

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження методів вимірювання та візуалізації характеристик спрямованості
акустичного випромінювання малорозмірних літальних апаратів

Виконав:

студент 2 курсу, групи МІМ-20-1
Берлан В.А.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та
радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Олейніков В.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

_____ (підпис)

Карташов В.М.
(прізвище, ініціали)

2021

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
 Кафедра Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
 (код і повна назва)
 Тип програми освітньо-професійна
 (освітньо-професійна або освітньо-наукова)
 Освітня програма " Медіаінженерія "

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Берлан Владиславу Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи

Дослідження методів вимірювання та візуалізації характеристик спрямованості акустичного випромінювання малорозмірних безпілотних літальних апаратів.Затверджено наказом по університету від "08" 11 2021р. № 1676 Ст _____2. Термін подання студентом роботи 08.12.20213. Вихідні дані до проекту (роботи) Метою магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження і визначення особливостей акустичних сигналів малорозмірних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) Розробка методів експериментального дослідження спрямованості акустичного випромінювання, розробка методів їх обробки та візуалізації засобами 3D графіки.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Вступ1. Аналітичний огляд літературних джерел присвячених дослідженню характеристик спрямованості акустичного випромінювання БПЛА.2. Аналіз впливу навколишнього середовища на характеристики вимірюваних акустичних сигналів.3. Методи аналізу акустичних сигналів малорозмірних БПЛА.4. Розробка методів експериментального дослідження та візуалізації засобами 3D графіки характеристик спрямованості акустичного випромінювання малорозмірних БПЛА .5. Аналіз результатів експериментального дослідження спрямованості акустичного випромінювання малорозмірних БПЛАВисновкиПерелік посилань

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням обов'язкових креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій:

1. Постановка задачі (1 лист)
2. Класифікація БПЛА (1 лист)
3. Спектр акустичного випромінювання БПЛА (1 лист)
4. Шум навколишнього середовища та загасання АВ на місцевості (1 лист)
5. Вимірювання акустичного випромінювання у заглушеній камері (1 лист)
6. Актуальність 3d графіки у відображенні характеристик АВ БПЛА та її види (1 лист)
7. Оснащення експерименту визначення характеристик спрямованості АВ БПЛА (1 лист)
8. Опис експерименту акустичного вимірювання (1 лист)
9. Результати розрахункової частини експерименту визначення характеристик спрямованості АВ БПЛА, лист 1 (1 лист)
10. Результати розрахункової частини експерименту визначення характеристик спрямованості АВ БПЛА, лист 2 (1 лист)
11. Результати 3D візуалізації характеристики спрямованості АВ БПЛА (1 лист)
12. Висновки (1 лист)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	07.11.21 – 14.11.21	
2	Теоретичне обґрунтування методу	15.11.21 – 20.11.21	
3	Налаштування та тестування обладнання	21.11.21 – 25.11.21	
4	Проведення експерименту	26.11.21 – 01.12.21	
5	Обробка результатів експерименту	02.12.21 – 04.12.21	
6	Візуалізація результатів експерименту	25.11.21 – 04.12.21	
7	Графічна частина роботи	25.11.21 – 04.12.21	
8	Перевірка керівником	05.12.21 – 07.12.21	
9	Перевірка на академічний плагіат	6.12.21	
	Перевірка нормоконтролем	6.12.21	
10	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	7.12.21 – 8.12.21	

Дата видачі завдання 08.11.2021

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи (проекту) _____ проф. Олейніков В.М.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 76 сторінок, 58 рисунків, 25 джерел.

БПЛА, ВИЯВЛЕННЯ, АКУСТИЧНІ СИГНАЛИ, МІКРОФОН, ГАРМОНІКА, СПЕКТРАЛЬНА ЩІЛЬНІСТЬ, АКУСТИЧНА СПРЯМОВАНІСТЬ, ХАРАКТЕРИСТИКА СПРЯМОВАНОСТІ, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ

Об'єкт дослідження – процес вимірювання акустичного випромінювання для задачі визначення характеристик спрямованості безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та їх візуалізації програмними способами.

Мета дослідження – дослідження і визначення особливостей акустичних сигналів малорозмірних безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Розробка методів експериментального дослідження спрямованості акустичного випромінювання, розробка методів їх обробки та візуалізації засобами 3D графіки.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання, обробка експериментальних даних, тривимірна візуалізація отриманих результатів.

У кваліфікаційній роботі виконано аналітичний огляд акустичних методів спрямованості акустичного випромінювання малорозмірних БПЛА, проведено теоретичний аналіз акустичного методу вимірювання спрямованості та оцінку його потенційних можливостей, проведено аналіз впливу навколишнього середовища на акустичне випромінювання, отримано діаграми акустичної спрямованості та виконано її тривимірне моделювання.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка к квалификационной работе: 76 страниц, 58 рисунков, 25 источников.

БПЛА, ОБНАРУЖЕНИЕ, АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, МИКРОФОН, ГАРМОНИКА, СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ, АКУСТИЧЕСКАЯ НАПРАВЛЕННОСТЬ, ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРАВЛЕННОСТИ, ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Объект исследования – процесс измерения акустического излучения для задачи определения характеристик направленности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и их визуализации программными способами.

Цель исследования – исследование и определение особенностей акустических сигналов малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Разработка методов экспериментального исследования направленности акустического излучения, разработка методов их обработки и визуализации средствами 3D графики.

Методы исследования – теоретический анализ, числовые расчеты, математическое моделирование, обработка экспериментальных данных, трехмерная визуализация полученных результатов.

В квалификационной работе выполнен аналитический обзор акустических методов направленности акустического излучения малоразмерных БПЛА, проведены теоретический анализ акустического метода измерения направленности и оценка его потенциальных возможностей, проведен анализ влияния окружающей среды на акустическое излучение, получены диаграммы акустической направленности и произведено ее трехмерное моделирование.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 76 pages, 58 figures, 25 sources.

UAV, DETECTION, ACOUSTIC SIGNALS, MICROPHONE,
HARMONICA, SPECTRAL DENSITY, ACOUSTIC ORIENTATION,
CHARACTERISTICS OF DIRECTION,

The object of research is the process of measuring acoustic radiation for the problem of determining the directivity characteristics of unmanned aerial vehicles (UAVs) and their visualization by software methods.

The aim of the study is to study and determine the features of acoustic signals of small-sized unmanned aerial vehicles (UAVs). Development of methods for experimental study of the directivity of acoustic radiation, development of methods for their processing and visualization by means of 3D graphics.

Research methods - theoretical analysis, numerical calculations, mathematical modeling, processing of experimental data, three-dimensional visualization of the results.

In the qualification work, an analytical review of acoustic methods of directivity of acoustic radiation of small-sized UAVs was carried out, a theoretical analysis of the acoustic method of measuring the directivity and an assessment of its potential capabilities were carried out, an analysis of the environmental impact on acoustic radiation was carried out, acoustic directivity diagrams were obtained and its three-dimensional modeling was performed.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	9
Вступ.....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ СПРЯМОВАННОСТІ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	12
1.1 Загальна класифікація БПЛА	12
1.2 Характеристики акустичного випромінювання БПЛА.....	17
1.3 Методи дослідження спрямованості акустичних коливань.....	21
1.4 Висновки по розділу 1.....	26
2 МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ СПРЯМОВАННОСТІ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	27
2.1 Методика моделювання характеристики спрямованості акустичного випромінювання БПЛА програмними засобами.....	27
2.2 Аналіз шуму навколишнього середовища.....	33
2.3 Методика розрахунку загасання звуку на місцевості.....	37
2.4 Загальні відомості про тривимірне технічне моделювання.....	39
2.5 Висновки по розділу 2.....	44
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИ ВІЗУПЛІЗАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК СПРЯМОВАННОСТІ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ БПЛА.....	45
3.1 Експериментальна установка для вимірювання та дослідження діаграми спрямованості акустичного випромінювання.....	45
3.2 Опис експерименту акустичного вимірювання.....	48

3.3 Розрахункова частина експерименту визначення характеристик спрямованості АВ БПЛА.....	52
3.4 Методика та візуалізація отриманих даних засобами 3D графіки.....	60
3.5 Висновки по розділу 3.....	70
Висновки.....	71
Перелік посилань.....	73
Додаток А. Графічний матеріал.....	77
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- БПЛА – безпілотний літаючий апарат;
АВ – акустичне випромінювання;
ЛА – літальний апарат;
МІРЕС – медіаінженерія та інформаційні радіоелектронні системи;
АКМ – акустичні методи;
ППО – протиповітряна оборона;
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;
КРК – канал радіо-керування;
СЩП – спектральна щільність потужності;
ЗД – тривимірний або тривимірний.

ВСТУП

У сучасному світі безпілотники міцно посіли у багатьох сферах життєдіяльності людини. Сфер використання БПЛА доволі багато: аматорська відеозйомка, різноманітні освітні програми та шоу-гонки пілотів БПЛА з видом від першої особи, світлові шоу, обприскування полів у сільському господарстві, використання у лісному господарстві, пошуково-рятувальні роботи, геодезія та картографія, риболовля, моніторинг трубопроводів та ліній електромереж і так далі. З часом та вдосконаленням технологій сфер використання буде становитися все більше.

Проте, БПЛА також вирішують задачі спеціального призначення, які потребують непомітності або, навпаки, існують задачі виявлення несанкціонованого проникнення ЛА до стратегічного об'єкту.

Для вирішення цих задач використовують не тільки активні методи виявлення, але й пасивні. Наприклад, методи акустичної та оптичної локації.

БПЛА, як правило, мають вигляд моноплана або мультикоптера, які є джерелами акустичного випромінювання.

Основними джерелами шуму є двигуни, гвинти та сам планер. В залежності від типу цих складових, рівень шуму буде різним. Найгучнішим типом двигуна є двигун внутрішнього згорання (поршневий). Джерелами шуму є процеси впуску свіжого заряду, горіння, впуску відпрацьованих газів (випускний шум) та тертя деталей двигуна.

БПЛА з електричними двигунами, у порівнянні, мають низький рівень шуму, який у режимі польоту майже нечутний, як і шум самого планеру. Найбільший рівень шуму створюють гвинти апарату.

Акустична дрон-детекція має доволі велику дальність розпізнавання, але найбільша ефективність буде у місцях з невеликим рівнем фонового шуму.

Такі локації зазвичай мають деяке віддалення від міст, або підприємств, в котрих рівень фонового шуму буде достатньо великим, що буде створювати складності у функціонуванні системи виявлення.

У даній роботі вирішуються задачі вибору акустичного методу вимірювання акустичної спрямованості і експериментальна оцінка похибок.

Об'єкт дослідження – процеси приймання і обробки сигналів акустичного діапазону для задачі визначення дальності до безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Мета дослідження – отримання теоретичних і експериментальних числових оцінок похибок вимірювання координат малих БПЛА в акустичному каналі системи виявлення при різних варіантах його реалізації.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання, обробка експериментальних даних та тривимірне моделювання отриманих даних.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ СПРЯМОВАННОСТІ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1 Загальна класифікація БПЛА

На сьогодні БПЛА використовують для вирішення різноманітних тактичних та стратегічних задач: спостереження, розвідки, транспортування вантажів, завдання ударів, цільовказання, ретрансляція даних, виконання заздалегідь розроблених програм та інші. Для кожного типу задач варто розуміти яким параметрам має відповідати БПЛА.

Якщо дослідити існуючі БПЛА [1], то їх можна класифікувати по особливостям та конструктивному виконанню.

В залежності від функціональної швидкості польоту:

- мало-швидкісні БПЛА – швидкості польотів до 200 км/год;
- середньо-швидкісні БПЛА – швидкості польотів від 150 до 400 км/год;
- високо-швидкісні БПЛА – швидкості польотів від 350 до 800 км/год.

За функціональним призначенням [2] БПЛА поділяються на:

- транспортні;
- спостерігаючі;
- моніторингові;
- розвідувальні;
- інформаційно-розвідувальні;
- розвідувально-ударні;
- бойові;
- БПЛА радіо-безпеки;
- бомбардувальні:
- охоронні;
- дистанційно-зондуючі;
- робочі;

- допоміжні;
- БПЛА радіоелектронної боротьби;
- БПЛА – перехоплювачі.

В залежності від кількості БПЛА, що використовуються:

- одиночного застосування;
- групового застосування.

За принципом польоту можна класифікувати на такі типи:

- БПЛА вертолітного типу (рис. 1.1);
- БПЛА літакового типу (рис. 1.2);
- мультикоптери (рис. 1.3).



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд БПЛА вертолітного типу



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд БПЛА літакового типу



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд БПЛА типу мультикоптер

В состав бортового оснащення малих БПЛА можна віднести:

- силова установка (двигуни);
- система радіозв'язку;
- система керування;
- система навігації;
- бортовий комп'ютер.

Основними перевагами БПЛА можна вважати:

- можливість віддаленого керування оператором, що дає можливість оператору знаходитися у безпечній позиції але мати актуальну інформацію о ході дії операції;
- можливість знаходитися впродовж тривалого терміну над зоною бойових дій та можливість самостійного подавлення або знищення засобів ППО;
- низька помітність БПЛА в радіолокаційному, тепловому [2] та оптичному діапазоні завдяки малим габаритам та використанні в конструкції пластикових та композитних матеріалів;
- можливість здійснювати маневри з великими перевантаженнями та польоти на низькій висоті і низькій швидкості, що значно понижає ефективність застосування засобів ППО проти БПЛА;
- малі геометричні розміри, які ускладнюють попадання снарядів зенітних протиповітряних комплексів а також зенітних керованих ракет;
- висока непомітність завдяки відносно невеликій гучності двигунів та їх розмірів, а також за рахунок можливості ведення польоту у режимі «радіомовчання» до зони бойового застосування.

Завдяки досвіду авіації та розвитку технологій можна також виділити такі технічні та економічні переваги БПЛА над пілотованими апаратами:

- можливість оснащення електричними двигунами, які, як раніше було зазначено мають відчутно нижчий рівень шуму та простіші в обслуговуванні;

- використання альтернативних джерел енергії для двигунів та обладнання, наприклад, сонячної енергії, що дає можливість майже нескінченного часу польоту на відміну від ЛА на ДВЗ ;
- значно нижчі затрати на утримування, транспортування та експлуатування до зон використання або обслуговування;
- у випадку використання БПЛА з електричними двигунами, менший негативних вплив на екологію у зв'язку з відсутніми продуктами згоряння
- відносно простіше керування, яке пов'язано зі знаходженням оператора у «стані покою», або, якщо БПЛА має автоматизовану програму виконання операції;
- нижча вартість розробки та виробництва у порівнянні з керованими пілотами ЛА.

Скільки би багато не було переваг у БПЛА, як і у будь-якої складної системи знайдуться також немало недоліків:

- обмеження використання в залежності від часу доби та погодних умов для окремих видів БПЛА;
- низька варіативність операцій в автономному режимі;
- мала точність визначення координат;
- низька скритність КРК та передачі даних;
- можливість впливання радіо-завад на КРК та супутникову навігацію;
- відносно невелика дальність між оператором та апаратом без застосування засобів ретрансляції;
- невелика маса та габарити транспортованого вантажу або обладнання.

1.2 Характеристики акустичного випромінювання БПЛА

Характеристики звукового сигналу БПЛА залежать від його типу, форми, кількості двигунів тощо [4].

Згідно [5], характеристики АВ можна поділити на такі типи:

- амплітудні, які визначають величину коливання, або ж, інакше кажучи, величину енергію, що перенесить звукова хвиля;
- частотні, завдяки яким визначають спектральний склад коливань;
- часові, які визначають розподіл коливань у часі, тривалість звукових імпульсів;
- просторові, що визначають розподілення енергії хвиль у просторі;
- характеристики середовища, у якому розповсюджується звукові хвилі.

Спектр АВ БПЛА містить гармонічні складники шуму обертів гвинта, роботи двигуна, тертя механічних деталей.

Серед особливостей АВ малих БПЛА можна відзначити:

- частота звуку, що генерується, кратна частоті обертання гвинтів,
- зі зміною режиму польоту змінюється інтенсивність АВ.

Для детального аналізу акустичних сигналів використовують мікрофонні решітки [6], тому що використання одного мікрофону не дасть точної оцінки АВ. Акустичні мікрофонні решітки можуть ефективно виявляти ЛА, що здійснюють політ на невеликих висотах. Окрім просторового накопичення сигналів, мікрофонні решітки дозволяють оцінити час приходу фронту акустичної хвилі у різні точки розташування елементів решітки, що надає можливість визначити напрям до об'єкту, що наближається.

При гармонічному виявленні аналізуються вузькі смуги частот на коротких часових інтервалах. Сигнал подається у вигляді суми гармонік з невідомими частотами та фазами. Якщо сигнали слабкі, то гармонійний детектор працює надійніше ніж енергетичний.

У шумі силової установки БПЛА, що включає поршневий двигун повітряного охолодження, за відсутності в його вихлопному тракті глушника визначальним джерелом зовнішнього шуму є поршневий двигун.

Дискретні складові впливають із частотами $f_i = f_0 \cdot i$, які кратні частоті запалювання f_0 , де $i = 1, 2, 3 \dots$ – номер відповідної гармонійної складової. На високих частотах значимість періодичних процесів у формуванні спектра акустичного випромінювання двигуна помітно послаблюється, оскільки важливішу роль сумарному акустичному випромінюванню починають грати процеси випадкового походження. Зокрема, для шуму вихлопу може бути суттєвою вихрова складова. Насправді ж вихлопний тракт двигуна формує в атмосфері послідовність імпульсів тиску, приклад частотного спектру якого представлено на рис. 1.4.

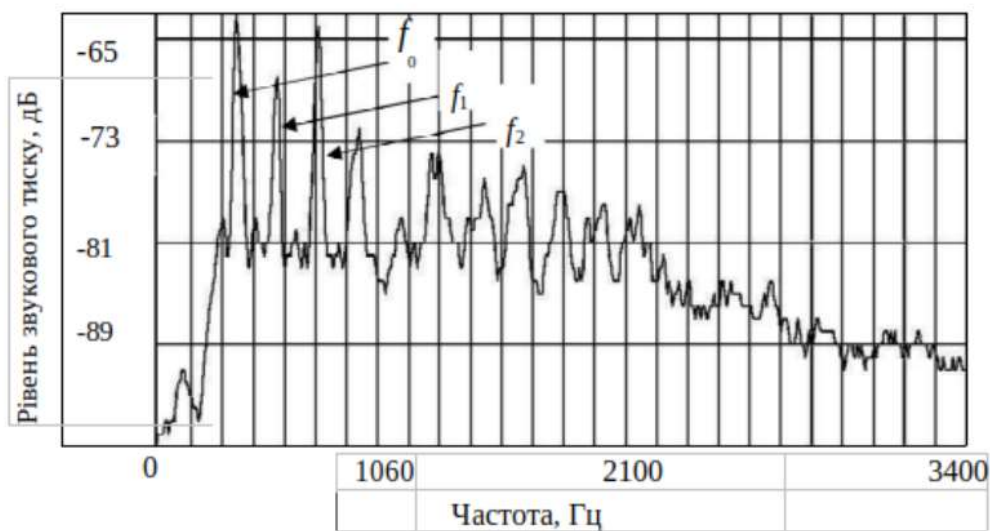


Рисунок 1.4 – Типовий спектр акустичного випромінювання БПЛА з ДВЗ [7]

Дослідження літератури [8], де приведені вимірювання спектральної щільності потужності АВ БПЛА, дають зрозуміти, що типова реалізація містить основний тон та його гармоніки (рис 1.5).

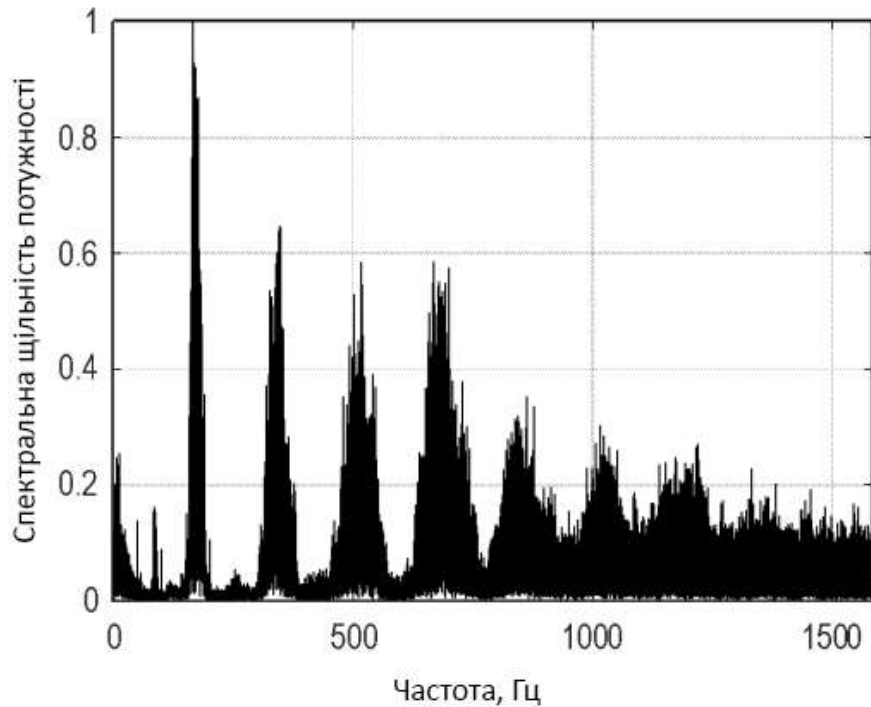


Рисунок 1.5 –Реалізація СЩП акустичного випромінювання БПЛА
[6]

Аналіз СЩП різних моделей малорозмірних БПЛА, здатних нести корисне навантаження у вигляді професійної відеокамери, показав, що частота основного тону для БПЛА знаходиться в межах від 90 до 240 Гц. Кількість гармонік основного тону знаходиться в межах від 10 до 40, але зі збільшенням відстані до БПЛА, через поглинання звуку атмосфері, високочастотні гармоніки суттєво послаблюються до рівня фонових шумів і не можуть бути оброблені. Тому для обробки використовується від 2-х до 8-ми гармонік основного тону

При розробці алгоритмів виявлення та розпізнавання важливу роль мають показники природних шумів. На рис.1.6 наведено можна побачити вигляд згладженої реалізації СЩП.

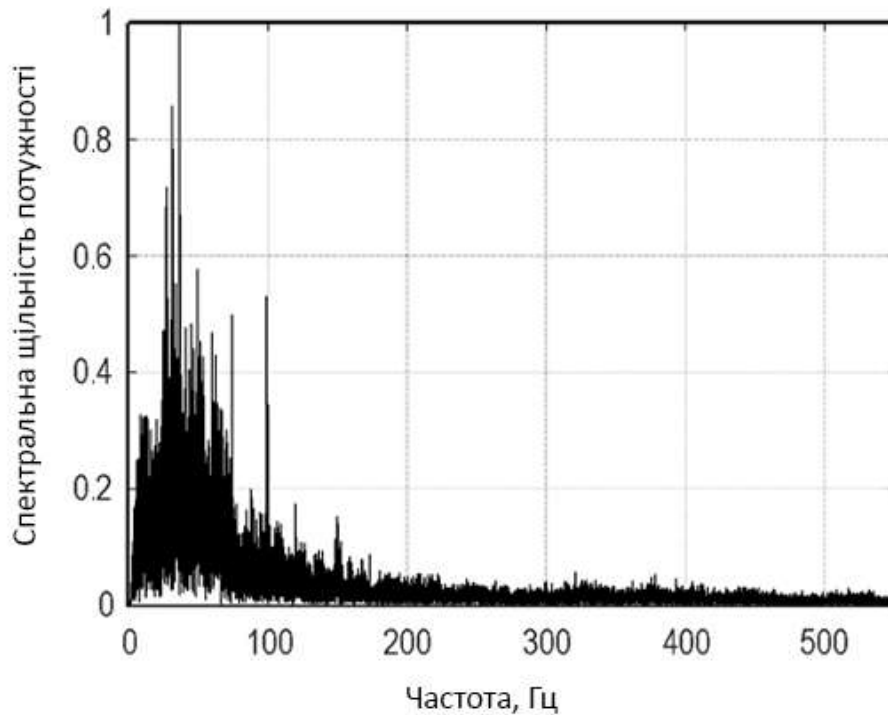


Рисунок 1.6 – Згладжена реалізація СЩП природного шуму

СЩП природних шумів добре апроксимується функцією логарифмічно-нормального закону розподілу:

$$S(f) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}f} e^{-\frac{(\ln(x)-\ln(a))^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1)$$

СЩП, що містить АВ БПЛА (рис. 1.2), має огинаючу, яка описується поліномами високих ступенів. Таким чином, відрізнити СПМ АВ БПЛА від СЩП природних шумів можна за результатами апроксимації виразом (1).

Серйозну проблему при виявленні та розпізнаванні АВ БПЛА створюють шуми бензинових та дизельних автомобільних двигунів, трамваїв, залізничного транспорту, голоси людей та звуки тварин. З типовими реалізаціями СЩП шумів автомобільного дизельного та бензинових двигунів можна ознайомитися на рис 1.3.

СЩП шумів автомобільних двигунів мають характер подібний до СЩП БПЛА, однак частота основного тону автомобільних двигунів знаходиться в межах від 40 до 80 Гц, тому що, в порівнянні з авіаційними двигунами, їх частоти обертання суттєво нижчі. Тому відрізнити їх від БПЛА можна за нижчою частотою основного тону.

Якщо проаналізувати звукозаписи мови людини, можна побачити, що СЩП багатьох мовних сигналів мають подібний характер із СПМ БПЛА. Однак частота основного тону, як правило, знаходиться в діапазоні понад 200 Гц з ймовірністю 98%. Саме тому відрізнити сигнал мови від сигналу АІ БПЛА можна також за частотою основного тону.

1.3 Методи дослідження спрямованості акустичних коливань

Характеристикою спрямованості джерела звукових коливань називають представлений у функції напрям відносно значення звукового тиску, що створюється ним на фіксованій відстані у дальньому полі [8]. Напрямок задається одиничним радіус-вектором або кутами.

Вимірюється характеристика спрямованості так само як і амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) у заглушеній камері [9], але об'єкт, що досліджується обертається із заданим проміжком навколо своєї осі, або обертається мікрофон навколо джерела звуку (рис.1.7).



Рисунок 1.7 – Метод вимірювання характеристики спрямованості та АЧХ у заглушеній камері [9]

У першому випадку можна отримати полярні діаграми спрямованості на ряду фіксованих частот, у другому набір АЧХ, що записані під різними кутами. Приклад діаграми спрямованості та АЧХ під кутами 15° для високочастотного джерела звуку зображені на рис. 1.8.

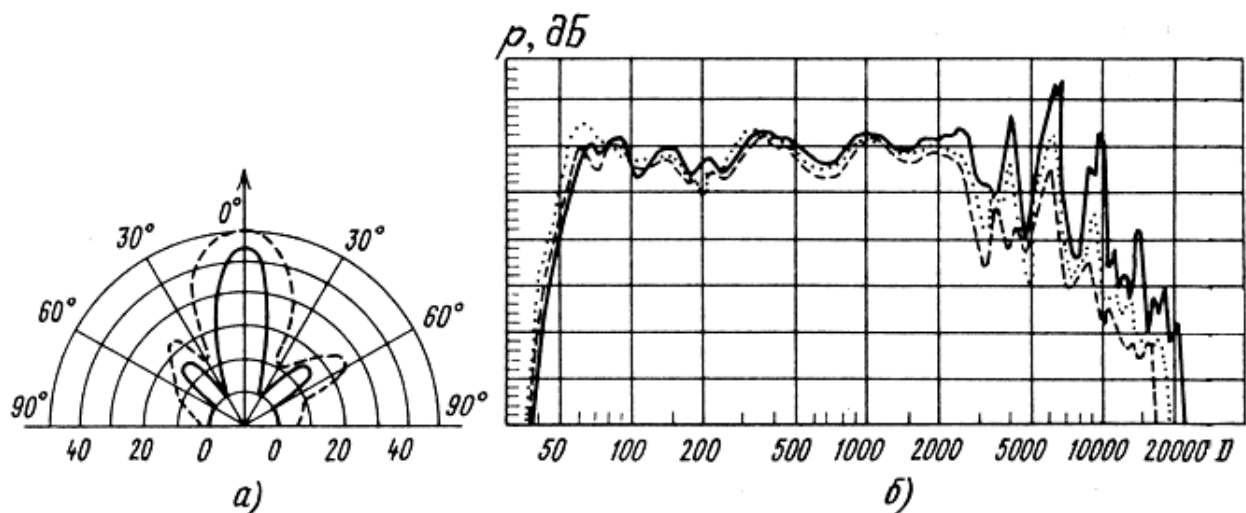


Рисунок 1.8 – Приклад полярної діаграми характеристики спрямованості (а), частотна характеристика тиску АВ (б)

За отриманими даними рівня звукового тиску можна розрахувати:

- коефіцієнт спрямованості

$$\Gamma(\alpha) = \frac{p(\alpha)}{p(0)},$$

де $p(\alpha)$ – звуковий тиск, замірений при обертанні мікрофону під кутом α відносно осі джерела звуку, Па; $p(0)$ – звуковий тиск джерела звуку на осі, Па.

Вираз коефіцієнту осьової концентрації має вигляд:

$$\Omega = \frac{2}{\int_0^\pi (\alpha) \sin(\alpha) d\alpha}.$$
(1.2)

Маючи коефіцієнт осьової концентрації з виразу (1.2) можна розрахувати індекс осьової концентрації:

$$I = 10 \lg \Omega$$
(1.3)

Акустичну потужність можна вирахувати з звуковим тиском:

$$P_a(f) = \frac{4\pi l^2}{\rho c} \cdot \frac{l}{n} \sum_{i=1}^n p_i^2(f),$$
(1.4)

де $p_i(f)$ – звуковий тиск на заданій частоту точці i , n – кількість позицій розташування мікрофону на рівномірних відрізках (кутах), ρ – щільність повітря, c – швидкість звуку, l – відстань від джерела звуку до мікрофону.

Метод мел-кепстральних коефіцієнтів (MFCC – Mel-Frequency Cepstral Coefficients) має широке розповсюдження у системах розпізнавання мови людини та в областях діагностики технічних систем. Цей метод заснований на змінній голосу людини з критичною пропускнуою здатністю з використанням частотних трикутних фільтрів.

Мел-кепстральні коефіцієнти [11] зазвичай розраховуються із використанням набору фільтрів трикутної форми з фільтром центральної частоти, який розташовується із лінійними частотними інтервалами менше 1000 Гц та логарифмічними вище 1000 Гц. Пропускна здатність кожного фільтру визначається центральними частотами двох сусідніх фільтрів та залежить від частотного діапазону набору фільтрів та їх кількості.

Перевагою даного методу можна вважати вектор ознак АВ БПЛА, що отримується, від довжини вихідного фрагменту сигналу, що обробляється, його відносно малим розміром та врахуванням розкиду характеристик АВ джерела звуку.

Щоб зменшити вплив зовнішніх шумів сигнал потрібно обробляти фільтром верхніх частот. Після цього послідовність відліків сигналу розбивається на сегменти з протяжністю менше, ніж час стаціонарності АВ БПЛА.

У межах сегменту необхідно проводити нормалізацію записаного сигналу, оскільки на рівень акустичного сигналу, що записується, який випромінює безпілотник, впливає ціла низка факторів: режим роботи двигунів, їх кількість, віддаленість від мікрофона, ракурс літаючого апарату, погодні умови. Застосування нормалізації дозволяє зменшити розбіг рівнів записаного акустичного сигналу для різних умов польоту та спостереження БПЛА. Після виконання нормалізації вихідний сегмент розбивається на суб-сегменти, що йдуть з перекриттям 75% у межах сегмента. Для зниження спотворень при спектральному аналізі, що обумовлені кінцевим розміром вибірки кожного суб-сегменту, застосовується вагова обробка. Як вагова функція підходить вікно Хеммінга. Після виконується дискретне перетворення Фур'є:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{\frac{-2\pi i}{N} kn} \quad (1.5)$$

де k відповідає частоті $f = FS / N$, $k \in 0, 1 \dots N-1$, FS – частота дискретизації сигналу.

Для підвищення відношення сигнал/шум здійснюється накопичення спектрів у межах сегмента.

Далі сигнал, що представлений у частотній області обробляється набором смуго-пропускних фільтрів із трикутною апроксимацією частотних характеристик. Границі частотної характеристики фільтрів обчислюються в шкалі мел.

Віконна функція для реалізації смуго-пропускних фільтрів описується виразом:

$$[k] = \left\{ 0k < f[m-1] \frac{(k-f[m-1])}{(f[m]-f[m-1])} f[m-1] \leq k < f[m] \frac{(f[m+1]-k)}{((m+1)-f[m])} f[m] \leq k \leq f[m+1], \right. \quad (1.6)$$

де m – номер фільтра, $m \in 1 \dots N_F$, N_F - кількість смуго-пропускних фільтрів.

Енергію сигналу для кожної смуги трикутного вікна в логарифмічному представленні можна описати:

$$S[m] = \ln \left(\sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 H_m[k] \right) \quad (1.7)$$

де k – номер відліку спектра, $m \in 1 \dots N_F$.

Щоб зменшити кількість вихідних параметрів та декорелювати компоненти застосовується дискретне косинусне перетворення, в результаті якого отримуємо вектор C (вектор ознак), який містить набір мел-частотних кепстральних коефіцієнтів:

$$C[n] = \sum_{m=0}^{N_F-1} S[m] \cos \left(\frac{\pi n \left(m + \frac{1}{2} \right)}{N_F} \right) \quad (1.8)$$

де N - кількість мел-частотних кепстральних коефіцієнтів, $n \in 1 \dots N_{kk}$.

У результаті обробки сигналу відповідно до запропонованого алгоритму значна кількість відліків АВ замінюється на компактний набір мел-частотних кепстральних коефіцієнтів.

1.4 Висновки по розділу 1

БПЛА у сучасному світі стали незамінним інструментом у ряді задач різноманітних напрямлень. В залежності від поставленої задачі використовуються БПЛА підібрані за: функціональною швидкістю, призначенням, принципом польоту та кількістю ЛА.

Успіх БПЛА у стратегічних завданнях став можливим завдяки розвитку технологій електричних двигунів, які мають нижчий рівень помітності та простіші вимоги для застосування.

Усі сучасні БПЛА створюють АВ, за яким його можна виявити на місцевості. Для виявлення АВ безпілотників зазвичай використовують мультисенсорні системи, до яких також входять і акустичні системи.

Акустичні системи виявлення, у порівнянні з іншими, мають невеликий радіус дії, сильно залежать від фонового акустичного шуму місцевості та метеорологічних умов. Проте вони все ж дуже ефективні для виявлення малих БПЛА, що здійснюють польоти на малих висотах та швидкостях.

Після огляду АВ БПЛА стає зрозуміло, що воно має свої акустичні характерні ознаки.

Отримавши запис АВ можна розпізнати за допомогою методу мел-кепстральних коефіцієнтів акустичний портрет БПЛА та розрахувати його характеристику спрямованості.

2 МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ СПРЯМОВАННОСТІ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

2.1 Методика моделювання характеристики спрямованості акустичного випромінювання БПЛА програмними засобами

Для розробки методу розрахунку шуму гвинта можна застосувати роботу [11]. Принципи звукоутворення гвинтами БПЛА та літака майже ідентичні. Генерація звукових хвиль обумовлена впливанням обертання гвинта на повітряний простір навколо нього, у результаті чого повітря витиснується із фіксованого об'єму та лопаті гвинта взаємодіють з турбулентними утвореннями, що набігають на їх поверхню [12].

Сили, котрими гвинт впливає на середу позначимо як:

- $A(R)dR$ – сила, що паралельна осі та направлена протилежно напрямку осі гвинта, ось гвинта вважається співпадаючою з віссю ротору мотору, а її позитивний напрямок від точки кріплення гвинта у простір;
- $B(R) dR$ – сила, що спрямована протилежно до обертального руху гвинта.

Звідси маємо вираз:

$$n \int_0^{R_0} A(R)dR = n \int_0^{R_0} dP = P,$$

$$n \int_0^{R_0} B(R)dR = n \int_0^{R_0} dM = M,$$

де n – кількість лопатей, R_0 – довжина лопаті, P – аеродинамічна сила, M – момент в обертаючому руху лопаті.

Якщо проходження лопаті почалося на момент часу $t = 0$, то воно буде закінчено під час τ . Періодично повторювані з періодом T сили можна розкласти в ряд Фур'є:

$$F_1(t) = \begin{cases} A(R) \frac{R}{a} dR d\theta \dots (0 < t < \tau) \\ 0 \dots (\tau < t < T) \end{cases} = \sum_1^{\infty} A_m \cos(mnat - \varepsilon_m) + A_0,$$

$$F_2(t) = \begin{cases} B(R) \frac{R}{a} dR d\theta \dots (0 < t < \tau) \\ 0 \dots (\tau < t < T) \end{cases} = \sum_1^{\infty} B_m \cos(mnat - \mu_m) + B_0,$$

де θ – кут, $d\theta$ – елементарний кут у площині обертання, ε_m , μ_m – фази, A_m , B_m – амплітуди гармонік, m – номер гармонік.

При цьому:

$$A_m = \frac{2}{m\pi} A(R) \cdot \frac{R}{a} \sin\left(m\pi \frac{\tau}{T}\right) dR d\theta,$$

$$B_m = \frac{2}{m\pi} B(R) \cdot \frac{R}{a} \sin\left(m\pi \frac{\tau}{T}\right) dR d\theta.$$

Для перших гармонік маємо:

$$A_m = \frac{n}{\pi} A(R) dR d\theta,$$

$$B_m = \frac{n}{\pi} B(R) dR d\theta.$$

Визначається потенціал швидкостей, зумовлений зосередженою силою з компонентами X , Y , Z . Слід враховувати, що точка спостереження лежить у площині X , Y на відстані r .

$$\varphi = \left| \frac{-i}{4\pi\rho kc} \cdot X \left(\frac{1}{2r} \right) + \frac{ik}{r} \right| \cdot \frac{e^{-ikr}}{r} x,$$

де ρ – щільність середовища, k - хвильове число, x - координата.

Посилаючись до [12], вираз для звукового тиску у дальньому акустичному полі матиме вигляд:

$$P_m = Q \frac{d\varphi}{dt} \approx \frac{mn\omega}{2\pi c_0 L_1} \left| -P_B \cos\vartheta + \frac{c_0 M_{кр}}{\omega R_e} \right| J_{mn} \left(\frac{mn\omega}{c_0} R_e \sin\vartheta \right),$$

де ϑ – кут характеристики спрямованості, $x/r = \cos \vartheta$ – напрям косинуса радіус-вектору, ω_m – кругова частота кожної гармоніки, ω_l – кругова частота основного тону, $J_{mn} (kR \sin \vartheta)$ - функція Бесселя 1-го роду n -ного порядку, m – номер гармоніки, n – число обертів за хвилину на валу двигуна, рад/с, j – число лопатей гвинта, R – довжина лопаті гвинта, W – потужність, c_0 – швидкість звуку, p_0 – значення атмосферного тиску, ρ_v – щільність повітря.

У дослідженні [12] наведений приклад розрахунку БПЛА, що має такі характеристики:

- дві лопаті на гвинті $j = 2$;
- швидкість обертання гвинта $n = 6380$ об/хв;
- потужність $W = 1350$ Вт;
- радіус гвинта $R = 0,1778$ м;
- швидкість звуку $c_0 = 340$ м/с;
- значення атмосферного тиску $p_0 = 101325$ Па;
- щільність повітря $\rho_v = 1,29$.

Розрахунки виконуються у програмному пакеті MathCad 2015. До програми вносяться зазначені вище дані та створюється вектор-стовбець m , що містить значення відповідні до перших п'яти гармонік.

Далі розраховуються:

- кутова швидкість $\omega = \pi n/30$;
- значення частоти $f = nj/60$;
- довжини хвилі для кожної з гармонік $r = \lambda/m$;
- відстань до початку дальнього акустичного поля $\lambda = c/f$.

Наступним кроком розраховується площа гвинта S , шляхом розбивання поверхні на два трикутника та прямокутник.

Після цього потрібно розрахувати швидкість потоку повітря V , вважаючи, що підйомна сила діє на лопать на відстані $0,75R$ від початку лопаті. Ця швидкість дорівнює $V = 0,75R\omega$.

Далі розраховуються:

- повітряний тиск на лопаті $p_a = p_0 + \frac{\rho V^2}{2}$;
- аеродинамічна сила $P = p_a S$;
- обертальний момент на валу $M = \frac{W}{\omega}$;
- хвильове число k для кожної з гармонік $k = \frac{\omega}{c}$.

Кут повороту гвинта у площині обертання буде аргументом функції, яка вираховує тиск. Далі задається дискретність зміни кута, почальне та кінцеве значення у радіанах.

Аналогічна функція створюється для інших чотирьох гармонік, змінюючи m та g . Програма для розрахунку у пакеті MathCad представлена на рис. 2.1 та для перших п'яти гармонік на рис. 2.2.

$$\begin{array}{l}
 \underline{m} := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{pmatrix} \\
 \underline{r} := \begin{pmatrix} \frac{\lambda}{m_0} \\ \frac{\lambda}{m_1} \\ \frac{\lambda}{m_2} \\ \frac{\lambda}{m_3} \\ \frac{\lambda}{m_4} \end{pmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 n := 6380 \quad j := 2 \quad c := 340 \quad W := 1350 \\
 \omega := \frac{\pi \cdot n}{30} \quad f := \frac{n \cdot j}{60} \quad \lambda := \frac{c}{f} \\
 S_1 := \frac{1}{2} \cdot 0.0373 \cdot 0.018 \\
 S_2 := 0.1032 \cdot 0.018 \\
 S := 2 \cdot S_1 + S_2 \\
 R := 0.1778 \\
 V := 0.75 \cdot R \cdot \omega \\
 P_0 := 101325 \quad \rho := 1.29 \\
 p_a := P_0 + \frac{\rho \cdot V^2}{2} \\
 P := p_a \cdot S \quad M := \frac{W}{\omega} \quad k := \frac{\omega}{c}
 \end{array}$$

Рисунок 2.1 – Код програми для розрахунку акустичних полів у пакеті MathCad

$$\begin{array}{l}
 \begin{pmatrix} m_3 \\ \frac{\lambda}{m_4} \end{pmatrix} \quad p_a := p_{atm} + \frac{\rho \cdot V^2}{2} \quad P := p_a \cdot S \quad M := \frac{W}{\omega} \\
 k := \frac{\omega}{c} \quad \theta := 0.01745, 0.034906, 6.28319 \\
 p1(\theta) := \frac{m_0 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_0} \left(\frac{j \cdot c}{\omega \cdot R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_0, k \cdot R \cdot \sin(\theta)) \\
 p2(\theta) := \frac{m_1 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_1} \left(\frac{j \cdot c}{\omega \cdot R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_1, k \cdot R \cdot \sin(\theta)) \\
 p3(\theta) := \frac{m_2 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_2} \left(\frac{j \cdot c}{\omega \cdot R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_2, k \cdot R \cdot \sin(\theta)) \\
 p4(\theta) := \frac{m_3 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_3} \left(\frac{j \cdot c}{\omega \cdot R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_3, k \cdot R \cdot \sin(\theta)) \\
 p5(\theta) := \frac{m_4 \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot r_4} \left(\frac{j \cdot c}{\omega \cdot R^2} \cdot M - P \cdot \cos(\theta) \right) \cdot J_n(m_4, k \cdot R \cdot \sin(\theta))
 \end{array}$$

Рисунок 2.2 – Код програми для розрахунку звукового тиску акустичного поля гвинта для перших п'яти гармонік у пакеті MathCad

За результатами розрахунків програми будується графік (рис 2.3), де кожному кольору відповідає певна гармоніка. Червоний – перша, синій – друга, зелений – третя. У четвертій та п'ятій гармоніки значення виявилися занадто малі для відображення. Також, згідно графіку, видно, що максимальний тиск, що створюється гвинтом БПЛА дорівнює $P_I(\theta) = 6,228$ Па.

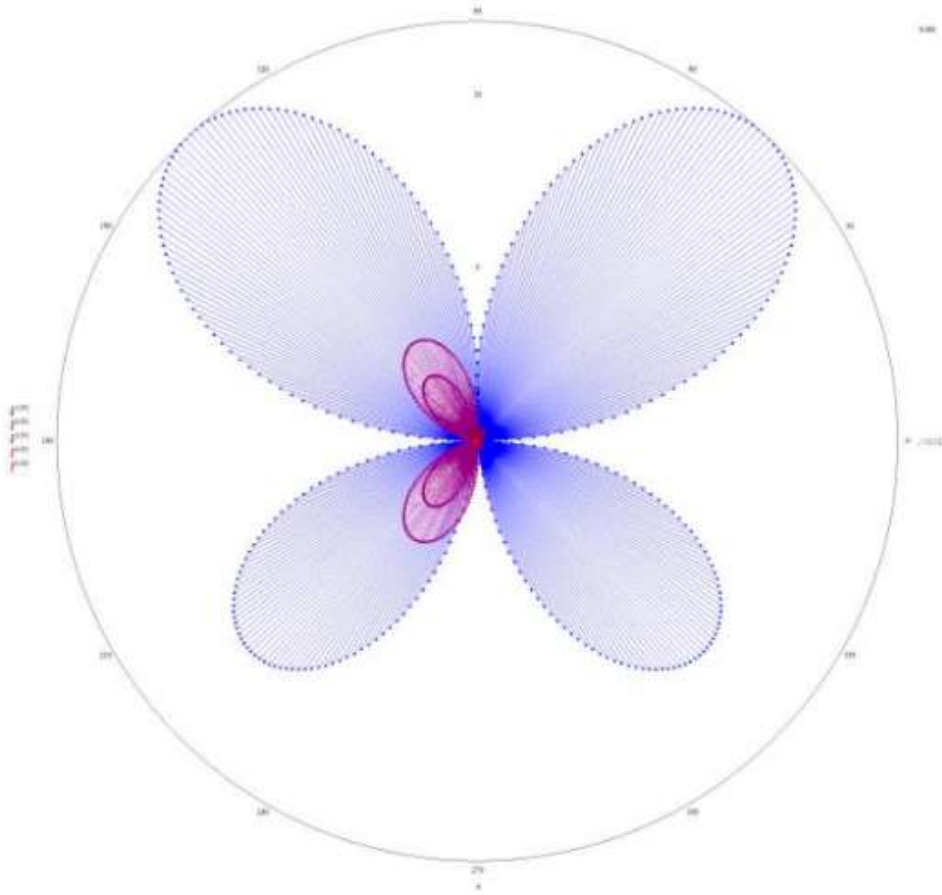


Рисунок 2.3 – Характеристика спрямованості АВ гвинта БПЛА [12]

На рис 2.4 відображено зміну звукового тиску залежно від віддалення від джерела АВ, а саме, гвинта БПЛА. Рівень звукового тиску змінюється приблизно на 6 Дб при кожному подвоєнні відстані r від джерела шуму.

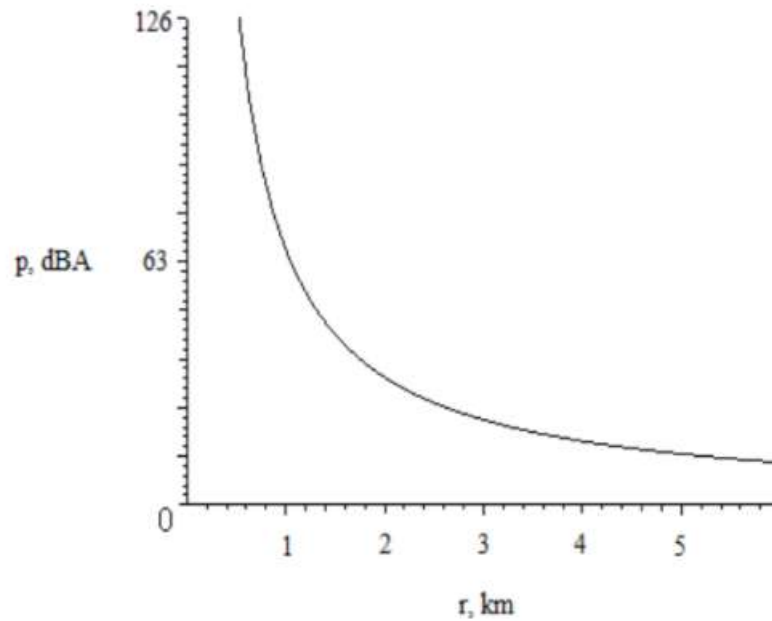


Рисунок 2.4 – Графік залежності звукового тиску від відстані до гвинта БПЛА

2.2 Аналіз шуму навколишнього середовища

Акустичне забруднення при вимірювання може створювати досить великі похибки. Для запобігання цього, при можливості, об'єкт дослідження потрібно ізолювати або, при аналізі отриманих даних враховувати корективи, що були внесені фоновими шумами навколишнього середовища.

Акустичним шумом прийнято вважати випадкові звукові коливання, які виникають у наслідок різноманітних фізичних явищ, що характеризуються випадковими значеннями частоти, амплітуди та інших параметрів.

Акустичний шум при вимірюванні на відкритих місцевостях зумовлюється великою кількістю активних джерел АВ, що виникають у наслідок діяльності людини або техніки (техногенні шуми), та природних явищ, зокрема вітром, дощем, тощо.

Вітер виникає у наслідок нерівномірності повітряних мас у атмосфері та їх переміщеннях відносно один одної. Чим більша висота над рівнем земної

поверхні, тим вища швидкість вітру. Як правило, у низьких шарах атмосфери швидкість коливається від 5 до 10 м/с.

Під час дощу акустичні вимірювання майже неможливі, адже шумовий фон зіткнення крапель води з різними поверхнями має велику інтенсивність та, хоч и періодичну, але випадкову складову, що частково буде співпадати зі спектром АВ БПЛА та перекривати його.

Але навіть при відсутності вітру та дощу рівень звукового тиску матиме випадкову величину. На це впливають такі фактори, як: температура, вологість, рівень атмосферного тиску, тощо.

Джерела антропогенного шумового забруднення [13] умовно можна поділити на:

- механічні, що виникають у наслідок взаємодії або руху різних деталей агрегатів, механізмів тощо;
- електромагнітні, джерелами яких можуть виступати електромеханічні прилади, наприклад трансформатори, дроселі, ротори та інші;
- аеродинамічні, спричинені у наслідок роботи двигунів ЛА, охолоджувальних систем тощо;
- гідродинамічні, виникнення яких обумовлено процесами у рідинах
- імпульсивні та вибухові, що виникають у наслідок роботи ДВЗ, дизельних установок тощо.

Приклади спектрів джерел шуму можна побачити на рисунку 2.5, де 1 – спектр турбореактивного двигуна, 2 – осьового вентилятора, 3 – транспортний шум, 4 – удари ручного будівельного інструмента.

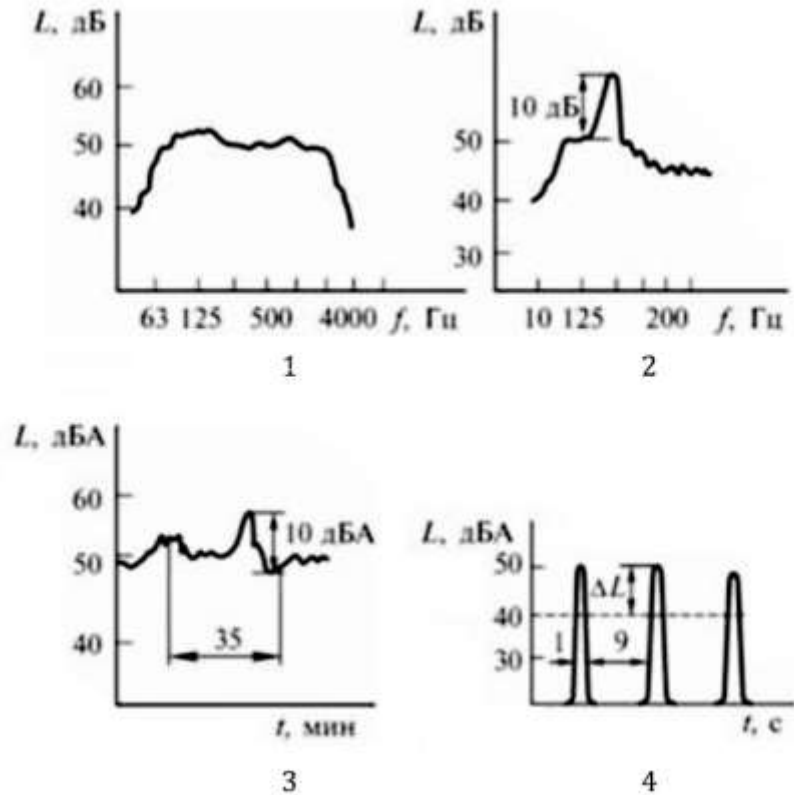


Рисунок 2.5 – Приклади зображень спектрів і часових реалізацій антропогенних джерел акустичного шуму

Згідно дослідженням [14] Європейського агентства з оточуючого середовища (ЕЕА), найбільш розповсюдженим видом шуму є шум від автомобільних та залізних доріг, тобто транспортний (рис. 2.6). Наступним йде шум від роботи аеропортів та промислових об'єктів (рис. 2.7.).

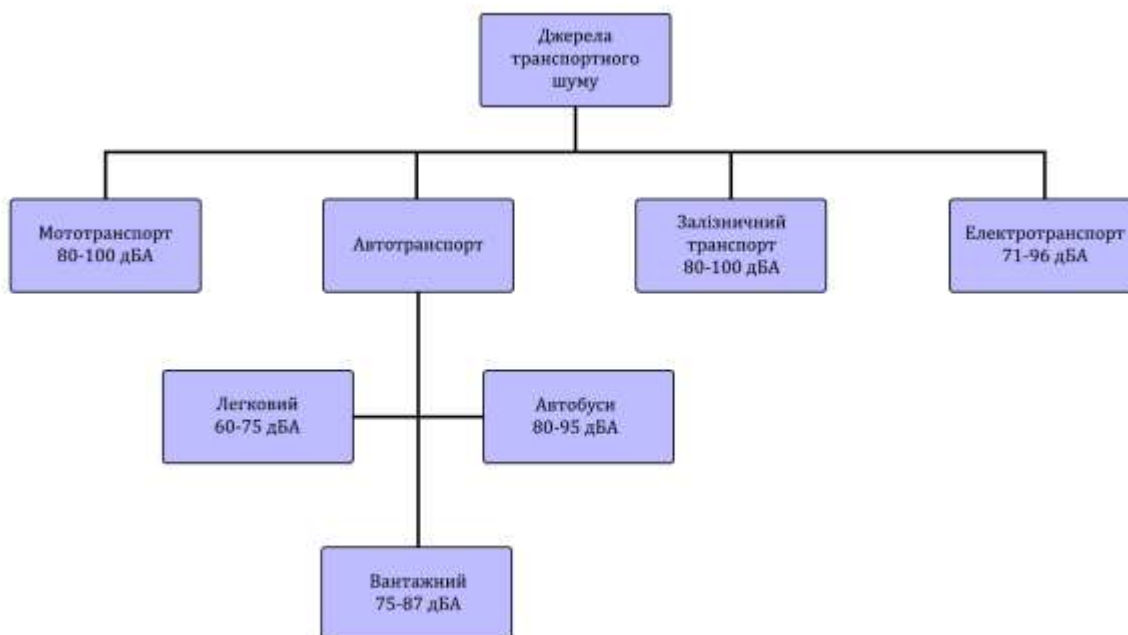


Рисунок 2.6 – Види джерел транспортного шуму

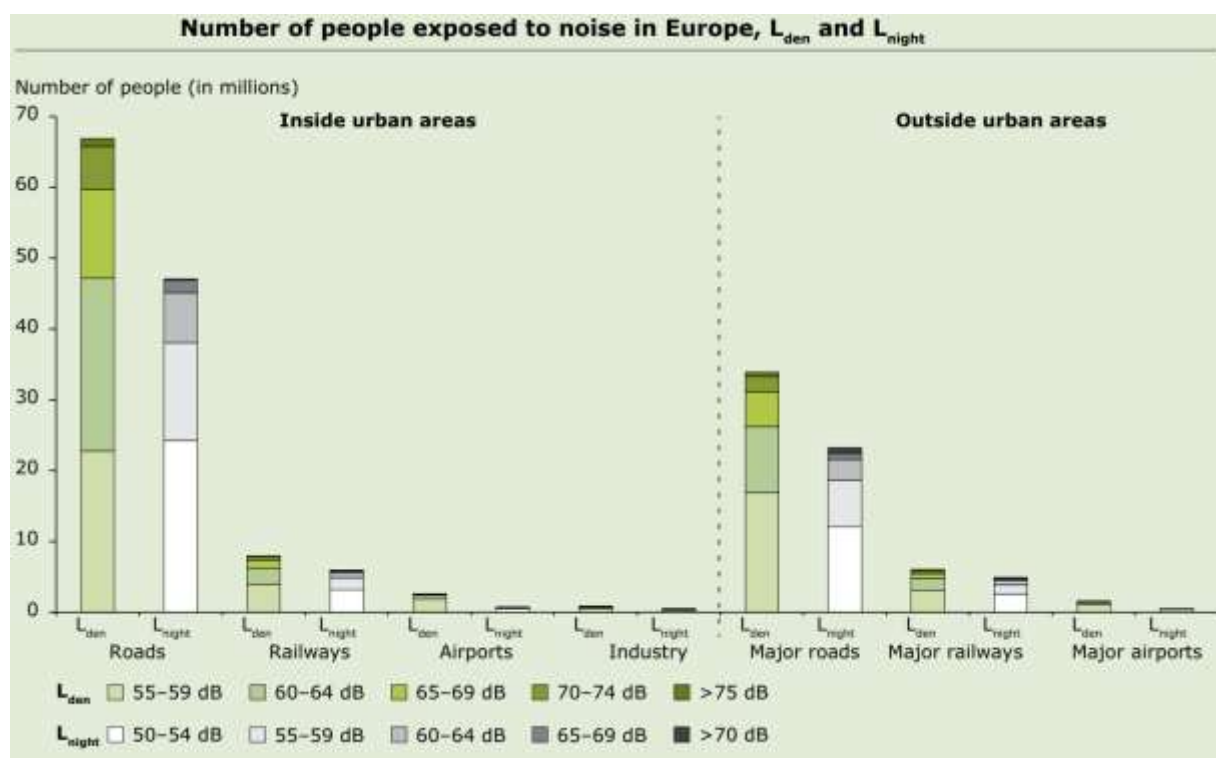


Рисунок 2.7 – Графік кількісної оцінки видів акустичного шуму в залежності від кількості відгуків населення та рівню потужності кожного виду шуму [14]

2.3 Методика розрахунку загасання звуку на місцевості

Як було попередньо зазначено, вагомою складовою акустичного методу виміру являють собою фонові шуми, проте є чимало інших особливостей, про котрі теж варто відмітити, а саме, загасання та відбиття АВ на місцевості.

Це варто враховувати для правильної інтерпретації результатів, отриманих при вимірюванні на місцевості.

Згідно [15] існує метод розрахунку загасання звуку при розповсюдженні на місцевості, який можна використовувати для прогнозування рівнів шуму на відстані від джерел шуму з відомим випроміненням, за умови придатних для розповсюдження звуку метеорологічних умов.

Метод надає можливість провести розрахунки у смугах частот від 63 до 8000 Гц для точкового джерела, або групи точкових джерел, незалежно від того, рухомі вони чи ні. Для розрахунку потрібно знати параметри навколишньої середовища, характеристики поверхні АВ, геометричні параметри джерела звуку та його рівні звукової потужності у напрямленні поширення.

Отже, загасання АВ в навколишньому середовищі може відбуватися через такі фактори:

- 1) Геометрична дивергенція – це затухання у вільному просторі через розбіжність звукової енергії, яке відбувається у результаті сферичного розповсюдження звуку точкового джерела шуму.

Вирахувати можна за допомогою виразу:

$$A_{div} = \left[20 \cdot \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \right], \quad [2.3]$$

де d – відстань від джерела звуку до приймача, м; d_0 – опорна відстань ($d_0 = 1$ м).

- 2) Звукопоглинання атмосферою на відстань від джерела АВ визначається:

$$A_{atm} = \frac{\alpha d}{1000}, \quad [2.4]$$

де α – коефіцієнти загасання звуку в октавній смузі частот а атмосфері, частина яких представлена на рисунку 2.8.

Температура, °С	Відносна вологість, %	Коефіцієнт загасання звуку в атмосфері α , дБ/км, в октавних смугах із середньгеометричною частотою,							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

Рисунок 2.8 – Коефіцієнти загасання звуку в атмосфері в активних частотах

- 3) Вплив земної поверхні виражається в інтерференції віддзеркалених звукових хвиль з хвилями прямого звуку. Розрахунок цього фактору можливий при умові майже плоскої поверхні.
- 4) Загасання через екранування. Екраном можна вважати об'єкт , якщо:
 - його поверхнева щільність не менша 10 кг/м²;
 - його поверхня не має отворів або проміжків;
 - горизонтальний розмір перпендикулярний напрямку між джерелом та приймачем має більшу довжину, ніж звукова хвиля λ з частотою, яка дорівнює середньо-геометричній частоті октанової смуги, тобто $l_l + l_r > \lambda$ (рис. 2.9).

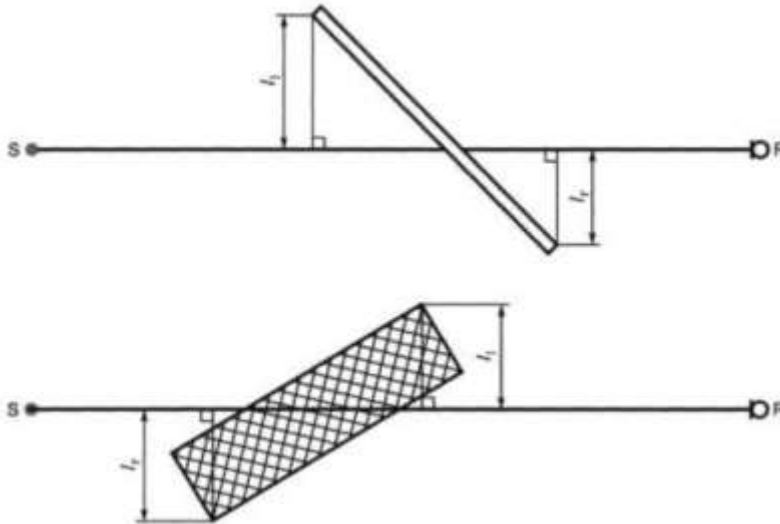


Рисунок 2.9 – Вид зі сторони на два екрана між джерелом шуму та приймачем

5) Загасання через листя має незначний рівень впливу, за виключенням коли воно дуже густе.

Що стосується точності та обмежень розрахунку загасання АВ, то вони залежать також від метеорологічних умов протягом шляху розповсюдження звукової хвилі. Найсильніший вплив мають: дощ, снігопад, вітер та туман.

2.4 Загальні відомості про тривимірне моделювання

Під тривимірною візуалізацією мається на увазі отримання зображення сцени з об'єктами або явищами по заданим параметрам. Структура моделей та метод візуалізації (рендеринг) вибирається у відповідності з поставленою задачею.

Моделювання – створення віртуального простору та об'єктів усередині нього, що включає створення різних геометрій, матеріалів, джерел світла, віртуальних камер, додаткових спецефектів.

Умовно моделювання у 3D-графіці можна поділити на такі види:

- полігональне;
- аналітичне;
- фрактальне;
- сплайнове.

Принцип моделювання об'єктів заснований їх на побудові з полігонів, сплайнів (кривих ліній) або модифікаторів за допомогою формул або мап висот. Полігонами в моделюванні називають три та більше вершин, які з'єднанні площиною. У зв'язку з технологічними особливостями, полігони мають бути трикутними або чотирикутними. Допускається використання багатокутників, але на плоских поверхнях.

Найбільш поширеними програмними продуктами для 3d-моделювання є Autodesk 3D Max та 3D Maya, Pixologic Zbrush, Maxon Cinema 4D, Blender.

Освітлення є невід'ємною частиною тривимірної візуалізації. Це процес створення та встановлення напряму джерел освітлення, налаштування їх параметрів для забезпечення потрібного візуального сприйняття. Графічні 3d-редактори, як правило, використовують такі види джерел світла (рис 2.10):

- точкове освітлення (spot light), промені котрого виходять з однієї точки,
- всеспрямоване освітлення (omni light), одним із різновидів є освітлення HDRI-мапами, картинками, що «обретаються» навколо сцени;
- спрямоване освітлення, що має паралельні промені (direction light),
- просторове освітлення (area light).

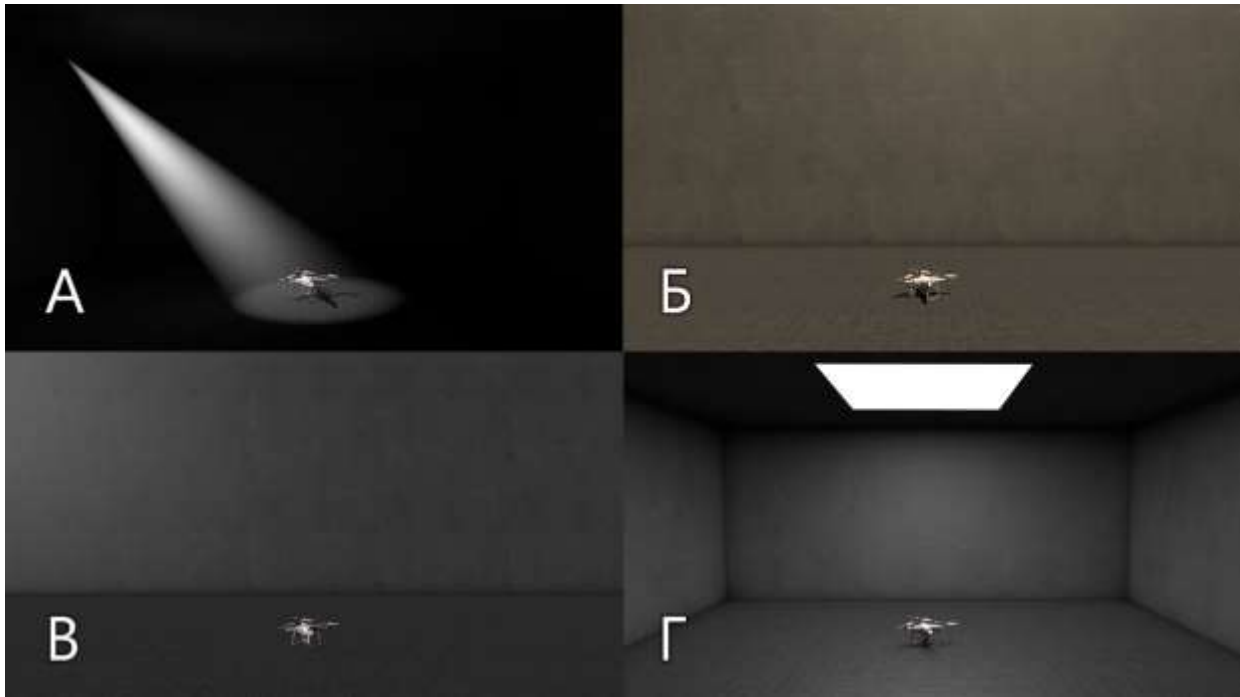


Рисунок 2.10 – Зображення видів освітлення на прикладі зі сценою із БПЛА: точкове (А), всеспрямоване (Б), спрямоване (В) та просторове (Г)

Анімація – створення віртуальної сцени, де об'єкти рухаються, та/або взаємодіють з іншими об'єктами чи явищами. Сучасні 3D-редактори містять безліч інструментів для створення детальних та фізично коректних анімацій, де поведінка об'єктів прораховується відповідно законам фізики.

Із розвитком технологічного процесу, експерименти та розрахунки потрібні все складніші. Їх складність може закладатись у багатьох факторах, наприклад, дорожнечі експерименту або відсутності сприятливих умов. У цьому випадку може підійти тривимірне моделювання. Сучасні обчислювальні машини мають непогані потужності для здійснення складних дослідницьких експериментів у віртуальному просторі.

Умовно, поділити системи планування проведення наукових експериментів [16] можна на:

- системи орієнтовані на виявлення взаємно-суперечних з технічного зору вимог та формування на основі цього циклограм керування комплексом наукової апаратури,

- системи, що націлені на формування плану, найбільш ефективного з наукової точки зору, враховуючи технічні обмеження.

Відповідно до цілей систем у них використовують і різні графічні форми подачі даних. У системах першого типу - це в основному графіки, карти, діаграми, тобто двовимірні візуалізації; тривимірні графіки, якщо і застосовується, то зазвичай без текстуровання або об'єкти чи їх частини забарвлюються одним кольором відповідно до значень будь-яких характеристик, що відображаються. Зустріти таку візуалізацію [16] можна наприклад у системі планування польоту БПЛА (рис 2.11).



Рисунок 2.11 – Система планування польоту БПЛА з багаточисленними перевірками

У системах другого виду, навпаки, зазвичай надають найбільш реалістичний вигляд. Наприклад система прорахунку швидкостей повітряних потоків БПЛА та гвинта БПЛА на рисунках 2.12 та 2.13.

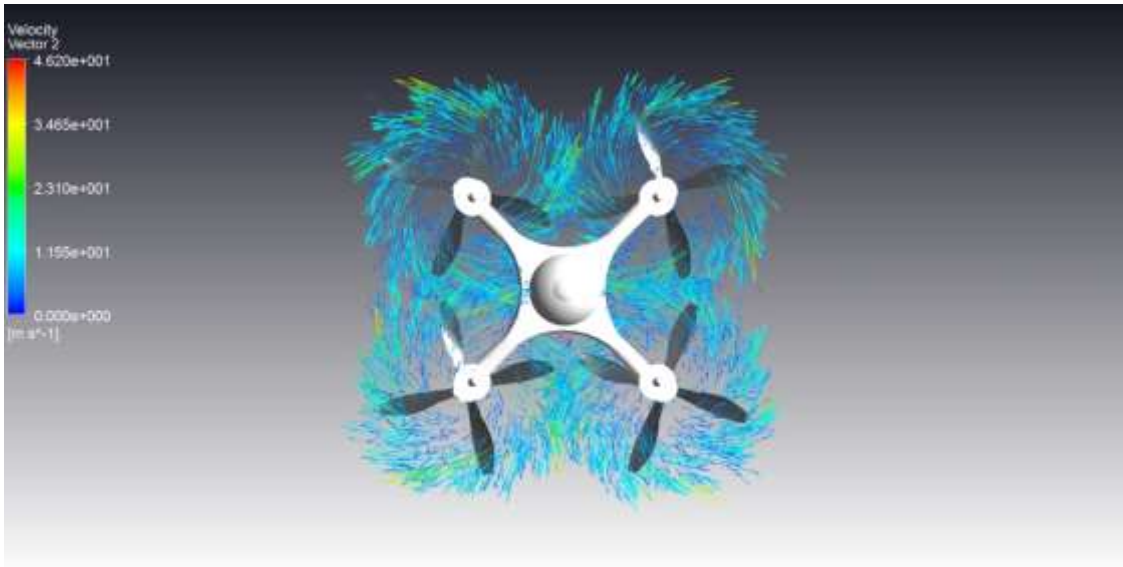


Рисунок 2.12 – Тривимірна візуалізація векторів та швидкостей повітряних потоків, що набігають з усіх гвинтів БПЛА

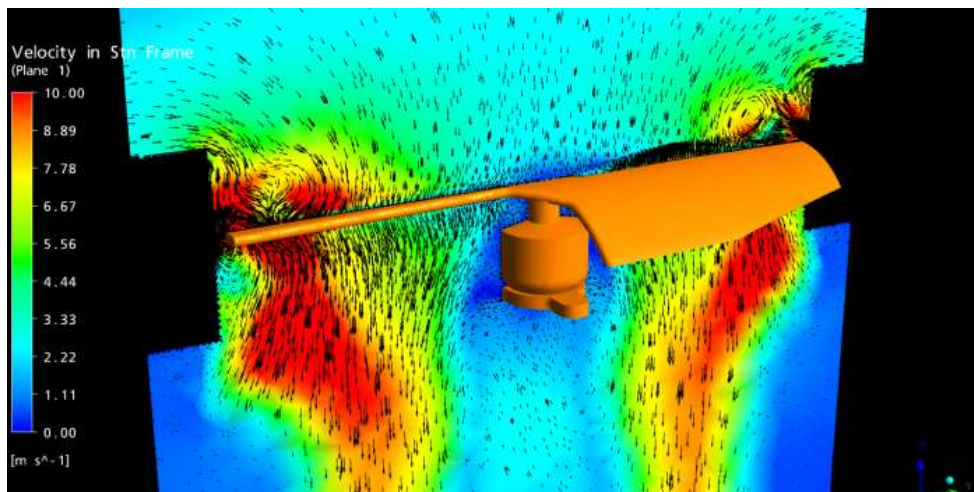


Рисунок 2.13 – Тривимірна візуалізація векторів та швидкостей повітряних потоків, що набігають з гвинта БПЛА

Фінальним етапом візуалізації вважається рендеринг.

Рендеринг – процес прорахунку всіх складових сцени (геометрії, матеріалів, освітлення, відображень поверхонь та ін.), у результаті якого виходить зображення або послідовність зображень анімації (секвенція кадрів).

Рендером, також, називають готове зображення, яке не було оброблено програмними засобами після прорахунку.

2.5 Висновки по розділу 2

Згідно аналізу, можна встановити, що головний фактор негативного впливу на акустичне виявлення та вимірювання є шумове забруднення навколишньої середовища. Для виявлення та подальшого розпізнавання БПЛА у забрудненому шумом сигналі потрібно відділити спектр БПЛА від спектру шуму.

Також не менш важливим фактором, який потрібно враховувати при використанні акустичних вимірювань це загасання. Причин загасання чимало: затування у вільному просторі, звукопоглинання атмосферою, віддзеркалення АВ земною поверхнею, різноманітні перешкоди, які блокують вільне розповсюдження звукових хвиль (екрани) та загасання через листя на місцевості.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК СПРЯМОВАННОСТІ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ БПЛА

3.1 Експериментальна установка для вимірювання та дослідження діаграми спрямованості акустичного випромінювання

Задля мінімізації впливу шумів навколишнього середовища експеримент проводився у «заглушеній» камері розмірами 3м*3м*2.5м (ширина*довжина*висота), стіни якої покриті звукопоглинальними панелями із поверхнею спеціальної геометричної форми, що має вигляд пірамід (рис 3.1).

Мікрофон було закріплено на металевій жорстко закріпленій штанзі, яка має можливість обертання навколо об'єкту дослідження та фіксації у необхідному положенні.



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд звуко-поглинаючих акустичних панелей

Об'єктом дослідження виступав БПЛА громадянського типу «Dji Phantom 3», рисунок 3.2, із такими характеристиками:

- тип планера: мультикоптер;
- кількість гвинтів: 4;

- кількість лопатей на гвинтах: 2;
- тип двигунів: електричні;
- маса: 1280 грам;
- максимальний час польоту: 25 хвилин;
- максимальна швидкість польоту: 58 км/год;
- максимальна висота польоту: 500 м.



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд БПЛА «Dji Phantom 3» та його апаратури керування

Акустичне випромінювання об'єкту дослідження було записано на мікрофон «Superlux ECM999» (рис 3.3) з такими характеристиками:

- тип: конденсаторний;
- характеристика спрямованості: неспрямований;
- частотний діапазон: 20 Гц - 20 кГц;

- динамічний діапазон: 106 дБ;
- сигнал/шум: 70 дБ;
- імпеданс: 200 Ом;
- максимальний звуковий тиск: 132 дБ;
- матеріал корпусу: метал.



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд мікрофону «Superlux ECM999»

Для проведення експерименту потрібно використовувати саме конденсаторний мікрофон, адже він, на відміну від динамічного або стрічкового, може записувати звук більш об'ємно, чисто та детально. Принцип його роботи заснований на металевих мембранах, котрі починають рухатися від коливань повітря та перетворюють їх у електричний сигнал. Для роботи мікрофону конденсаторного типу потрібне додаткове живлення (фантомне живлення), яке надається зовнішньою звуковою картою або попереднім підсилювачем.

Частотна характеристика таких мікрофонів дозволяє охоплювати діапазон частот навіть більший, ніж діапазон, що чує людина.

Недоліком можна вважати сильну чутливість до шумів навколишнього середовища та вібрацій. Тому при використанні конденсаторних мікрофонів потрібно встановлювати поп-фільтри та антивібраційні кронштейни.

Підключено мікрофон було до звукової карти «Behringer U-Phoria UMC404HD» по зовнішньому аудіо-інтерфейсу XLR , яка забезпечує наявність усіх необхідних роз'ємів підключення апаратури для запису акустичного випромінювання (рис 3.4).



Рисунок 3.4 – Структурна схема експериментальної установки

3.2 Опис експерименту акустичного вимірювання

Експеримент проводився спільно із співробітниками кафедри МІРЕС у декілька етапів:

1) Тестові заміри АВ БПЛА для встановлення оптимальної відстані (точок у просторі) джерела звуку до мікрофону. Під час тестових замірів було встановлено, що відстані у 1м достатньо для мінімізації впливу повітряного потоку від лопатей на запис та отримання результатів вимірювання придатних для подальшої обробки програмними засобами. Також було підібрано

характеристики каналу запису задля забезпечення максимального динамічного діапазону.

2) Запис АВ БПЛА у вертикальній площині із кроком у 15° , починаючи від 0° , закінчуючи до 180° . Точки у просторі, у яких проводився запис із вертикальним зміщенням позначено на рисунку 3.6 зеленим кольором.

На рисунках 3.5 та 3.6 «L» позначає відстань від БПЛА до мікрофону, та дорівнює 1м.

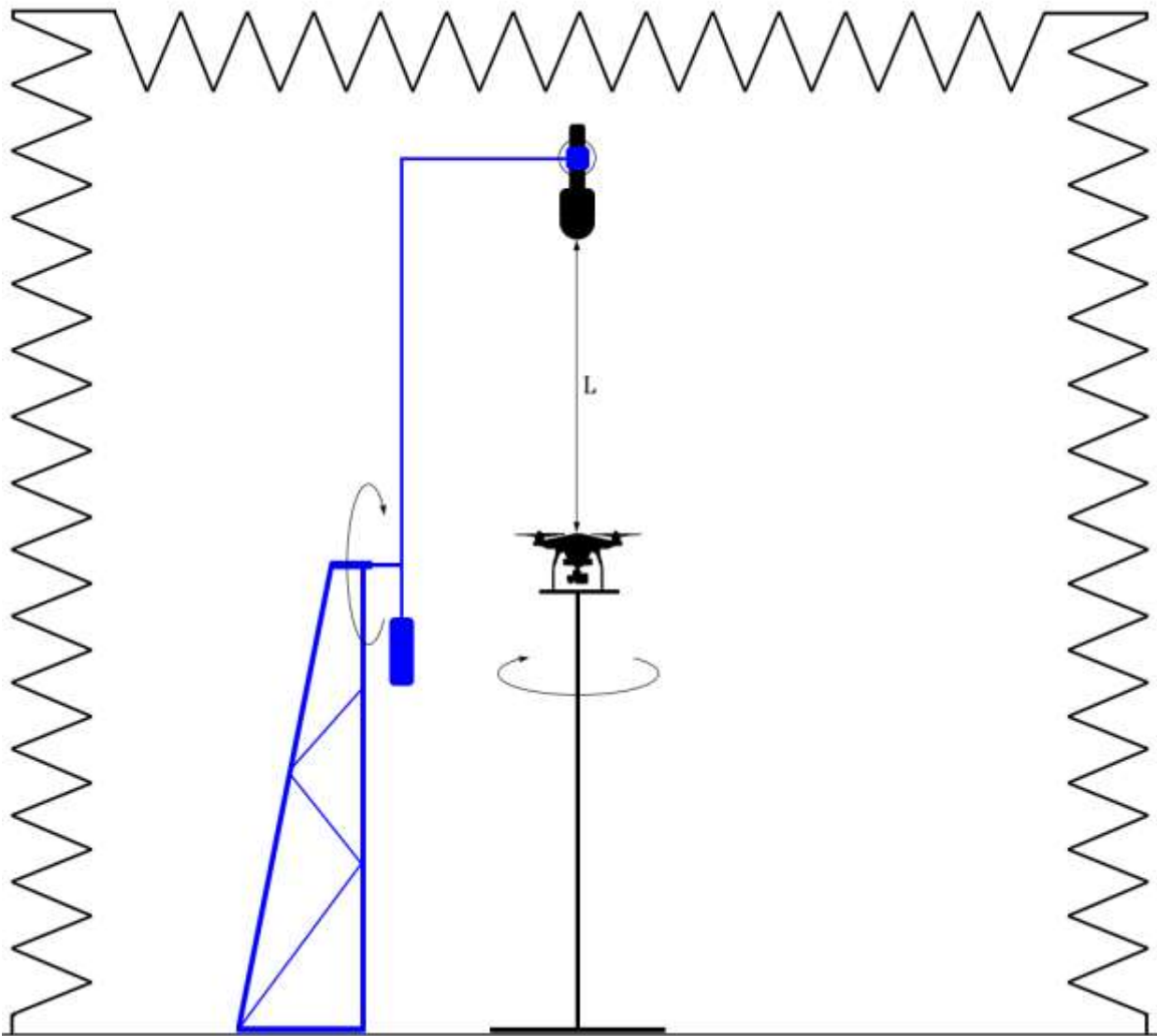


Рисунок 3.5 – Схема розташування компонентів експериментальної установки для вимірювання спрямованості акустичного випромінювання БПЛА у вертикальній площині, вид спереду

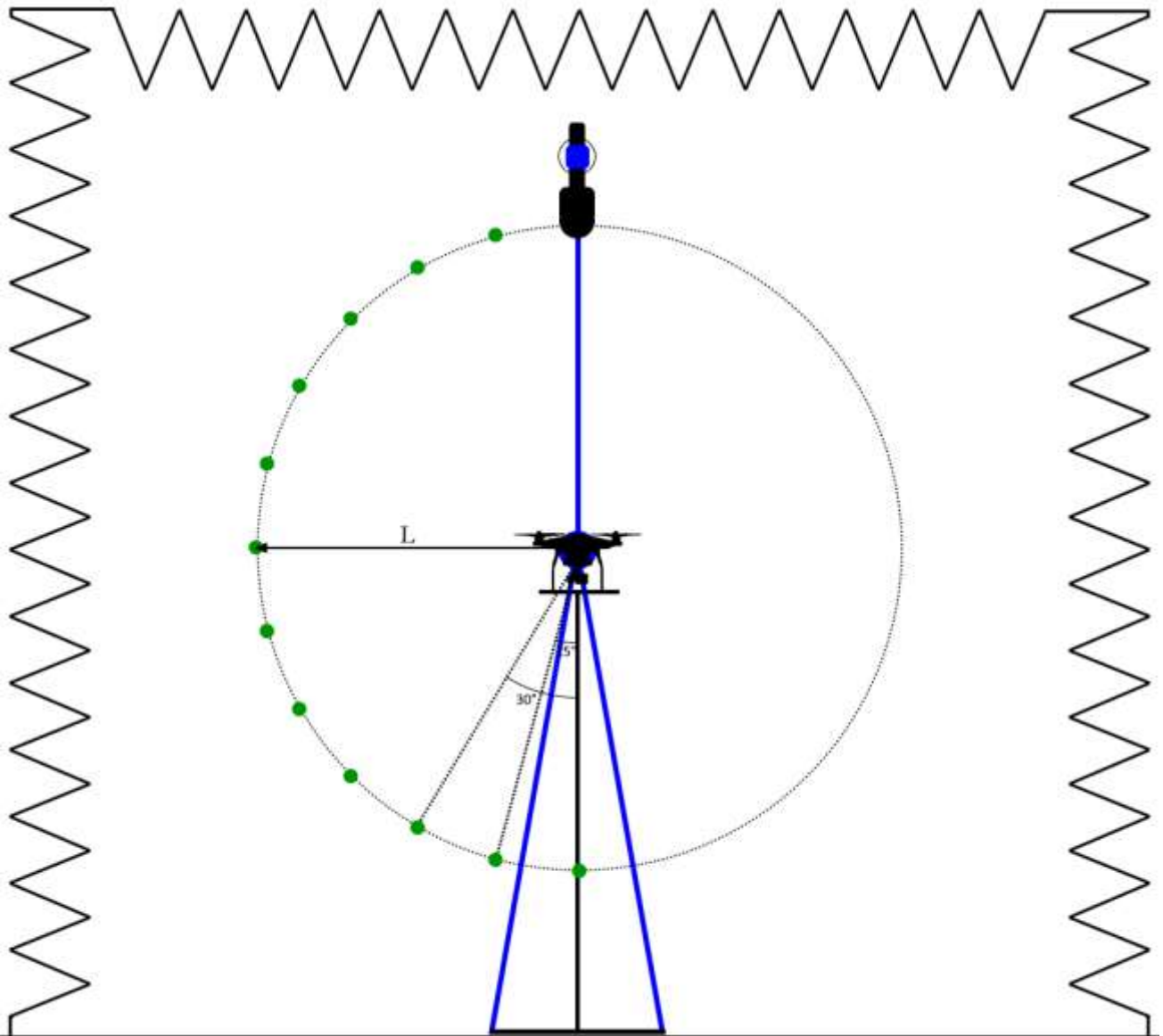


Рисунок 3.6 – Схема розташування компонентів експериментальної установки для вимірювання спрямованості акустичного випромінювання БПЛА у вертикальній площині, вид збоку

3) Запис АВ БПЛА у горизонтальній площині із кроком у 15° , починаючи від 0° , закінчуючи до 180° з метою отримання можливості змоделювати характеристику спрямованості у віртуальному просторі потрібно мати дані як у вертикальній площині, так і в горизонтальній. Точки у просторі, у яких проводився запис із горизонтальним зміщенням позначено (рис 3.7) червоним кольором.

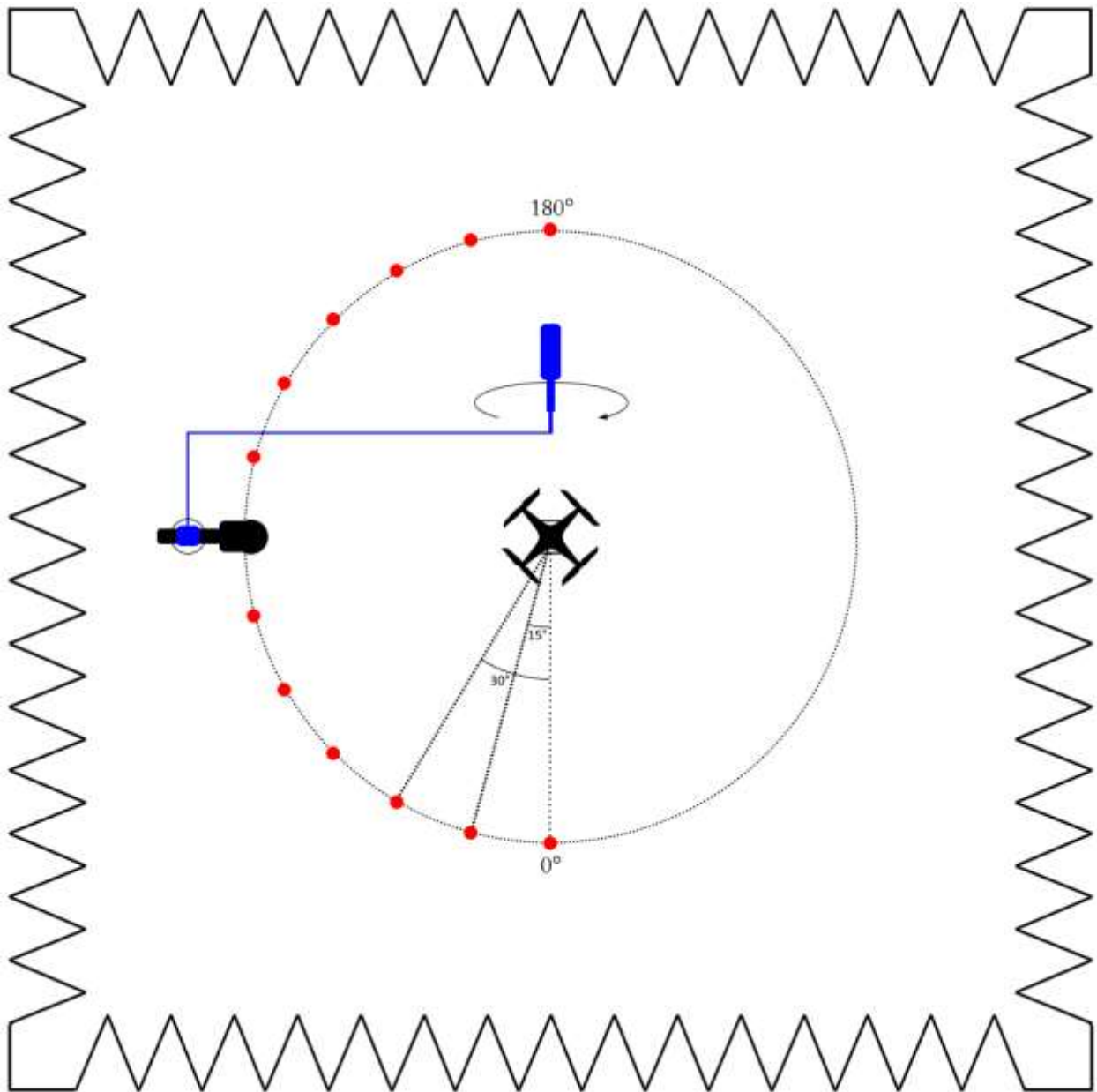


Рисунок 3.7 – Схема розташування компонентів експериментальної установки для вимірювання спрямованості акустичного випромінювання БПЛА у горизонтальній площині

Замір АВ проводився в першому випадку при відсутності та при наявності гвинтів на повній швидкості їх обертання, а у другому випадку у режимі статичного польоту безпілотнока (планування на місці).

3.3 Розрахункова частина експерименту визначення характеристик спрямованості АВ БПЛА

Після того, як АВ було записано єдиною звуковою доріжкою, його у програмному пакеті Sony Sound Forge, було нарізано на необхідні окремі фрагменти, що відповідають кожній точці у просторі, у котрій проводився запис.

За допомогою інструментів програмного пакету MathLab було зроблено спектральний аналіз складових сигналу. З рисунку 3.8 видно, що АВ БПЛА представляє собою широкопasmовий сигнал [17]. Найбільше значення потужності коливань сигнал має у частотному діапазоні до 500 Гц, де видно першу гармоніку, та далі, з періодичною складовою, йде на загасання до рівня шуму навколишнього середовища.

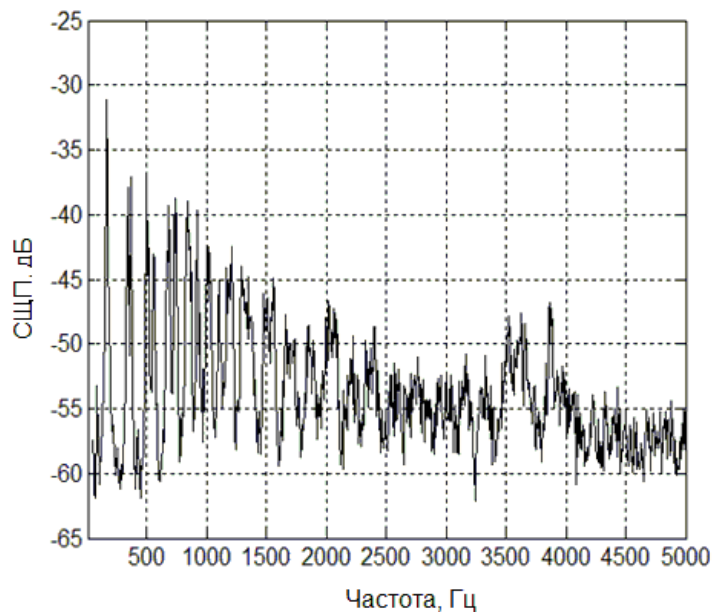


Рисунок 3.8 — Амплітудний спектр акустичного випромінювання квадрокоптера «Dji Phantom 3»

Якщо взяти дані заміру у перерізі для значення азимута 0° та виконати перетворення Фур'є, можна виділити 4 гармоніки, реалізації котрих зображено на рисунках 3.9 – 3.12.

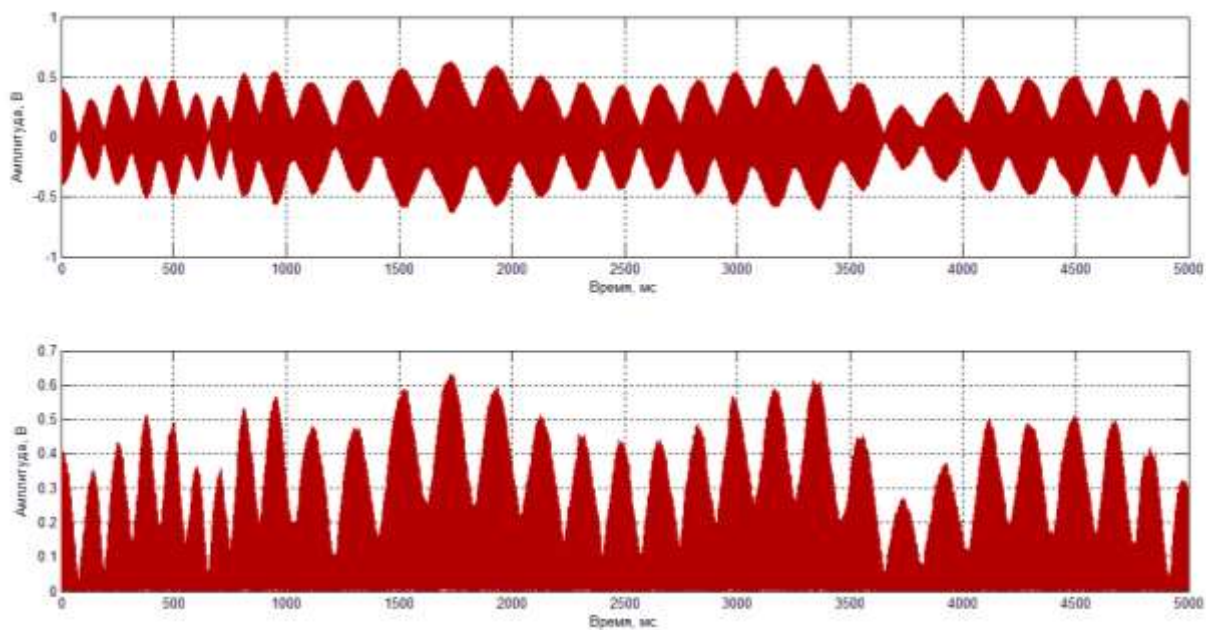


Рисунок 3.9 — Реалізація та модулі реалізації сигналу АВ БПЛА для першої гармоніки

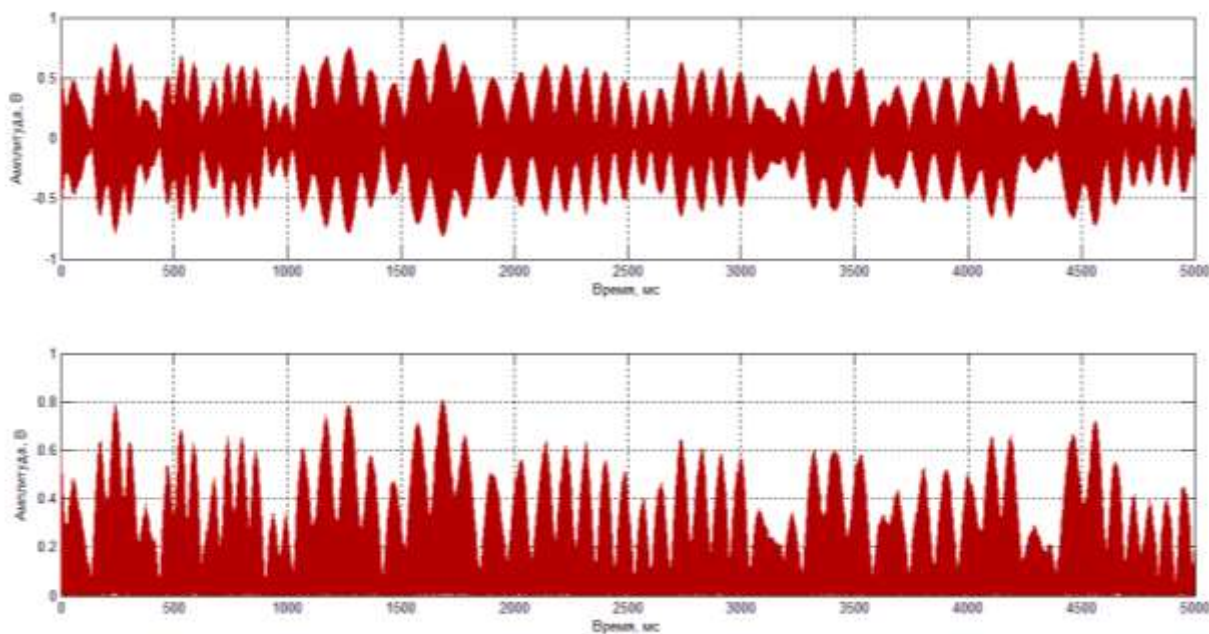


Рисунок 3.10 — Реалізація та модулі реалізації сигналу АВ БПЛА для другої гармоніки

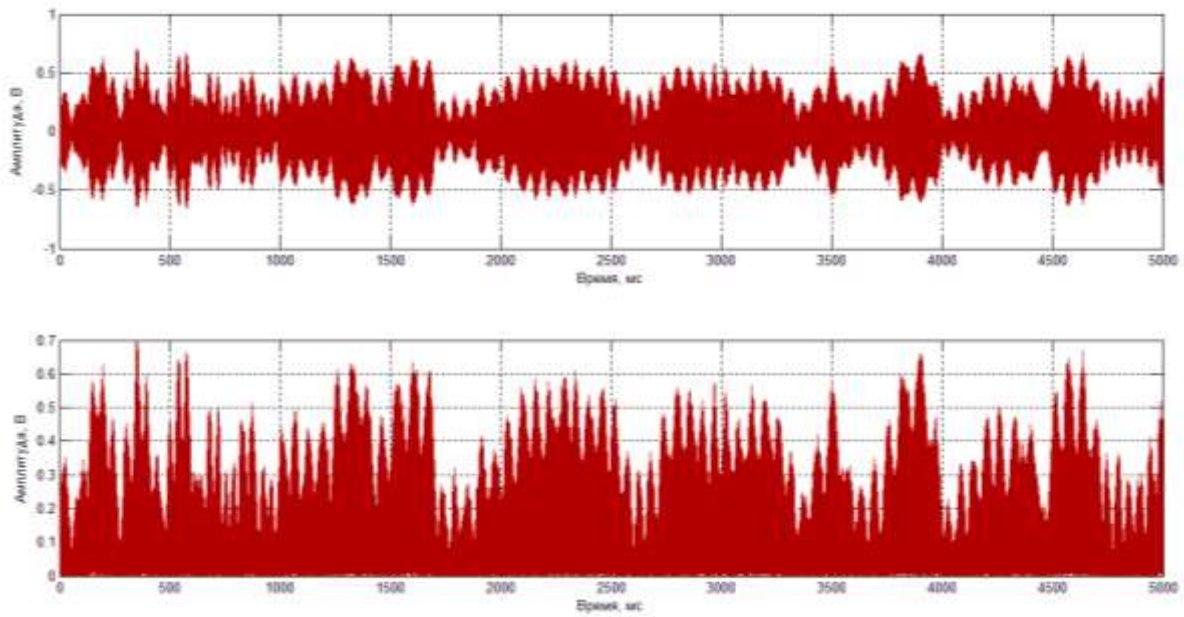


Рисунок 3.11 — Реалізація та модулі реалізації сигналу АВ БПЛА
для третьої гармоніки

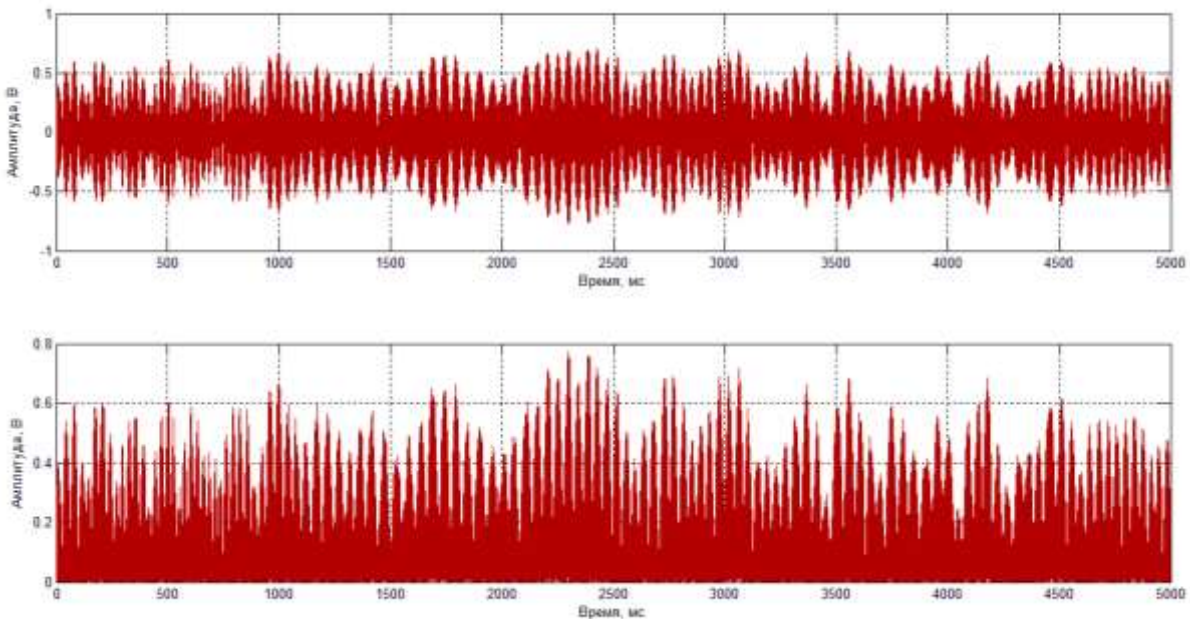


Рисунок 3.12 — Реалізація та модулі реалізації сигналу АВ БПЛА
для четвертої гармоніки

Оцінка рівня сигналу у кожному напрямі підраховується як сума амплітуд реалізацій, що були отримані із модуля реалізації.

Якщо побудувати діаграми спрямованості АВ БПЛА для випадку обертання усіх гвинтів на максимальній швидкості та окремо АВ двигунів, отримаємо зображення, яке має вид представлений на рисунку 3.13. Синім кольором позначено діаграму спрямованості АВ роботи гвинтів БПЛА, червоним, відповідно, електричних двигунів.

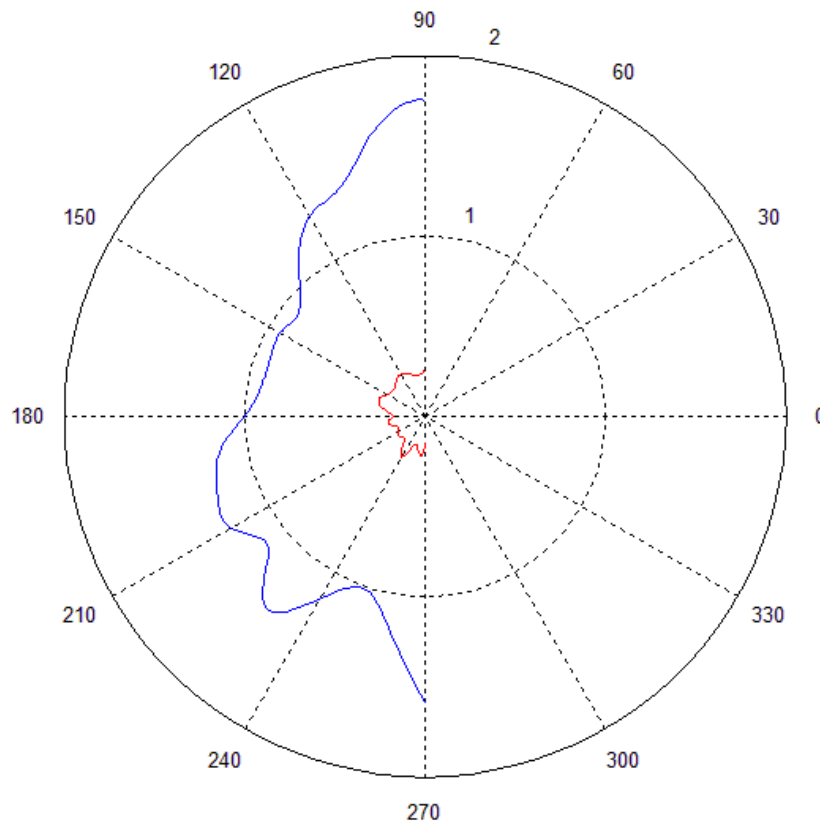


Рисунок 3.13 – Діаграми спрямованості АВ гвинтів та двигунів БПЛА

Виділивши гармонічні складові ми, також, маємо можливість побудувати діаграми спрямованості для чотирьох гармонік (рисунки 3.14 – 3.17).

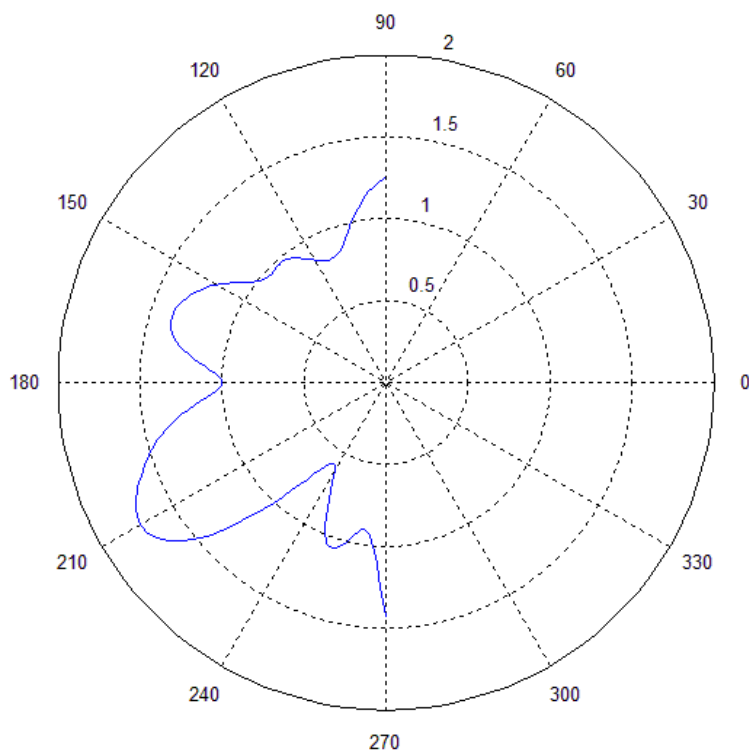


Рисунок 3.14 – Діаграма спрямованості першої гармоніки АВ БПЛА

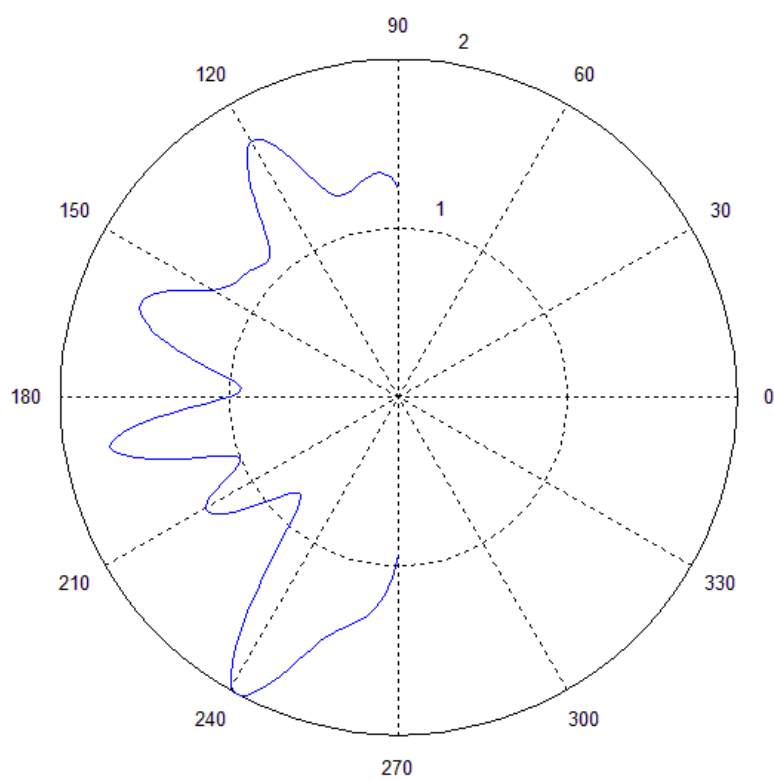


Рисунок 3.15 – Діаграма спрямованості другої гармоніки АВ БПЛА

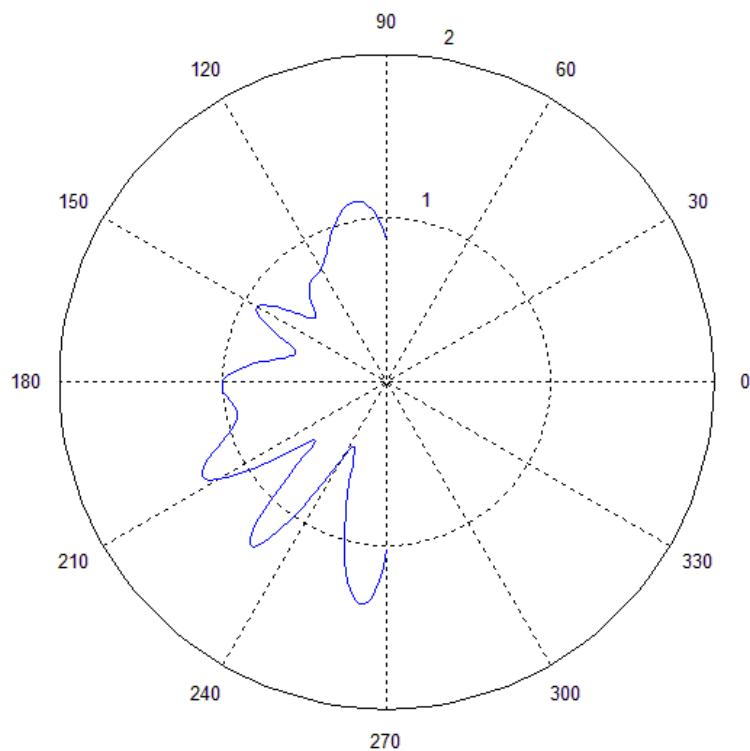


Рисунок 3.16 – Діаграма спрямованості третьої гармоніки АВ БПЛА

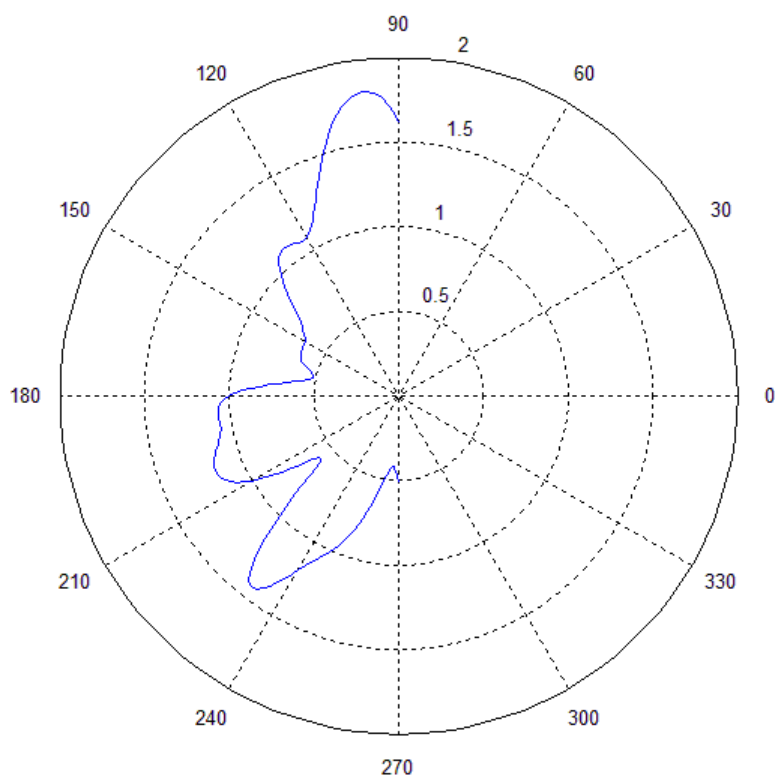


Рисунок 3.17 – Діаграма спрямованості четвертої гармоніки АВ БПЛА

Другим етапом було побудовано діаграми спрямованості для 13-ти перерізів вимірювання при значеннях азимутів: 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° , 105° , 120° , 135° , 150° , 165° та 180° (рис 3.18 - 3.22).

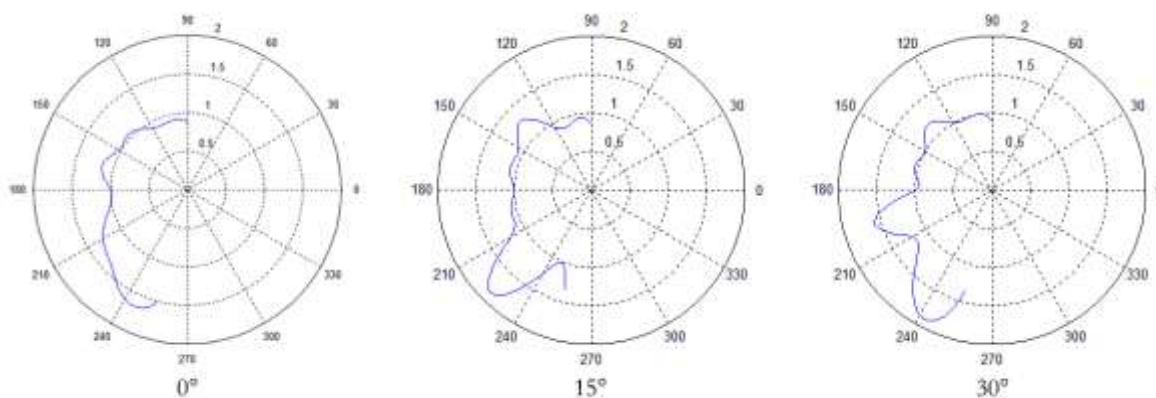


Рисунок 3.18 – Діаграми спрямованості АВ БПЛА при значеннях азимуту 0° , 15° та 30°

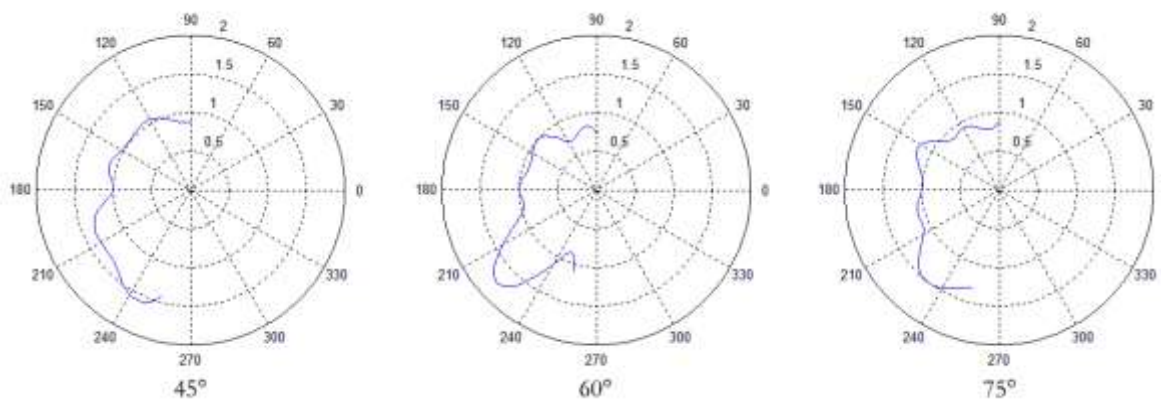


Рисунок 3.19 – Діаграми спрямованості АВ БПЛА при значеннях азимуту 45° , 60° та 75°

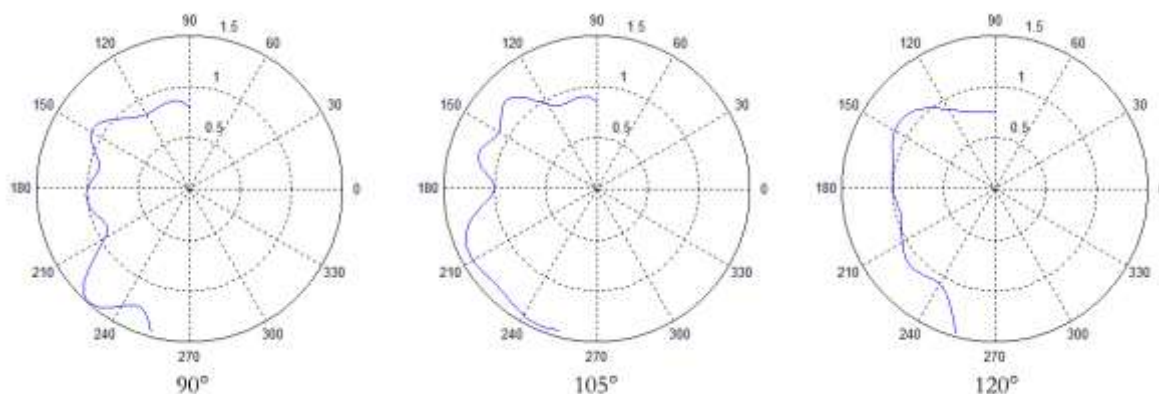


Рисунок 3.20 – Діаграми спрямованості АВ БПЛА при значеннях азимуту 90° , 105° та 120°

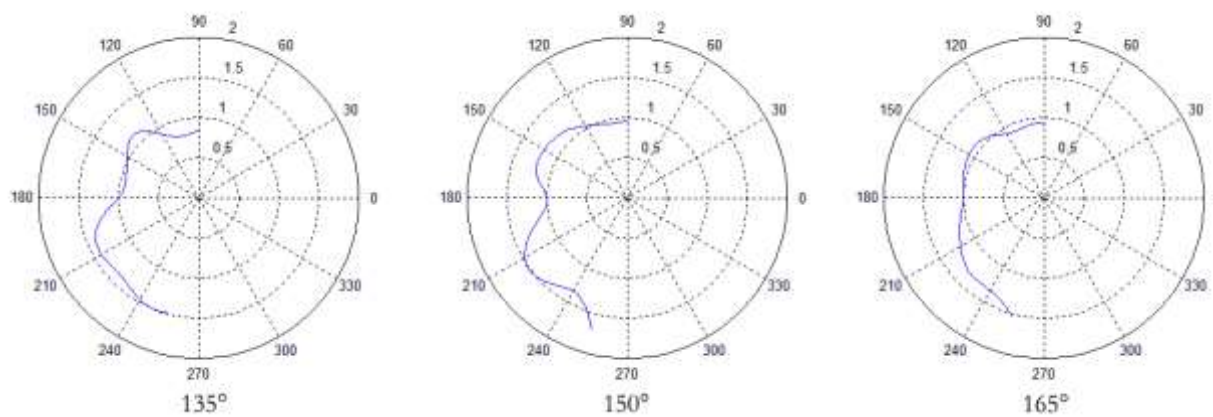


Рисунок 3.21 – Діаграми спрямованості АВ БПЛА при значеннях азимуту 135° , 150° та 165°

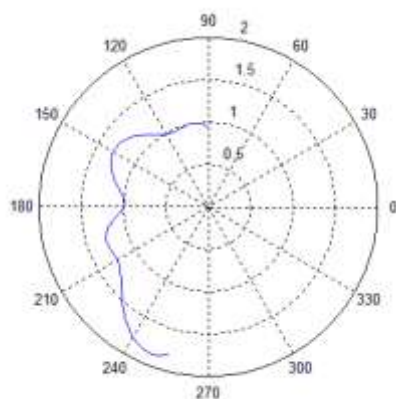


Рисунок 3.22 – Діаграма спрямованості АВ БПЛА при значенні азимуту 180°

3.4 Методика та візуалізація отриманих даних засобами 3D графіки

Після проведених розрахунків та отриманих, у результаті експерименту, діаграм спрямованості можна перейти до етапу тривимірного моделювання характеристики спрямованості БПЛА «Dji Phantom 3».

Програмним пакетом для реалізації тривимірних візуалізацій було обрано Maxon Cinema 4D. Широкий інструментарій по роботі з камерою та наявність великої кількості модифікаторів у цій програмі відмінно підходить для створення анімацій.

Моделювання результатів у тривимірному просторі проводилось комбінованим методом. Першим етапом було створення контурів моделі за допомогою сплайнів (рис 3.18), та у подальшому побудовані за цими сплайнами полігональної геометрії об'єкту.

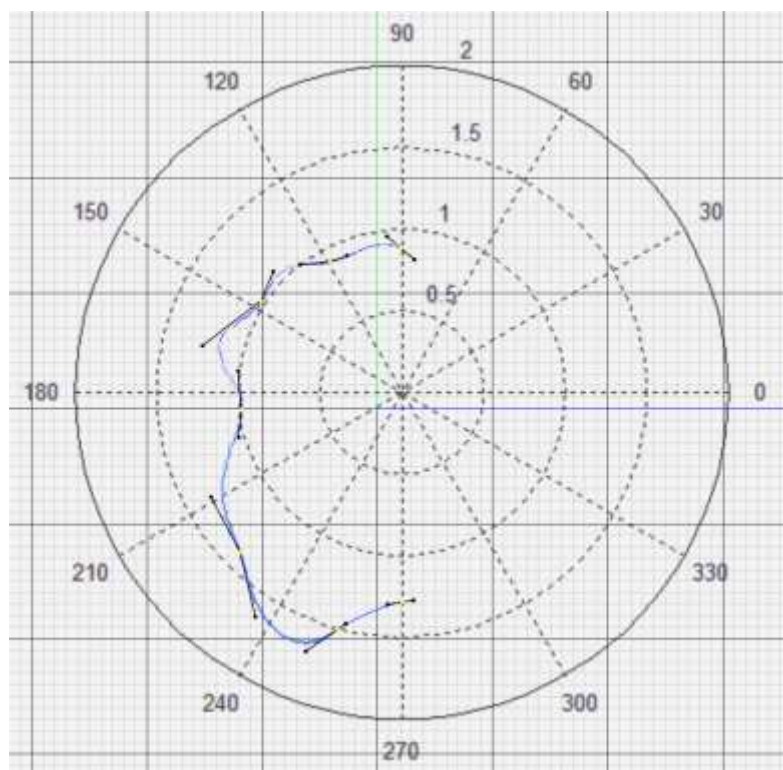


Рисунок 3.23 – Етап створення сплайну за діаграмою спрямованості для значення азимуту 0°

Застосовуємо модифікатор, який за контурами обертання сформованих сплайнів дозволяє отримати тривимірні фігури кожної з діаграм спрямованості для першого випадку, а саме для вимірювання в одному перерізі при максимальній швидкості обертання гвинтів (рис. 3.24 – 3.29)

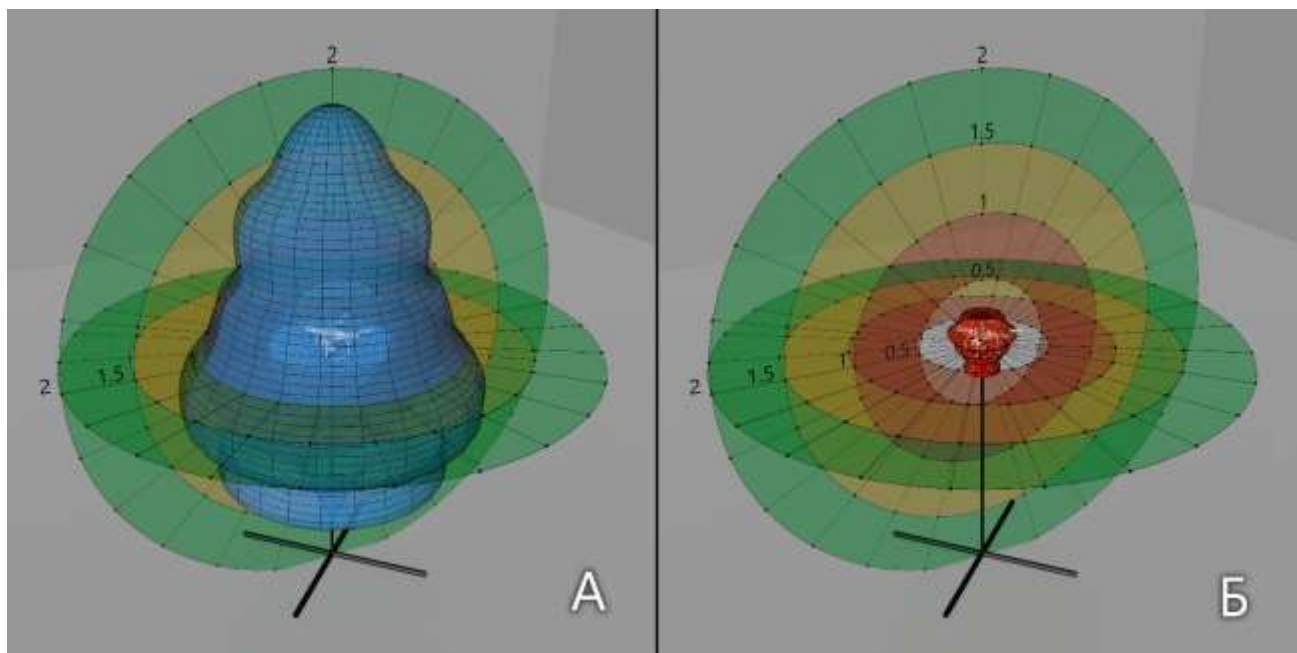


Рисунок 3.24 – Тривимірні діаграми спрямованості АВ роботи гвинтів (А) та двигунів (Б) БПЛА

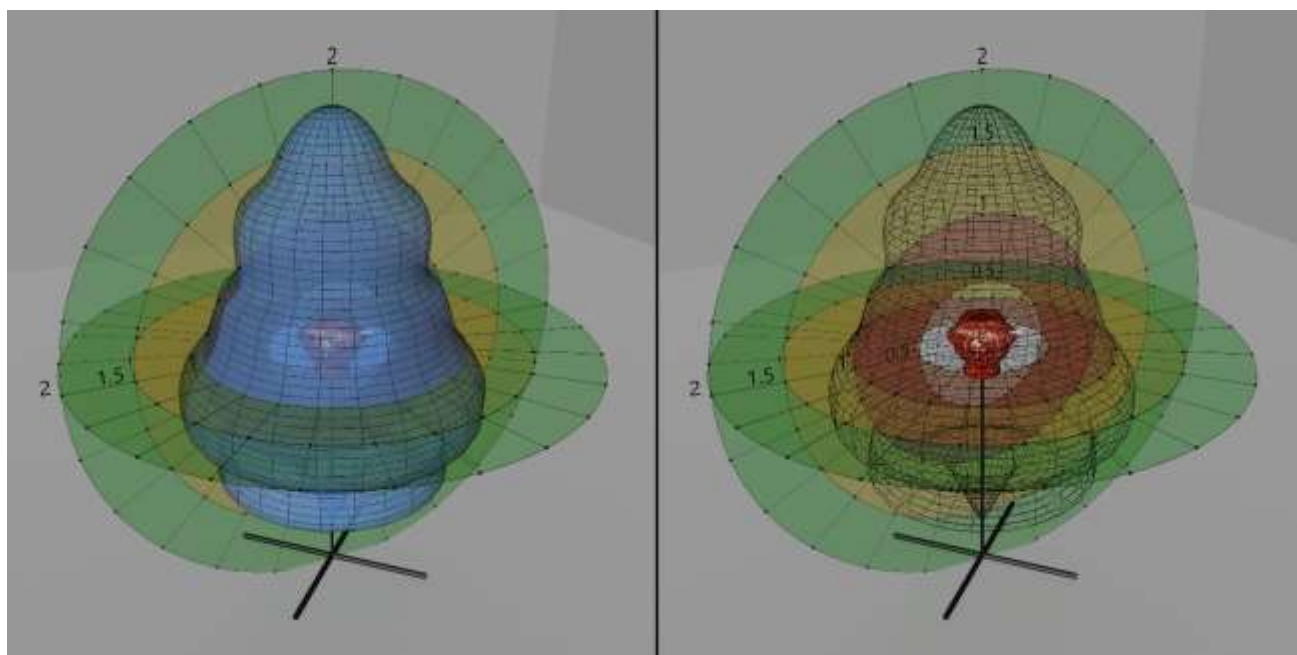


Рисунок 3.25 – Тривимірні діаграми спрямованості АВ роботи окремо гвинтів та двигунів БПЛА

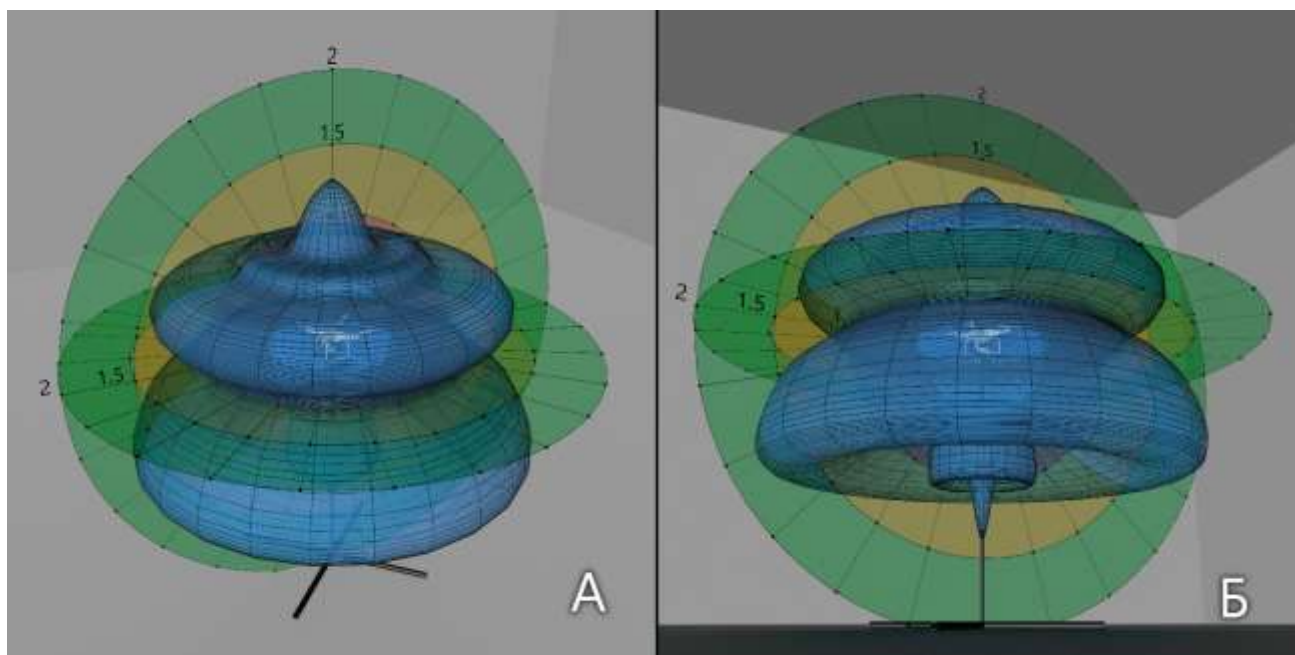


Рисунок 3.26 – Тривимірні діаграми заміру акустичної спрямованості АВ БПЛА в одному перерізі для 1 гармоніки, вид зверху (А) та знизу (Б)

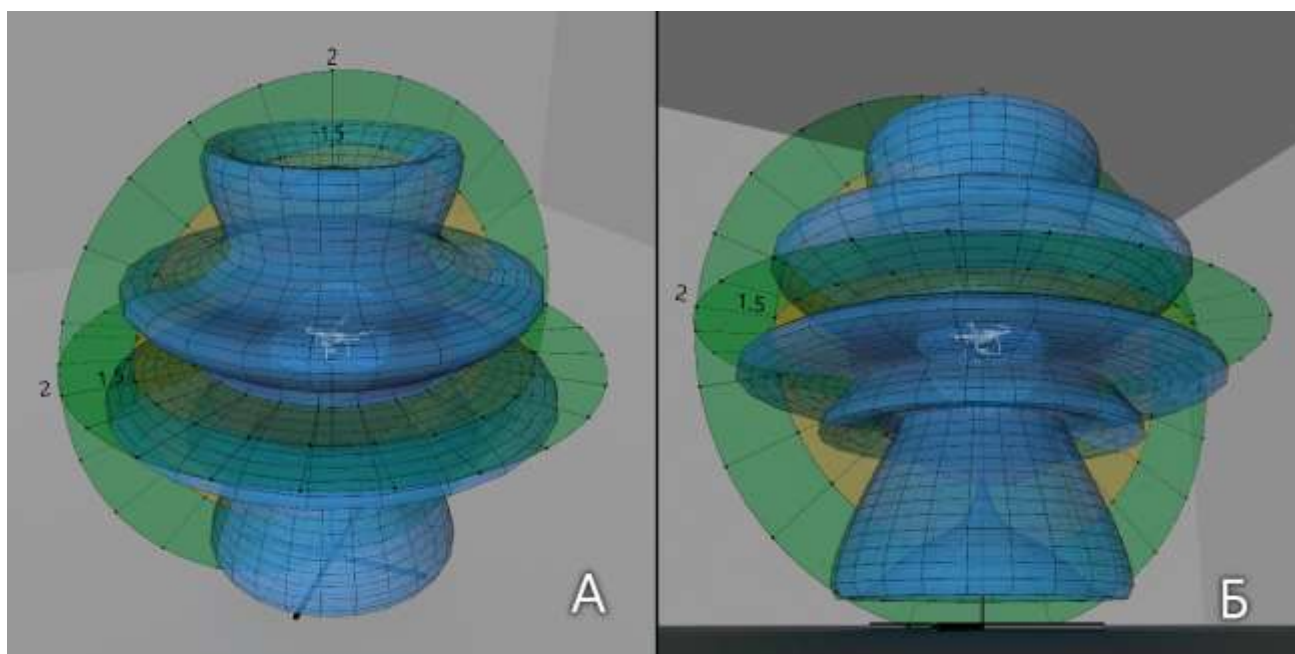


Рисунок 3.27 – Тривимірні діаграми заміру акустичної спрямованості АВ БПЛА в одному перерізі для 2 гармоніки, вид зверху (А) та знизу (Б)

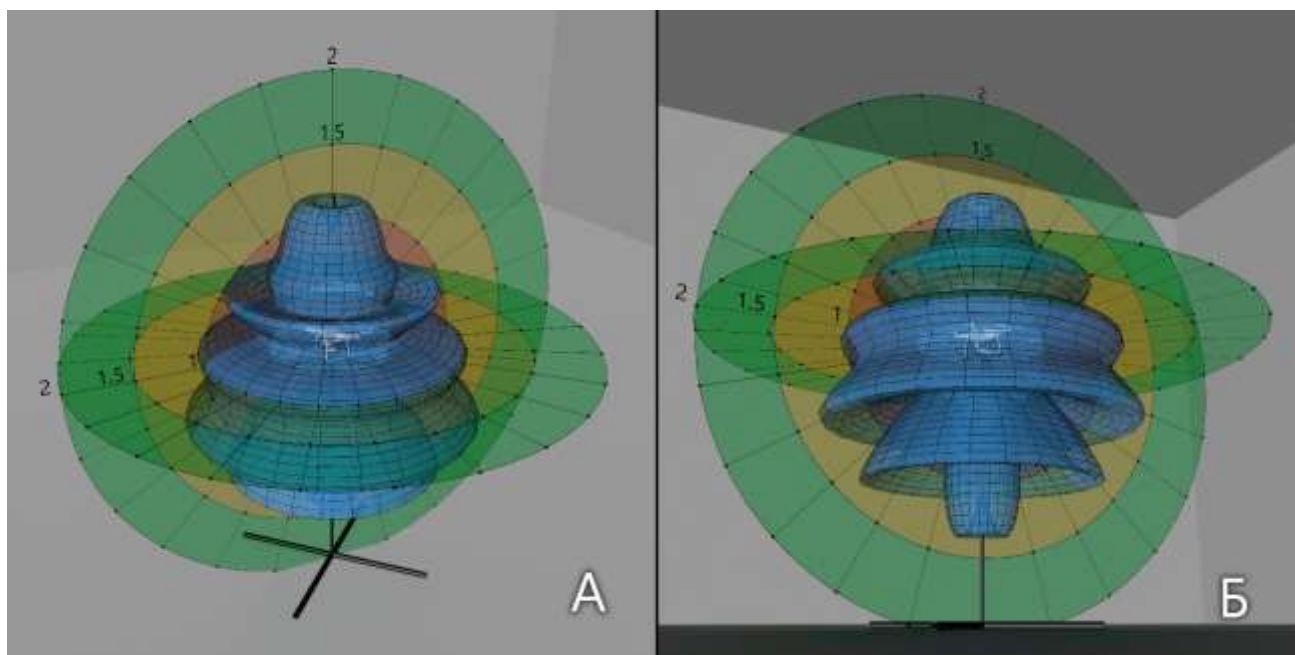


Рисунок 3.28 – Тривимірні діаграми заміру акустичної спрямованості АВ БПЛА в одному перерізі для 3 гармоніки, вид зверху (А) та знизу (Б)

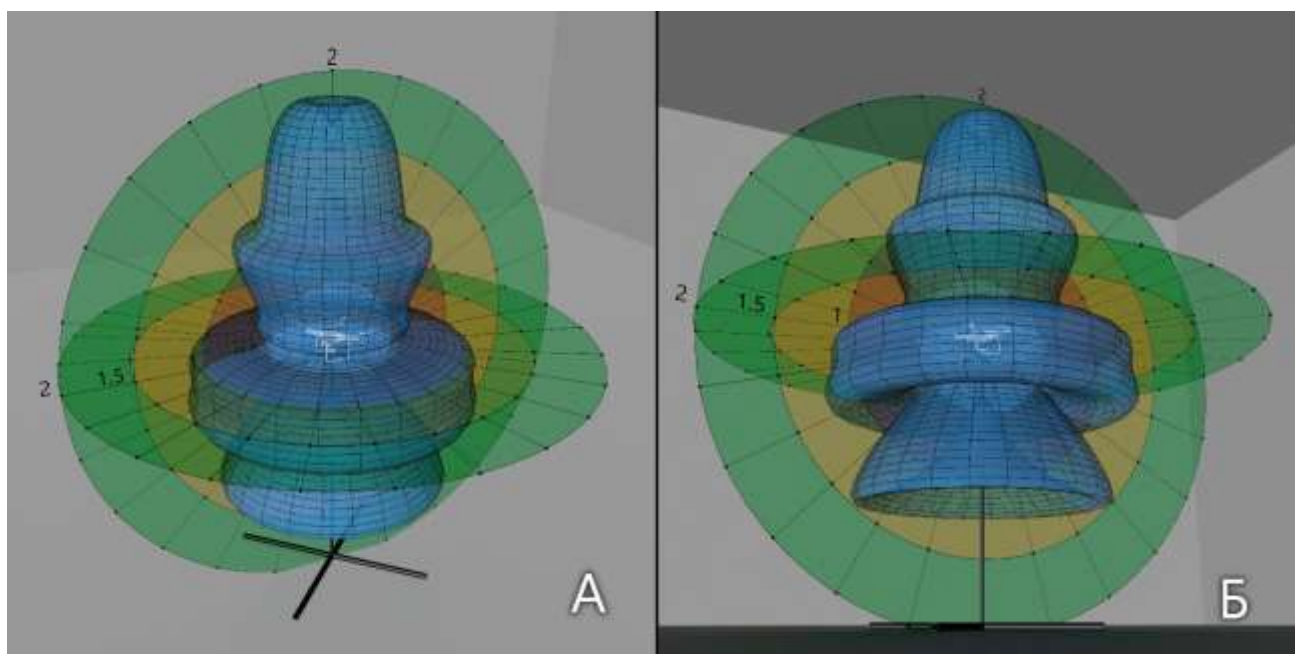


Рисунок 3.29 – Тривимірні діаграми заміру акустичної спрямованості АВ БПЛА в одному перерізі для 4 гармоніки, вид зверху (А) та знизу (Б)

Якщо усі необхідні сплайни розташувати згідно замірам у експерименті через крок у 15° по азимуту, то можна створити подобу каркасу для тривимірного об'єкту (рис 3.30).

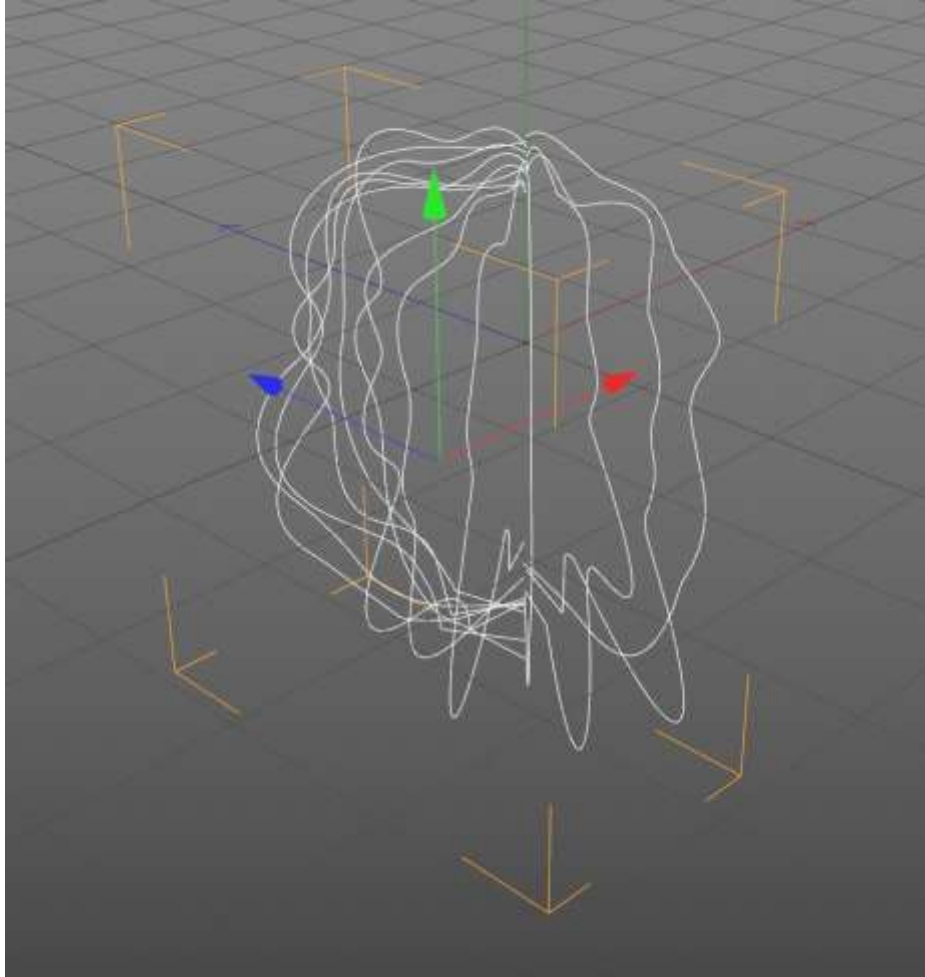


Рисунок 3.30 – Набір сплайнів для створення 3D моделі діаграми спрямованості

Наступним кроком є з'єднання отриманої віртуальної конструкції полігонами, у результаті чого виходить тривимірний діаграма спрямованості (рис 3.31).

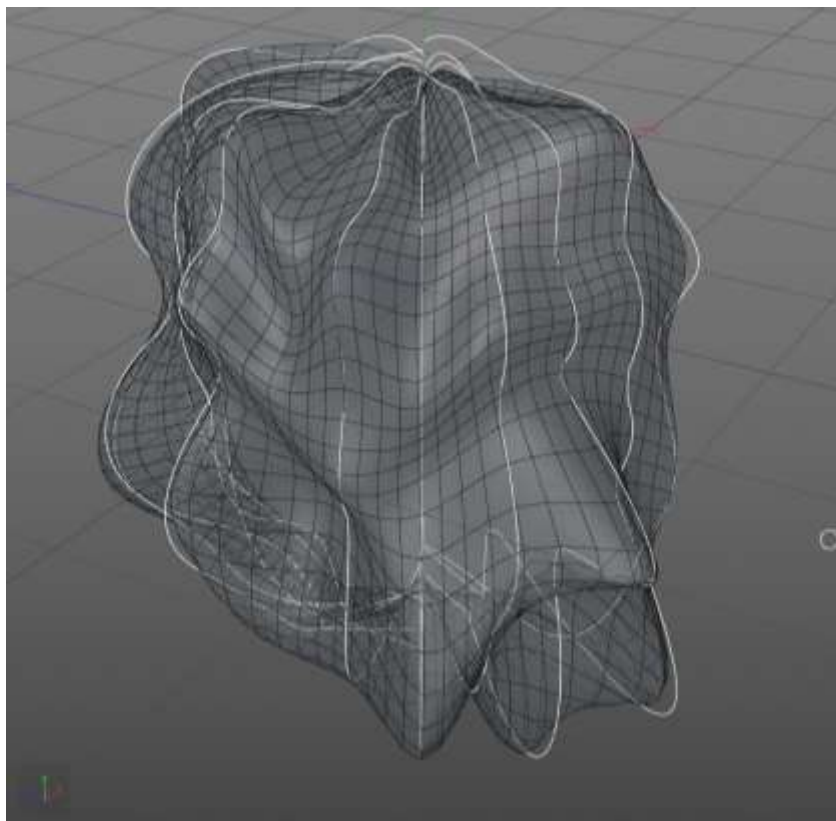


Рисунок 3.31 – Зображення тривимірної діаграми спрямованості у робочому середовищі програми

Задля більш наочного зображення можна зробити рендер змодельованих об'єктів, камери дослідження, та тривимірних діаграм спрямованості АВ БПЛА з накладанням вимірювальних лімбів (рис. 3.32 – 3.34) та без них (рис. 3.35-3.37).



Рисунок 3.32 – Тривимірна візуалізація заглушеної камери

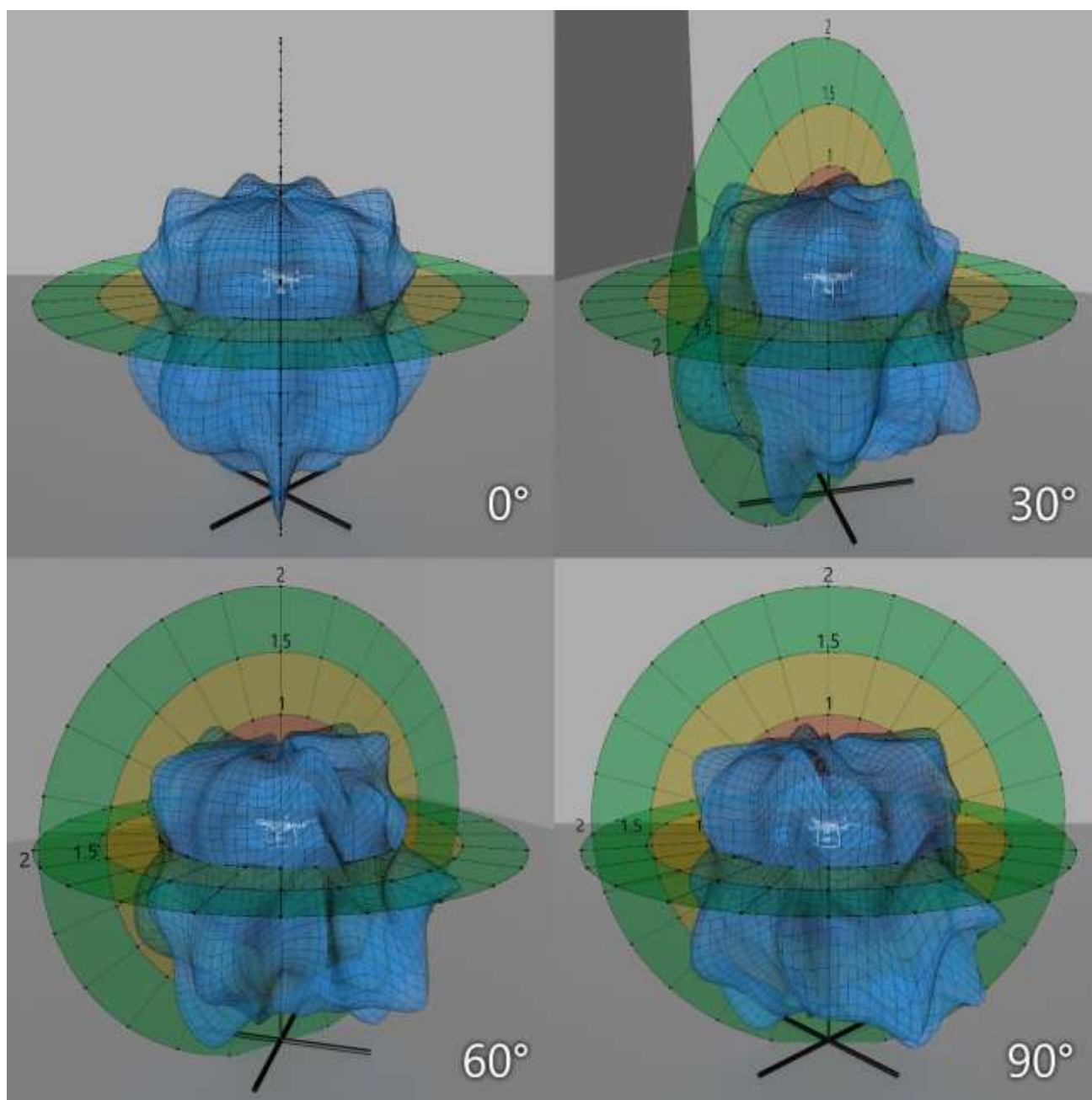


Рисунок 3.33 – Тривимірна візуалізація оброблених результатів експерименту по вимірюванню діаграми спрямованості АВ при спостереженні з точок, що відповідають різним значенням азимута (0° , 30° , 60° та 90°)

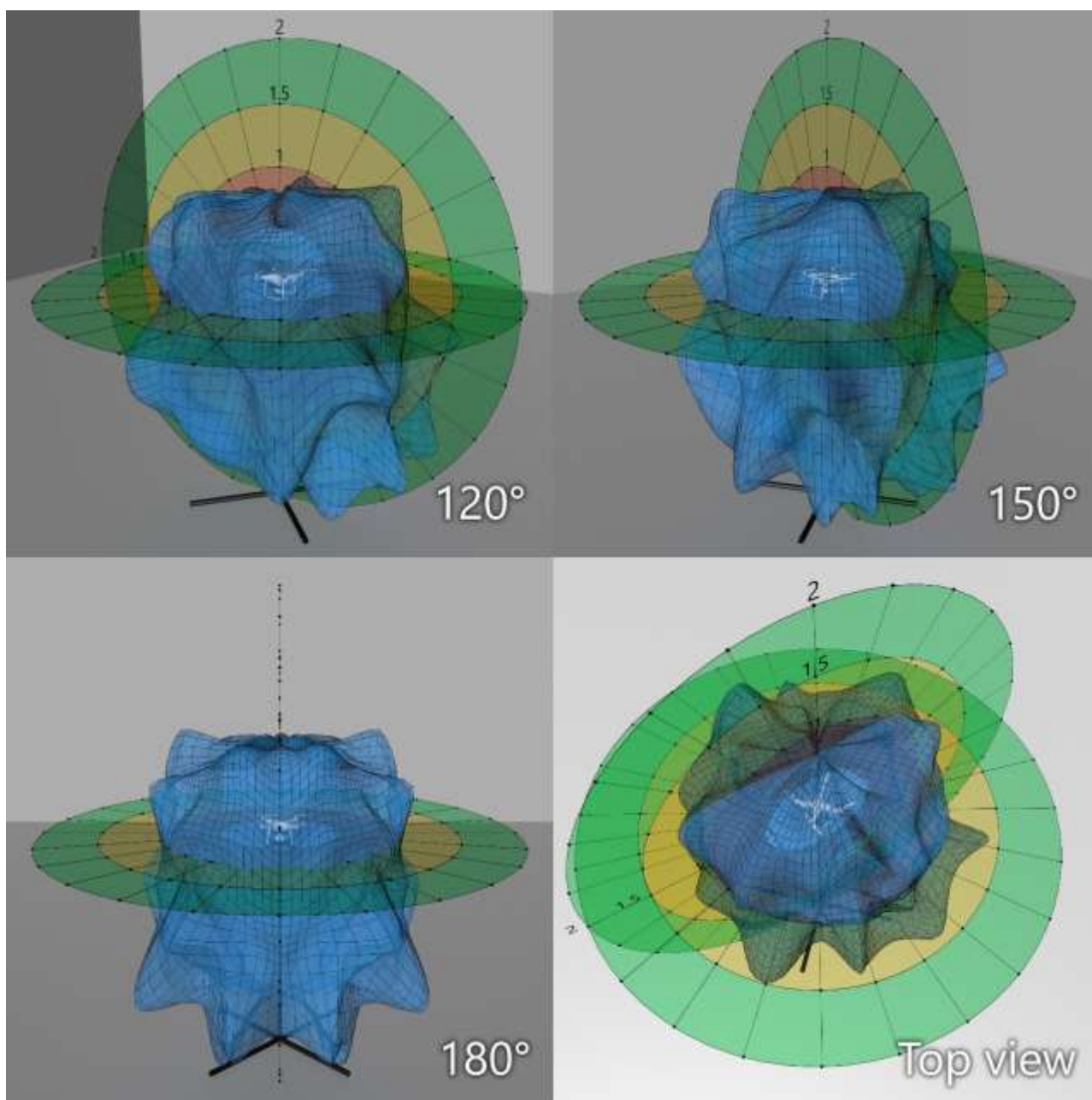


Рисунок 3.34 – Тривимірна візуалізація оброблених результатів експерименту по вимірюванню діаграми спрямованості АВ при спостереженні з точок, що відповідають різним значенням азимута (120° , 150° , 180° та вид зверху)

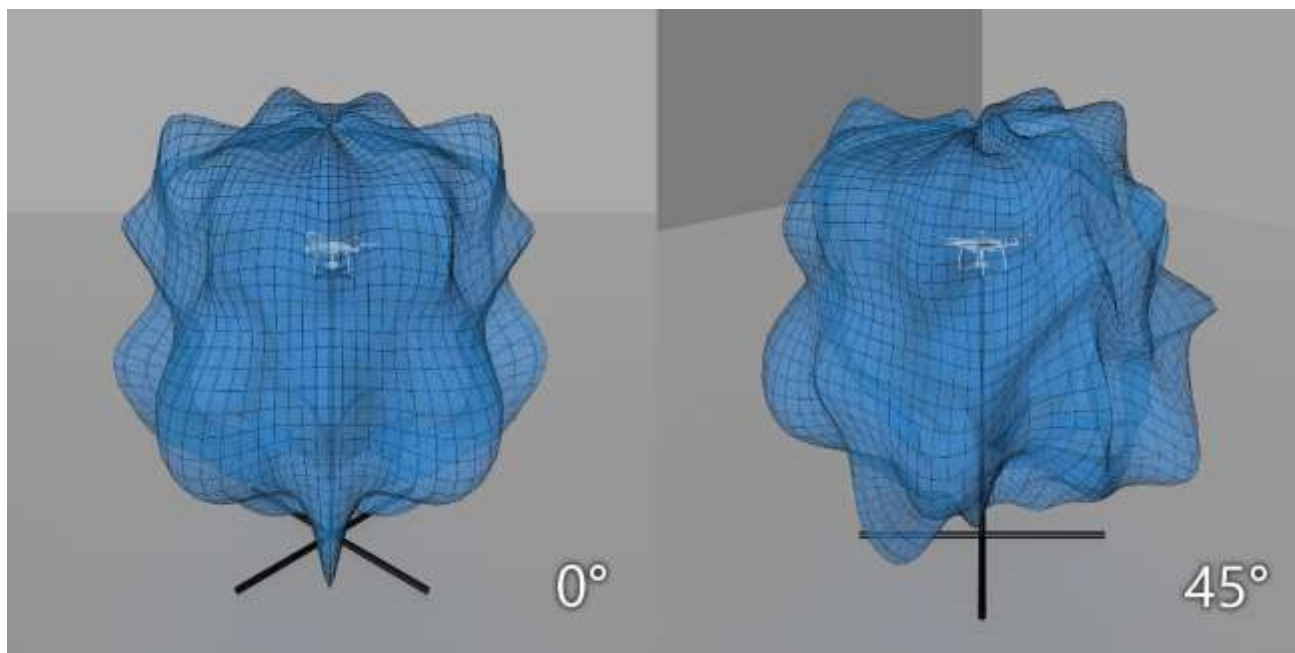


Рисунок 3.35 – Тривимірна візуалізація оброблених результатів експерименту по вимірюванню діаграми спрямованості АВ при спостереженні з точок, що відповідають різним значенням азимута (0° та 90°)

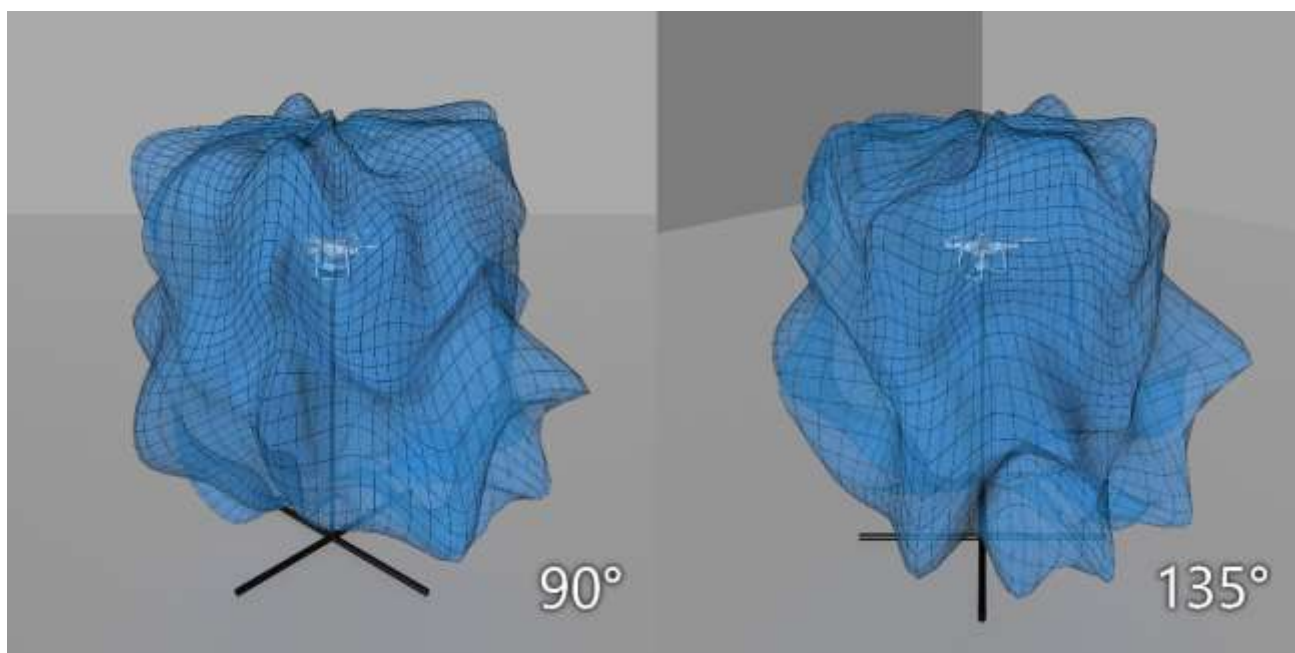


Рисунок 3.36 – Тривимірна візуалізація оброблених результатів експерименту по вимірюванню діаграми спрямованості АВ при спостереженні з точок, що відповідають різним значенням азимута (90° та 135°)

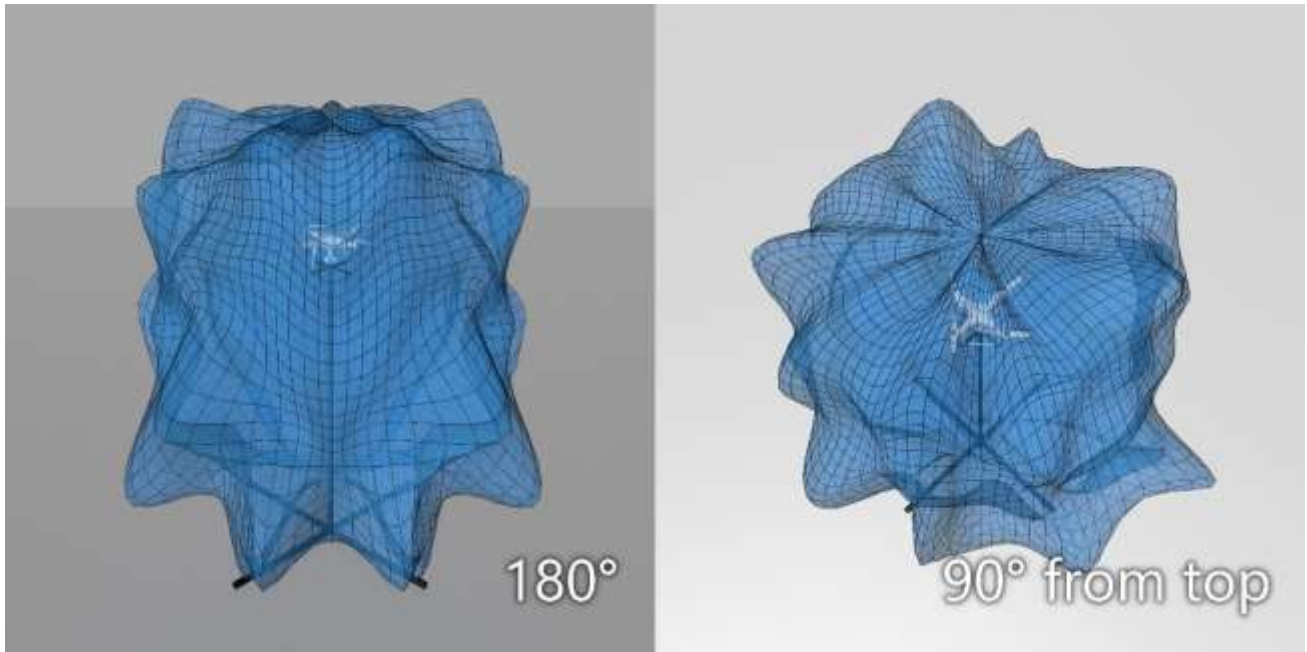


Рисунок 3.37 – Тривимірна візуалізація оброблених результатів експерименту по вимірюванню діаграми спрямованості АВ при спостереженні з точок, що відповідають різним значенням азимута (180° та 90° від зверху)

3.5 Висновки по розділу 3

Експеримент, розрахунки та візуалізація, що були проведені, показали:

1) Точність отриманого запису залежить від чутливості мікрофону та дистанції від джерела АВ. Потоки повітря, що набігають на пристрій фіксації звукових коливань вносять великі перешкоди та спотворюють запис. Це говорить о недоліках використання акустичних систем виявлення ЛА в умовах вітру.

2) Сумарний спектр БПЛА складається з широкосмугових та гармонійних випадкових коливань.

3) Сигнал розподілено у широкій смузі частот, приблизно від 200 Гц до 8 кГц.

4) Методом візуального аналізу за побудованою візуалізацією характеристики спрямованості можна відмітити, що інтенсивність АВ БПЛА приймає більші значення у напрямку витиснення повітря гвинтами (напрямок надиру відносно об'єкту дослідження), має більшу амплітуду коливань та форма просторової діаграми спрямованості, в цілому, відповідає сферичному закону.

ВИСНОВКИ

Є очевидним фактом, що БПЛА з розвитком технологій будуть тільки вдосконалюватися та проникати у ще більшу кількість сфер діяльності людини. У зв'язку з цим необхідним, також, стає винайдення, розвиток та вдосконалення методів виявлення та протидії безпілотним ЛА.

Мультисенсорні системи, що вже існують мають у своєму складі як пасивні так і активні засоби. Кожні з цих систем мають свої особливості та межі використання. Саме тому, використання водночас декількох систем має найбільшу ефективність.

Одним із видів систем виявлення є акустична. Метою кваліфікаційної роботи було дослідити методику отримання та обробки акустичних даних БПЛА, виконати обробку та представити візуалізацію отриманих результатів.

Першим етапом було досліджено теоретичні данні з класифікацію БПЛА за їх характеристика та можливостями використання у різноманітних задачах. Проаналізовано за типом характеристик та виділені особливості АВ БПЛА. Розглянуто спектральну щільність потужності акустичного сигналу безпілотного ЛА та метод розрахунку апроксимації фонових шумів функцією логарифмічно-нормального закону розподілу, методику моделювання характеристики спрямованості використовуючи програмні засоби.

У якості впливу навколишнього середовищ на акустичні вимірювання було проаналізовано фонові шуми навколишнього середовища та метод розрахунку загасання АВ на відкритій місцевості. Основними чинниками загасання були відмічені: геометрична дивергенція, звукопоглинання атмосферою, віддзеркалення звукових хвиль від земної поверхні, екранування (знаходження об'єктів між джерелом звукових коливань та отримувачем) та, згадано, загасання через рослинність на місцевості.

Тривимірне моделювання, що розглядається у кваліфікаційній роботі, являє собою інструмент демонстрації отриманих результатів у віртуальному просторі та зображення умов проведення експерименту.

Аналіз результатів експерименту показав, що акустичний спектр БПЛА має періодичні та гармонійні складові, які відповідають частоті обертання гвинтів. Незважаючи на симетричну побудову діаграма спрямованості АВ не є рівномірною у різних напрямках, як і по азимуту, так і по кутомісній площині.

З отриманих діаграм спрямованості можна спостерігати, що інтенсивність акустичного випромінювання має більші значення у діапазоні від 0° до 90° , ніж від 90° до 180° в кутомісній площині. Візуально на тривимірній моделі це виглядає як вершини у нижній частині тривимірної характеристики спрямованості акустичного випромінювання БПЛА.

Результати, що було отримано, мають велике практичне застосування при аналізі АВ БПЛА на місцевості та виявленні БПЛА.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146.
2. Карташов В.М., Корытцев И.В., Олейников В.Н., Зубков О.В., Шейко С.А., Бабкин С.И., Левский Н.А., Селезнев И.С. Алгоритмы пеленгации беспилотных летательных аппаратов по их акустическому излучению// Радиотехника. (Харьков). — 2019. — Вып. 196. — С. 22-31.
3. Рябуха В.П., Карташов В.М. Методы обнаружения-распознавания радиолокационных, акустических, оптических и инфракрасных сигналов беспилотных летательных аппаратов / В.П. Рябуха, В.М. Карташов// Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — 2020. — Т. 63, № 11. — С. 1–35.
4. Корченко А. Г. Обобщённая классификация беспилотных летательных аппаратов / А. Г. Корченко, О. С. Ильяш // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. - 2012. - Вип. 4. - С. 27-36.
5. Абракітов В.Е. Багаторазові відбиття звуку в акустичних розрахунках. Монографія. Харківська національна академія міського господарства. С. 64-78.
6. Олейников В.Н., Зубков О.В., Карташов В.М., Корытцев И.В., Бабкин С.И., Шейко С.А. Исследование эффективности обнаружения и распознавания акустического излучения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Харьковский национальный университет радиоэлектроники. 2017. URL: https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Scientific_editions/rvmnts_2018_195_23.pdf
7. Олейников В.Н., Зубков О.В., Карташов В.М., Корытцев И.В., Бабкин С.И., Шейко С.А. Особенности обнаружения и распознавания малых

- беспилотных летательных аппаратов. Харьковский национальный университет радиоэлектроники.
8. Смаришев М. Д., Добровольский Ю. Ю., Гидроакустические антенны, Л., 1984. 304с.
 9. Мошков П.А., Беляев И.В., Остриков Н.Н. Экспериментальное исследование акустических характеристик беспилотного летательного аппарата в заглушенной камере АК-2 // Материалы XI Международной научной конференции по амфибийной и безаэродромной авиации «Гидроавиасалон-2016»: Сборник тезисов докладов. М.: ЦАГИ. 2016. С. 45.
 10. Л.Я.Гутин. О звуке вращения воздушного винта. ЖТФ, 1942, т.12, вып.2-3
 11. Аксёнов О.Д., Логин В.М. Метод мел-частотных кепстральных коэффициентов в задаче распознавания речи. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. г. Минск, республика Беларусь. 2019.
 12. Г.И. Сокол, И.С. Омелюшко, С. Ю. Кириченко, О.А. Колесник. Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. Том XXVII // Моделирование характеристики направленности шума винта бпла в программной среде Mathcad. - С. 145-153.
 13. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды: Учебное пособие. - Пенза: Изд-во ПГАСА, 2002. - 290 с.
 14. European Environment Agency. Noise in Europe 2014 // Publication. - 62 с.
 15. ДСТУ 31295.2:2007 / ISO 9613-2:1996. Шум. Затухання звуку під час розповсюдження на місцевості. Частина 2. Загальний метод розрахування.
 16. Корнева Н.Н., Назаров В.Н. Визуализация данных в задачах наземного сегмента научных космических проектов. г. Москва. 2013. - 43 с.
 17. В.А. Тихонов, В.М. Карташов, В.М. Олейников, В.И. Леонидов, Л.П. Тимошенко, И.С. Селезнеов, Н.В. Рыбников. Обнаружение-распознавание

- беспилотных летательных аппаратов с использованием составной модели авторегрессии их акустического излучения// Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка. Радіоапаратобудування. - 2020.- Вип. №81. – С.38-46.
- 18.Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Селезнев И.С. Автогрегессионные фильтры подавления помех в системах акустического зондирования атмосферы// Радиотехника. (Харьков). — 2019. — Вып. 196. — С. 106-111.
- 19.Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В. Адаптивное подавление помех в системах акустического зондирования атмосферы в аэропортах// Прикладная радиоэлектроника (Харьков). — 2019. — Т. 18. №1,2 — С. 16-22.
- 20.Олейников В.Н., Зубков О.В, Карташов В.М., Корытцев И.В., Бабкин С.И., Шейко С.А, Селезнев И.С. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению// Радиотехника. (Харьков). — 2019. — Вып. 199. – С. 29-37.
- 21.Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Кошевой В.В. Подавление акустических помех в системах дистанционного мониторинга атмосферы с использованием решетчатых фильтров// Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2019. — №2 (135) — С. 40-48.
- 22.Карташов В.М., Корытцев И.В., Олейников В.Н., Зубков О.В., Шейко С.А., Бабкин С.И., Обработка сигналов при пеленгации и определении дальности до малоразмерных БПЛА в оптическом и инфракрасном диапазонах // Радиотехника. (Харьков). — 2020. — Вып. 202. — С. 125-135. DOI:10.30837/rt.2020.3.202.13
- 23.В.М. Карташов, В.Н. Олейников, В.И. Леонидов, канд. техн. наук, В.В. Воронин, А.И. Капуста, И.С. Селезнев, Е.В. Першин / Комплексная обработка сигналов интегрированной системы наблюдения беспилотных

- летательных аппаратов с использованием целеуказания // Радиотехника. (Харьков). — 2020. — Вып. 203. — С. 1-13.
24. Берлан В.А. Використання широкосмугових сигналів акустичного випромінювання БПЛА для визначення напрямку приходу // 25-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2021. С. 35-36.
25. В.М. Карташов, В.А. Тихонов, І.В. Савченко. Методичні вказівки з виконання атестаційної магістерської роботи за спеціальністю 8.05090102 «Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення». Освітньо-кваліфікаційний рівень – магістр. Харків: ХНУРЕ, 2012. – 43с.