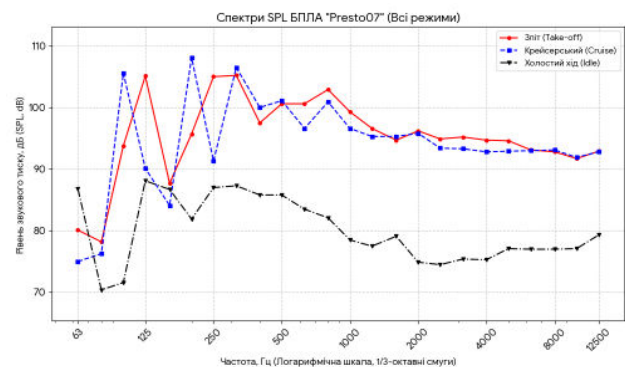
а)



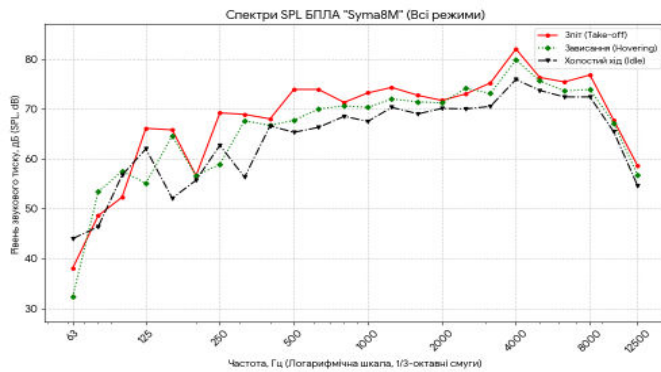
б)



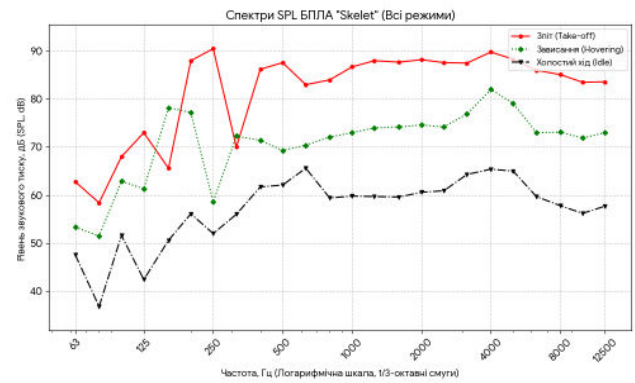
в)



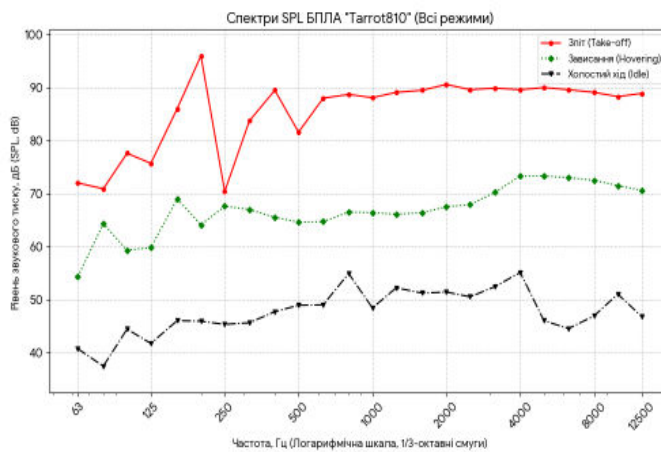
г)



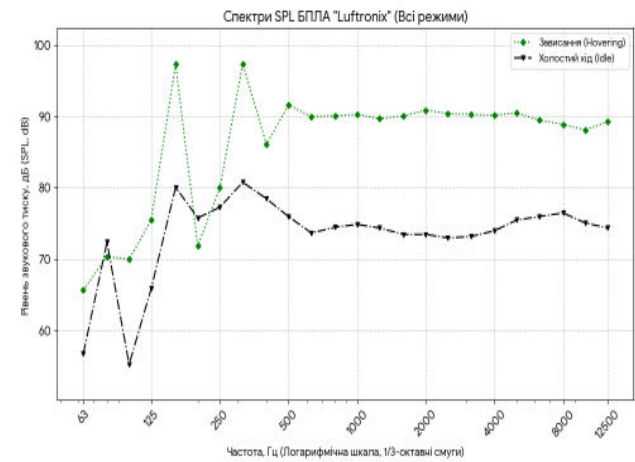
д)



е)



є)



ж)

Рис. 3.22. Спектральні характеристики досліджуваних типів БПЛА: а) Narius; б) Protech Cessna 400; в) Raptor; г) Presto 07; д) Syma 8M; е) Skelet; є) Tarrot 810; ж) Luftronix.

Спектри шуму **Protech Cessna 400** (рис. 3.22, б) мають згладжений характер у широкому частотному діапазоні, особливо в режимах зльоту та крейсерського польоту. Домінування середньочастотної області зумовлене поєднанням пропелерного й аеродинамічного шуму, характерного для БПЛА з фіксованим крилом. У режимі холостого ходу рівні шуму суттєво знижуються, що свідчить про зміну домінуючих джерел акустичного випромінювання.

Для **Raptor** (рис. 3.22, в) характерна наявність виражених максимумів у середньочастотному діапазоні, насамперед у режимі зльоту. У крейсерському режимі спектр вирівнюється, однак зберігає стійкі пікові зони, які можуть використовуватися як акустичні ознаки ідентифікації.

Спектри **Presto 07** (рис. 3.22, г) демонструють найвищі рівні звукового тиску серед досліджуваних апаратів, особливо у режимах зльоту та крейсерського польоту. Домінування середніх частот і широкосмуговий характер спектра вказують на значний аеродинамічний внесок і формують чітко виражений акустичний «портрет».

Для **Syma 8M** (рис. 3.22, д) характерне плавне зростання рівнів від низьких до середніх частот із подальшим спадом у високочастотній області. Близька форма спектрів у режимах зльоту та зависання свідчить про стабільні режими навантаження силової установки, що є типовим для малих мультикоптерів.

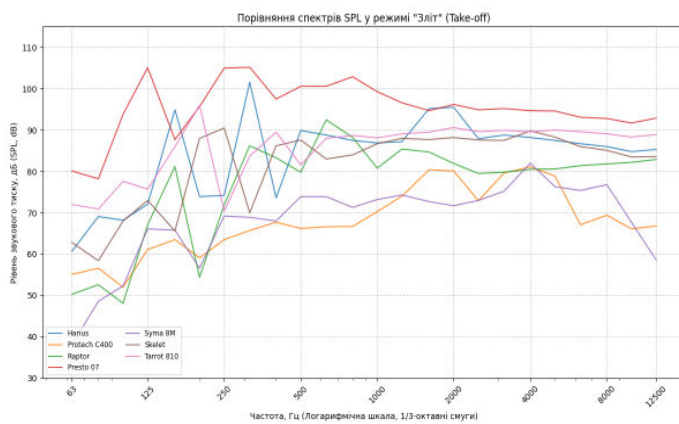
Спектральні характеристики **Skelet** (рис. 3.22, е) мають стійку форму в усіх режимах експлуатації з помірно вираженими максимумами в середньочастотному діапазоні. У режимі зльоту відбувається рівномірне підвищення рівнів шуму без істотної зміни спектральної структури, що вказує на відсутність домінуючих тональних складових.

Для **Tarrot 810** (рис. 3.22, є) у режимі зльоту зафіксовано значне зростання рівнів шуму з домінуванням середніх і високих частот. У режимі зависання загальна форма спектра зберігається, що підтверджує визначальний вплив конструкції пропелерної системи. Холостий хід характеризується мінімальними рівнями за збереження індивідуальних спектральних ознак.

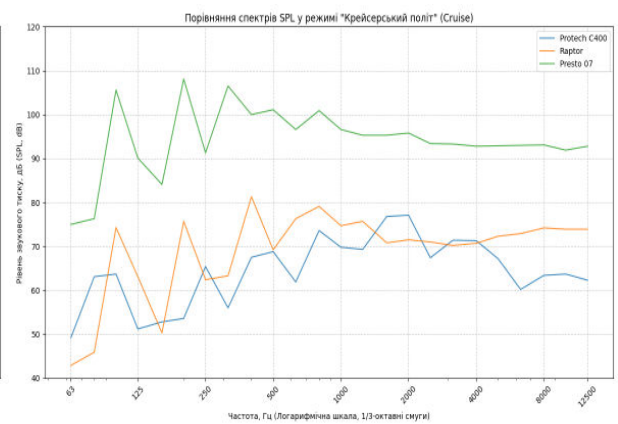
Спектри **Luftronix** (рис. 3.22, ж) відзначаються рівномірним розподілом рівнів у широкому частотному діапазоні з помірними піками. У режимі зависання спостерігається суттєве зростання рівнів шуму порівняно з холостим ходом, зумовлене підвищенням навантаження на силову установку.

На рис. 3.23 наведено спектральні характеристики шуму БПЛА, згруповані за режимами експлуатації. Аналіз показує наявність як спільних акустичних закономірностей, так і індивідуальних «спектральних підписів», що є важливим для задач акустичної ідентифікації.

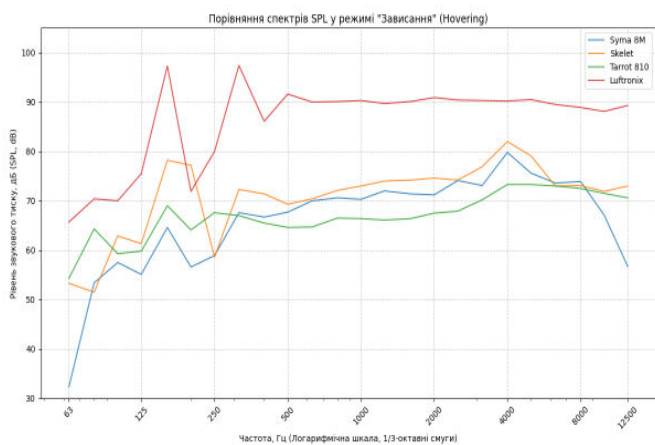
У режимі **зльоту** спостерігається максимальне зростання рівнів шуму в середньо- та високочастотному діапазоні, при цьому найвищі значення зафіксовано для Presto07, а найнижчі для Protech Cessna 400. У **крейсерському режимі** відзначається зниження шуму та вирівнювання спектрів із концентрацією енергії в діапазоні 1000–4000 Гц. У режимі **зависання** найбільші рівні характерні для Luftronix, тоді як Syma 8M і Skelet демонструють помірні та згладжені спектри. У режимі **холостого ходу** рівні шуму мінімальні для всіх БПЛА, однак спектральні відмінності між моделями зберігаються.



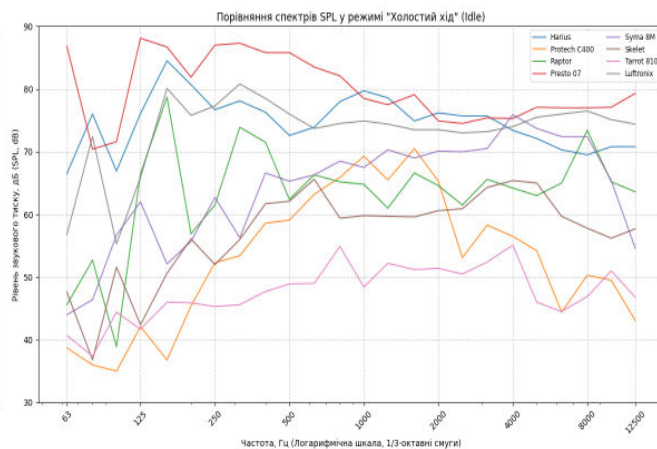
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.23: Порівняння спектральних характеристик за режимами експлуатації БПЛА: а – зліт, б – крейсерський політ, в - зависання, г – холостий хід.

Загалом, результати, наведені на рис. 3.22–3.23, підтверджують, що вимірні третинооктавні спектри є унікальними для кожного типу БПЛА та режиму його роботи. Це дозволяє розглядати їх як основу для побудови систем акустичної ідентифікації безпілотних транспортних засобів, а також для подальшого розвитку критеріїв оцінки їхнього шумового впливу в міському середовищі.

У таблиці 5 узагальнено інформацію щодо ключових спектральних ознак кожного типу БПЛА, які можуть використовуватися на практиці із застосуванням методу аналогій до типу БПЛА (результати розрахунків наведено для попереднього покоління БПЛА, але тип силової установки, компоновка інші льотно-технічні характеристики можуть бути масштабовані за застосовані до БПЛА останнього покоління.

Ідентифікаційні акустичні критерії досліджуваних типів БПЛА (за третинооктавними спектрами)

Тип БПЛА	Домінуючі частотні коридори	Ключові спектральні ознаки (акустичний «відбиток»)	Режими, де прояв найстійкіший
Harius	160–315 Гц	Виражені низькочастотні піки, пов'язані з тональним шумом пропелера великого діаметра; відносно рівний середньочастотний спектр	Зліт, холостий хід
Protech Cessna 400	1000–4000 Гц (локально)	Низький загальний рівень шуму; характерний локальний максимум близько 4000 Гц (ймовірний конструктивний резонанс)	Крейсерський політ
Raptor	160–315 Гц; 500–800 Гц	Комбінація низько- та середньочастотних піків; відносно рівний високочастотний фон	Зліт, крейсерський політ
Presto 07	500–8000 (до 10 000) Гц	Стійке домінування високих рівнів шуму у широкому спектрі (>90 дБ); відсутність різкого спектрального спаду	Усі режими
Syma 8M	1000–4000 Гц	Згладжений спектр без різких піків; низька низькочастотна складова	Зависання
Skelet	315–1000 Гц	Підвищені рівні в середніх частотах; більша спектральна нерівномірність порівняно з Syma 8M	Зависання, зліт
Tarrot 810	4000–8000 Гц	Зміщення енергії у високочастотну область; слабка низькочастотна складова	Зліт, зависання

Luftronix	315–500 Гц	Стійкі високі рівні у низько- та середньочастотному діапазоні навіть на холостому ході	Зависання, холостий хід
------------------	------------	--	-------------------------

Таким чином, результати спектрального аналізу дозволяють виділити графічні акустичні відбитки досліджуваних БПЛА у вигляді характерних третинооктавних спектрів та домінуючих частотних коридорів. Незважаючи на зміну режимів експлуатації, форма спектра для кожного типу апарата залишається відносно сталою, що створює передумови для його ідентифікації за акустичними ознаками.

Ще один підхід до обробки рівнів звуку в тертьоктавних смугах представлено в роботі [19], де пропонується перейти відразу до визначення залежностей між рівнями звуку та рівнем дискомфорту від прольоту БПЛА. На рис. 3.24. пунктирними лініями позначений рівень дискомфорту, отриманий за результатами дослідження психоакустичного тестування шуму малих БПЛА. У процесі тестування випробуваних просили оцінити рівень дискомфорту від шуму за шкалою «Зовсім не дискомфортно», «Трохи дискомфортно», «Помірно дискомфортно», «Дуже дискомфортно». На основі результатів психоакустичних тестів було використано шкалу оцінки шуму малих БПЛА [19].

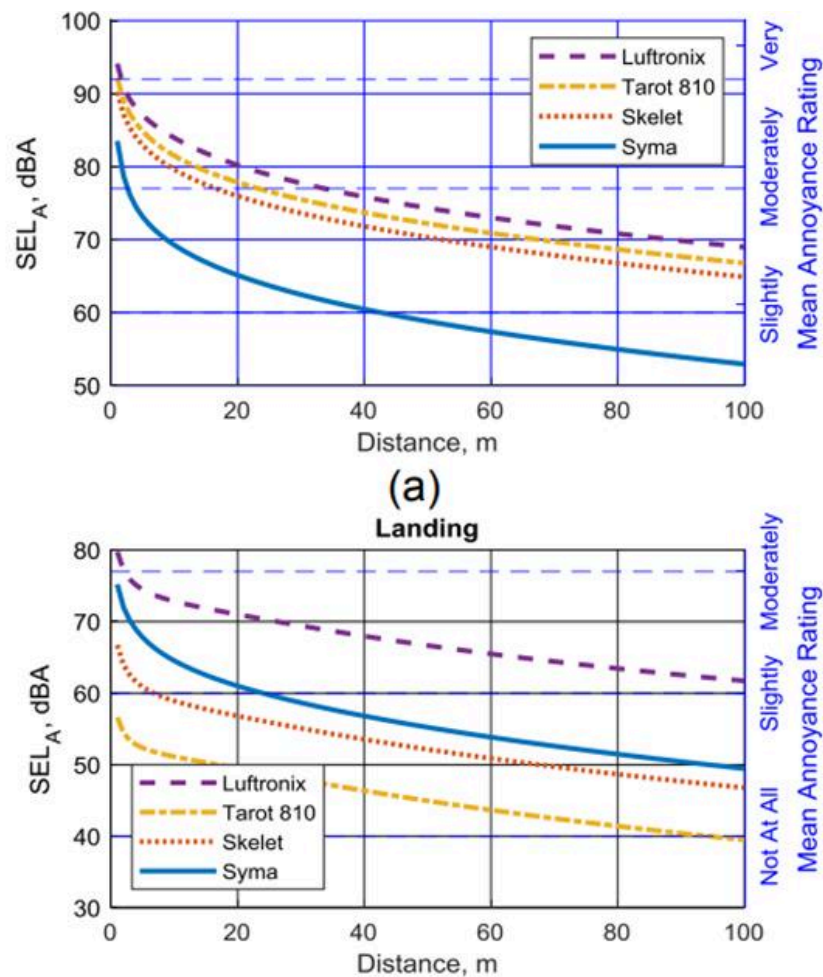


Рис. 3.24. Розрахований рівень SEL шумового впливу для типових режимів зльоту (а) і посадки (б) [16]

Як випливає з результатів розрахунку двох показників шуму, малі БПЛА у режимі зльоту з масою понад 12 кг буде створювати більше шумового дискомфорту для населення за показником шуму звукового впливу порівняно з оцінкою за показником шумового впливу [19].

Важливою також є побудова залежності типу NPD (Noise-Power-Distance, або Шум-Режим-Вістань) для окремих типів БПЛА, оскільки ці залежності потім можуть бути застосовані для розробки акустичних моделей БПЛА, що дозволить у поєднанні з траєкторіями руху, метеорологічними чинниками та іншими умовами експлуатації проводити прогнозування акустичних подій як для одиничних

прольотів БПЛА, так і досліджуючи різні сценарії експлуатації, а отже, оцінюючи інтегральні показники, які зазвичай і є нормативними.

3.6. Результати моделювання шуму для різних типів БПЛА

На основі експериментальних досліджень акустичних характеристик малих безпілотних літальних апаратів та отриманих третинооктавних спектрів шуму (підрозділи 3.3–3.5) у роботі виконано моделювання шумового впливу БПЛА на прилеглу територію з використанням сучасних систем прогнозування авіаційного шуму. Метою моделювання є оцінка просторового розподілу основних шумових показників для різних режимів експлуатації БПЛА, а також аналіз можливого акустичного навантаження на території, прилеглі до майданчиків їх злітно-посадкових операцій.

Для моделювання шуму були використані підходи, реалізовані в програмних комплексах **INM (Integrated Noise Model)** та **AEDT (Aviation Environmental Design Tool)**, які широко застосовуються у світовій практиці для оцінки авіаційного шуму в околицях аеропортів і вертипортів. Дані системи базуються на концепції **Noise–Power–Distance (NPD)** залежностей, що пов'язують рівні шуму з режимом роботи двигуна, траєкторією польоту та відстанню до точки спостереження.

Оскільки стандартні бази даних INM/AEDT не містять сертифікованих шумових характеристик для більшості малих БПЛА, у даній роботі було застосовано підхід **коригування NPD-залежностей** на основі результатів власних експериментальних вимірювань. Отримані рівні звукової потужності та спектральні характеристики використовувалися для формування адаптованих шумових профілів, що відповідають реальним акустичним властивостям досліджуваних апаратів. Такий підхід дозволяє зберегти методологічну основу класичних моделей авіаційного шуму та одночасно врахувати специфіку БПЛА як нової категорії повітряних суден.

Як приклад застосування запропонованого підходу у роботі виконано моделювання шумового впливу **БПЛА гелікоптерного типу**, масштабованого до підняття вантажу вагою до 50 кг - під час заходження на посадку, зльоту та початкового набору висоти. Розрахунки проведено для умов функціонування локального майданчика обслуговування БПЛА (вертипорту), який розглядається як джерело регулярних злітно-посадкових операцій.

Результати моделювання представлені у вигляді розподілу значень **LAMAX** у вузлах розрахункової сітки, а також у вигляді **ізоліній основних шумових показників** - LAMAX, SEL, EPNL та LAeq (рис. 3.25 - 3.33). Така форма подання дозволяє наочно оцінити як максимальний миттєвий шумовий вплив окремих подій, так і сумарне акустичне навантаження за певний період експлуатації.

Окрему увагу приділено **сценарному аналізу** (рис. 3.34-3.37), який включає різну інтенсивність злітно-посадкових операцій БПЛА. Розглянуто базовий сценарій з одиничними операціями, а також сценарії з підвищеною інтенсивністю руху, що імітують реальні умови експлуатації майданчиків обслуговування БПЛА у міській забудові. Це дозволяє оцінити вплив зростання кількості операцій на рівні еквівалентного шуму та розміри зон акустичного впливу.

Подальший аналіз результатів моделювання виконано окремо для режимів заходження на посадку (рис. 3.25 - 3.29) та зльоту (рис. 3.29 - 3.33), а також для різних експлуатаційних сценаріїв, що детально розглядається на відповідних рисунках.

Результати розрахунку максимальних рівнів звукового тиску LAMAX у вузлах розрахункової сітки при заходженні на посадку БПЛА гелікоптерного типу наведено на рис. 3.25. Просторовий розподіл значень LAMAX чітко відображає траєкторію зниження апарата та зону найбільш інтенсивного акустичного впливу, зосереджену вздовж осі заходу на посадку. Максимальні значення шуму спостерігаються в безпосередній близькості до майданчика обслуговування БПЛА (позначеного як *H*), що є характерним для режиму посадки, коли апарат працює з

підвищеною тягою для стабілізації вертикальної швидкості та керування положенням у просторі.

Варто відзначити, що зона підвищених значень LAMAX має видовжену форму, орієнтовану вздовж напрямку польоту, що свідчить про домінування акустичного впливу саме під траєкторією заходу на посадку. За межами цієї зони рівні максимального шуму зменшуються досить швидко, що вказує на локальний характер впливу одиничної події посадки для БПЛА гелікоптерного типу.

Для більш наочного аналізу просторового розподілу максимальних рівнів шуму на рис. 3.26 наведено ізолінії LAMAX з кроком 1 дБ, побудовані на основі даних, представлених на рис. 3.25. Ізолінії мають концентричну, витягнуту форму з максимальними значеннями в районі майданчика *H*, що підтверджує локалізацію найбільшого акустичного навантаження поблизу точки завершення заходу на посадку.

Аналіз ізоліній показує, що зони з підвищеними значеннями LAMAX простягаються на обмежену відстань уздовж траєкторії польоту, при цьому поперечний розмір зон шумового впливу є значно меншим. Такий характер розподілу є типовим для гелікоптерних апаратів і відрізняється від класичних літакоподібних схем, де максимальні рівні шуму часто зміщуються вздовж глісади на більші відстані.

Отримані результати свідчать, що при заходженні на посадку БПЛА гелікоптерного типу основний акустичний вплив формується короткочасними піковими значеннями шуму, локалізованими в зоні майданчика обслуговування та безпосередньо під траєкторією зниження. Це має важливе значення при плануванні розміщення майданчиків для обслуговування БПЛА, особливо в умовах близької житлової забудови або інших шумочутливих об'єктів.

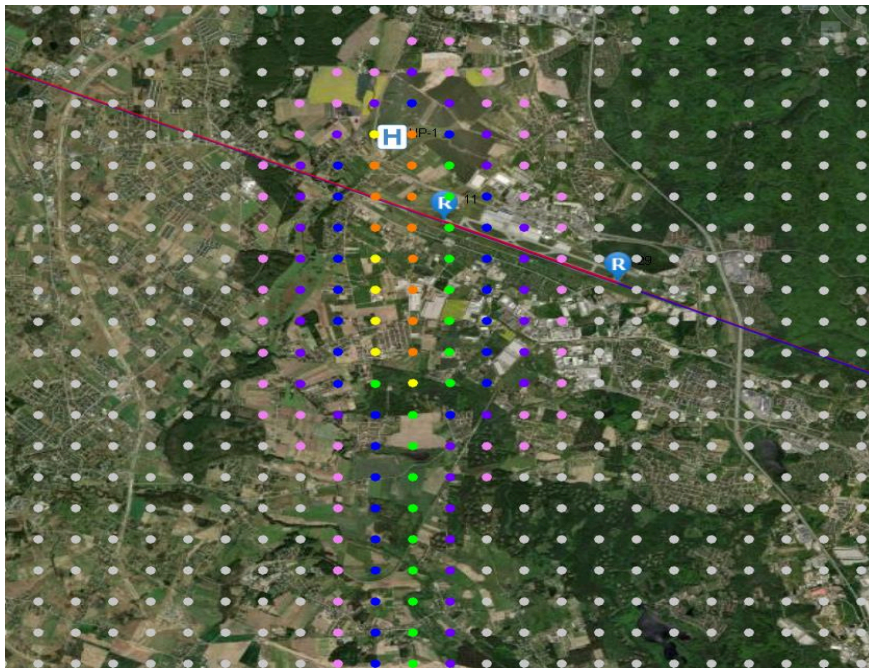


Рис. 3.25. Результати розрахунку LAMAX в вузлах розрахункової сітки при заходженні на посадку БПЛА гелікоптерного типу: Н - майданчик для обслуговування БПЛА

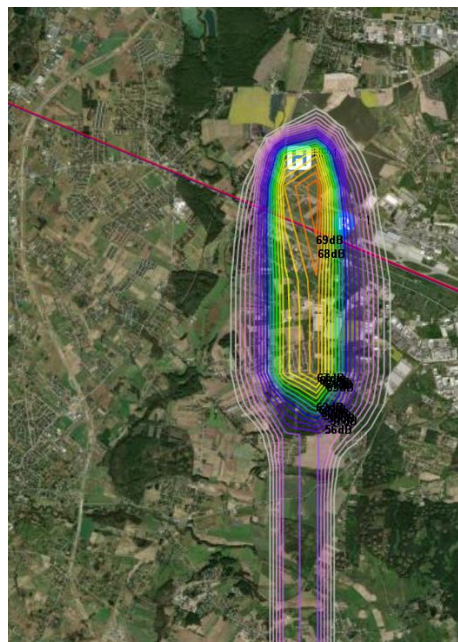


Рис.3.26. Ізолінії LAMAX з кроком 1 дБ при заходженні на посадку БПЛА гелікоптерного типу: Н - майданчик для обслуговування БПЛА (за результатами представленими на рис 3.25)

Ізолінії SEL (Sound Exposure Level) з кроком 1 дБ для режиму заходження на посадку БПЛА гелікоптерного типу наведено на рис. 3.27. На відміну від показника LAMAX, який характеризує максимальні миттєві значення шуму, рівень SEL враховує інтегральний енергетичний вплив одиначної події посадки та є більш репрезентативним для оцінки акустичного навантаження на навколишню територію.

Аналіз розподілу ізоліній SEL показує, що зона підвищених значень шуму має більш просторово розширений характер порівняно з полем LAMAX (рис. 3.26). Це зумовлено тривалістю акустичного впливу під час зниження та стабілізації апарата перед посадкою, коли БПЛА протягом певного часу перебуває на малих висотах і з підвищеною тягою двигунів. У результаті акустична енергія накопичується вздовж усієї траєкторії заходу на посадку.

На рис. 3.27 окремо виділено область з рівнем SEL понад 70 дБА (позначена червоним кольором), яка може розглядатися як зона підвищеного акустичного впливу. Дана зона зосереджена поблизу майданчика обслуговування БПЛА (*H*) та простягається вздовж осі заходу на посадку, що підтверджує визначальну роль фінального етапу зниження у формуванні сумарного шумового впливу.

Водночас характер ізоліній свідчить про достатньо швидке зменшення рівнів SEL у поперечному напрямку відносно траєкторії польоту. Це означає, що енергетичний шумовий вплив при одиначній посадці має переважно локальний характер і найбільш суттєво проявляється в межах вузької смуги, орієнтованої вздовж напрямку руху БПЛА.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що при оцінці шумового впливу посадкових операцій БПЛА гелікоптерного типу показник SEL є більш інформативним порівняно з LAMAX з точки зору накопиченої акустичної енергії, особливо при аналізі повторюваних операцій або сценаріїв з підвищеною інтенсивністю руху, що буде розглянуто в подальших підрозділах.

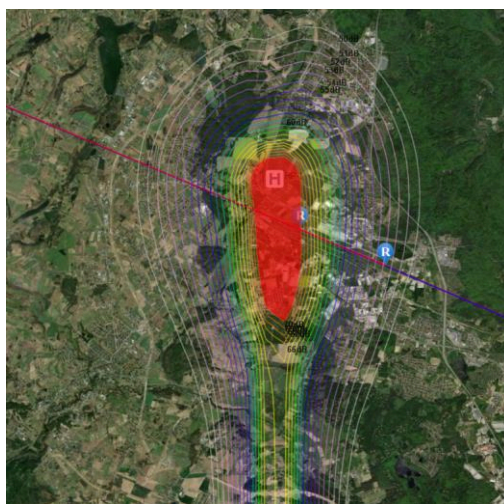


Рис. 3.27. Ізолінії SEL з кроком 1 дБ при заходженні на посадку БПЛА гелікоптерного типу: Н - майданчик для обслуговування БПЛА

Ізолінії EPNL (Effective Perceived Noise Level) з кроком 1 EPNдБ для режиму заходження на посадку БПЛА гелікоптерного типу наведено на рис. 3.28. Показник EPNL є сертифікаційно-орієнтованим шумовим критерієм, який, на відміну від LAMAX та SEL, враховує не лише енергетичну складову шуму, але й спектральний склад та тональні компоненти, що визначають сприйняття шуму людиною.

Аналіз ізоліній EPNL показує, що просторовий розподіл зон підвищеного шуму загалом повторює форму ізоліній SEL (рис. 3.27), однак має більш компактний та локалізований характер. Це пов'язано з тим, що при розрахунку EPNL додатково враховуються корекції на тривалість події та тональність, унаслідок чого зменшується вплив ділянок траєкторії з відносно короткочасним або спектрально менш значущим шумом.

На рис. 3.28 виділено область з рівнем EPNL понад 70 EPNдБ (позначена червоним кольором), яка зосереджена безпосередньо в районі майданчика обслуговування БПЛА (Н) та в зоні фінального етапу заходу на посадку. Це підтверджує, що саме завершальна фаза зниження, коли БПЛА працює з підвищеною тягою та має виражені тональні складові шуму, є визначальною з точки зору сертифікаційного шумового впливу.

Характер ізоліній EPNL свідчить про швидке зменшення значень показника за межами осі заходу на посадку, що вказує на локальний вплив посадкової операції з точки зору критеріїв, орієнтованих на сприйняття шуму. У порівнянні з SEL, зона перевищення порогових значень EPNL є менш протяжною, але більш чітко сконцентрованою, що є типовим для показників, розроблених для сертифікації повітряних суден.

Отримані результати демонструють, що використання показника EPNL у моделюванні шуму БПЛА є доцільним для порівняльної оцінки різних типів апаратів та режимів експлуатації з позицій сертифікаційних підходів ICAO. Водночас для задач оцінки сумарного шумового навантаження при багаторазових операціях EPNL доцільно розглядати у поєднанні з енергетичними показниками, такими як SEL та LAeq.

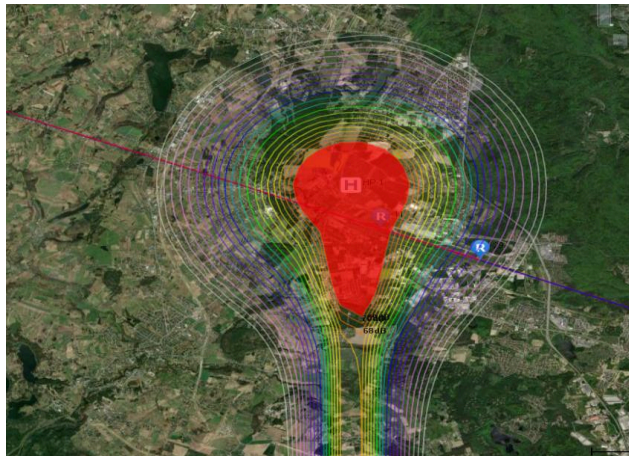


Рис. 3.28. Ізолінії EPNL з кроком 1 EPNдБ при заходженні на посадку БПЛА гелікоптерного типу: Н - майданчик для обслуговування БПЛА

Показник LAeq характеризує накопичений у часі шумовий вплив під час заходу на посадку, тому формує згладжені та протяжні зони шуму вздовж траєкторії польоту (рис. 3.29). Для однієї посадкової операції розрахункові значення LAeq не перевищують 30–35 дБА, що не створює суттєвого акустичного навантаження на навколишню територію. Це підтверджує, що значний шумовий вплив від БПЛА гелікоптерного типу проявляється переважно за умов багаторазових або регулярних

злітно-посадкових операцій, що потребує сценарного аналізу з урахуванням кумулятивного ефекту.



Рис. 3.29. Ізолінії LA_{eq} з кроком 1 дБ при заходженні на посадку БПЛА гелікоптерного типу: Н - майданчик для обслуговування БПЛА

Зліт та початковий набір висоти. Як видно з рис. 3.30, максимальні значення LA_{max} зосереджені безпосередньо в зоні майданчика та вздовж початкової ділянки траєкторії набору висоти, що є характерним для гелікоптерних схем польоту з вертикальною або квазівертикальною складовою руху. Зони підвищених пікових рівнів шуму мають витягнуту форму вздовж осі зльоту, що свідчить про домінування шуму несучого гвинта та силової установки в режимі максимальної тяги.

Порівняно з етапом заходження на посадку, ізолінії LA_{max} при зльоті мають більш компактний характер поширення, оскільки після відриву БПЛА швидко набирає висоту, зменшуючи тривалість перебування поблизу земної поверхні. Це обмежує просторове розширення зон пікового шумового впливу, особливо в бокових напрямках від траєкторії зльоту.

Згідно з результатами моделювання (рис. 3.31), зони підвищених значень SEL формуються вздовж осі зльоту та локалізуються поблизу майданчика обслуговування, де силова установка працює у режимі максимальної потужності.

Область із рівнями SEL > 70 дБА має обмежену площу та чітко концентрується в безпосередній близькості до злітної точки.

На відміну від посадки, зони підвищених значень SEL при зльоті є більш витягнутими вздовж траєкторії польоту, що зумовлено безперервним набором висоти та збереженням високого режиму тяги. Водночас зі збільшенням висоти польоту рівні SEL поступово зменшуються, що обмежує акустичний вплив на віддалені ділянки території.

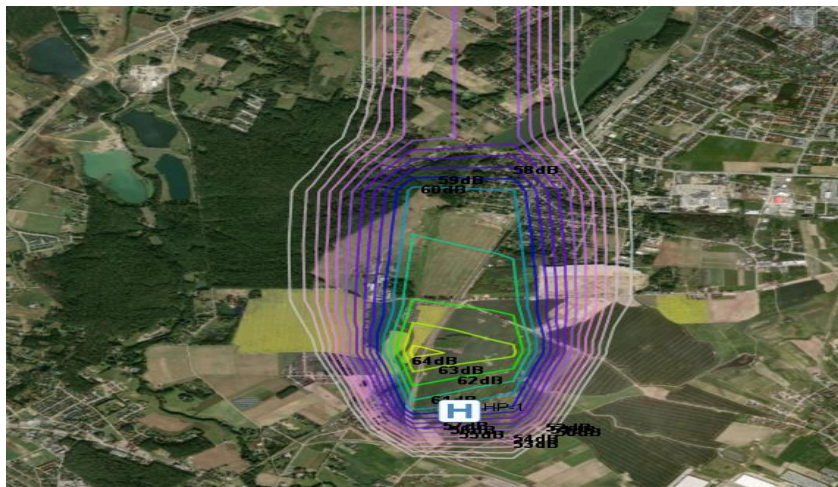


Рис. 3.30.Ізолінії LAMAX з кроком 1 дБ при зльоті БПЛА гелікоптерного типу: Н - майданчик для обслуговування БПЛА

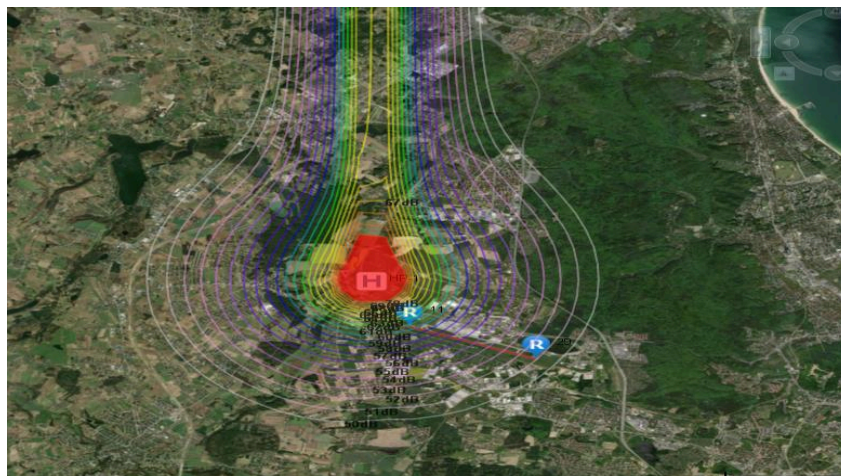


Рис.3.31. Ізолінії SEL з кроком 1 дБ при зльоті БПЛА гелікоптерного типу: Н - майданчик для обслуговування БПЛА (червоний SEL>70дБА)

Як видно з результатів моделювання (рис. 3.32), зони з підвищеними значеннями EPNL (>70 EPNдБА, позначені червоним кольором) формуються переважно в районі майданчика обслуговування БПЛА та на початковій ділянці траєкторії зльоту. Це зумовлено поєднанням високої потужності силової установки та наявності виражених тональних складових, характерних для гелікоптерного типу БПЛА.

У порівнянні з показником SEL, контури EPNL мають більш компактний характер, що пояснюється орієнтацією даного показника на оцінку сприйнятої гучності окремої події, а не її енергетичної протяжності в часі. Водночас, просторове розташування зон максимального впливу EPNL добре корелює з зонами підвищених значень LAMAX, підтверджуючи визначальну роль пікових шумових рівнів у формуванні сертифікаційних показників.

Отримані результати свідчать, що на етапі зльоту гелікоптерного БПЛА потенційно критичним з точки зору нормативного контролю є саме показник EPNL, який доцільно використовувати як базовий критерій при подальшій адаптації сертифікаційних підходів для безпілотних авіаційних систем.

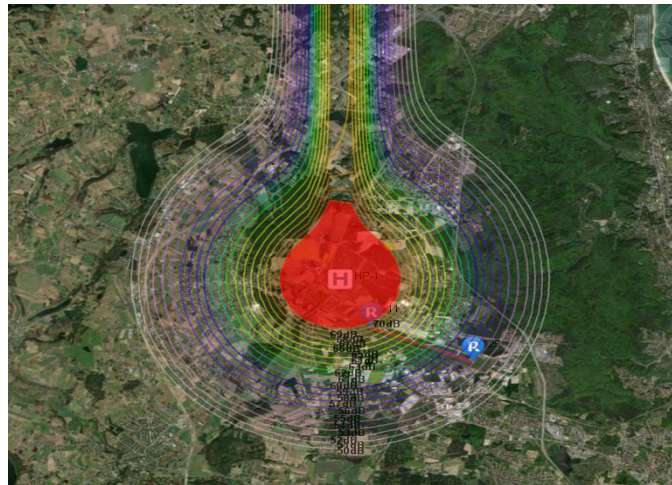


Рис.3.32. Ізолінії EPNL з кроком 1 дБ при зльоті БПЛА гелікоптерного типу: Н - майданчик для обслуговування БПЛА (червоний EPNL >70 дБА)

Завершальним показником для аналізу етапу зльоту та початкового набору висоти є еквівалентний рівень шуму L_{Aeq} , ізолінії якого наведено на рис. 3.33. На відміну від показників L_{Amax} та $EPNL$, L_{Aeq} характеризує усереднений у часі акустичний вплив окремої шумової події, що є принципово важливим для коректної оцінки одиничної злітної операції.

Як видно з рис. 3.33, розраховані значення L_{Aeq} є відносно низькими та не перевищують приблизно 30–35 дБА в межах досліджуваної області. Такий результат є очікуваним, оскільки моделювання виконувалося для одного зльоту без урахування кумулятивного ефекту багаторазових подій.

Порівняно з етапом заходження на посадку, зони підвищених значень L_{Aeq} під час зльоту мають меншу просторову протяжність, що зумовлено більшими середніми висотами польоту на етапі набору висоти. Це особливо помітно поблизу майданчика обслуговування, де ізолінії L_{Aeq} швидко розріджуються з віддаленням від джерела шуму.



Рис. 3.33. Ізолінії L_{Aeq} з кроком 1 дБ при зльоті БПЛА гелікоптерного типу: Н - майданчик для обслуговування БПЛА

Оцінка шумового впливу від експлуатації БПЛА не може обмежуватися аналізом окремих злітно-посадкових операцій, оскільки в реальних умовах

майданчики обслуговування функціонують у режимі багаторазових повторюваних циклів. Саме кумулятивний характер шуму визначає рівень акустичного навантаження на прилеглу територію та є ключовим чинником відповідності санітарним і містобудівним вимогам [ДСП 173].

У зв'язку з цим у роботі виконано сценарний аналіз шумового впливу для типового майданчика зльоту та посадки БПЛА. Розглянуто два експлуатаційні сценарії:

Сценарій I – 10 зльотів і 10 посадок, що відповідає помірному режиму використання;

Сценарій II – 100 зльотів і 100 посадок, який моделює інтенсивну експлуатацію.

Для оцінки кумулятивного впливу застосовано еквівалентний рівень шуму L_{Aeq} , що дозволяє врахувати накопичення акустичної енергії в часі та просторове поширення зон підвищеного шуму.

У межах сценарію I проаналізовано шумове поле для 10 зльотів і 10 посадок, що є репрезентативним для регулярної, але помірної експлуатації майданчика. На рис. 3.34 наведено контури L_{Aeq} для випадку 10 зльотів. Шумове поле має витягнуту форму вздовж траєкторії набору висоти, що відображає спрямований характер джерела під час зльоту. Максимальні значення L_{Aeq} (порядку 40 дБА) зосереджені поблизу майданчика Н і швидко зменшуються з віддаленням, формуючи відносно вузьку зону підвищеного впливу.

На рис. 3.35 подано контури L_{Aeq} для 10 посадок. Порівняно зі зльотом зона підвищених рівнів шуму є більш компактною та симетричною, що зумовлено нижчими висотами і зменшеними режимами роботи силової установки під час заходу на посадку. Значення L_{Aeq} не перевищують приблизно 40 дБА, що свідчить про обмежений кумулятивний вплив у межах сценарію I.

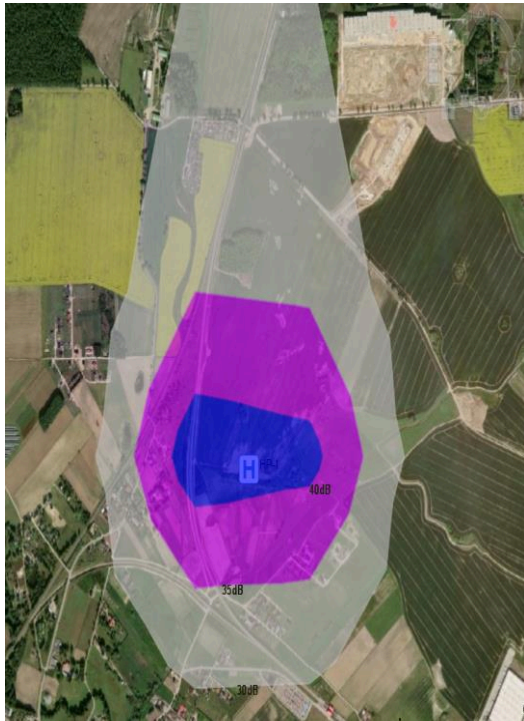


Рис. 3.34. Контури шуму LAeq для Сцерарій I - 10 посадок

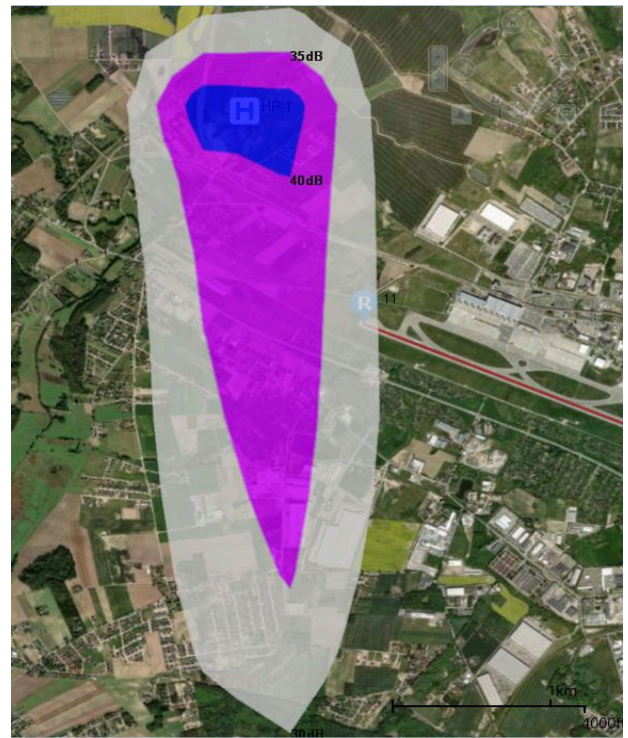


Рис. 3.35. Контури шуму LAeq для Сцерарій I - 10 зльотів

Об'єднаний ефект 10 зльотів та 10 посадок показано на рис. 3.36. Сумарне шумове поле формується як накладання двох асиметричних контурів, у результаті чого зона рівнів LAeq ≥ 35 -40 дБА дещо розширюється порівняно з окремими операціями. При цьому контури шуму 45 дБА формуються переважно в межах території вертипорту, тоді як найближча житлова забудова потрапляє під вплив в діапазоні 40-40 дБА. Такі рівні, хоча й не є критичними з точки зору нормативного навантаження, можуть сприйматися як потенційно дратівливі в окремі періоди доби, зокрема у вечірній та нічний час.

Згідно з рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я (WHO), орієнтовним пороговим значенням для нічного шуму в житлових районах є $L_{\text{night}} = 40$ дБА, перевищення якого може призводити до порушень сну та зростання рівня скарг населення, а рівні 45 дБА і вище розглядаються як такі, що ймовірно

викликають дискомфорт при регулярному впливі. Аналогічні підходи закладені у Європейській директиві 2002/49/ЕС, де зона $L_{\text{night}} > 40\text{--}45$ дБА розглядається як область підвищеної уваги з точки зору акустичного планування.

Таким чином, хоча отримані рівні шуму не є критичними з нормативної точки зору, вони можуть сприйматися як потенційно дратівливі у вечірній та нічний час, особливо за умови регулярної експлуатації майданчика або збільшення кількості операцій.

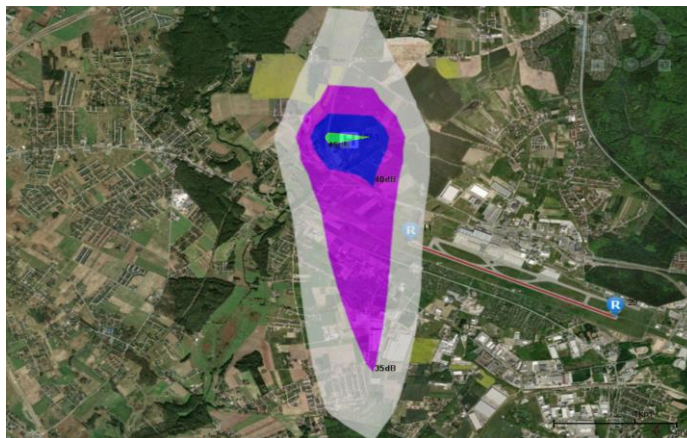
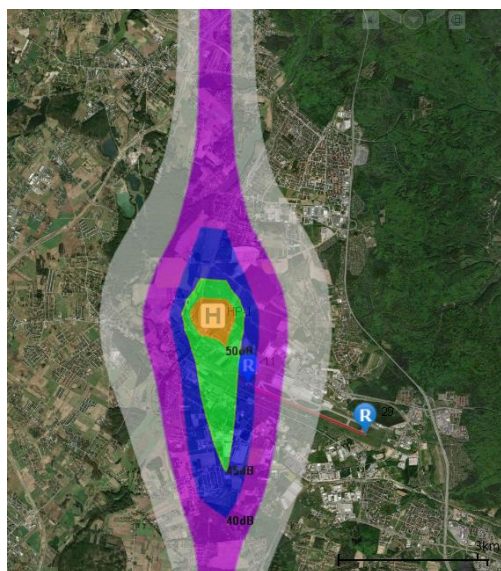


Рис. 3.36. Контури шуму LA_{eq} для Сценарій I - 10 посадок та 10 зльотів

Сценарій II, що відповідає 100 зльотам та 100 посадкам гелікоптерного БПЛА, відображає режим інтенсивної експлуатації майданчика та дозволяє оцінити кумулятивний шумовий вплив на прилеглі території. Результати моделювання еквівалентного рівня шуму LA_{eq} для даного сценарію наведено на рис. 3.37, де представлено як загальний вигляд околиць вертипорту, так і детальний фрагмент майданчика з прилеглою житловою забудовою.



а)



б)

Рис.3.37. Контури шуму LAeq для Сценарію II - 100 посадок та 100 зльотів: сірий - 30 дБА; фіолетовий - 40 дБА; синій - 45 дБА; помаранчевий - 50 дБА: а - загальний вигляд околиць вертипорту; б - деталізований вигляд майданчика та навколишньої житлової забудови

На відміну від сценарію I, у якому шумове поле залишалося переважно локалізованим, у сценарії II спостерігається істотне розширення контурів LAeq, що є наслідком значного зростання кількості операцій. Контури 40 дБА (фіолетовий) та 45 дБА (синій) охоплюють значно більшу площу та поширюються за межі безпосередньої зони функціонування вертипорту, залучаючи прилеглі житлові та напівжитлові території. Зона з рівнями LAeq \approx 50 дБА (помаранчевий) формується безпосередньо над майданчиком та в його найближчому оточенні, що вказує на концентрацію акустичного навантаження в районі виконання злітно-посадкових операцій.

З точки зору санітарно-гігієнічних та рекомендаційних критеріїв, рівні LAeq у діапазоні 40–45 дБА, зафіксовані на територіях житлової забудови, відповідають пороговим значенням нічного шуму, визначеним рекомендаціями WHO та

підходами Європейської директиви 2002/49/ЕС. За умов регулярної експлуатації майданчика такі рівні можуть спричиняти підвищений рівень акустичного дискомфорту, особливо у вечірній та нічний періоди, та потребують врахування на етапі планування режимів роботи вертипорту.

Отримані результати свідчать, що при інтенсивності 100 зльотів та 100 посадок шумовий вплив БПЛА набуває кумулятивного характеру, а зона потенційного впливу виходить за межі суто локального. Це підкреслює доцільність застосування регламентів експлуатації, часових обмежень та акустичних критеріїв при впровадженні майданчиків для обслуговування БПЛА в безпосередній близькості до житлової забудови.

3.7. Акустична помітність БПЛА та акустичне маскування

Для ефективного виявлення безпілотних літальних апаратів доцільно використовувати критерій акустичної помітності, який являє собою об'єктивну оцінку можливості локалізації БПЛА за його шумовим випромінюванням. Застосування такого критерію дає змогу теоретично визначити максимальну відстань між джерелом шуму та спостерігачем, на якій БПЛА може бути виявлений технічними акустичними засобами.

Експериментальні дослідження показують, що для надійної акустичної помітності шум БПЛА повинен перевищувати рівень фонового шуму щонайменше на 10 дБ [19]. Отже, критерій акустичної помітності базується на аналізі співвідношення між корисним сигналом і шумом навколишнього середовища.

У роботі для цього використано третинно-октавні спектри рівнів звукового тиску в діапазоні частот 20–20000 Гц, які дозволяють порівнювати акустичний сигнал БПЛА з природним фоновим шумом у відповідних частотних смугах. БПЛА вважається акустично помітним у тому випадку, коли рівень звукового тиску, створений апаратом, перевищує фоновий рівень хоча б у частині спектра.

Основний принцип акустичної помітності БПЛА ілюстровано на рис. 3.38 [19], де синім кольором показано фоновий шум, а помаранчевим - акустичний сигнал від БПЛА. Як видно з рисунка, необхідною умовою помітності є перевищення рівня шуму БПЛА над фоном у відповідних третинно-октавних смугах. При цьому мінімально достатні рівні звуку залежать не лише від характеристик апарата, але й від умов навколишнього середовища, зокрема рівня шумового забруднення та місця розташування мікрофонів системи спостереження.

Зі збільшенням відстані між БПЛА та приймачем звуку рівень звукового тиску, створюваний апаратом, закономірно зменшується. Так, на відстані 115,9 м від БПЛА лише в одній третинно-октавній смузі частот рівень звуку перевищує фоновий більш ніж на 10 дБ. За умов відносної вологості 50% і температури 15 °C акустично помітним залишається лише шум на частоті 3150 Гц для БПЛА типу Skelet (рис. 3.24).

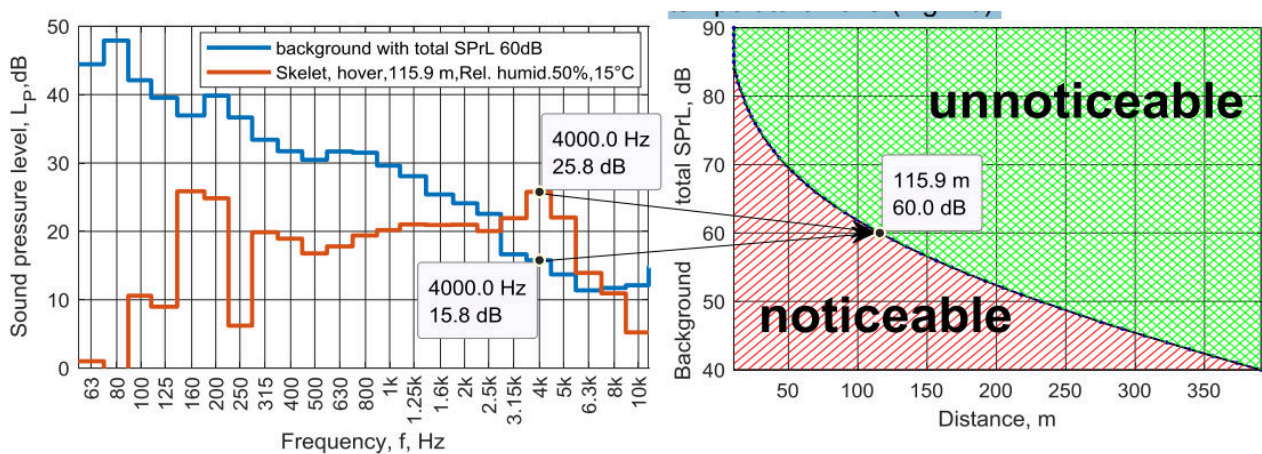


Рис. 3.38. Принцип дотримання акустичної помітності [19]

Зокрема, на рис. 3.38 показано, що збільшення відстані між приймачем звуку та БПЛА знижує рівень звукового тиску (РЗТ), спричинений БПЛА. На відстані 115,9 м від БПЛА існує лише одна 1/3-октавна смуга частот, для якої РЗТ, створюваний БПЛА, перевищує фоновий РЗТ на 10 дБ. Лише на 3150 Гц модель БПЛА, що аналізується на даному рисунку - вважається акустично помітною.

Інші джерела вказують, що вимога +10 дБ є досить консервативною і наприклад, спостерігач може ідентифікувати шум від БПЛА набагато нижчого рівня.

Акустична помітність безпілотних літальних апаратів починається з їхньої унікальної звукової сигнатури. На відміну від широкосмугового (wide-band) природного шуму, шум дронів, особливо багатороторних, характеризується чіткими тональними компонентами (гармоніками), які генеруються пропелерами та електромоторами. Саме ці гармоніки, зосереджені у вузьких частотних смугах, становлять "акустичний відбиток" апарата. Ця специфічна, організована енергія дозволяє подальшу ідентифікацію, оскільки характеристики цих тонів – їхня частота, інтенсивність і модуляція – є унікальними для конкретної моделі БПЛА та його режиму польоту. Ця тональна природа шуму дрона пояснює, чому критерії виявлення суттєво відрізняються для людини та технічних засобів. Хоча автоматичні системи часто потребують високого співвідношення сигнал-шум, наприклад, +10 дБ над фоновим шумом, для надійної локалізації, людський слух демонструє разючу чутливість. Людська слухова система, діючи як високочутливий спектральний аналізатор, здатна виділяти слабкі тональні компоненти навіть тоді, коли загальний рівень шуму дрона є значно нижчим за фоновий (негативний SNR). Цей ефект посилюється, якщо фоновий шум є динамічним (наприклад, шум автостради з паузами), дозволяючи виявлення на порогах, які можуть сягати -35дБ для 50% ймовірності. Спираючись на тональні характеристики, сучасні інструментальні методи перейшли від простого виявлення до точної ідентифікації. Використання глибокого машинного навчання - зокрема, згорткових нейронних мереж CRNN - дозволило автоматизувати складний процес спектрального аналізу. Ці мережі навчаються розпізнавати акустичні сигнатури, представлені як спектрограми, і класифікувати їх з високою точністю (до 96.7%), що дає змогу не лише підтвердити присутність дрона, а й визначити його модель та ідентифікувати режим роботи (наприклад, зависання, політ). Незважаючи на високу чутливість

сенсорів і складність алгоритмів, ефективність акустичної ідентифікації залишається критично залежною від умов навколишнього середовища. Рівень і спектральний склад фонового шуму прямо впливають на максимальну дальність виявлення. Крім того, на практиці умови вільного поля часто порушуються: звукова хвиля зазнає відбиттів, затухання та дифракції, спричинених об'єктами або змінами температури та вологості. Тому відстані виявлення, отримані в безлунних камерах, слід розглядати лише як початкові оцінки, що вимагають корекції для реальних польових умов [27].

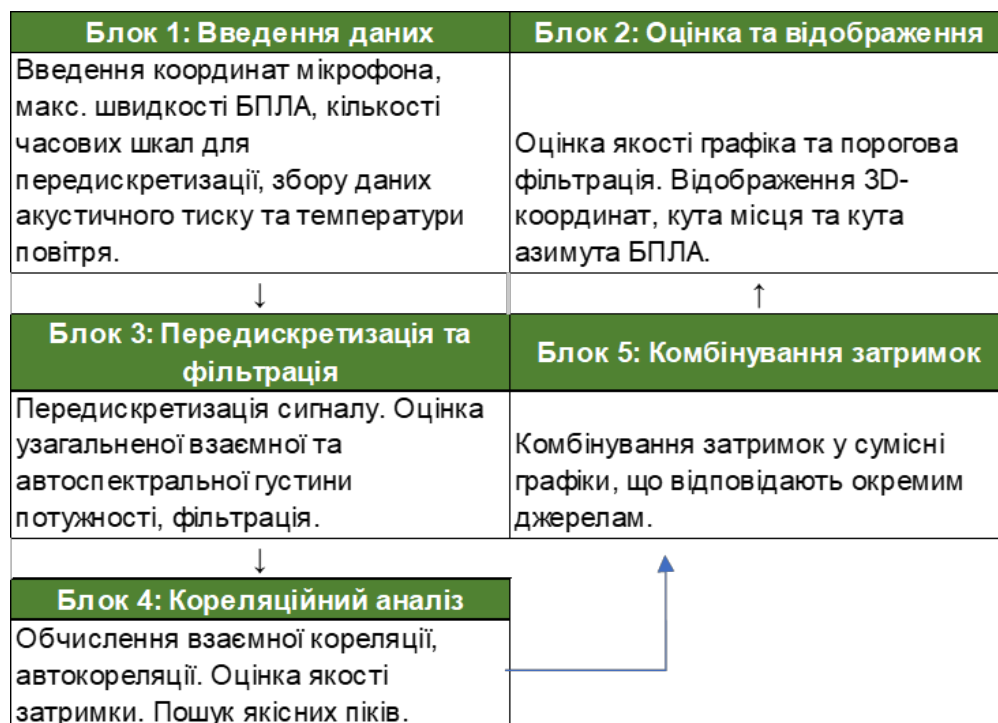


Рис. 3.39. Схема алгоритму локалізації БПЛА

Висновки до РОЗДІЛУ 3

У третьому розділі виконано практичне дослідження акустичних характеристик безпілотних транспортних засобів із застосуванням інтегральних і спектральних методів аналізу. Оцінено рівні звукового тиску БПЛА в різних

режимах роботи, що дало змогу кількісно охарактеризувати їх акустичну помітність та особливості формування шумового поля.

Встановлено, що показник L_{Aeq} є придатним для загальної оцінки акустичного навантаження, однак не відображає повною мірою специфіку шуму БПЛА через його нестационарний і тонально-імпульсний характер. Показано, що за близьких значень L_{Aeq} різні апарати можуть істотно відрізнятися за суб'єктивним сприйняттям шуму.

Доведено важливість використання показника L_{Amax} , оскільки саме пікові рівні звукового тиску визначають раптовість акустичного впливу та рівень дискомфорту, особливо в режимах зльоту, маневрування і зависання. Спектральний аналіз у третинно-октавних смугах виявив домінування середньо- та височастотних компонентів і наявність стійких тональних складових, зумовлених роботою пропелерів, які суттєво підвищують акустичну помітність БПЛА.

Обґрунтовано доцільність комплексного підходу до акустичної оцінки безпілотних транспортних засобів, що поєднує показники L_{Aeq} , L_{Amax} та спектральні характеристики. Отримані результати підтверджують необхідність адаптації традиційних критеріїв оцінки шуму до специфіки БПЛА та можуть бути використані для розроблення рекомендацій з нормування шуму й зниження його негативного впливу на довкілля.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів упродовж останнього десятиліття суттєво вплинув на авіаційну сферу, інфраструктуру та екологічну безпеку. Сучасні дрони активно використовуються у цивільній авіації, логістиці, моніторингу довкілля, топографічних зйомках, аграрному секторі та сфері безпеки. Паралельно з розширенням їхнього застосування постає низка екологічних викликів, серед яких особливе місце займає шумовий вплив БПЛА на навколишнє середовище та населення [20].

На відміну від класичної авіації, шум БПЛА має іншу акустичну природу: він характеризується високочастотними компонентами, гармонічними спотвореннями та різкою модуляцією, що робить його більш нав'язливим та психологічно подразливим для людини. Дослідження доводять, що шум дронів може викликати дискомфорт, порушення сну, підвищення рівня стресу, негативні реакції у тварин, а також впливати на загальну екологічну якість територій. Особливо актуальною ця проблема стає у контексті збільшення кількості польотів малозумних, але масово використовуваних БПЛА у міських зонах [21].

З огляду на те, що українська авіаційна галузь активно інтегрує безпілотні технології, питання регулювання шумового навантаження, методів оцінки та мінімізації акустичного впливу набуває стратегічного значення. Екологічні норми, вимоги безпеки та методи акустичного контролю мають адаптуватися до нових реалій, а також враховувати специфіку поліпропелерних і мультикоптерних систем, які мають унікальний спектральний склад шуму [21].

Таким чином, дослідження шумового впливу БПЛА є важливим елементом комплексної системи охорони навколишнього природного середовища. Аналіз акустичних характеристик, факторів формування шуму, оцінка його наслідків і розробка рекомендацій для зменшення негативного впливу є необхідними для

формування сучасної екологічної політики у сфері експлуатації безпілотних авіаційних систем [23].

4.1. Охорона навколишнього середовища: шумове забруднення від БПЛА

Шум безпілотних літальних апаратів формується комплексом фізичних процесів, що виникають під час роботи їхніх силових установок, аеродинамічної взаємодії елементів конструкції з потоком повітря та механічних коливань корпусу. На відміну від традиційних літальних апаратів, акустичний профіль БПЛА має ряд унікальних властивостей, зумовлених компактністю конструкції, високими обертами пропелерів та переважним використанням електричних двигунів [20].

Акустичні характеристики безпілотних літальних апаратів формуються під впливом конструктивних особливостей, типу силової установки, аеродинамічних параметрів та режимів польоту. На відміну від великих пілотованих літаків, шум БПЛА має специфічну структуру, що визначається високочастотними компонентами, періодичними імпульсами від роботи пропелерів та нестационарними флуктуаціями повітряного потоку [24].

4.2. Вплив шуму БПЛА на довкілля та людину

Шум, який генерують безпілотні літальні апарати, стає одним із ключових чинників їхнього екологічного та соціального впливу. Особливості акустичного профілю БПЛА - широка частотна смуга, нерегулярність спектра, виражені тональні компоненти та імпульсивність під час маневрів – роблять цей тип шуму унікальним у порівнянні з традиційними джерелами, такими як автомобільний чи авіаційний транспорт [23].

Шум від БПЛА має як екологічні, так і соціально-психологічні наслідки. У міських та рекреаційних зонах він формує додаткове акустичне навантаження, що може перевищувати комфортні рівні шуму, встановлені санітарними нормами.

Вплив шуму БПЛА на природні екосистеми

Дослідження показують, що фауна реагує на шум БПЛА так само чутливо, як на шум традиційної авіації, але з додатковими особливостями:

Низька висота польоту (переважно до 120–150 м) збільшує ймовірність акустичного стресу.

Високочастотний компонент шуму (понад 1–4 кГц), характерний для малих роторів, часто збігається з частотами комунікації та орієнтації тварин.

Наявність **тональних пік-функцій** (гармонік) робить шум БПЛА схожим на сигнали хижаків або тривоги.

У тварин спостерігаються: підвищена пильність; уникання територій, порушення харчової поведінки, зміна маршрутів міграції.

Особливо чутливі до шуму БПЛА **птахи**, які можуть: [24]

- припиняти годування пташенят,
- залишати місця гніздування,
- демонструвати панічні зльоти навіть при короткочасному прольоті.

Вплив шуму на заповідні території

Для природоохоронних зон критичними є:

- **порушення режиму тиші**, що впливає на відтворення видів;
- зміна **акустичного ландшафту**, який є частиною природних екосистем;
- ризик **довгострокової деградації біоакустичного середовища**.

У багатьох країнах діють суворі обмеження використання БПЛА над національними парками саме через акустичний вплив [24].

Вплив на комах та дрібних тварин

Хоча рівень шуму невеликого БПЛА часто нижчий за природні звуки середовища, високочастотні спектри можуть впливати на: комунікацію комах, орієнтацію летючих мишей, поведінку дрібних ссавців.

Вплив на людину

Людське вухо є найбільш чутливим у діапазоні 1–4 кГц, саме на цих частотах працює більшість пропелерних систем БПЛА, що посилює дискомфорт від їхнього шуму. Основні негативні впливи:

- підвищення рівня стресу, тривожності, дратівливості;
- труднощі концентрації уваги;
- порушення сну при нічних польотах;
- зниження суб'єктивного рівня комфорту у житлових районах;
- негативне сприйняття БПЛА як порушення приватності, навіть якщо реальної загрози немає [24].

Високий рівень шуму може маскувати інші важливі акустичні сигнали в середовищі (транспорт, сигнали попередження), що знижує загальну безпеку на промислових об'єктах і в містах [20].

Методи зниження шуму БПЛА

Зменшення шуму безпілотних літальних апаратів є одним із ключових викликів сучасної авіаційної інженерії. В умовах стрімкого зростання кількості дронів - від побутових до професійних та промислових - питання акустичного вдосконалення перестає бути другорядним. Воно переходить у площину безпеки, екологічної відповідальності, психологічного комфорту населення і навіть бойової ефективності у військовому застосуванні. Тому сучасний підхід до зниження шуму БПЛА розглядається як комплекс технічних, конструктивних і організаційних рішень, що взаємодоповнюють одне одного.

Першим кроком до зменшення шуму завжди є розуміння його джерел. Основний внесок створюють пропелери - саме вони формують характерне високочастотне «дзижчання», яке чує людина. Кожен оберт лопаті спричиняє локальну зміну тиску і породжує хвилю, що поширюється в повітрі. Тому інженери все частіше використовують спеціальні аеродинамічні профілі, лопаті з криволінійними краями та композиційні матеріали, які поглинають вібрації. Такі

конструктивні вдосконалення дають змогу не лише зменшити звуковий тиск, а й змінити частотний спектр шуму, роблячи його менш помітним для людського вуха [20].

Одним із найбільш перспективних напрямів є оптимізація кількості та розмірів пропелерів. Цікаво, що збільшення числа лопатей іноді дає протилежний ефект до очікуваного: частота шуму зростає, але амплітуда знижується. В результаті дрон звучить “м’якше”, а його шум краще маскується природним середовищем. Подібного ефекту можна досягти й за рахунок зміни діаметра пропелера: більші пропелери працюють на менших обертах, що також знижує загальний шумовий рівень [20].

Важливе місце займають і технологічні методи - використання двигунів із плавним контролем тяги, електронного гасіння вібрацій та інтелектуальних систем стабілізації. На сучасних БПЛА стабілізатори та контролери польоту працюють таким чином, щоб уникати різких змін обертів двигуна, які породжують шумові піки. Точний розрахунок режимів польоту дозволяє значно зменшити акустичне навантаження, зберігаючи при цьому стабільність і безпеку [21].

Окремим напрямом є використання шумопоглинальних матеріалів. Вони застосовуються не тільки в корпусі, але й у кріпленні двигунів, щоб погасити вібрації ще на рівні конструкції. Такі матеріали дозволяють не лише поглинути частину механічних коливань, а й запобігти їх поширенню на корпус, що є одним із механізмів виникнення вторинного шуму.

Водночас акустична “культура” БПЛА не обмежується лише технічними засобами. У певних сценаріях значну роль відіграє оптимізація польотних маршрутів та висот. Наприклад, політ на вищій висоті автоматично зменшує рівень шуму, що досягає землі, а маршрути, прокладені подалі від житлових зон, знижують вплив на людей. У військових та спеціальних застосуваннях це також підвищує рівень прихованості [21].

Деякі виробники експериментують навіть із повністю альтернативними концепціями. Наприклад, перехід від традиційних пропелерів до тунельних вентиляторів або використання гібридних схем, де частина підйомної сили створюється аеродинамікою корпусу. Такі рішення поки що складні й дорогі, проте вони демонструють високий потенціал у зниженні акустичного сліду.

Зрештою, методи зниження шуму БПЛА - це не окремі технології, а системний підхід. Тільки поєднання аеродинамічного вдосконалення, матеріалознавства, електронного контролю та грамотного застосування дозволяє домогтися істотного зменшення шуму. Усе це робить сучасні БПЛА більш «дружніми» до навколишнього середовища і людей, а в певних сферах - більш ефективними й непомітними.

Основні шляхи зменшення шумового впливу від БПЛА на довкілля:

1. Зниження рівня шуму на конструкційному рівні:

- **Аеродинамічні пропелери:** Використання спеціально розроблених пропелерів знижує рівень шуму, оскільки вони створюють менше турбуленції. Технології, такі як «великі кроки» (large-pitch) пропелерів, можуть знизити шумову емісію до 10 дБ, порівняно зі стандартними.
- **Безщіткові двигуни:** Безщіткові електродвигуни зазвичай є менш шумними, ніж традиційні двигуни внутрішнього згоряння. Тому використання таких двигунів замість бензинових може суттєво знизити рівень шуму.
- **Герметизація компонентів:** Відокремлення частин дронів (моторів і батарей) у спеціальні захисні оболонки для зменшення акустичних вібрацій.

Активне зменшення шуму - розробка технологій активного зменшення шуму, наприклад, застосування спеціальних антикогерентних хвиль для нейтралізації шуму в режимі реального часу. Хоча ця технологія ще не поширена, вона може стати одним з шляхів для зменшення шуму від дронів у майбутньому [21].

2. Оптимізація маршрутів польоту

Вибір траєкторій з урахуванням чутливих зон:

- Дрони можуть знижувати рівень шуму, якщо вони обирають траєкторії польоту, що обходять житлові райони або природоохоронні території.
- Польоти на високих висотах: Збільшення висоти польоту дозволяє знизити рівень шуму на землі, оскільки звукові хвилі розсіюються з відстані, а також скорочує площу прямого контакту з об'єктами [21].
- Використання “тихих повітряних коридорів” в містах чи над природними заповідниками, де дрони можуть переміщатися без шкоди для екосистеми.

Часова організація польотів:

- Обмеження нічних польотів: У багатьох країнах вже вводяться обмеження на польоти дронів вночі, коли звукові хвилі поширюються швидше, і це може значно порушити спокій тварин і людей.

3. Використання альтернативних технологій

Електричні дрони з малим рівнем шуму: використання малошумних електричних дронів з покращеними акумуляторами, що можуть виконувати більш тривалі польоти без значного збільшення шуму. Це дозволяє зменшити вплив дронів на навколишнє середовище порівняно з моделями, що використовують двигуни внутрішнього згорання [21].

Використання дронів з вертикальним злетом та посадкою: дрони, які мають можливість вертикального зльоту та посадки (наприклад, дрони з функцією гелікоптера), можуть використовувати менші та більш тихі двигуни, порівняно з традиційними дронами, що мають горизонтальне переміщення.

4. Створення екологічних стандартів і норм

Регулювання рівня шуму:

- Розробка нормативів по шуму для дронів, що враховують обмеження на максимальний рівень шуму в різних зонах (житлові, природоохоронні зони).
- Введення сертифікації на низький рівень шуму для нових моделей дронів та заохочення виробників до розробки безшумних технологій.

Норми для польотів у чутливих зонах - встановлення обмежень на польоти дронів у природних зонах, національних парках та інших територіях, де підвищена чутливість до шуму може мати негативні наслідки для екосистеми [21].

5. Акустичні бар'єри та звукоізоляція

Звукові бар'єри для дронів - встановлення акустичних бар'єрів на територіях, що часто використовуються для польотів дронів, може допомогти зменшити поширення шуму. Це можуть бути спеціальні звукоізолюючі конструкції або зелені насадження, які виконують роль природного бар'єра [21].

Місцеві звукоізоляційні рішення: застосування звукоізоляційних матеріалів для будівель, якщо польоти дронів проходять на низьких висотах у міських зонах, де це може негативно позначатися на комфорті жителів.

6. Підвищення обізнаності та громадські ініціативи

Поширення освітніх кампаній серед користувачів дронів щодо важливості зменшення шумового забруднення, а також введення програм по заохоченню тихих моделей серед компаній, що надають послуги з доставки або аерофотозйомки.

Громадські ініціативи для створення спеціальних «тихих зон» у міських і природних територіях, де дрони могли б працювати з мінімальним рівнем шуму.

Отже, зменшення шумового впливу від БПЛА на довкілля потребує комплексного підходу, який поєднує технологічні новації, екологічне регулювання, а також освітні та організаційні ініціативи. Важливо забезпечити баланс між розвитком інноваційних технологій і збереженням екологічного благополуччя, щоб досягти сталого використання дронів у різних сферах діяльності [22].

Висновки до РОЗДІЛУ 4

Таким чином, в даному розділі обґрунтовано актуальність охорони навколишнього середовища в умовах зростання застосування БПЛА та показано, що їхній шум має специфічний акустичний профіль (тональні компоненти, високочастотність, модуляція), який часто сприймається більш нав'язливо, ніж

шум традиційних джерел. Проаналізовано вплив шуму БПЛА на людину (дискомфорт, стрес, порушення сну, зниження концентрації) і природні екосистеми, зокрема на птахів та інші види, для яких важливими є частоти комунікації й орієнтації. Визначено, що особливо чутливими є міські та рекреаційні території, а також природоохоронні зони, де зміна акустичного ландшафту може мати довгострокові наслідки.

Сформульовано комплекс заходів зменшення шумового впливу БПЛА: конструктивно-технологічні рішення (оптимізація пропелерів і двигунів, зниження вібрацій, застосування матеріалів), оптимізація режимів і маршрутів польоту (висота, обхід чутливих зон, обмеження нічних польотів), впровадження стандартів і норм, а також організаційні та інформаційні заходи. Зроблено висновок, що ефективне шумозниження можливе лише за системного поєднання технічних, регуляторних і організаційних інструментів із дотриманням балансу між розвитком безпілотних технологій та екологічною безпекою.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи на тему «**Акустичні критерії для оцінки безпілотних транспортних засобів**» було вирішено такі основні завдання: виконано аналітичний огляд безпілотних літальних апаратів, їх класифікації та методів ідентифікації; узагальнено підходи до оцінювання техногенного та шумового впливу БПЛА і методи розрахунку акустичного поля; систематизовано основні групи акустичних критеріїв (енергетичні, спектральні, структурні, подієві, довгострокові, психоакустичні та просторово-моделювальні) та показано їх застосування для оцінювання ефективності БПЛА; розглянуто акустичне виявлення БПЛА й алгоритми обробки сигналів з позицій формування інформативних ознак і підвищення дальності та точності виявлення; проаналізовано екологічні аспекти шумового впливу БПЛА на людину і тваринний світ та окреслено основні напрями шумозниження; сформовано вимоги з охорони праці та безпечної експлуатації БПЛА.

1. У роботі виконано комплексний аналіз безпілотних транспортних засобів як джерел техногенного акустичного впливу. Показано, що конструктивні особливості БПЛА та режими їх експлуатації формують шум із вираженим нестационарним, тональним і високочастотним характером, який істотно відрізняється від шуму традиційних транспортних засобів.

2. Проаналізовано сучасні методи виявлення та оцінювання БПЛА і встановлено, що акустичні методи є перспективними для ідентифікації малорозмірних апаратів, особливо в умовах обмеженої ефективності радіолокаційних і радіочастотних засобів. Акустична помітність визначена як одна з ключових характеристик БПЛА незалежно від їх маси та призначення.

3. Досліджено екологічні та санітарно-гігієнічні аспекти шумового впливу БПЛА. Показано, що навіть за помірних інтегральних рівнів шуму вони можуть створювати підвищений дискомфорт для людини та негативно впливати на

тваринний світ, що зумовлено спектральними особливостями і наявністю тональних компонентів.

4. У ході практичного дослідження підтверджено, що показник L_{Aeq} є доцільним для загальної оцінки акустичного навантаження, однак не дозволяє повною мірою врахувати специфіку шуму БПЛА. Обґрунтовано необхідність додаткового використання пікових показників L_{Amax} .

5. Результати спектрального аналізу в третоктавних смугах частот підтвердили важливість урахування частотного складу шуму БПЛА. Виявлено домінування середньо- та високочастотних складових і стійких тональних компонентів, пов'язаних із роботою пропелерів, що істотно впливає на акустичну помітність і суб'єктивне сприйняття шуму.

6. На основі отриманих результатів обґрунтовано доцільність застосування комплексної системи акустичних критеріїв, яка поєднує інтегральні рівні шуму, пікові значення та спектральні характеристики. Такий підхід дозволяє більш повно враховувати енергетичні й частотні особливості акустичного випромінювання БПЛА.

7. Встановлено, що чинна нормативна база з оцінювання шуму не повною мірою враховує специфіку безпілотних транспортних засобів, що підтверджує актуальність подальших досліджень у напрямі розроблення спеціалізованих методик і критеріїв нормування їх акустичного впливу.

Отримані результати мають практичну значущість і можуть бути використані при розробленні рекомендацій щодо зниження шуму безпілотних транспортних засобів, підвищення техногенної безпеки та як наукове підґрунтя для подальших досліджень у галузі акустичного моніторингу довкілля й запобігання техногенним ризикам, зокрема ризикам для третьої сторони.

Наукова новизна полягає в комплексній систематизації безпілотних транспортних засобів як специфічних джерел техногенного акустичного впливу з урахуванням їх конструктивних особливостей, режимів експлуатації та

характерного спектрального складу шуму. Удосконалено підхід до оцінювання акустичної помітності БПЛА шляхом обґрунтування доцільності поєднаного використання інтегральних, пікових і спектральних показників. Дістало подальший розвиток обґрунтування ролі спектральних і тональних компонентів шуму у формуванні суб'єктивного сприйняття та екологічного дискомфорту, а також підтверджено перспективність акустичних методів для виявлення й ідентифікації малорозмірних БПЛА.

СПИСОК БІБЛОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 8807:2018. Безпілотні авіаційні системи. Терміни та визначення.
2. Кузьменко О.М. Безпілотні авіаційні системи : навч. посіб. – Київ : НАУ, 2022.
3. Державна авіаційна служба України. Правила використання повітряного простору України. – 2023.
4. Бойко В.В. Класифікація та застосування безпілотних літальних апаратів // Авіаційно-космічна техніка. – 2021.
5. Шевченко В.В. Системи управління та навігації БПЛА. – Харків : ХАІ, 2021.
6. Литвиненко С.О. Інерціальні та супутникові навігаційні системи БПЛА. – Київ, 2020.
7. Петренко О.Г. Штучний інтелект у безпілотних авіаційних системах // Інформаційні технології. – 2022.
8. Ковальчук І.М. Методи виявлення та ідентифікації БПЛА. – Львів : ЛПНУ, 2022.
9. Дорошенко А.О. Акустичні характеристики безпілотних літальних апаратів // Вісник НАУ. – 2023.
10. ICAO. Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). Doc 10019, 2022.
11. ISO 1996-1:2016 Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise.
12. Гутін Л. Я. Теорія шуму повітряного гвинта. – М.: Оборонгиз, 1948.
13. Державна екологічна інспекція України. Застосування БПЛА у сфері екологічного контролю. – Київ, 2021.
14. European Maritime Safety Agency. RPAS for environmental monitoring. – 2020.
15. NOAA. Effects of noise on wildlife. – 2019.
16. Бойко В.М. Акустика і шумозахист : навч. посіб. – Київ : КНУБА, 2018.
17. Коржик В.М., Лисенко О.М. Основи акустики та психоакустики : монографія. – Харків : ХНУРЕ, 2019.

18. Кузьмін С.О. Обробка сигналів у вимірювальних системах : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.
19. Жуков І.А., Руденко О.І. Безпілотні авіаційні системи : проектування та експлуатація : монографія. – Київ : НАУ, 2021.
20. ДБН В.1.1-31:2013. Захист територій, будинків і споруд від шуму. – Київ : Мінрегіон України, 2014.
21. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – Київ : МОЗ України, 1999.
22. WHO. Environmental Noise Guidelines for the European Region. – Copenhagen : World Health Organization, 2018.
23. ICAO. Environmental Protection – Volume I: Aircraft Noise (Annex 16). – Montreal, 2017.
24. EASA. Environmental protection requirements for Unmanned Aircraft Systems. – Cologne, 2022.
25. Kolamunna T., Li W., Ghergulescu I. AcousticPrint: acoustic signature based open set drone identification. The Journal of Supercomputing. 2024. Vol. 80. P. 13917–13941. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/AcousticPrint%3A-acoustic-signature-based-open-set-Kolamunna-Li/888c6565c15a385be1fd09d686245e68fb2e64bc> (дата звернення: 14.12.2025).
26. Al-Qassim W. A Real-Time System for Joint Acoustic Detection and Localization of UAVs. Electronics. 2021. Vol. 10, No 4. URL: <https://www.researchgate.net/publication/349466267...> (дата звернення: 14.12.2025).
27. Piotrowski J., Ciesielka W., Siwiec K. Efficiency of small unmanned aerial vehicle detection based on acoustic signal analysis. Przegląd Elektrotechniczny. 2016. Vol. 92, No 10. URL: <https://www.researchgate.net/publication/309011373...> (дата звернення: 14.12.2025).
28. Detecting UAVs Using Acoustic Camera. SIGNAL 2018: 3rd International Conference on Signals and Systems. 2018. P. 50–55. URL:

https://personales.upv.es/thinkmind/dl/conferences/signal/signal_2018/signal_2018_3_5_0_68005.pdf (дата звернення: 14.12.2025).

29. AcousticPrint: acoustic signature based open set drone identification. Defence Innovation Network. URL: <https://defenceinnovationnetwork.com/case-study/acoustic-print-acoustic-signature-to-identify-and-authenticate-autonomous-vehicles/> (дата звернення: 14.12.2025).

30. Determination of the detection threshold of human observers in the presence of ambient noise. SCISPACE. URL: <https://scispace.com/pdf/determination-of-the-detection-threshold-of-human-observers-20811lu8s0.pdf> (дата звернення: 14.12.2025).

31. CRNN-based UAV Detection using Acoustic Signature. IEEE Xplore. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10466797/> (дата звернення: 14.12.2025).

32. Škultéty, F., Bujna, E., Janovec, M., & Kandra, B. (2023). Noise Impact Assessment of UAS Operation in Urbanised Areas: Field Measurements and a Simulation. *Drones*, 7(5), 314. <https://doi.org/10.3390/drones7050314>