

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Козак Андрій Віталійович

УДК 534.14

ДИСЕРТАЦІЯ
РОБОТА АКУСТИЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ШУМОВИХ
НАВАНТАЖЕНЬ

171 Електроніка
17 Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ /А.В. Козак

Науковий керівник Коржик Олексій Володимирович, доктор технічних наук,
професор

АНОТАЦІЯ

Козака А.В. Робота акустичних систем в умовах шумових навантажень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 «Електроніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2023.

В зв'язку з зростаючими вимогами до систем повітряного спостереження та розвідки, а також необхідності вдосконалення існуючого парку БПЛА в частині зменшення радіолокаційної та акустичної помітності, сформульовано та розв'язана задача розробки системи акустичного шумопеленгування малих літальних апаратів на основі методів пеленгування, які успішно використовувались в підводній акустиці.

Методи шумопеленгування доопрацьовані в частині відповідності до умов роботи за системою: акустична антена (АА) – пристрій виявлення (до 5 типів пристроїв виявлення) – пристрій пеленгування та індикації.

Метою роботи є створення акустичної системи повітряного шумопеленгування, що реалізує принципи виявлення шумоподібних сигналів із залучення спектральних та кореляційних методів.

При цьому в дисертації отримано наступні наукові результати:

1. Адаптація принципів шумопеленгування в морському середовищі до принципів пеленгування в повітрі;
2. Вперше для повітряних об'єктів розрахована енергетична дальність виявлення БПЛА типу КРИЛО;
3. Вперше використано середовище LabView для моделювання алгоритму і структури пристрою шумопеленгування;

4. Вперше програмно були об'єднані пристрій виявлення і вимірювання параметрів виявленого сигналу в комплексі, тобто підвищення надійності забезпечувалося паралельним використанням трьох трактів виявлення;
5. Вперше була запропонована акустична антена, конструкція якої дозволяє працювати як з скалярними та векторними полем тиску, так і з коливальною швидкістю;
6. За результатами розробки було створено макет пристрою шумопеленгування, функціональні можливості якого, було перевірено в практичних умовах із залученням БПЛА квадрокоптерного типу в лабораторних та натурних умовах.

Практична значимість роботи полягає в подальшому розвитку засобів повітряного шумопеленгування, а саме створення оригінальних комбінованих пристроїв виявлення БПЛА та впровадження віртуальних інструментів для пеленгування і виявлення на основі лабораторного пакету програм LabView та MathLab.

Основний зміст дисертаційної роботи викладено в чотирьох розділах та додатку.

У вступі сформульовано мету та визначено цілі розробки, обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, описано методи дослідження, надана інформація про наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

Перший розділ роботи присвячено формулювання проблеми та огляду сучасного стану задач шумопеленгування БПЛА. Основну увагу приділено мультисенсорним системам, тобто таким, що сукупно використовують методи акустичного, оптичного та радіолокаційного виявлення і водночас аналізують отримані дані різних типів. В розділі також наведено основні характеристики сучасних мультисенсорних систем. Отриману інформацію можна застосовувати для майбутньої

реалізації системи шумопленгування повітряних об'єктів в програмному середовищі LabView.

У другому розділі приведено математичні та фізичні засади методології виявлення та пеленгування. Досліджено існуючі методи та алгоритми обробки та аналізу шумів навколишнього повітряного середовища. Також в другому розділі представлені теоретичні засади щодо розрахунку енергетичної дальності. запропоновано тракт спектрального аналізу, як перспективний засіб виявлення. Розглянуто можливість впровадження тракту спектрального аналізу у склад мультисенсорного комплексу виявлення та пеленгування БПЛА. Запропоновано систему виявлення та пеленгування корисних шумоподібних сигналів, що має містити чотири тракти, фізична реалізація виявлення в яких виконується програмною реалізацією алгоритмів виявлення та, пороговою обробкою та індикацією результатів. Розглянуто шумоподібні сигнали і завади в задачах шумопеленгування та отриману інформацію можна застосовувати для майбутньої реалізації системи шумопленгування повітряних об'єктів в програмному середовищі LabView.

Третій розділ роботи присвячено технічним рішенням реалізації пристрою шумопеленгування БПЛА. Для реалізації пристрою було використано програмний пакет LabView. LabVIEW (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) — платформа та середовище розробки для візуальної мови програмування компанії National Instruments (США). Метою даної мови є автоматизація використання обчислювального та вимірювального лабораторного обладнання. Оцінено якість і переваги програмного середовища розробки LabView. Представлено тракт виявлення і пеленгування, що є результатом наукового дослідження методології акустичного виявлення повітряних об'єктів. Окреслено схему та описано її компонування і роботу за цією схемою. Приведено схему реалізації тракту виявлення і пеленгування, описано їх роботу та розписано усі складові компоненти схеми та їх характеристики у складі пристрою

виявлення і шумопеленгування. Представлено мультикомпонентну векторну акустичну антену пристроїв виявлення та пеленгування. Дана антена може працювати як пристрій, що забезпечує реєстрацію як скалярних, так і векторних характеристик. На основі вказаної антени показано застосування адитивних операцій, що до можливості формування характеристик направленості різних типів. Слід зауважити, що ця антена в силу використання додаткових приймачів може бути віднесеною як до області повітряної, так і до області гідроакустики.

Четвертий розділ присвячено проведенню експериментальних досліджень, які відбувалися шляхом лабораторного та натурного експерименту. Описано підготовку матеріальної бази та схеми експерименту, збирання вимірювального стенду та самі результати.

В додатку представлено методику розрахунку дальності для різних можливих варіантів реалізації та використання приладу. Визначено та враховано завадостійкості акустичної антени. Проведено попередню оцінку результуючої завадо-сигнальної ситуації. Враховано наявність зелених насаджень, інженерних наземних об'єктів, турбулентності. І в результаті визначено прогнозовану дальність виявлення БПЛА різних типів (квадрокоптер і крило), що включає геометричну та енергетичну дальності.

Галузь застосування: акустичні вимірювання

Ключові слова: *виявлення, пеленгування, БПЛА, інтенсивність, спектр, повітряний шумопеленгатор, прийомник градієнту тиску, фаза, амплітуда, спектральні характеристики, акустичні шуми, методи пеленгування, пристрої виявлення*

SUMMARY

Kozak A.V. The operation of acoustic systems under conditions of noise loads. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 171 "Electronics". - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", MES of Ukraine, Kyiv, 2023.

In connection with the growing requirements for aerial surveillance and reconnaissance systems, as well as the need to improve the existing fleet of UAVs in terms of reducing radar and acoustic visibility, the task of developing an acoustic noise direction finding system for small aircraft based on direction finding methods that have been successfully used was formulated and solved in underwater acoustics.

Noise direction finding methods have been refined in terms of compliance with system operating conditions: acoustic antenna (AA) – detection device (up to 5 types of detection devices) – direction finding and indication device.

The purpose of the work is to create an acoustic system of airborne noise direction finding, which implements the principles of detecting noise-like signals using spectral and correlation methods.

At the same time, the following scientific results were obtained in the dissertation:

1. Adaptation of the principles of noise direction finding in the marine environment to the principles of direction finding in the air;
2. For the first time, the energy detection range of the wing-type UAV was calculated for aerial objects;
3. For the first time, the LabView environment was used for modeling the algorithm and structure of the noise direction finding device;

4. For the first time, the detection device and the measurement of the parameters of the detected signal were combined by software in a complex, i.e. the increase in reliability was ensured by the parallel use of three detection paths;
5. For the first time, an acoustic antenna was proposed, the design of which allows working with both scalar and vector pressure fields, as well as with oscillating speed;
6. Based on the results of the development, a model of the noise direction finding device was created, the functionality of which was tested in practical conditions with the involvement of a quadcopter-type UAV in laboratory and field conditions.

The practical significance of the work lies in the further development of aerial noise direction finding tools, namely the creation of original combined UAV detection devices and the introduction of virtual tools for direction finding and detection based on the laboratory package of LabView and MathLab programs.

The main content of the dissertation is presented in four chapters and two appendices:

In the introduction, the purpose and goals of the development are defined, the relevance of the dissertation work is substantiated, research methods are described, information is provided about scientific novelty and the practical significance of the obtained results.

The first part of the work is devoted to the formulation of the problem and an overview of the current state of UAV noise direction finding problems. The main attention is paid to multi-sensor systems, that is, those that collectively use the methods of acoustic, optical and radar detection and at the same time analyze the received data of various types. The section also provides the main characteristics of modern multi-sensor systems. The obtained information can be

used for the future implementation of the noise shielding system of air objects in the LabView software environment.

In the second chapter, the mathematical and physical foundations of the detection and direction finding methodology are presented. The existing methods and algorithms for processing and analyzing ambient air noise are studied. The second chapter also presents the theoretical principles for calculating energy range. the path of spectral analysis is proposed as a promising means of detection. The possibility of introducing a spectral analysis path into the multi-sensor complex of UAV detection and direction-finding was considered. A system for detection and direction finding of useful noise-like signals is proposed, which should contain four paths, the physical implementation of detection in which is performed by software implementation of detection algorithms and threshold processing and display of results. Noise-like signals and disturbances in noise direction finding tasks are considered, and the information obtained can be used for the future implementation of the system of noise direction finding of air objects in the LabView software environment.

The third section of the work is devoted to technical solutions for the implementation of the UAV noise shielding device. The LabView software package was used to implement the device. LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) is a platform and development environment for the visual programming language of National Instruments (USA). The purpose of this language is to automate the use of computing and measuring laboratory equipment. The quality and advantages of the LabView software development environment were evaluated. The path of detection and direction finding is presented, which is the result of a scientific study of the methodology of acoustic detection of aerial objects. The scheme is outlined and its layout and operation according to this scheme are described. The implementation scheme of the detection and direction finding path is presented,

their operation is described, and all the components of the scheme and their characteristics as part of the detection and noise direction finding device are described. A multi-component vector acoustic antenna for detection and direction finding devices is presented. This antenna can work as a device that provides registration of both scalar and vector characteristics. On the basis of the specified antenna, the application of additive operations is shown, which leads to the possibility of forming different types of directivity characteristics. It should be noted that this antenna, due to the use of additional receivers, can be classified both in the field of air and in the field of hydroacoustics.

The fourth chapter is devoted to conducting experimental research, which took place through laboratory and field experiments. The preparation of the material base and scheme of the experiment, the assembly of the measuring stand and the results themselves are described.

The appendices present the method of calculating the range for various possible options for the implementation and use of the device. The noise immunity of the acoustic antenna is determined and taken into account. A preliminary assessment of the resulting fault-signal situation was carried out. The presence of green spaces, engineering ground objects, turbulence is taken into account. And as a result, the predicted detection range of UAVs of various types (quadcopter and wing) was determined, which includes geometric and energy ranges.

Field of application: acoustic measurements

Key words: *detection, direction finding, UAV, intensity, spectrum, aerial sound locator, gradient receivers of pressure, phase, amplitude, spectral characteristics, acoustic noises, direction finding methods, detection devices.*

Список публікацій здобувача:

1. Козак А. В., Коржик О. В. (2023). Метод взаємних спектрів в задачах шумопеленгування бпла. Наукоємні технології № 1(57), <https://doi.org/10.18372/2310-5461.57.17442> (фахове видання категорії Б).
2. Козак А. В., Коржик О. В. (2023). Удосконалення систем шумопеленгування бпла з використанням векторно-фазових методів та наднаправленості. Технології та інжиніринг, № 2(13), <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.2.4> (фахове видання категорії Б).
3. Шишкова К. А., Козак А. В. (2023). Направлені властивості кругового циліндричного п'єзокерамічного перетворювача з плоским екраном в діаметральній площині. Технології та інжиніринг, № 4(15), <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.4.6> (фахове видання категорії Б).
4. Електроніка 2020 зі статтею: Чайка О. С. Формування акустичного поля у хвилеводі сферичним джерелом звуку / О. С. Чайка, А. В. Козак // Електронна та акустична інженерія, Том.3, №. 2(2020), сс. 58–63, 2020. URL: <http://feltran.kpi.ua/article/view/199018>. (наукове технічне видання).
5. Козак, А. В. (2021). Удосконалена система шумопеленгування безпілотних літальних апаратів. Електронна та Акустична Інженерія, 4(1), 228902–1 . <https://doi.org/10.20535/2617-0965.eae.228902> (наукове технічне видання).
6. Козак А. В., Ларін П. М., Костюк Р. Ю., Коржик О. В. (2018). Імітаційне моделювання вимірювача інтенсивності звуку в задачах шумопеленгування. Електронна та Акустична Інженерія, 1(1), 27–33. <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2018.1.1.104510> (наукове технічне видання).
7. Мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування: пат. 132160 Україна: МПК G01S 3/808 (2006.01). № u201809649; заявл. 26.09.2018; опубл. 11.02.19, бюл. № 3/2019. 3 с. (патент на корисну модель).

8. Kozak A., Didkovskyi V., Korzhyk O., Naida, S., Kostiuk R., Liakhevych S., «Noise measurement of the multicopter UAV» DOI: [10.1109/APUAVD47061.2019.8943922](https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943922) і участь на конференції 2019 IEEE 5th International Conference “Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments” (APUAVD) (*матеріали конференції*).
9. Kozak A., Didkovskyi V., Korzhyk O., Naida, S., «Construction the Device of Acoustic Noise Air Bearing,» 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 683-687, 2020, DOI: [10.1109/ELNANO50318.2020.9088899](https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088899) (*матеріали конференції*).
10. Козак А. В., Ларін П. М. Імітаційне моделювання приладу вимірювання інтенсивності звуку та формування просторової вибіркості в повітряному середовищі / А. В. Козак, П. М. Ларін, Р. Ю. Костюк // X Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка–2017», 25–27 квітня, 2017 р., Київ, Україна / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки. – Київ, 2017. – С. 46–51. (*матеріали конференції*).
11. Костюк Р. Ю. Розробка мікрофонного тракту для систем повітряної шумопеленгації / Р. Ю. Костюк, А. В. Козак, П. М. Ларін // X Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка–2017», 25–27 квітня, 2017 р., Київ, Україна / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки. – Київ, 2017. – С. 27–30. (*матеріали конференції*).
12. Козак А. В. Пристрій виявлення безпілотних літальних апаратів у програмному середовищі LabView / А. В. Козак, П. М. Ларін, Р. Ю. Костюк // XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка–2018», 3–5 квітня, 2018 р., Київ, Україна / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки. – Київ, 2018. – С. 78–81. (*матеріали конференції*).
13. Ларін П. М. Пристрій пеленгування безпілотних літальних апаратів у програмному середовищі LabView / П. М. Ларін, А. В. Козак, Р. Ю. Костюк // XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених

«Електроніка–2018», 3–5 квітня, 2018 р., Київ, Україна / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки. – Київ, 2018. – С. 74–78. *(матеріали конференції)*.

14. Пристрій виявлення та пеленгування повітряних об'єктів /Дідковський В.С. , Коржик О.В., Горовий К.В. , Козак А.В. , Ларін П.М. , Ляхевич С.В. // XI науково-практичній конференції "Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил" , 8–9 листопада, 2018 р., Київ, Україна. *(матеріали конференції)*.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
-------------------	-----------

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАДАЧ ШУМОПЕЛЕНГУВАННЯ БПЛА

1.1 Формулювання мети і постановка основних задач роботи	18
--	----

1.2 Огляд сучасного стану задач виявлення БПЛА	19
--	----

Висновки по розділу.....	32
---------------------------------	-----------

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ ТА ФІЗИЧНІ ЗАСАДИ МЕТОДОЛГІЇ ПОВІТРЯНОГО ВИЯВЛЕННЯ ТА ПЕЛЕНГУВАННЯ БПЛА

2.1 Математичні та фізичні засади методології виявлення та пеленгування	34
---	----

2.1.1 Розрахунок енергетичної дальності	42
---	----

2.1.2 Теоретичні засади трактів виявлення.....	44
--	----

2.1.3 Теоретичні засади трактів пеленгування	55
--	----

2.2 Огляд шумоподібних сигналів та завад в задачах шумопеленгування	65
---	----

Висновки по розділу.....	94
---------------------------------	-----------

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИСТРОЮ ШУМОПЕЛЕНГУВАННЯ БПЛА

3.1 Структурна схема пристрою виявлення безпілотних літальних апаратів ..	97
---	----

3.2 Функціональна схема пристрою виявлення в програмному середовищі LabVIEW	100
---	-----

3.3 Загальний устрій пристрою виявлення	101
---	-----

3.4 Опис основних блоків, які використовуються	104
--	-----

3.5 Панель користувача (Front Panel)	120
--	-----

3.6 Мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування.....	123
--	-----

Висновки по розділу.....	126
---------------------------------	------------

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1.Підготовка апаратури та схеми експерименту.....	130
---	-----

4.2 Збирання вимірювального стенду (лабораторні умови)	131
--	-----

4.3 Проведення вимірювань у лабораторних умовах	132
---	-----

4.4 Підготовка матеріальної бази для вимірювання на відкритих просторах, збирання стенду, проведення вимірювань в натурних умовах	135
---	-----

Висновки по розділу.....	142
---------------------------------	------------

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	144
-------------------------------	------------

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТОК

ВСТУП

Викладені матеріали дисертації виконано на прикладі довільного безпілотного літального апарату (БПЛА). В реаліях сьогодення проблема повітряного шумопеленгування обумовлена масовим використанням і швидкими темпами розвитку парку безпілотних літальних апаратів. Це змінює систему охорони і безпеки будь-якого об'єкта, у зв'язку з чим і зростає потреба у розробці та удосконаленні систем акустичного шумопеленгування БПЛА. Крім того, якщо відомості щодо конструкції та аеро-динамічних якостей БПЛА є відомими [1,2], то відомості про акустичні характеристики БПЛА – вельми незначні. Проте, зауважимо, що певні відомості про спектральні характеристики шумовипромінення подані в роботі [3].

У свою чергу широке коло задач і відповідний ряд спеціалізованих БПЛА [4-7] вказаного типу вимагають строгого визначення багатьох технічних характеристик дрону, однією з яких є рівень акустичного навантаження на робоче середовище. Технічні характеристики дронів мають розглядатися у взаємозв'язку з ефективністю та скритністю застосування, а основні характеристики акустичного поля, що утворюється БПЛА, підлягають вимірюванню, аналізу і нормуванню. У реаліях сучасної України найпоширенішим у загальному доступі цивільним підкласом є дрони саме роторного типу, наприклад моделі DJI Phantom 3, 4, Autel Robotics X-Star. Крім того викликає цікавість використання в якості засобу вимірювання не тільки традиційного інструментарію, а й оригінальних комбінованих пристроїв виявлення БПЛА та створення віртуальних інструментів для пеленгування і виявлення на основі лабораторного пакету програм Lab View та Math Lab.

Отже, базуючись на залучених з роботи [3] даних про спектральні характеристики БПЛА, припустимо, що одним з перспективних напрямків створення пристроїв виявлення БПЛА можна вважати розробку системи

трактів виявлення на основі акустичних принципів роботи, використовуючи методи виявлення, які встановлюють факт наявності корисного шумоподібного процесу в робочому повітряному середовищі.

На момент отримання технічного завдання на розробку, ні теорії, ні практичної реалізації теоретичних викладок в Україні не існувало. Тому було прийнято рішення звернутися до відомостей про станції аналогічного призначення, але які використовуються в гідроакустиці, хоча ідеї реалізовані там не зовсім підходили. Наприклад станція ОГС була обладнана системою виявлення по потужності, по вузькосмугового спектру та підсилювачем вузькосмугового спектру. При цьому вимірювалися рівні відносних змін, частота вимірюного опорного сигналу і напрямок на ціль. Такий підхід вирішили запровадити і ми, при цьому використовували класичні методи пеленгування. Програмна реалізація цих методів передбачалася в середовищі мови Math Lab з використанням принципів моделювання програмного пакета Lab View.

У роботі представлено результати розробки системи повітряного пеленгування малих рухомих об'єктів. Результати розробки представлено макетом пристрою шумопеленгування, що реалізує класичні методи огляду, виявлення та пеленгування БПЛА. Алгоритми роботи пристрою реалізовано із залученням програмних середовищ Lab View та Math Lab. Результати роботи подаються послідовно виконанню наступних операцій:

- огляд оточуючого повітряного середовища в заданому секторі або колово;
- виявлення об'єкта за допомогою паралельно працюючих систем виявлення, що реалізують принципи спектрального та кореляційного аналізу;
- вимірювання пеленгу та супроводження виявленого об'єкта по циклах локації;
- макетування приструню.

Системи шумопеленгування забезпечені певними розподіленнями приймальних елементів які конструктивно оформлені в багатофункціональну акустичну антену. Антена забезпечую роботу трактів виявлення та визначення пеленгу в термінах скалярних та векторних характеристик акустичного поля, а також методологією вузькосмуговою та широкосмуговою частотної фільтрації. При цьому вимірювання пеленгу відображаються в структурі інтерфейсу приладу у вигляді індикаторних панелей, спектрограм та загальне змінення рівня шуму оточуючого середовища в межах інформативного частотного діапазону.

В зв'язку з цим, задача створення віртуальних інструментів для вимірювання основних характеристик акустичного поля та виявлення автономних рухомих об'єктів є актуальною і має розглядатися як крок до уніфікації та наочності шляхів апаратно-програмної реалізації засобів підводного та повітряного шумопеленгування. Це, власне, і визначає мету роботи.

Завдання дослідження

Завданнями дослідження є:

- дослідити основні системи та методології шумопеленгування повітряних літальних апаратів;
- впровадження нетрадиційних програмних середовищ в практику розробки і моделювання акустичних каналів пристроїв шумопеленгування;
- формування схеми вимірювання за допомогою сучасних програмних та моделюючих засобів;
- створення макету пристрою, що реалізує акустичні методи шумопеленгування безпілотних літальних апаратів за основними характеристиками акустичного поля, формування схеми вимірювання за допомогою сучасних програмних та моделюючих засобів;
- визначення можливості мінімізації апаратної частини засобів повітряного шумопеленгування;

- програмування та відпрацювання програмного продукту в середовищі National Instruments LabView (як зручного інструменту об'єктного програмування);
- експериментальне дослідження розробленого комплексу тракту в лабораторних і натурних умовах.

Метою наукового дослідження є створення системи шумопеленгування повітряних об'єктів за допомогою сучасного програмного забезпечення.

Об'єктом дослідження є процес шумопеленгування, що включає огляд простору, виявлення, вимірювання параметрів поля та цилівказання за допомогою прийомників тиску і коливальної швидкості.

Предметом дослідження є пристрій повітряного шумопеленгування.

Методами досліджень є класичні методи дослідження спектральних характеристик, а саме:

- застосування методу швидкого перетворення Фур'є (ШПФ);
- застосування теореми Вінера-Хінчіна;
- використання методів кореляційної обробки сигналу.

При цьому **достовірність** забезпечується класичними методами пеленгування, в частині виявлення та вимірювання параметрів виявленого об'єкта. А також забезпечується збіг характеристик комп'ютерних моделей у частині збігу розрахункових та експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних в роботі результатів полягає в наступному:

1. Адаптація принципів шумопеленгування в морському середовищі до принципів пеленгування в повітрі;
2. Вперше для повітряних об'єктів розрахована енергетична дальність виявлення БПЛА типу КРИЛО;
3. Вперше використано середовище LabView для моделювання алгоритму і структури пристрою шумопеленгування;

4. Вперше програмно були об'єднані пристрій виявлення і вимірювання параметрів виявленого сигналу в комплексі, тобто підвищення надійності забезпечувалося паралельним використанням трьох трактів виявлення;
5. Вперше була запропонована акустична антена, конструкція якої дозволяє працювати як з полем тиску, так і з коливальною швидкістю;
6. За результатами розробки було створено макет пристрою шумопеленгування, функціональні можливості якого, було перевірено в практичних умовах із залученням БПЛА квадрокоптерного типу в лабораторних та натурних умовах.

Практична значимість роботи полягає в подальшому розвитку прикладних аспектів повітряного шумопеленгування, а саме створення оригінальних комбінованих пристроїв виявлення БПЛА та впровадження віртуальних інструментів для пеленгування і виявлення на основі лабораторного пакету програм LabView та MathLab.

Особистий внесок здобувача полягає у:

- формулюванні постановки задачі виявлення повітряних об'єктів;
- виконання робіт зі створення програмного забезпечення по алгоритмам виявлення об'єктів та вимірювання їх характеристик;
- постановка і проведення лабораторного та натурального експерименту, аналіз та інтерпретація результатів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційних досліджень обговорювалися на міжнародних та вітчизняних конференціях і викладенні в статтях:

- Козак А. В., Ларін П. М. Імітаційне моделювання приладу вимірювання інтенсивності звуку та формування просторової вибірконості в повітряному середовищі / А. В. Козак, П. М. Ларін, Р. Ю. Костюк // X Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка–2017», 25–27 квітня, 2017 р., Київ, Україна / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки. – Київ, 2017. – С. 46–51.

- Пристрій виявлення та пеленгування повітряних об'єктів /Дідковський В.С., Коржик О.В., Горовий К.В., Козак А.В., Ларін П.М., Ляхевич С.В. // XI науково-практичній конференції "Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил" , 8–9 листопада, 2018 р., Київ, Україна.
- Козак А. В. Пристрій виявлення безпілотних літальних апаратів у програмному середовищі LabView / А. В. Козак, П. М. Ларін, Р. Ю. Костюк // XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка–2018», 3–5 квітня, 2018 р., Київ, Україна / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки. – Київ, 2018. – С. 78–81.
- V. Didkovskyi, O. Korzhyk, S. Kozeluk, A. Kozak, R. Kostiuk and S. Liakhevych, "Noise Measurement of the Multicopter UAV," 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), Kiev, Ukraine, 2019, pp. 67-70, doi: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943922.
- O. Korzhyk, A. Kozak, V. Didkovskyi and S. Naida, "Construction the Device of Acoustic Noise Air Bearing," 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 683-687, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088899.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи представлені у 14 публікаціях наукових робіт: у тому числі в 6 статтях, 3 з яких у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 171 Електроніка, які включені до міжнародних наукометричних баз; 7 тези доповіді у збірниках матеріалів конференцій; 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 119 найменувань та

додатку. Робота містить 88 рисунків (з них 1 повністю займає площу сторінки) та 5 таблиць. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 159 сторінки.

Актуальність роботи

Актуальність обумовлена необхідністю первинного виявлення та спостереження засобами шумопеленгаційних систем повітряних широкосмугових випромінюючих об'єктів різного призначення, а також збільшення якості первинного виявлення. Впровадження в тактику боротьби з БПЛА нетрадиційних методів виявлення, що пов'язана з використанням особливостей фізичних полів різних типів.

Математичні положення цієї роботи не мають кожна окремо новизни, але в сукупності використання всіх чинників призводить до того що з'являється абсолютно новий пристрій, тому актуальність розробки не викликати сумніви. А метою розробки є створення пристрою, в макетному виконанні яким будемо реалізовувати задачу повітряного шумомеленговання.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАДАЧ ШУМОПЕЛЕНГУВАННЯ БПЛА

На даний момент, проблема повітряного шумопеленгування широкосмугових шумовипромінюючих об'єктів стає все більш актуальною через зростання числа безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Хоча інформація про конструкцію та аеродинамічні характеристики БПЛА вже відома [1,2], дослідження і відомості про їх акустичні характеристики залишаються вельми обмеженими. Проте, варто зазначити, що певні дані про спектральні особливості шумового випромінювання БПЛА можна знайти в дослідженні [3].

Таким чином, базуючись на залучених з роботи [3] спектральних характеристик БПЛА, одним із обіцяючих напрямків виявлення БПЛА є аналіз взаємного спектру та вимірювання інтенсивності звукового поля, при появі такого об'єкту. Концепція розробки інтенсиметрів (пристроїв для вимірювання інтенсивності звуку) не є новою і детально представлена в літературі [8-10]. Тому векторні методи можуть бути застосовані в задачах пеленгування за інтенсивністю.

В зв'язку з необхідністю первинного виявлення та збільшення якості первинного виявлення, стає актуальним завдання розробки віртуальних інструментів для вимірювання ключових характеристик акустичного поля та ідентифікації автономних рухомих об'єктів. Це завдання має розглядатися як крок до стандартизації та візуалізації методів апаратно-програмного забезпечення для підводного та повітряного шумопеленгування.

1.1 Формулювання мети і постановка основних задач роботи

Метою наукового дослідження є створення системи шумопеленгування повітряних об'єктів за допомогою сучасного програмного забезпечення (з використанням пакету програм Lab View).

Для досягнення даної мети в дисертаційній роботі слід вирішити наступні завдання:

1. Дослідити основні системи та методології шумопеленгування.
2. Розглянути можливі способи реалізації системи шумопеленгування.
3. Дослідити умови виявлення і пеленгування у повітрі.
4. Розробити тракт виявлення і пеленгування в програмі LabView.
5. Перевірити роботу розробленого тракту в лабораторних і натурних умовах.

1.2 Огляд сучасного стану задач шумопеленгування БПЛА

На сучасному ринку представлена велика кількість систем шумопеленгування, спостереження та знешкодження БПЛА [11–19]. Найефективнішими типами систем є мультисенсорні системи, тобто такі, що сукупно використовують методи акустичної, оптичної та радіолокаційної детекції. Акустичні сигнатури конкретних типів дронів вже занесені у бази даних компаній-виробників систем виявлення і використовується при роботі у реальному часі. Слід додати, що при високому рівні зашумленості, а саме у містах, системи акустичного детектування є менш ефективними і частіше їх застосовувати на заміських територіях.

Розглянемо деякі типові приклади мультисенсорних систем виявлення БПЛА, які мають у своєму складі акустичний тракт виявлення.

Польський виробник Advanced Protection Systems представив систему SafeSky, призначену для виявлення та слідкування за дронами. Ця система забезпечує надійне виявлення дронів незалежно від часу доби та погодних умов. Завдяки комбінації радарних, акустичних та оптичних датчиків, система забезпечує мінімізацію помилкових спрацьовувань на відстанях до 1000 м. Радарна частина працює на основі FMCW в X-діапазоні, використовуючи спеціально розроблені мікросхеми. Складний аналіз радіосигналів дозволяє відрізнити дрони від птахів.

Акустична частина системи базується на мікрофонній решітці, яка дозволяє локалізувати джерела звуку в просторі. Додатково, система використовує алгоритми машинного навчання для класифікації дронів.

SafeSky має інтуїтивно зрозумілий веб-інтерфейс, який інтегрує дані з усіх датчиків. У випадку виявлення дрона, система негайно сповіщає персонал служби безпеки через SMS, електронну пошту або інші системи оповіщення. Зокрема, акустична частина системи включає:

- масив мікрофонів для широкого діапазону виявлення;
- алгоритми для точної локалізації та класифікації бпла;
- здатність одночасно виявляти та слідкувати за декількома дронами в акустичному діапазоні.

Також компанія випустила систему під назвою «ctrl+sky», яка оснащена акустичним датчиком (див. рис. 1.1) із восьмима мікрофонними елементами. Завдяки застосуванню цифрових методів формування спрямованості, ця система може локалізувати дрони в будь-якому напрямі. Особливістю є те, що вона ефективно працює навіть у міських умовах з високим рівнем шуму, адже використовує спеціалізовані алгоритми машинного навчання для відокремлення сигналів від дронів від інших джерел шуму. Виробник стверджує, що максимальна дальність виявлення дронів складає 200 метрів.

Додатково, «ctrl+sky» обладнана інструментами для моніторингу умов навколишнього середовища, що дозволяє системі оптимізувати свою

роботу в залежності від погодних умов. Для комунікації з оператором використовується протокол Ethernet.



Рисунок 1.1 – Акустичний сенсор «ctrl+sky»

Компанія Drone Labs пропонує систему Drone Detector, що комбінує акустичні, радіочастотні, оптичні, температурні та GPS-датчики для виявлення різних типів дронів, включаючи нерухомі, літаючі та автономні. Система може автономно підключатися до мережі, оновлювати бази даних, створювати резервні копії та мати автономне живлення. Вона здатна виявляти дрони на відстані до 1000 метрів завдяки радіочастотній локації. Модель DD610AR Drone Detector (рис. 1.2) є високочутливим пристроєм, спроможним виявляти дрони на відстані до 1 км. Дані передаються через різні протоколи, включаючи Wireless LAN, Ethernet, 3G та супутниковий зв'язок.



Рис. 1.2 DD610AR Drone Detector

Французька компанія ORELIA представляє свою версію Drone Detector, яка працює виключно на основі акустичного виявлення. Цей компактний пристрій (рис. 1.3) має невеликі габарити $220 \times 140 \times 71$ мм.



Рис. 1.3. Drone Detector від фірми ORELIA

Система має наступні характеристики:

- забезпечення водонепроникності;
- діапазон живлення: 7 – 18 В;
- споживана потужність: 5 Вт;

- температура використання: від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$ (поч. точка при 0°C);
- поставляється з конвертером 220V AC/18V DC;
- вага: 1,5 кг;
- матеріал: алюміній.

Використання декількох таких датчиків дозволяє створити чутливий захисний бар'єр і точно визначити місцезнаходження виявленого БПЛА.

Австралійська компанія DroneShield пропонує ряд акустичних систем для виявлення дронів. Однією з них є DroneShield FarAlert Sensor (рис. 1.4). Ця система має вузький 30-градусний діапазон з дальністю до 1 км, спроможний виявляти дрони на висоті до 500 ярдів. Пристрій оснащений спеціальною "тарілкою" для монтажу на антенних щоглах базових станцій.



Рис. 1.4. DroneShield FarAlert Sensor

Прототипом приладу «АП-1» обрано прилад DroneShield FarAlert Sensor.

Основними проблемами зазначених приладів є неточність у виявленні та пеленгуванні, яка виникає через високий рівень шумових завад у середовищі.

Для вирішення цієї проблеми потрібно комбінувати спрямовані характеристики системи приймачів із спектральними методами обробки. Ці методи дозволяють на основі часового зсуву кореляційної функції точно визначити пеленг до цілі. Структура антенного обладнання надає можливість використовувати різноманітні методи виявлення та пеленгування: виявлення на основі інтенсивності звукового сигналу, виявлення за допомогою просторового спектру, виявлення через акустичну сигнатуру, пеленгування за допомогою взаємних спектрів та пеленгування за фазовим методом. Важливо відзначити, що фазовий метод може мати неоднозначність у пеленгуванні при певних умовах, але ця проблема може бути вирішена шляхом визначення квадранту спостереження, враховуючи знаки вихідних сигналів комбінованого приймача. Таблиця 1.1

Характеристики аналогів

Прилад	Дальність виявлення, м	Кут пеленгу, °	Кут азимуту, °	Робочий діапазон температур, °C
DroneShield FarAlert Sensor	460	0-360	0-180	-15...+ 40
Drone Detector	250	0-360	0-180	-10...+ 50
SafeSky	1000	0-360	0-180	-30...+ 50
DD610AR	1000	0-360	0-180	-10...+ 50

Розглянемо існуючі наукові дослідження з напрямку виявлення БПЛА

В аналізованих наукових роботах часто розглядається використання вже відомих методик обробки акустичних сигналів, які отримані за допомогою мікрофонних масивів різних конфігурацій. Хоча теоретична

основа цих досліджень базується на вже відомих методах, призначених для інших застосувань, головний акцент робиться на практичних експериментах.

У дослідженні [19] представлено практичні результати випробувань алгоритму виявлення та визначення напрямку до об'єкта. Зокрема, розглядається алгоритм фазового перетворення, який ґрунтується на розширеному крос-кореляційному підході. Цей метод відзначається ефективністю при реверберації, здатністю збільшувати радіус дії виявлення (до 300 м) в порівнянні з традиційними методами та підвищеною швидкістю обчислень. Описана в роботі акустична антена має два яруси мікрофонних масивів з шістьма елементами кожен і радіусом 1 м. Збільшення числа мікрофонів у масиві сприяє підвищенню точності виявлення.

Використання кількох багатомікрофонних масивів на різних ділянках охоронюваного об'єкта дозволяє точно локалізувати дрон. Однак слід враховувати, що використання декількох масивів з меншою кількістю мікрофонів може погіршити характеристики виявлення через ряд факторів, таких як атмосферна турбулентність, кореляційні ефекти шумів та вплив ефекту Доплера. Останній має особливе значення, коли існує значна різниця у швидкостях дрону відносно далеких масивів, що вимагає спеціальної компенсації [20–21].

У дослідженні [22] розглядається система для виявлення та локалізації великих літальних апаратів, які керуються пілотом. Хоча основні методи виявлення залишаються незмінними, ключова відмінність полягає у дальності дії системи.

Для виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) використовувались станції, що містили 5 мікрофонних сенсорів. Кожен

сенсор мав 64 мікрофонні капсули. Сенсор складався з пластини, на якій з кожного боку розміщено вісім груп капсул, при цьому в кожній групі було по чотири капсули. Збільшення числа капсул дозволяло отримувати більш спрямовані характеристики прийому та підвищувати відношення сигнал/шум.

Для визначення напрямку на БПЛА використовувалась методика розрахунку взаємної кореляційної функції між парами сенсорів. Цей підхід дозволяв отримувати напрямки у вигляді конусу. Алгоритм перетворення фази, який був застосований у дослідженні, вимагав "відбілювання" спектру прийнятого сигналу, що полягало у приглушенні гармонічних складових. Ця особливість алгоритму робила його відмінним від інших методів виявлення.

Основна відмінність між алгоритмами виявлення та визначення напрямку полягала у використанні гармонічних складових для виявлення. Це дозволяло збільшити дальність виявлення порівняно з дальністю визначення напрямку на БПЛА. Це було зумовлено використанням широкосмугових методів визначення напрямку, які були менш чутливими до затухання звуку на високих частотах. Важливо відзначити, що локалізація БПЛА здійснювалась методом тріангуляції, використовуючи кілька описаних систем.

Основний індикатор присутності БПЛА полягає у виявленні гармонічних компонентів у отриманому сигналі протягом часового інтервалу в 0,5 секунди. Викликом є той факт, що частота цих компонентів може динамічно змінюватися відповідно до обертів пропелера, швидкісних показників БПЛА (через вплив Доплерівського ефекту), напряму руху БПЛА відносно приймаючої системи, а також зміни спектру сигналу після його проходження через турбулентність атмосфери [25].

У дослідженні [26] розглянуто методи виявлення та визначення місцезнаходження дронів з метою запобігання можливим зіткненням, припускаючи, що детектор шуму розташований на одному з них. Процес обробки включає послідовний набір кроків для відсіювання шуму від носія та зовнішнього середовища, а також "нормалізації" спектру для подальшого аналізу засобами детекції та визначення напрямку до об'єкта. Використовується специфічне гармонійне спектральне перетворення, яке дозволяє визначити частоту основної гармоніки не лише від безпосередньо прийнятого сигналу БПЛА, але й після його кореляційної обробки, яка також має періодичні властивості. Спектр цього перетворення включає головну гармоніку з високим рівнем та додаткові гармоніки, розташовані за певним принципом, з нижчими рівнями. Під час детекції, яка не залежить від конкретного статистичного розподілу гармонік, для зниження кількості помилкових спрацьовувань важливо виключати їх з розрахунків. Таким чином, комбіноване використання обох методів забезпечує підвищену ефективність виявлення. Однак слід відзначити, що під час експерименту на дроні було встановлено чотири мікрофони, які безпосередньо піддаються впливу структурного шуму від вібрацій, а заходи захисту від такого шуму є важкими для впровадження на малих апаратах.

Додатковим підходом до виявлення дронів може служити алгоритм оцінювання спектрального складу отриманого сигналу, відомий як MUSIC (MUltiple SIgnal Classification), який ґрунтується на кореляційних принципах. Для його втілення в системі обробки як інструмент для конвертації акустичного сигналу дрону в цифровий формат було використано [27] мікрофонний масив. Цей масив складався з двох лінійних восьмиелементних акустичних антен, розташованих так, що вони перетиналися під прямим кутом у їх фазових центрах. Проте деталі щодо

характеристик цього антенного устаткування дослідниками не були представлені.

В дослідженні [28] розглядається використання методів машинного навчання для виявлення дронів. Два основних методи, які були використані, включають Plotted Image Machine Learning (PIL) - техніку, що використовує алгоритми для порівняння візуалізованого зображення спектру отриманого сигналу з референсним спектром з бази даних, та K-Nearest Neighbors (KNN) - метод, який порівнює отриманий та референсний спектри у форматі csv файлів. Зазначені програмні рішення, розроблені на Python, використовують алгоритм швидкого перетворення Фур'є, що дозволяє системі оперувати в реальному часі. Вони також мають перевагу в здатності до самоосвіти та в їх економічності, оскільки можливе використання лише одного мікрофону. Однак такий підхід має деякі обмеження, зокрема, він є менш стійким до завад через низьке відношення сигнал/шум у одномікрофонних системах та потребує обширної бази даних, яка включає не тільки сигнатури дронів, але й спектральні характеристики зовнішнього шуму.

У декількох дослідженнях [29–32] було вивчено методику виявлення БПЛА, засновану на аналізі інтенсивності їхнього акустичного випромінювання. Для цього було створено апаратний комплекс та програмне забезпечення для вимірювання інтенсивності звуку, а також проведено комп'ютерне моделювання процесів ідентифікації дрону та визначення його напрямку. Основна концепція цього пристрою полягала у створенні приймачів градієнту тиску з приймачів тиску за допомогою електричного комбінування. Таким чином, сигнал від приймача градієнту тиску можна перетворити на сигнал, що відображає коливальну швидкість, і, використовуючи відомі формули, розрахувати інтенсивність звуку. Після цього, подаючи його на квадратичний детектор, можна визначити присутність або відсутність дрону в зоні відповідальності системи. Перед

аналізом сигналів на вимірювач інтенсивності передбачено їх фільтрацію в частотному діапазоні, характерному для певного типу БПЛА [33-37].

Розглядаючи існуючі патенти, можна згадати винахід [38], який також базується на кореляційному аналізі акустичного сигналу, отриманого мікрофонним масивом невизначеної конфігурації. Детектування здійснюється шляхом порівняння пікового значення взаємної кореляційної функції з певним пороговим значенням, а напрямок приходу акустичного сигналу визначається за зміщенням піка цієї функції. Оскільки основним джерелом завад є вітер, що на низьких частотах виявляє високі спектральні показники, було вирішено обробляти всі отримані сигнали за допомогою фільтрів верхніх частот з адаптивною граничною частотою. Корекція граничної частоти та порогу виявлення вноситься після розрахунку дисперсії атмосферних шумів, яка, у свою чергу, визначається на основі вимірюної швидкості вітру.

Існує також винахід [39], де основний інструмент для виявлення є широкосмуговий детектор. Цей детектор аналізує спектр сигналу, отриманого мікрофоном, і порівнює його зі спектральними сигнатурами з бази даних. Однак цей метод має декілька обмежень: він працює повільно через використання метрики Васерштейна, має низьку стійкість до завад, і є потреба регулярно оновлювати базу даних звукових сигнатур дронів. Особливо це стає проблемою, коли мова йде про саморобні дрони, чий звукові сигнатури можуть бути невідомими.

У патенті [40] описано винахід, що стосується звукометричних систем, призначених для визначення відстані до джерела звуку, його акустичного сигналу від пеленгатора, а також географічних координат цього джерела. Акустичний пеленгатор містить дві лінійні групи приймачів, які підключені до відповідних входів системи обробки сигналів. Кожна система складається з ряду резонансних підсилювачів, суматорів, детекторів амплітуди, аналого-цифрових перетворювачів та

регістрів, які підключені до ЕВМ. Додатково, система містить ряд резонансних підсилювачів та пристрій для формування імпульсів. Застосування цього пеленгатора дозволяє точно і швидко визначити напрямок до джерела звуку та локалізувати його, що є основною метою цього винаходу.

У патенті [41] описано метод визначення відстані до джерела звуку. Основна мета цього методу полягає в зменшенні систематичних та випадкових помилок при вимірюванні відстані, а також в розширенні можливостей пеленгаторів і підвищенні їх ефективності.

Процес вимірювання включає в себе прийом акустичних сигналів за допомогою двох лінійних груп звукоприємників. Електричні сигнали, отримані від цих груп, обробляються в двох окремих каналах. Пеленг на джерело звуку визначається на основі порівняння амплітуд напруги на виходах цих каналів.

Далі проводиться обчислення амплітуди напруги сигналу, припускаючи, що джерело звуку розташоване прямо на лінії прийому першої групи звукоприємників. Амплітуда звукового тиску на вході цієї групи визначається на основі раніше отриманої амплітуди напруги та коефіцієнта пропорційності, який встановлюється експериментально.

Після цього визначається рівень звукового тиску, а також проводяться аналогічні обчислення для сигналів інших частот. На наступному етапі враховуються різні зовнішні фактори, такі як тип поверхні, вплив перешкод, метеорологічні умови та інші атмосферні фактори, які можуть впливати на передачу звуку.

Враховуючи всі ці фактори, розраховуються дальність та топографічні координати джерела звуку. Такий підхід дозволяє отримати більш точні та надійні результати вимірювань.

Відома корисна модель [42] представляє собою мультикомпонентну акустичну антену, яка забезпечує одночасний прийом акустичних сигналів з різних джерел. Основна особливість цієї моделі полягає в тому, що вона дозволяє одночасно обробляти сигнали, які потребують різних антенних структур для їх виявлення та пеленгування.

Система включає в себе кілька трактів, кожен з яких відповідає певному методу виявлення або пеленгування. Це може бути виявлення за інтенсивністю, кореляційне пеленгування, фазове пеленгування або пеленгування за методом рівносигнальних зон. Такий підхід дозволяє збільшити ефективність системи, оскільки вона може одночасно використовувати різні методи для виявлення та пеленгування джерел звуку [33-35].

Переваги та перспектива

Сучасні системи часто вимагають великих розмірів та складного обладнання, що може ускладнити їх використання та обслуговування. Крім того, зберігання та обробка даних також може бути викликом, особливо якщо потрібно передавати дані на віддалені сервери або в центри обробки даних.

В майбутньому можливе розроблення більш компактних та ефективних систем, які будуть легшими у використанні та обслуговуванні. Також можливе впровадження нових технологій та методів обробки даних, які дозволять збільшити точність та надійність системи.

На прикладі використання програмного пакету LabView ми можемо відмовитись від складних аналогових приладів та залишити лише декілька блоків включаючи комп'ютер та АЦП.

Отже, основною перевагою є компактність та мобільність, що дасть з легкістю впровадити даний акустичний комплекс у склад мультисенсорної системи виявлення.

Також перевагою є використання дублюючих принципів виявлення, мають підвищувати надійність

Очікувана дальність виявлення нашого макетного зразка:

- для малих БПЛА квадрокоптерного типу до 200 м
- для БПЛА типу КРИЛО до 2000 м

Очікуванні значення дальності виявлення не програють аналогам, у випадку виявлення БПЛА типу КРИЛО їх перевищують.

Як результат, на меті маємо створення системи шумопеленгування повітряних об'єктів за допомогою сучасного програмного забезпечення, яку можливо впровадити в у склад мультисенсорної системи виявлення.

Висновки по розділу

В першому розділі:

- визначено і досліджено актуальність та мета роботи тобто створення пристрою виявлення повітряних об'єктів;
- окреслено завдання які потрібно вирішити, а саме, розглянути математичні та теоретичні засади методології виявлення і пеленгування та обґрунтувати їх використання;
- розглянуто стан розвитку сучасних систем шумопеленгування БПЛА та отриману інформацію можна застосовувати для майбутньої реалізації системи шумопеленгування повітряних об'єктів в програмному середовищі LabView.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ ТА ФІЗИЧНІ ЗАСАДИ МЕТОДОЛГІЇ ПОВІТРЯНОГО ВИЯВЛЕННЯ ТА ПЕЛЕНГУВАННЯ БПЛА

Фізичні поля, що можуть бути зареєстровані пристроєм виявлення БПЛА є дуже різноманітними: електромагнітні, оптичні та акустичні. В свою чергу акустичне поле характеризується низкою шумоподібних сигналів, які можуть бути розцінені як корисні та завади.

До того ж широкий парк БПЛА не завжди піддається виявленню. Тому хотілося би отримати такий акустичний пристрій, що міг би забезпечити мінливість сигналу з плином часу.

Мінливість сигналу з плином часу може бути взята за основу, як поява шумоподібного сигналу, при якому змінюється потужність акустичного поля або інтенсивність, що фіксується пристроєм виявлення. Крім того, до властивостей акустичного поля відносяться і просторова вибірковість – направленість приходу корисного сигналу. Також існують спектральні особливості, через те, що сигнал який ми розглядаємо є широкосмуговим. Тому в якості каналів виявлення, що можуть бути включені у склад пристрою є канали виявлення за потужністю, вузькосмуговим та взаємним спектром [116].

Отже, найбільш достовірним [43-45] є сукупність ознак виявлення пов'язаних з просторовою вибірковістю та спектральними характеристиками. Найменш стійким до зовнішніх завад та найменш помітним є короткотривале або монотонне збільшення потужності або інтенсивності. У зв'язку з цим, є доцільним розглядати пристрій, що працює у заданому діапазоні частот, що застосовує рівняння гідролокації.

2.1 Математичні та фізичні засади методології виявлення та пеленгування

Методика розробки математичних моделей задач виявлення БПЛА

Статистична теорія виявлення сигналів та виміру їх параметрів будується на бінарній ситуації. Це означає, що у процесу прийому сигналів на вхід приймального пристрою (рис.2.1) надходить або суміш сигналу $S(t)$ з шумом, або тільки шум $n(t)$. Аналітично це представляється у вигляді:

$$x(t) = S(t) + n(t) \quad (2.1)$$

або

$$x(t) = n(t)$$

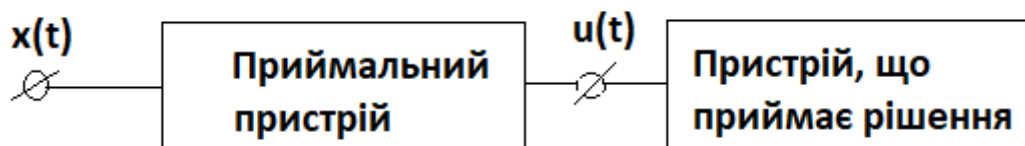


рис.2.1

В роботі розглядаються широкосмугові сигнали які є не детермінованими.

Прийнятий шумоподібний сигнал $x(t)$ приймальний пристрій деяким чином перетворює у вихідний сигнал $u(t)$. За результатами спостереження цього вихідного процесу потрібно винести рішення про наявність або відсутність сигналу. Через випадковий характер завад рішення може бути правильним або помилковим. Якщо до того ж потрібно визначити параметри вихідного сигналу, наприклад, моменту його появи або закінчення, то рішення буде тією чи іншою мірою неточним.

В акустичному полі шумів, яке розглядається як ізотропне, можна розглядати стійкість до завад створеної приймальної системи як таку, що

відображає коефіцієнт осьового фокусування в обчислювальному контексті. Акустичні шумові поля формуються з різних джерел, таких як атмосферні шуми, вплив вітру, температурні відмінності, властивості яких описані в [87]. Шуми можуть мати стаціонарний або динамічний характер [60]. Відмінність між двома випадковими процесами може бути визначена тоді, коли ймовірність одного процесу не залежить від значення іншого.

Розглянемо задачу виявлення:

Усі можливі ситуації простору станів вхідного процесу $x(t)$ та простору рішень описуються у табл.2.1 – простір рішення задач виявлення.

Оцінка результатів роботи в просторі задач виявлення відповідає чотирьом можливим випадкам.

Таблица 2.1

Рішення	Сигнал	
	Є	Немає
Так	Правильне виявлення	Хибна тривога
Ні	Пропуск сигналу	Правильне НЕ виявлення

У табл. 2.2 у кожній із чотирьох можливих ситуацій ставиться у відповідність міра ймовірнісної оцінки можливості їх появи. Кожна з ймовірностей D_1 ; $\bar{D}_1 = 1 - D_1$; F_1 ; $\bar{F}_1 = 1 - F_1$ є умовною ймовірністю. Так, ймовірність тиску D_1 є можливість виявлення сигналу, тобто. прийняття рішення «Так» в умовах, коли сигнал $S(t)$ на вході системи існує. Або, скажімо, F_1 є ймовірність прийняти рішення «Так» в умовах, коли на вході

системи сигнал відсутній. Оскільки ймовірності \bar{D}_1 і \bar{F}_1 є додатковими по відношенню до D_1 і F_1 відповідно, то вичерпною характеристикою для оцінки варіантів можливих ситуацій є лише пара ймовірностей D_1 і F_1 .

Таблиця 2.2

Рішення	Сигнал	
	Є	Немає
Так	$D_{1(C_{11})}$	$F_{1(C_{10})}$
Ні	$\bar{D}_{1(C_{01})}$	$\bar{F}_{1(C_{00})}$

Далі цю пару умовних ймовірностей об'єднаємо загальним поняттям якості виявлення, вкладаючи у це поняття кількісний сенс. Як має бути ясно, якість виявлення тим вище, що більше D_1 і менше F_1 .

При вирішенні завдань виявлення сигналів як у радіолокації, так і в аероакустиці, припускаємо, що найбільш підходящий є критерій оптимізації, який називається критерієм Неймана - Пірсона. [44] Відповідно до цього критерію система виявлення повинна мати наперед задану ймовірність помилкової тривоги. При цьому система повинна будуватися таким чином, щоб у ній максимізувалась ймовірність правильного виявлення. Таким чином, цей критерій оперує лише умовними ймовірностями D_1 і F_1 , що визначають якість виявлення, і для оптимізації за цим критерієм не потрібно апріорних відомостей по P_1 та функцій вартості [126].

Головні висновки цієї теорії наведені [44, 45] і складаються в тому, що як у загальному випадку, як і у випадку критерію Неймана - Пірсона, приймальний пристрій (див. рис. 2.1) повинен на основі аналізу вхідного процесу $x(t)$ скласти так зване відношення правдоподібності $\Lambda(x)$, а пристрій, що приймає рішення - порівняти отримане значення $\Lambda(x)$ з деяким порогом Λ_0 .

Ситуація виявлення відбувається як результат перебільшення шуканого параметру q^2 (параметр виявлення) і перебільшення деякого порогу (порогу спрацьовування)

Поняття відносини правдоподібності є фундаментальним поняттям теорії виявлення та оцінки параметрів прийнятих сигналів. Нехай H_1 – гіпотеза «Сигнал є», а H_0 – гіпотеза «Сигналу немає».

У будь-якому випадку рішення про вибір однієї з двох гіпотез H_1 або H_0 потрібно провести на основі "спостереження" процесу $x(t)$ на деякому кінцевому інтервалі часу. Позначимо цей інтервал через T_n , повторюючи цю процедуру на n примикаючих інтервалах тривалістю T_n розв'яжемо задачу виявлення на всьому інтервалі спостереження. Тому обмежимося розглядом лише одного кінцевого інтервалі T_n . Реалізація процесу $x(t)$ на інтервалі T_n може бути представлена N відліками $X_i = x(t = t_i)$ вхідного процесу, що еквівалентно представленню N -мірного вектора \bar{X} .

Тому замість сукупності відліків X_i , які за досить малих інтервалах часу між відліками повністю визначає реалізацію $x(t)$ на обраному інтервалі часу T_n , можна говорити про реалізацію $x(t)$ у формі N -мірного вектора \bar{X} .

Вектор \bar{X} на деякому кінцевому інтервалі часу T_n може бути утворений або лише дією завади (гіпотеза H_0), або сумісною дією сигналу і завади (гіпотеза H_1). Приймальний пристрій може вичислити, як співвідносяться між собою ймовірність того, що реалізація X утворено сумішню сигнал і завада, і ймовірність того, що \bar{X} утворилося тільки дією завади. Це відношення називається відношенням правдоподібності.

Можна порівнювати з середнім значенням оточуючих шумів за умови відсутності корисного сигналу.

Кожна з цих ймовірностей сама по собі не має ціни, оскільки на ясно, з чим її треба порівнювати, якщо, звичайно, вона дорівнює не 1 або 0. Однак їх відношення говорить про те, що ймовірніше. Саме завдяки тому, що обчислюється відношення ймовірностей, відношення правдоподібності можна виразити через відношення щільностей ймовірностей і в такому трактуванні воно набуває вигляду:

$$\Lambda(x) = \frac{W_N(\bar{X} / S_1 n)}{W_N(\bar{X} / n)} = \frac{W_N(\bar{X} / H_1)}{W_N(\bar{X} / H_0)}, \quad (2.2)$$

де $W_N(\bar{X} / \dots)$ умовні щільності ймовірностей отримання реалізації $x(t)$ на аналізованому на інтервалі T_n за умови наявності або відсутності сигналу.

Методика розрахунку характеристик виявлення оптимальних приймачів

Характеристикою виявлення (ХВ) приймача називають залежність ймовірності правильного виявлення сигналу D_1 від параметра виявлення q^2 при фіксованому значенні ймовірності хибної тривоги F_1 .

Характерно, що ХВ оптимальних приймачів при виявленні сигналів на тлі стаціонарної нормальної завади залежать від єдиного фактора -

параметра виявлення. Цей параметр, монет бути виражений наступними відношеннями:

$$q^2 = \frac{E}{N_0} = \frac{A^2 \cdot T / 2}{N_0} = \frac{A^2 / 2}{N_0 \Delta f_c} = \frac{A^2 / 2}{\sigma_0^2}. \quad (2.3)$$

У цьому варіанті параметр виявлення визначається як відношення потужності гармонійного сигналу $A^2 / 2$ (A – амплітуда) до дисперсії тих спектральних компонентів завади, які потрапляють у смугу частот сигналу. Оскільки в оптимальних прийमाх смуга пропускання приймального тракту збігається з ефективною шириною спектру сигналу, то параметр виявлення визначається так само, як відносяться потужності сигналу до потужності завади на виході оптимального лінійного фільтра $q^2 = U_c^2 / U_{ш}^2$. Це зауваження важливо в тому сенсу, що дозволяє легко представити параметр виявлення через вихідні потужності сигналу і завади в більш загальному вигляді:

$$q^2 = M (U_c^2 / U_{ш}^2), \quad (2.4)$$

де M - ступінь неоптимальності тракту, визначається відношенням смуги пропускання фільтра до Δf_c , тобто $M = \Delta f_\phi / \Delta f_c = \Delta f_\phi T$

T - інтервал спостереження суміші сигнал-завада. Збільшення часу спостереження збільшує вірогідність хибної тривоги.

На рис.2.2 показані графіки ХВ оптимальних приймачів по трьох варіантах зонduючого сигналу. Зверніть увагу на близькість результатів розрахунків для випадків а і б. З цього випливає, що випадковий характер фази сигналу не призводить до великих втрат завадостійкості оптимальних схем у порівнянні з випадком повністю відомого.

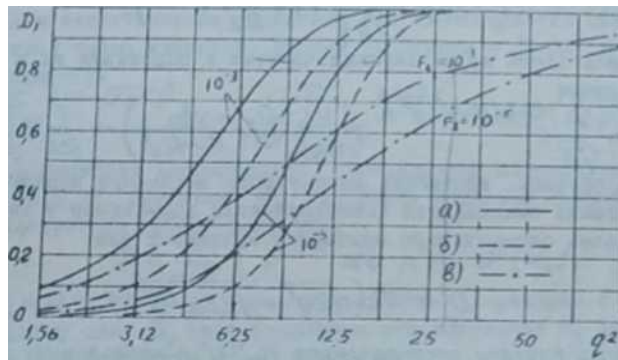


Рис.2.2 Графіки ХВ оптимальних приймачів по трьох варіантах зонduючого сигналу (а – повністю відомий сигнал, б – сигнал з випадковою початковою фазою, в – сигнал з випадковою фазою та амплітудою).

Зовсім іншою виявляється ситуація при флуктуації амплітуди сигналу. При малих q^2 такий сигнал дає більш високу якість виявлення і навпаки, при великих q^2 сигнал з флуктуючою амплітудою явно програє [44, 46].

Методика розрахунку характеристик виявлення неоптимальних приймачів

При проектуванні та апаратурної реалізації пристрою шумопеленгування часто доводиться відмовлятися від оптимальної обробки прийнятих сигналів. Структура приймального тракту при цьому максимально спрощується і приймає вид, показаний на рис.2.3.

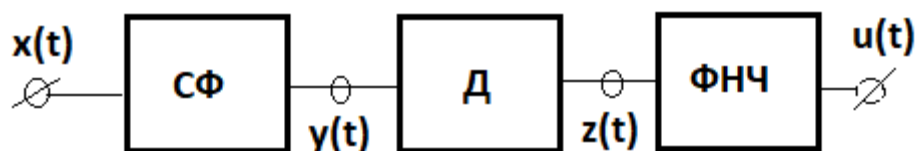


Рис.2.3 Схема типового тракту виявлення

На цьому рисунку відображена схема так званого типового тракту виявлення (ТТО). У його склад входять СФ - смуговий фільтр, Д - детектор і ФНЧ - фільтр низьких частот. Як уже зазначалося, якщо в схемі ТТО

вхідний фільтр має смугу пропускання Δf_ϕ , рівну ефективній ширині спектру сингала Δf_c , то прийомник називають квазіоптимальним і його ХВ практично збігаються з ХВ оптимального варіанта обробки.

Однак для ТТО характерно, що параметр M , визначений рівністю $q^2 = M(U_c^2 / U_{ш}^2)$, виявляється набагато більше одиниці. Саме при $M \gg 1$ маємо справу з неоптимальним варіантом обробки, найбільш характерним для більшості пристроїв шумопеленгування.

Характеристики виявлення ТТО шукають на основі аналізу функцій розподілу вихідної напруги $u(t)$ за наявності або відсутності сигналу.

Якщо при оптимальній обробці ХВ були функціями лише двох параметрів - q^2 і F_1 , то тепер має проявитися залежність також і від M . Відхід від оптимальності означає неминучу втрату завадостійкості, тобто, в кінцевому підсумку зниження якості виявлення при незмінному значенні q^2 [44].

2.1.1 Розрахунок енергетичної дальності

У акустиці при збільшенні дистанції від об'єкта енергія сигналу зменшується і падає якість виявлення. Відбувається це внаслідок розширення хвильового фронту та втрат, зумовлених згасанням звуку у середовищі. Максимальне значення дистанції, коли якість виявлення знижується до допустимого рівня, називається енергетичною дальністю дії.

При рефракції звукових променів у повітрі вводиться також поняття геометричної дальності дії, що визначається межею зон освітлення та звукової тіні.

Дальність виявлення є складною характеристикою приймальної системи якої залежить від багатьох параметрів: акустичної потужності

P_{AK} , коефіцієнту осьової концентрації Ω (він же завадостійкість), часу, відстані, аномалії поширення $A(r)$

При відомих акустичній потужності та спрямованих властивостях випромінюючої антени, заданих величинами $P_{AK}, R_1(\theta, \varphi), \Omega$, інтенсивність сигналу на відстані r визначається рівністю:

$$I_1 = \frac{P_{AK} \cdot \Omega_l \cdot R_1^2(\theta, \varphi)}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot 10^{0.1A(r)} \quad (2.5)$$

де $A(r)$ - аномалія поширення, що виражає децибелах відмінність закону поширення хвилі від сферичного. Надалі будемо вважати, що відбиваючий об'єкт перебуває у напрямі акустичної осі антени.

Інтенсивність відбитого сигналу у місці розташування приймальної антени визначається рівністю:

$$I_2 = \frac{P_{AK} \cdot \Omega_l \cdot R_e^2}{16 \cdot \pi \cdot r^4} \cdot 10^{-0.2A(r)} \quad (2.6)$$

яке являє собою одну з простіших форм рівняння гідролокації.

Складемо на його основі рівняння для параметру виявлення q^2 . Енергія сигналу визначається добутком тривалості сигналу T на його інтенсивність I_2 . Спектральна густина потужності завади з врахування просторової вибіркості приймальної антени визначається відношенням N_0 / Ω_e . При цьому отримаємо:

$$q_0^2 = \frac{P_{AK} \cdot \Omega_l \cdot T_s \cdot \Omega_e \cdot R_e^2}{16 \cdot \pi \cdot r^4 \cdot N_0} \cdot 10^{-0.2\beta r} \quad (2.7)$$

де $R_e^2 = 4 \cdot 10^{0.1T}$, а $A(r) = a(r) - \beta r$ (βr - втрати на затухання)

Рефракційна аномалія $A(r)$ може приймати як додатні, так від'ємні значення. Її вважають додатною, якщо вона посилює сигнал, і від'ємною - якщо вона його послаблює [44].

Розрахунки параметрів поля та енергетичної дальності для БПЛА типу Крило та Квадрокоптер винесені в ДОДАТОК.

2.1.2 Теоретичні засади трактів виявлення

Один з перспективних методів виявлення БПЛА полягає у встановленні взаємного спектра та аналізі інтенсивності акустичного поля при з'яві зазначеного об'єкта.

На науковому рівні завдання повітряного пеленгування може бути вирішене через створення цифрових інструментів для розпізнавання рухливого аеровісника на основі ключових параметрів акустичного поля та встановлення курсу на БПЛА.

Методика шумопеленгування може бути втілена за допомогою лінійної дискретної акустичної антени, яка надає можливість прийому акустичних сигналів, пристрою спряження (система АЦП) та програм обробки інформації на основі пакету LabView на персональному комп'ютері (ПК).

Концепція використання об'єктно-орієнтованого програмування ґрунтується на застосуванні трьох видів систем виявлення:

- вузькосмугового спектру (FFT) або спектру в широкій смузі;
- інтенсивності;
- взаємного спектру.

Застосування таких комбінованих методів виявлення ґрунтується на реєстрації особливостей акустичного поля, що покращує ефективність пристрою.

Використання взаємних спектрів

Оскільки ВКФ дають можливість визначити канали розповсюдження акустичних хвиль то слід очікувати, що взаємний спектр сигналів $x_1(t)$ та $x_2(t)$ теж дає таку можливість. Використаємо Ф- перетворення до ВКФ багато ланцюгового АК:

$$\dot{X}_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \sum_{i=1}^M H_i \dot{X}_{xx}(f) e^{-j2\pi f\tau} \quad (2.8)$$

$$\text{або} - \dot{X}_{xy}(f) = |\dot{X}_{xy}(f)| e^{-j\theta_{xy}(f)}$$

Для сигналу , що пройшов по одному ланцюгу АК компоненти амплітудного і фазового спектрів мають вигляд:

$$|\dot{X}_{xy}(f)| = \dot{X}_{xy}(f) H_1; \theta_{xy}(f) = 2\pi f \tau_1 \quad (2.9)$$

Тобто ВС дорівнює спектру випроміненого сигналу помноженого на АЧХ АК, а фаза залежить від часу τ_1 . Якщо хвиля пройшла по двом напрямкам то ВС та фаза будуть визначатися:

$$|\dot{X}_{xy}(f)| = \dot{X}_{xx}(f) [H_1^2 + H_2^2 + 2H_1H_2 \cos 2\pi f(\tau_2 - \tau_1)]^{1/2} \quad (2.10)$$

У випадку двох каналів модуль ВС буде мати провали, які розташовані на відстані:

$$\Delta F = \frac{1}{(\tau_2 - \tau_1)} \quad (2.11)$$

Провали в спектрі можуть виникати і по іншим причинам. Тому метод застосування ВКФ більш надійний [90].

Виявлення за інтенсивністю

Виявлення за інтенсивністю характеризується короткочасним підвищенням потужності, так як канал неспрямований, то амплітудний спосіб (максимум амплітуди при певному напрямку) тут не працює. В даному випадку маємо справу з інтегральною характеристикою. Метод відновлення за інтенсивністю передбачає інтегральну оцінку шуму: появи шумного джерела або відповідного зростання рівня шуму в робочій смузі.

Процес поширення звукової хвилі характеризують два параметри:

- 1) тиск як місцева зміна тиску відносно статичного тиску і середовища;
- 2) коливальна швидкість частинок, що здійснюють коливальний рух відносно якогось опорного положення.

Миттєва інтенсивність звука у заданому напрямку r обчислюється як добуток миттєвого звукового тиску на миттєву швидкість у цьому напрямку:

$$I_r(t) = p(t)v_r(t) \quad (2.12)$$

Середня за часом інтенсивність звука обчислюється так:

$$I_r = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)v_r(t)dt \quad (2.13)$$

Відповідний вираз для оцінки інтенсивності звука у частотній зоні має вигляд:

$$I_r = \int_{f_1}^{f_2} S_I(f) df = \frac{1}{2\pi\rho\Delta r} \int_{f_1}^{f_2} \frac{\text{Im}\{S_{12}(f)\}}{f} df \quad (2.14)$$

$S_I(f)$ — спектр інтенсивності звука; $S_{12}(f)$ — взаємний спектр шумових тисків $p_1(t)$ і $p_2(t)$; $[f_1; f_2]$ — робочий діапазон частот вимірювань.

Метод вимірювання інтенсивності звука що ґрунтується на формулі (2.14), в інженерній практиці називають методом двох мікрофонів.

Пристрій для аналізу інтенсивності акустичних хвиль за вказаним методом (інтенсиметр) включає в себе двомікрофонний інтенсиметричний датчик (моделі 3520, 3545 компанії «Брюль і К'єр», Данія) та обчислювальний модуль (ОМ) (див. рис. 2.4, а). Мікрофони 1 та 2 можуть бути розташовані так, що їхні передні або бокові сторони дивляться одна на одну (див. рис. 4, б, відповідно). У реальних умовах найчастіше використовують перший спосіб розташування. Діаграма напрямленості датчика має форму косинуса.

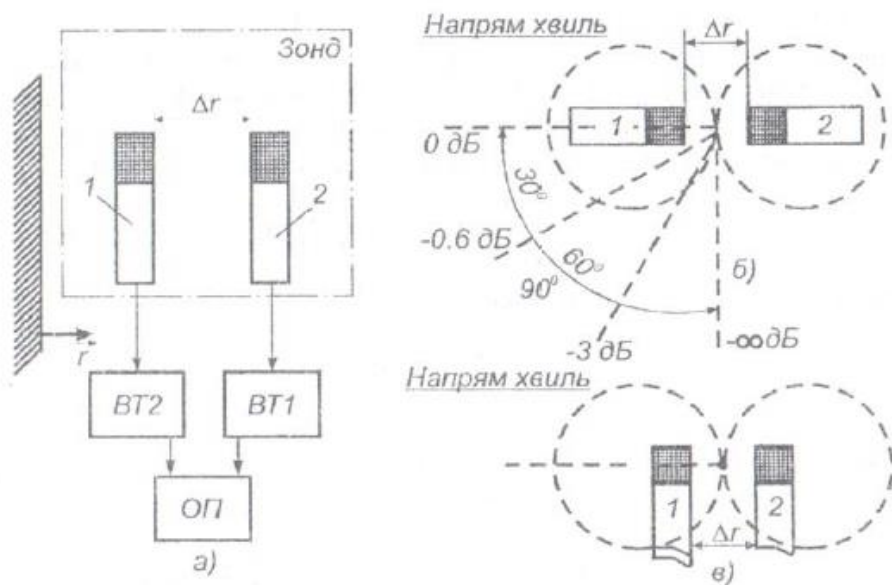


Рис. 2.4 Прилад для вимірювань інтенсивності методом двох мікрофонів

Обчислювальна одиниця має на борту два однакових вхідних вимірювальних канали, які виконують первинну обробку сигналів із мікрофонного датчика (адаптація, підсилення, фільтрація). Ця система дозволяє виконувати математичні дії, визначені у рівнянні (2.14). Сигнали

обробляються за допомогою електронних інтеграторів та суматорів. Один із прикладів такої системи — пристрій 4437 виробництва «Брюль і К'єр», Данія.

Основний принцип обчислювальної одиниці, заснованої на відношенні (2.14), полягає у використанні взаємного спектру сигналів через алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Для цього може бути використаний спеціалізований процесор ШПФ або комп'ютер із відповідним ПЗ (пристрої 2032, 2034 виробництва «Брюль і К'єр», Данія).

Основна перевага другого підходу до реалізації обчислювальної одиниці полягає у здатності розраховувати інтенсивність звуку в вузьких частотних діапазонах (визначення спектральної інтенсивності). Обмеженнями цього методу є вузький діапазон частот для вимірювань інтенсивності звуку в реальному часі (до декількох кГц) та порівняно тривалий час вимірювань. Тому для швидкої оцінки інтенсивності звуку часто використовують обчислювальні системи першого типу.

Розглянутий метод двох мікрофонів має такі обмеження:

- кінцеве значення відстані Δr між акустичними центрами мікрофонів визначає верхню границю робочого діапазону частот, в якому вимірювання інтенсивності звуку дає допустимий результат (за точністю);
- непогодження фазових характеристик мікрофонних трактів і каналів ОП визначає нижню границю робочого діапазону частот.

Акустична інтенсиметрія застосовується при оцінці звукової потужності машин у ближньому полі, при класифікації джерел звуку, пошуку головних джерел шуму, дослідженні звукоізоляції [10].

Апаратура для вимірювань і аналізу інтенсивності звуку

В цілому, обладнання для аналізу та вимірювань інтенсивності звуку включає в себе інтенсиметричний зонд, аналізуючий пристрій та калібратор для інтенсиметрії. Компанія Брюль і К'єр є лідером у сфері акустичної інтенсиметрії, активно проводячи дослідження, вдосконалюючи існуючі методи та розширюючи можливості їх застосування. Останні досягнення у сфері акустичної інтенсиметрії регулярно представляються у спеціалізованих брошурах Брюль і К'єр.

Компанія Брюль і К'єр пропонує широкий вибір інтенсиметричного обладнання та спеціалізованого програмного забезпечення, допомагаючи розробити як універсальні, так і специфічні системи інтенсиметрії [47].

Аналізатори

Аналітичні пристрої 2133, 2032/2034 та 4433 виробництва Брюль і К'єр призначені для роботи в сфері акустичної інтенсиметрії. Модель 2133 функціонує в режимі реального часу, а його цифрові фільтраційні системи дозволяють проводити одночасний аналіз у смугах з шириною 1/1, 1/3 та 1/12 октави. Аналізатори 2032 та 2034 базуються на методі швидкого перетворення Фур'є і забезпечують дослідження інтенсивності в стислих частотних діапазонах. Завдяки живленню від батареї, портативний аналізатор 4433 стає відмінним вибором для інтенсиметричних вимірювань та октавного аналізу в умовах виїзних досліджень.

Двухмікрофонні інтенсиметричні зонди

Зонди для акустичних вимірювань 3519, 3520 та 3545, які виробляє компанія Брюль і К'єр, забезпечують можливість проведення інтенсиметричних досліджень у великих частотних діапазонах. Ці зонди також сумісні з блоками дистанційного управління, що розширює можливості керування та налаштування інтенсиметричної апаратури.

Інтенсиметричний калібратор

Калібратор для інтенсиметрії 3541, який випускається компанією Брюль і К'єр, формує в обмеженому акустичному просторі точне звукове поле з добре відомими референсними рівнями звукового тиску, коливань частинок та інтенсивності звуку. Це дозволяє калібрувати мікрофонні набори, що входять до складу каналів інтенсиметричного обладнання, а також перевіряти величини інтенсивності звуку та швидкості коливань частинок, визначені за допомогою цього обладнання. Пристрій 3541 (див. рис. 2.5) також допомагає виявити залишкову інтенсивність в інтенсиметричних системах і дозволяє визначити показник залишкової різниці тиск-інтенсивність, який вказує на ступінь фазового розсинхронізування каналів цих систем.

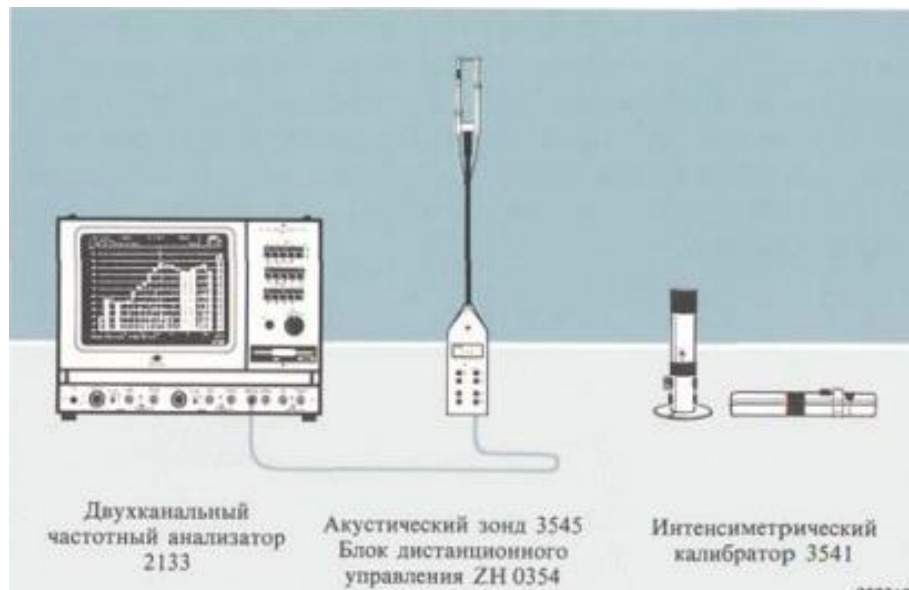


Рис.2.5 Двоканальний частотний аналізатор 2133, акустичний зонд 3545 з блоком дистанційного управління ZH 0354, інтенсиметричний калібратор 3541

Методи інтенсиметричних вимірювань

В сучасний період відсутні уніфіковані норми та рекомендації для проведення інтенсиметричних вимірювань, тому нижче наведено кілька ключових моментів та факторів, які слід враховувати при аналізі та вимірах інтенсивності звуку.

Калібрація

Калібрація мікрофонів, які є частиною інтенсиметричного зонда, проводиться за допомогою пістонфону чи спеціалізованого інтенсиметричного калібратора, який надає стандартний сигнал із відомим рівнем та частотою. Для перевірки правильності роботи інтенсиметричного обладнання проводиться порівняння відображеного ним значення із стандартним значенням інтенсивності звуку, яке генерується калібратором. Оскільки інтенсивність звуку також може змінюватися через зміни щільності повітря, яке залежить від температури та атмосферного тиску, слід враховувати цей фактор. Важливо зауважити, що ця корекція зазвичай невелика, окрім випадків вимірювань на великих висотах. Інтенсиметричний калібратор також використовується для перевірки фазової узгодженості каналів інтенсиметричної системи. У цьому контексті визначаються показники тиск-інтенсивність та динамічні характеристики системи.

Усереднення за часом

Для мінімізації випадкових відхилень рекомендується використовувати часове усереднення, що забезпечує консистентність та відтворюваність результатів. Оптимальний час усереднення можна встановити, проводячи послідовні вимірювання із поступовим збільшенням часового інтервалу. Такі вимірювання слід проводити до моменту, коли результати стають стабільними.

Усереднення по простору

При вимірах із зондом, який переміщується, важливо рівномірно покрити весь обрану опорну поверхню. Зонд повинен переміщуватися із сталою швидкістю. Якщо вимірювання проводяться в дискретних точках, кількість цих точок на поверхні повинна враховувати можливі зміни в інтенсивності звуку. Якщо інтенсивність звуку значно змінюється, кількість точок виміру слід збільшити. В досвідчених руках можна визначити оптимальну кількість точок для вимірювань.

Фонові шуми

При стаціонарних фонових шумах можливо забезпечити точність інтенсиметричних вимірювань з похибкою не більше 1 дБ, навіть якщо рівень шуму на 10 дБ вищий за рівень звуку від досліджуваного джерела. Для оцінки впливу фонових шумів можна виміряти звукову потужність після відключення джерела звуку. Зменшення відстані до джерела звуку допоможе знизити вплив фонових шумів і підвищити точність вимірювань [47].

Інтенсиметричні зонди

Модель 3595 - це інтенсиметричний зонд, розроблений для роботи з двоканальними спектральними аналізаторами, такими як модель 2260. У цьому зонді використовується спеціалізована пара мікрофонів моделі 4197, що дозволяє вимірювати інтенсивність звуку в діапазоні частот від 20 Гц до 6,3 кГц.



Рис. 2.6 Інтенсиметричний зонд 3595

3599 – Це універсальний зонд для вимірювання інтенсивності, розроблений для взаємодії з аналізатором спектра моделі 3560. В основі зонду лежить узгоджена пара мікрофонів моделі 4197, що забезпечує можливість вимірювання інтенсивності акустичних хвиль у діапазоні частот від 20 Гц до 6,3 кГц.

Набір для вимірювань інтенсивності моделі 2260e:

Аналізатор 2260 (див. рис. 2.7) у співпраці з програмним обладнанням BZ 7205 та зондом для вимірювання інтенсивності 3595 надає можливість здійснювати інтенсиметричні дослідження, спрямовані на визначення потужності акустичних хвиль, локалізацію джерел шуму та визначення акустичних параметрів об'єктів. Автоматичне позиціонування датчика та акустичний зворотний зв'язок під час вимірювань дозволяють зосередитися на детальному аналізі обраної території. Мобільна система для вимірювання акустичної потужності надає можливість проводити негайний аналіз потужності та інтенсивності звуку безпосередньо на місці дослідження.



Рис. 2.7 Модульний аналізатор 2260

Модульний аналізатор 2260 - це мобільний інструмент для аналізу віброакустичних процесів у режимі реального часу, який відзначається широким спектром практичних застосувань. Завдяки цим характеристикам, даний прилад визнаний однією з найефективніших у світі мобільних систем для дослідження та аналізу акустичних та вібраційних явищ [48].

Використання вузькосмугового спектру (FFT) або спектру в широкій смузі

Відмітимо також, що ідея вимірювання інтенсивності і прийняття відповідного рішення щодо виявлення цілі – не є новою (див. наприклад роботи джерелах [8,9]).

Проте, реалізація шумопеленгатор на основі лише вимірювання інтенсивності не є оптимальним, тому для підвищення надійності застосовано також вузькосмугова та широкосмугова фільтрація і тракт кореляційного пеленгування [49-55].

Для широкосмугової фільтрації застосована гребінка тритинооктавних смугових та напівоктавних фільтрів. В свою чергу тракт вузькосмугового спектру, являє собою октавний смуговий НХ фільтр та блок розрахунку швидкого перетворення Фур'є.

2.1.3 Теоретичні засади трактів пеленгування

Основні принципи обробки прийнятих акустичних сигналів

Акустичні відгуки, що були сформовані як визначені зондуючі акустичні хвилі, після їхнього проходження через АК, перетворюються. Атрибути отриманих відгуків, такі як амплітуда, частота, фаза, затримка часу, та форма огинаючої, істотно відмінні від параметрів вихідного зондуючого сигналу. Під час розповсюдження, хвилі переживають деформації, і їх параметри стають випадковими змінними, що коливаються у часі та просторі. Для аналізу отриманих відгуків найбільш використовуються часові, частотні та кореляційні методики. Часовий аналіз полягає у визначенні часового інтервалу, протягом якого може з'явитися відгук, та дослідженні його амплітуди та форми. Частотний аналіз полягає у вивченні частотного спектра відгуку та його характеристик за допомогою статистичного аналізу сигналів, отриманих у різний час. Кореляційний аналіз допомагає встановити взаємозв'язок між вихідним та відображеним сигналами в активних системах локації або між отриманими сигналами у завданнях пасивної локації.

Найпоширенішим інструментом для спектрального дослідження як нерегулярних, так і регулярних сигналів [56,57] є пара перетворень Фур'є:

$$\begin{aligned} \dot{X}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt; \\ x(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}(\omega)e^{j\omega t} d\omega; \end{aligned} \quad (2.15)$$

Комплексний спектр представимо у вигляді: $\dot{X}(\omega) = |\dot{X}(\omega)| e^{-j\varphi(\omega)}$

Модуль комплексної спектральної функції $|\dot{X}(\omega)|$ називається амплітудним спектром, а її аргумент $\varphi(\omega)$ - фазовим спектром. Пряме перетворення Фур'є конвертує сигнал, визначений у часовій області, в його спектральний аналог. Оскільки перетворення Фур'є є взаємно однозначним, інформація з часового діапазону переходить до частотного без будь-яких втрат. Раніше, під час аналізу методів модуляції, сигнали були представлені у формі рядів Фур'є. Коефіцієнти цього ряду представляють собою амплітудно-частотний спектр періодичного вібрування.

Порівнюючи спектральні елементи вихідного та отриманого сигналів, можна дізнатися про абсорбуючі властивості АК, оцінити геометрію та структуру об'єкта виявлення, а також встановити його швидкість. У завданнях пасивної локації (діагностика механізмів, виявлення та визначення напрямку до об'єктів) застосовують вузькосмуговий частотний аналіз у поєднанні зі статистичним аналізом [121].

Кореляційний метод пеленгування

Метод кореляційної обробки спрямований на встановлення взаємозв'язку між випромінюваними та отриманими сигналами у контексті активних та пасивних локаційних завдань. Основним показником цього зв'язку є кореляційна функція (КФ), яка відображає взаємозв'язок між двома сигналами, розділеними певним часовим інтервалом. Аналіз кореляції сигналів полягає у встановленні залежності КФ від часової затримки τ одного з сигналів [57-59]. Чим вище значення, яке приймає ця

функція, тим більше схожість між сигналами. Математичні відносини, що описують КФ, наведені далі:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot x(t - \tau) dt \quad (2.16)$$

Для порівняння двох сигналів $x_1(t)$ та $x_2(t)$ використовують взаємну кореляційну функцію (ВКФ):

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) \cdot x_2(t - \tau) dt \quad (2.17)$$

ВКФ дозволяє знайти взаємний спектр сигналів - взаємна спектральна густина потужності сигналів $x_1(t)$ та $x_2(t)$, $\dot{X}_{12}(\omega)$ використавши перетворення Фур'є:

$$\dot{X}_{12}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{12}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau; \quad (2.18)$$

Взаємний спектр (ВС) двох сигналів є результатом перемноження спектру одного сигналу $\dot{X}_1(\omega)$ (2.15) на комплексно спряжену величину спектру $\dot{X}_2^*(\omega)$ іншого:

$$\dot{X}_{12}(\omega) = \dot{X}_1(\omega) \dot{X}_2^*(\omega) \quad (2.19)$$

З даного рівняння можна вивести ключовий пункт: якщо спектри двох різних сигналів не мають спільних областей, то їхній взаємний спектр буде рівний нулю, отже, їх взаємна кореляційна функція (ВКФ) також буде рівна нулю [60]. Це означає, що сигнали, чий спектри не мають спільних частин, є некорельованими між собою. Якщо ми розглянемо взаємний

спектр одного й того ж сигналу, то з використанням (2.19) ми отримаємо енергетичний спектр даного сигналу $x_1(t)$:

$$\dot{X}_1(\omega)\dot{X}_1^*(\omega) = |X_1(\omega)|^2 \quad (2.20)$$

ВКФ двох сигналів може бути знайдена через обернене перетворення Фур'є від функції їх взаємного спектру:

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}_{12}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2.21)$$

Поклавши $x_1(t) = x_2(t) = x(t)$, $\tau = 0$, використавши співвідношення (2.17), (2.20) та (2.21), отримаємо рівність Парсеваля:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{X}(\omega)|^2 d\omega \quad (2.22)$$

Ефективне значення спектру сигналу $\Delta f_{\text{еф}}$ оцінюють із співвідношення [60] повної енергії сигналу до квадрата максимального значення його амплітудного спектру $|\dot{X}_m(\omega)|^2$:

$$\Delta f_{\text{еф}} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{X}(\omega)|^2 d\omega}{2\pi |\dot{X}_m(\omega)|^2} \quad (2.23)$$

Ефективне значення тривалості імпульсу $\delta_{\text{еф}}$ оцінюють як тривалість імпульсу прямокутної форми з амплітудою $X_m = 1$ через часову огинаючу імпульсу або спектр амплітуд, тобто:

$$\delta_{ef} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt}{X_m^2} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |\dot{X}(\omega)|^2 d\omega \quad (2.24)$$

Для числової характеристики часового інтервалу подібності процесів використовують інтервал кореляції τ_0 , який визначається по спаду кореляційної функції на 10% від свого максимуму.

Тракт кореляційного методу пеленгування базується на виявленні змін у коефіцієнті автокореляції та відповідному електричному параметрі (наприклад, струмі, що проходить через індикаторний контур) у системі обробки при спрямуванні на об'єкт [60].

Отже, застосовуючи цей підхід до акустичної антени, можна зробити наступний висновок: якщо акустичні хвилі надходять перпендикулярно до бази антени, то електричні напруги на приймачах будуть у фазі. Проте, якщо напрямок приходу акустичних хвиль відхиляється від перпендикуляра до бази, то електричні напруги на виходах приймачів матимуть фазове та часове відхилення відносно одне одного [61].

Метод рівносигнальних зон

Метод рівносигнальних зон полягає у вимірюванні акустичних сигналів за допомогою однонаправлених мікрофонів зі зміщеними максимумами характеристик направленості. Визначаючи амплітудне відношення на різних прийомниках, знаючи кут між максимумами прийомників можна визначити кутові координати шумлячого об'єкта.

Так як об'єкт випромінює широкосмуговий за спектром (2.25) сигнал постає питання, визначення амплітуди найбільш вираженої частоти взаємного спектру (2.26). Тільки після визначення, орієнтуючись на цю частоту, по отриманим амплітудам вимірюємо відношення амплітуд на приймачах і отримаємо кутові координати шумлячого об'єкта [34].

$$X_1(f) = \int_0^T x_1(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt; X_2(f) = \int_0^T x_2(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt; \quad (2.25)$$

$$G_{xy}(t) = 2 \cdot X_1^*(t) \cdot X_2(t) = C_{xy}(t) + iQ_{xy}(t). \quad (2.26)$$

Однонаправлені мікрофони

При комбінуванні характеристик направленості мікрофона, який об'єднує ненаправлену та двонаправлену характеристики, спостерігається наступне: у фронтальному напрямку чутливість мікрофона підвищується, оскільки сигнали сумуються в одній і тій же фазі. У той час як у зворотному напрямку чутливість знижується, оскільки сигнали нейтралізують одне одного через різницю у фазах.

Розглянемо мікрофон, який діє як приймач тиску і має чутливість S_1 , що не змінюється від кута падіння хвилі. Тоді інший мікрофон, який діє як приймач градієнта тиску, має чутливість $S_2 \cos \alpha$. Якщо ми встановимо чутливості цих двох мікрофонів на осі так, щоб вони були рівними ($S_1 = S_2$), то характеристика направленості цієї комбінованої системи мікрофонів буде мати певний вигляд:

$$D(\alpha) = (S_1 + S_1 \cos \alpha) / 2S_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha) \quad (2.27)$$

Діаграма спрямованості, яка має форму кардіоїди, є результатом комбінації характеристик двох мікрофонних капсул, розташованих в єдиному корпусі. У 30-40 роках минулого століття такий підхід був популярним для створення комбінованих мікрофонів. Проте, через різницю в амплітудних та фазових властивостях різних типів мікрофонів, можливість досягти односторонньої направленої характеристики була

обмежена лише кількома октавами. Така обмеженість у відтворенні частотного діапазону була однією з причин, чому цей метод не знайшов широкого застосування в сучасних технологіях запису звуку.

В сучасних односторонньо направлених мікрофонах використовується один перетворювач з двома або більше акустичними входами для доступу звукової хвилі до діафрагми, однак в них умови доступу звукової хвилі до передньої і задньої частини діафрагми неоднакові. Такі перетворювачі відносяться до групи несиметричних приймачів градієнта тиску (рис. 2.8). Фазовий зсув між звуковими хвилями, падаючими на передню і задню сторону діафрагми, складається з "зовнішнього", що залежить від довжини шляху між передньою і тильною стороною діафрагми $\Delta\varphi_1 = 2\pi(D \cos\alpha)/\lambda$, і "внутрішнього" $\Delta\varphi_2$, що визначається внутрішньою масою і пружним опором повітря в обсязі під діафрагмою і в отворах (для регулювання цього опору отвори закриваються шовком і ін.) [34]. Таким чином, сила F_3 , діюча на задню поверхню мембрани, відстає від сили F_1 , що діє на передню поверхню, як на зовнішній, так і на внутрішній фазовий зсув:

$$F_3 = p_{\text{зв}} S \cdot \sin(\omega t - \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2) \quad (2.28)$$

Зовнішній фазовий зсув, який визначається кутом падіння звукової хвилі, впливає на характеристику направленості мікрофона. Він змінюється в залежності від $\cos\alpha$, де α - це кут падіння. На відміну від зовнішнього, внутрішній фазовий зсув є сталим і не змінюється від кута падіння. Шляхом регулювання різниці між цими фазовими зсувами, можна домогтися формування різних видів односторонніх характеристик направленості. Таким чином, можливість керування фазовими зсувами надає інженерам гнучкість у створенні мікрофонів з конкретними характеристиками направленості для різних застосувань.

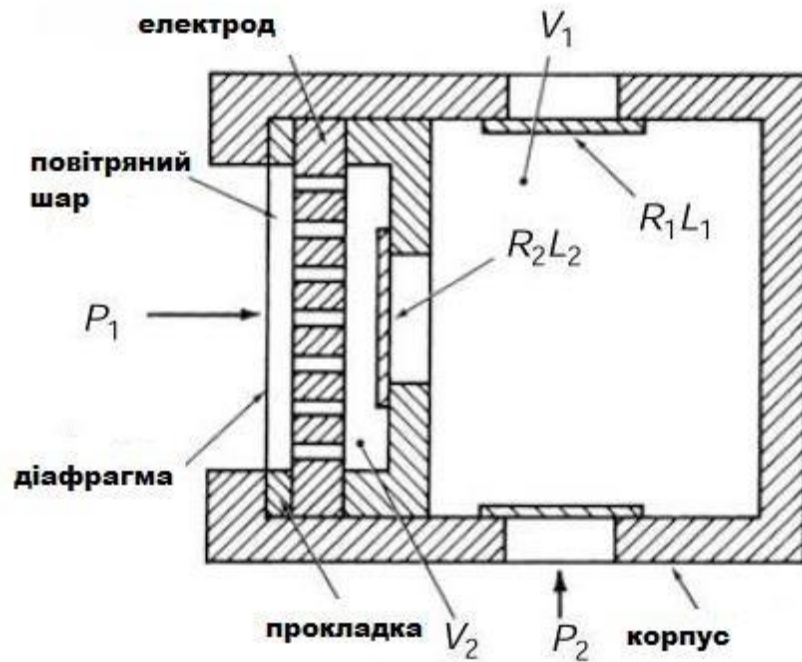


Рис. 2.8. Корпус з отворами

Сучасні спрямовані мікрофони, незалежно від їх конструктивного виконання - конденсаторні або динамічні, в основному належать до категорії несиметричних приймачів градієнта тиску [62].

Важливою особливістю антенного пристрою, призначеного для пеленгування, є його здатність визначати пріоритетність пеленгування. Це означає, що пристрій повинен точно визначати кут пеленгування до джерела шуму, наприклад, шумлячого аеродинамічного об'єкта, який було виявлено [56].

Конструктивно антенний пристрій містить дев'ять мікрофонів. П'ять з них, розташованих в горизонтальній площині, призначені для пеленгування (див. рис. 2.9). Мікрофони 1-4 формують чотири рівносигнальні зони для пеленгування. П'ятий мікрофон використовується для визначення конкретної зони, в якій відбувається визначення курсового кута до цілі.

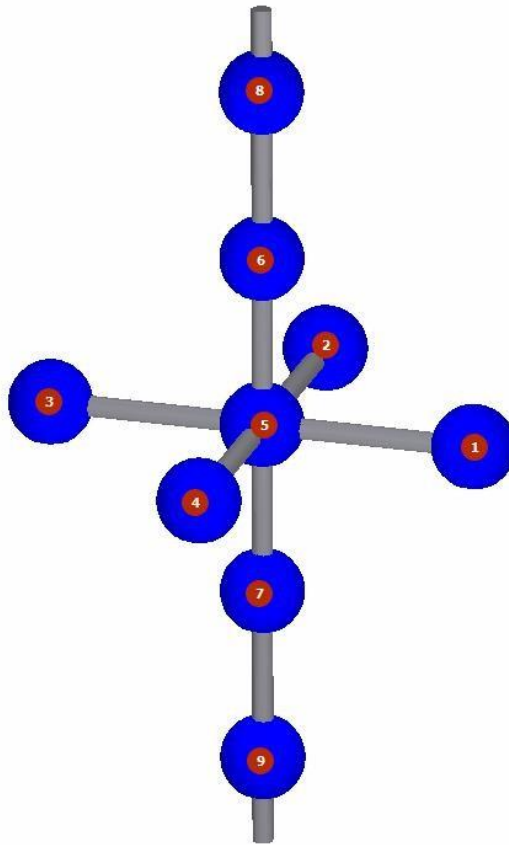


Рис.2.9. Модель антени пристрою виявлення та шумопеленгування
(склад. 1-9однонаправлені/ненаправлені мікрофони)

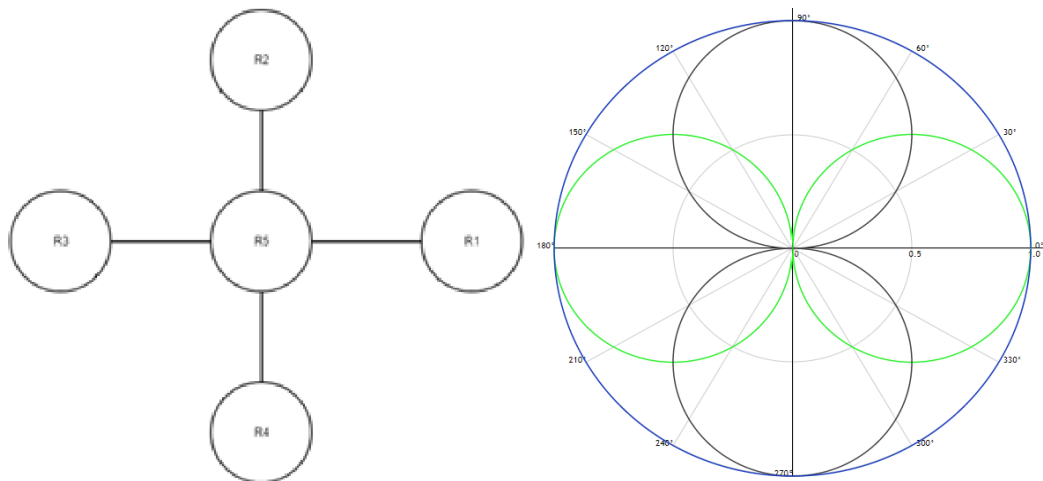


Рис. 2.10. Схема розміщення п'яти антенних елементів у просторі, та їх
ХН

Визначення кутової координати у кожній з зон відбувається за допомогою вектора сумарних напруг з двох каналів антени. Під каналом

розуміється зустрічне включення мікрофонів 1,3 та 2,4 (умовно синус та косінус).

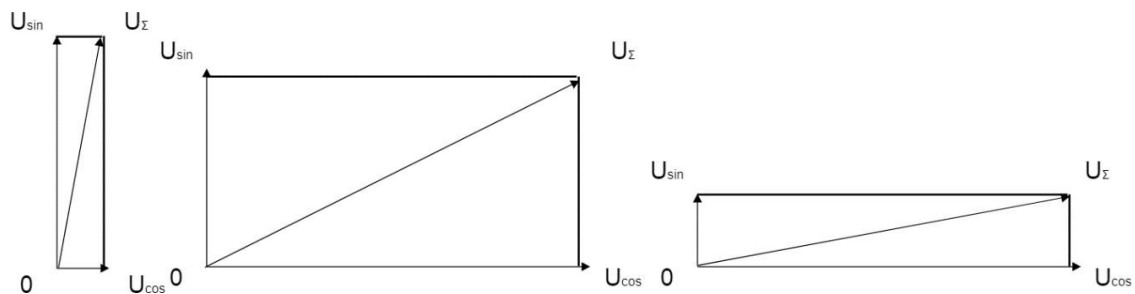


Рис. 2.11. Вектори напруг: сумарної, з каналу «sin» та каналу «cos»

Кут, який утворюється між умовною акустичною віссю антенного пристрою (або акустичною віссю першого антенного елементу) та вектором напруги, отриманим з двох каналів, визначає первинний напрямок до джерела шуму в атмосфері.

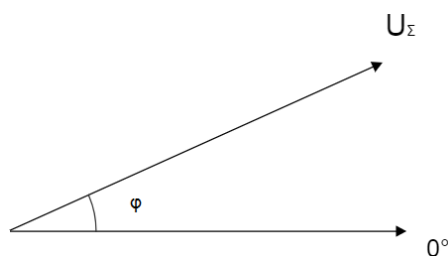


Рис. 2.12 Векторне визначення пеленгу

Фінальний етап визначення кутової координати полягає у встановленні зони (або квадранту), де було виявлено векторну відповідність та де було розраховано відповідний кут [63]. Цей процес реалізується завдяки п'ятому компоненту антенного пристрою. Специфічно, він полягає у визначенні фазового відхилення сигналу між першими чотирма елементами антени та п'ятим елементом. На рис. 2.13 наведено схему визначення квадранту на основі фази прийнятого сигналу.

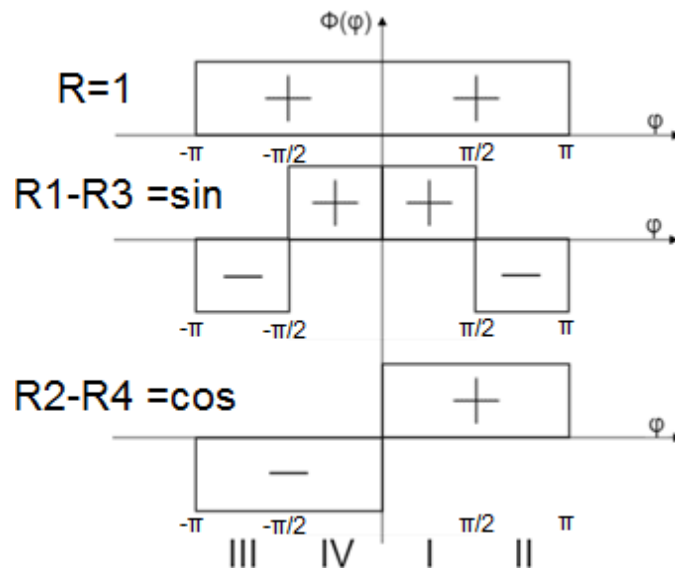


Рис. 2.13. Визначення квадранту за фазою прийнятого сигналу відносно п'ятого антенного елементу($R=1$)

Основні перешкоди представлені у вигляді шумів. Для мінімізації їх впливу необхідно визначити найбільш придатний діапазон роботи обладнання, здійснювати захист від електромагнітних завад [64]. Процес фільтрації прийнятого сигналу додатково допоможе знизити кількість помилкових активацій системи [34].

2.2 Огляд шумоподібних сигналів та завад в задачах шумопеленгування

Класифікація шумів

При використанні засобів шумопеленгування необхідно спиратися не лише на властивості шумлячого об'єкта, а й на ситуацію завад в районі застосування пристрою. Нижче подано класифікацію основних джерел шуму, спричинених повсякденною діяльністю людини, що можуть впливати на роботу тракту шумопеленгування БПЛА [10, 65-69].

Шум автомобілів і транспортних потоків

В індустріально розвинених країнах автомобільний транспорт відповідає за 60-80% екологічних викидів, включаючи акустичне забруднення. Автомобільний шум визнаний однією з основних причин параметричного забруднення, що викликає занепокоєння серед спеціалістів у галузях автомобілебудування, управління транспортом, регулювання дорожнього руху та містобудування. З ростом автомобільного руху області, піддані акустичному впливу, розширюються, роблячи проблему контролю за транспортним шумом актуальною з соціальної точки зору [70-72].

Кожний рухомий механізм, включаючи автомобіль, під час роботи випромінює енергію. Однією з форм цієї енергії є звукові хвилі. Основними джерелами шуму у рухомому автомобілі є шум ходової частини, шум від кочення коліс та аеродинамічний шум. Шум ходової частини формується з комбінації шуму двигуна, шуму трансмісії та допоміжних устаткувань.

Вібрації, що виникають в автомобілі, можуть викликати шум, який випромінюється через вібруючі частини шасі та кузова. У легкових автомобілях, під час прискорення або руху на низьких швидкостях, домінуючим є шум ходової частини. Проте на автострадах цей шум може бути приглушений аеродинамічним шумом та шумом кочення. У великих транспортних засобах, таких як вантажівки та автобуси, шум приводу залишається домінуючим навіть на великих швидкостях [125].

Шум кочення в автомобільному транспорті виникає в результаті взаємодії шин автомобіля з дорожнім покриттям. Цей шум є результатом зіткнення шини з нерівностями на дорозі та витисканням повітря з пазів протектора. Інтенсивність цього шуму залежить від багатьох факторів,

зокрема від швидкості автомобіля, типу шини, стану дорожнього покриття та інших.

Інтенсивність шуму кочення зростає зі збільшенням швидкості автомобіля. Це пояснюється тим, що при вищих швидкостях шина частіше зіткнеться з нерівностями дороги, що призводить до більшої кількості вібрацій і, відповідно, до більшого рівня шуму. Якщо розглядати залежність інтенсивності шуму від швидкості, то при подвоєнні швидкості рівень шуму збільшується приблизно на 9 дБ.

Тип шини також впливає на рівень шуму кочення. Зимові шини, як правило, видають більше шуму порівняно з літніми. Це пов'язано з особливостями конструкції зимових шин, їхнім протектором та матеріалами. Крім того, шини з ґрунтозачепами можуть створювати додатковий шум через їхню взаємодію з дорожнім покриттям.

Стан дорожнього покриття є ще одним важливим фактором, який впливає на шум кочення. Гладке асфальтове покриття видає менше шуму порівняно з рифленим або брукованим. Тому для зменшення рівня шуму в житлових районах рекомендується використовувати гладке покриття.

Важливо зазначити, що абсолютне зниження шуму кочення є неможливим, оскільки це може призвести до зниження безпеки руху. Наприклад, абсолютно гладкі шини можуть знизити зчеплення з дорогою, що є небезпечним. Тому завжди потрібно шукати оптимальний баланс між зниженням шуму та забезпеченням безпеки руху.

При значних швидкостях автомобільного руху виникає відчутний компонент шуму, що визначається опором аеродинамічного потоку. Даний шум, в основному, має широкий спектр і є результатом формування вихорів, при цьому його акустична потужність приблизно корелює з п'ятою або шостою степенями швидкості руху. У певних моделях автомобілів можна виявити "свистячі" звукові відтінки в шумі, які

виникають через періодичне формування вихорів (наприклад, через деталі багажника) або через резонанс у вільних порожнинах. Коли вікна авто відчинені (повністю або частково), всередині можуть формуватися коливання тиску в інфразвуковій області, що нагадує ефект резонансу, відомий як явище Гельмгольца. Зниження гучності транспортних засобів і автомобільних потоків у цілому ведеться за двома напрямками. Це, в першу чергу, боротьба із шумом самих автомобілів і їхніх вузлів, що досягається за рахунок:

- переходу до малошумних двигунів;
- оптимізації процесів горіння;
- капотування чи екранування двигуна; використання покриттів, які заглушують шум, і звукопоглинаючих матеріалів;
- оптимізації твердості блока циліндрів;
- використання нових конструкційних матеріалів для зниження структурного звуку;
- встановлення більш ефективних глушників і збільшення їхньої кількості;
- оптимізації трубопроводів вихлопної й всмоктувальних систем; застосування труб з більш товстими стінками і їхнім облицюванням;
- удосконалення коробки передач;
- демпфування вала вентилятора, а також зниження швидкості і тривалості обертання за рахунок використання лопатей більшого розміру і термостата;
- поліпшення гальм для зниження їх “вереску”; поліпшення аеродинаміки кузова.

Інший шлях - це нормування шуму [81-86] автомобілів. Законодавством ФРН установлені гранично припустимі рівні шумової емісії автомобілів (дБА):

- легкові автомобілі 80 ... 84
- вантажні автомобілі, автобуси і таксі 88 ... 89
- автомобілі підвищеної потужності 92
- мотоцикли 84
- мопеди 73 ... 79
- велосипеди зі знімним мотором 70 ... 73

Уповноважені органи Австралії можуть зупиняти транспортні засоби і проводити вимір шуму [10]. Припустимі рівні шумової емісії різних типів автомобілів і транспортних засобів попадають у діапазон 79...97 дБА.

Шум автомобіля в транспортному потоці є типовим широкосмуговим шумом, у якому наявні дискретні складові на низьких і середніх частотах. Приклад спектра шуму легкового автомобіля при русі в режимі розгону до швидкості 60 км/год із середнім прискоренням $0,8 \text{ м/с}^2$ у смузі частот (31,5...4000) Гц наведено на рис. 2.14.

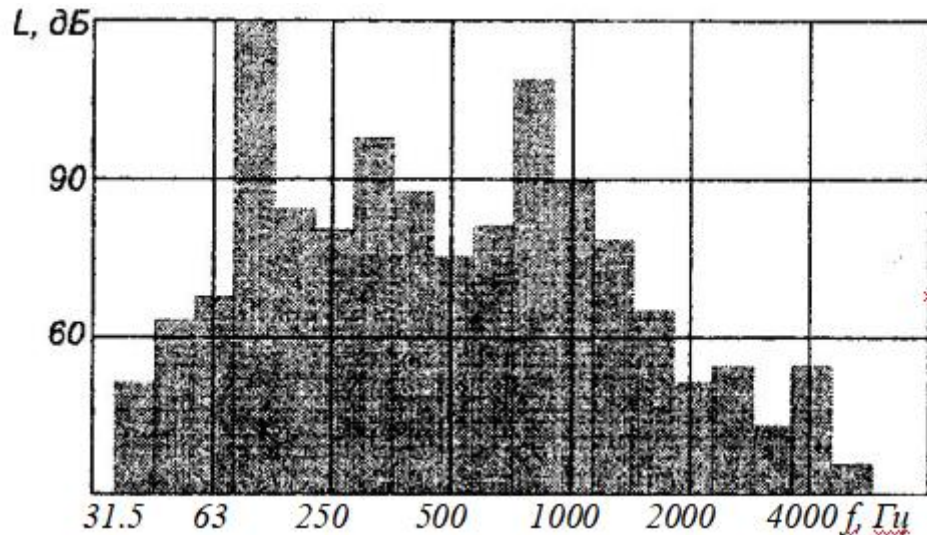


Рис. 2.14 Спектр шуму легкового автомобіля

Відзначимо, що найбільше зниження шуму спостерігається для найважчих транспортних засобів, у яких шум двигуна є домінуючим.

Шум авіаційного транспорту

В усіх країнах протягом останніх десятиліть проблема боротьби з акустичним забрудненням навколишнього середовища від авіаційного транспорту, особливо по близькості аеропортів, є загальною. Тому, при конструюванні нових літаків, виборі режимів зліту і посадки, а також при будівництві нових і реконструкції старих аеропортів, враховуються проблеми шуму, що можуть виникнути.

Шум, що створюється різними видами літальних апаратів за своїми характеристиками дуже різний. Це в першу чергу пов'язано з різними джерелами шуму цих літальних засобів [73-74].

Розглянемо ці джерела шуму для літаків і вертольотів з різними типами двигунів.

У реактивних літаках джерелами шуму є ряд факторів: реактивний викид, робота турбіни, діяльність компресора та дія повітряного вентилятора. Вклад кожного з цих компонентів в загальний рівень шуму в основному визначається характеристиками двигуна, зокрема його двоконтурністю (байпасним коефіцієнтом) та режимом роботи.

Реактивний викид та турбіна генерують шум, що спрямований в основному назад, тоді як компресор та повітряний вентилятор випромінюють шум як спереду, так і ззаду літака.

Сучасні тенденції в авіаційній промисловості націлені на розробку двигунів з великим байпасним коефіцієнтом, який може досягати значення восьми.

Проте, для надзвукових літаків, як правило, використовуються одно- або двоконтурні двигуни з низьким байпасним коефіцієнтом.

Шум, що виникає від реактивного струменя, обумовлений турбулентністю в зоні змішування - це область, де відбувається

змішування вихорів, розташована на відстані кількох діаметрів від виходу сопла двигуна.

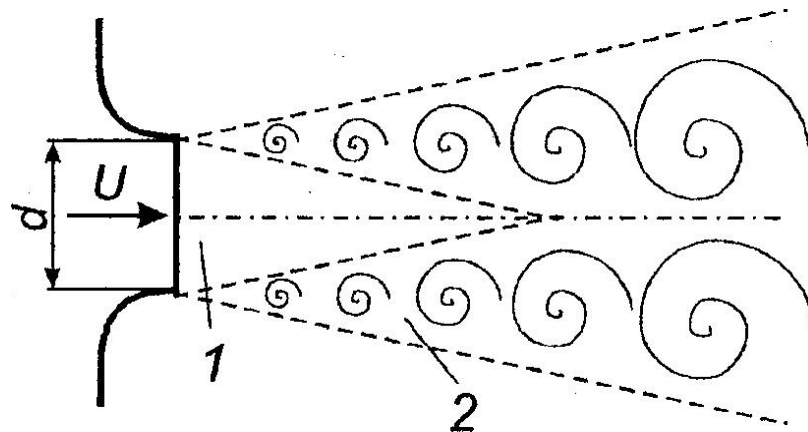


Рис. 2.15 Геометрія вільного турбулентного струменя

На рис. 2.15 схематично зображена геометрія вільного турбулентного струменя, де 1 - потенційне ядро; 2 - зона змішування.

Якщо в ядрі і зоні змішування відсутні які-небудь турбулізатори, то створюваний шум струменя – широкопasmовий.

Якщо в ядрі і зоні змішування відсутні які-небудь турбулізатори, то створюваний шум струменя - широкопasmовий. У надзвукових струменів ($M > 1$, M - число Маха, $M = V / c_0$, V - швидкість витікання струменя, c_0 - швидкість звука в незбудженому акустичному середовищі) частотний максимум звукової потужності розташований в області.

В області $0,7 < M < 1,6$ звукова потужність турбулентного струменя зростає пропорційно восьмому ступеню швидкості витікання, і розраховується за формулою:

$$P \approx 10^{-4} \left(\frac{1}{2} \rho_c V^8 \frac{S}{c_0^5} \right) \quad (2.29)$$

де ρ_c - густина у зоні змішування; S - площа вихідного перерізу сопла.

В області $M > 2$ звукова потужність, за рахунок зменшення коефіцієнта турбулентності зі збільшенням швидкості струменя, змінюється пропорційно третьому ступеню швидкості витікання і визначається за формулою:

$$P \approx 6 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1}{2} \rho_c V^3 S \right) \quad (2.30)$$

В області $M < 0,7$ шум струменя дуже часто маскується іншими джерелами шуму. У цьому випадку місцем виникнення шуму є не зона змішування, а вихідний отвір сопла.

Якщо в потенціальному ядрі струменя знаходиться турбулізатор, то виникають чітко виражені дискретні тони, що підвищують звукову потужність на 10 ... 20 дБ. Наведемо додаткові відомості, що стосуються реактивних двигунів.

Спектральний аналіз шуму компресорів виявляє наявність як широкосмугових, так і тональних компонентів. Широкосмугова частина спектру виникає внаслідок турбулентних взаємодій потоку з лопатками ротора та статора, а також через неоднорідний процес відділення вихорових структур від поверхні лопаток. Ці аеродинамічні взаємодії породжують нерегулярні пульсації, які, взаємодіючи з лопатками, викликають дипольне звуковипромінювання. Тональні компоненти в спектрі шуму виникають через періодичні коливання аеродинамічних навантажень на лопатках. Основною причиною цих коливань є взаємодія лопаток ротора з аеродинамічним потоком, що минув напрямні лопатки. Варто відзначити, що обидва згаданих джерела шуму мають дипольну природу. Основний тон має частоту $f = BN$, де B - кількість лопатей ротора; N - частота обертання ротора. У вхідних та вихідних каналах ротаційні поля акустичного тиску ініціюють специфічні моди вібрацій, які, залежно від умов, розповсюджуються у зовнішньому середовищі.

Ключовими факторами, які впливають на акустичні характеристики компресорів та вентиляторів, є: обертова швидкість лопаток, кількість лопаток у роторі та статорі, відстань між статором та ротором, а також розміри самого компресора або вентилятора. Зі збільшенням відстані між напрямними лопатками та ротором інтенсивність шуму спочатку зменшується, але потім стабілізується.

Атенуація або загасання вібраційних мод під час їх руху крізь канал визначається імпедансом обшивки, частотними характеристиками та швидкістю потоку.

У випадку, коли обертова швидкість лопаток перевищує звукову швидкість, формуються ударні хвилі, які можуть мати різниці через невідповідності між лопатками.

Ці ударні хвилі, рухаючись у напрямку до входу, можуть посилити свою нерівномірність. На вході розподіл тиску встановлюється так, що його циклічність становить $2T$. Такий розподіл тиску під час ротації лопаток із швидкістю, що відповідає частоті N обертання ротора, викликає генерацію основного гармонічного з частотою N , а також відповідних гармонік.

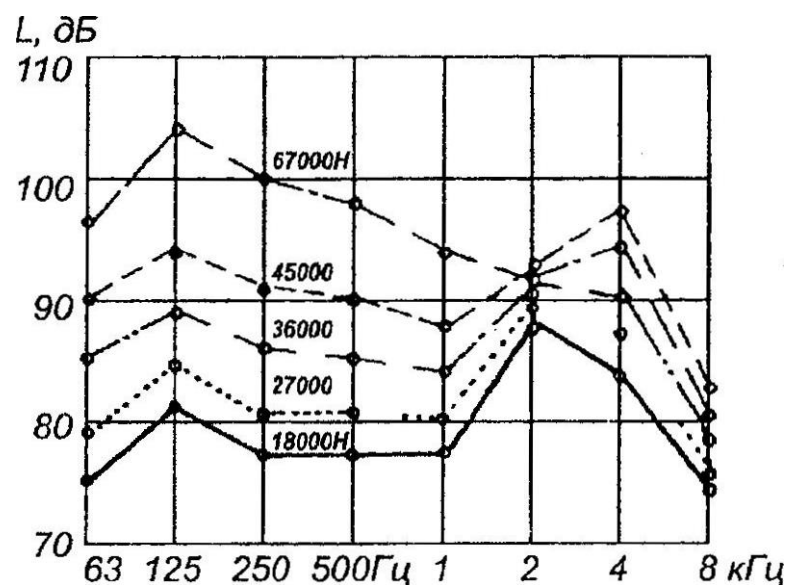


Рис.2.16 Максимальні значення октавних рівнів шуму літака ДС-8-62

Як наближену формулу для розрахунку максимального рівня шуму на рівні повітродувки в октавній смузі з частотою $f = BN$, на відстані $l = 50$ м використовується вираз:

$$L = 50 \lg V_s + 21 \lg D - 17 \quad (2.31)$$

де $V_s = 2\pi Tr_s$ - швидкість руху кінців лопатей; r_s - відстань від кінця лопатей до осі ротора; D - діаметр компресора.

Численні дослідження шумових характеристик літаків встановили залежність спектрів їхнього шуму від навантаження двигуна.

На рис. 2.16, як приклад, наведені максимальні значення октавних рівнів шуму літака ДС-8-62 обладнаного чотирма двигунами ИГЗД-ЗВ з подовженими вихідними каналами повітродувки при різній тязі на одному двигуні. Висота польоту 300м.

Слід зазначити, що моменти виникнення максимальних значень шуму під час прольоту, як правило, не збігаються через розбіжність у характеристиках направленості при різних навантаженнях двигуна [120, 125].

На рис. 2.17 зображені третьоктавні спектри різних літаків: а -при зльоті; б - при посадці.

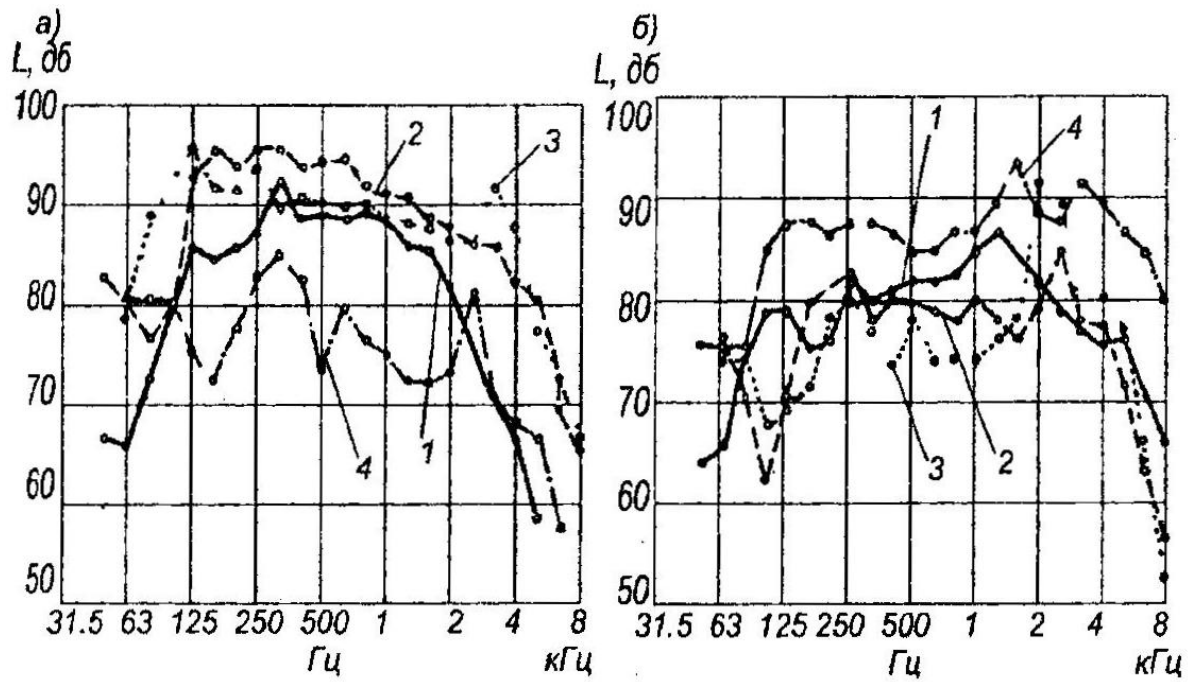


Рис. 2.17 Третьооктавні спектри різних літаків

Характеристики літаків, для яких на рис. 2.17 наведені їхні спектри, зазначені в рис. 2.18.

Тип літака	Максимальна злітна маса, т	Тип двигуна	Ступінь двокоптурності	Відстань до літака у момент прольоту d, м		Спектри шуму
				Зліт	Посадка	
NA265 "Сейбр-лайнер"	9	2ХЛТ12А-8	0	600	110	1
В727	77	3ХЛТ8Д	1,1	300	290	2
ДС-8-50	143	4ХЛТ3Д-3	1,5	350	340	3
И747-100	320	4ХЛТ9Д-3	5	700	110	4

Рис. 2.18 Характеристики літаків

Поршневі двигуни використовуються зараз практично лише на спортивних чи пасажирських літаках. Шум переважно створюється двигуном і гвинтом.

Характеристика направленості шуму літака з поршневим двигуном показана на рис. 2.19. Турбогвинтовий двигун займає проміжне місце між реактивним і поршневим. Такі двигуни в даний час використовуються на невеликих пасажирських літаках місцевих авіаліній [122].

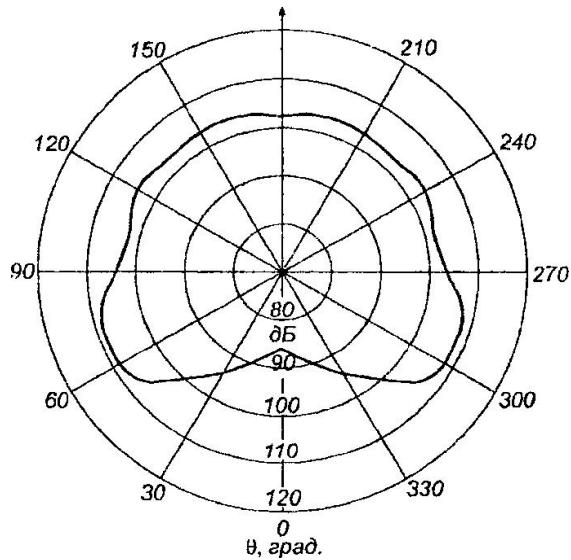


Рис. 2.19 Характеристика направленості шуму літака з поршневим двигуном показана

На рис. 2.20 подано октавні спектри шуму літаків Р-27 із двома поршневими двигунами в режимі зльоту (крива 1), і з турбогвинтовим двигуном у режимі зльоту (крива 2) і посадки (крива 3). Дистанція польоту 300м.

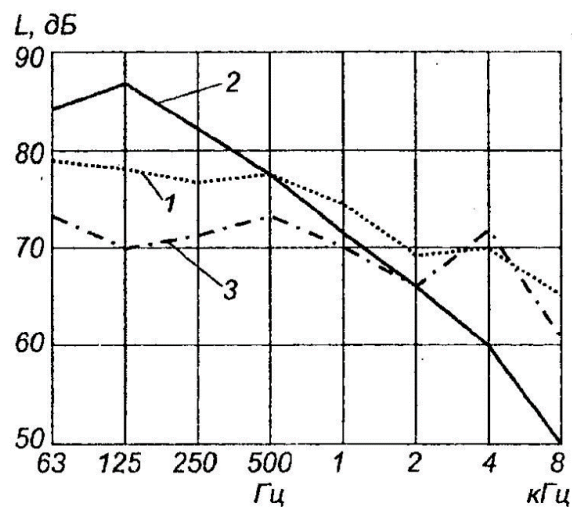


Рис. 2.20 Октавні спектри шуму літаків Р-27

Під час надзвукового польоту літак створює аеродинамічний потік, що приводить до звукового удару. Ділянку поверхні землі, на якій чутний цей удар, називають зоною звукового удару. Аеродинамічний потік утворюється, як правило, хвилями стиску, що відходять від передніх і задніх частин фюзеляжу і крил, а також “віялом” хвиль розширення, що розташовується між ними. Зі збільшенням відстані від літака хвилі стиску накладаються одна на одну, що призводить до різкого збільшення тиску на початку і в кінці цієї системи хвиль. Подібне збільшення тиску називають ударними хвилями.

Згадана система хвиль слідує разом з літаком, досягає поверхні землі й, залежно від особливостей її поверхні, відбивається і розсіюється. Система хвиль тиску, яка утворена задаючими і відбитими хвилями, сприймається як ударна хвиля.

Основними виробниками акустичних вібрацій у вертольотах є його ротори та двигуни. У вертольотах, що використовують поршневі двигуни, основним джерелом шуму є сам двигун. Проте, численні вертольоти обладнані газотурбінними двигунами, де акустичний вплив реактивного струменя та турбіни є менш вираженим порівняно з шумом від ротора. Шум, що генерується компресором, зазвичай має високу частоту і слабо сприймається на значних відстанях.

На рис. 2.21 показані залежності максимального рівня шуму вертольотів від злітної маси. Графік наведений для двох випадків: поршковий привод (крива 1) і газотурбінний привод (крива 2). Виміри були проведені на відстані 75м.

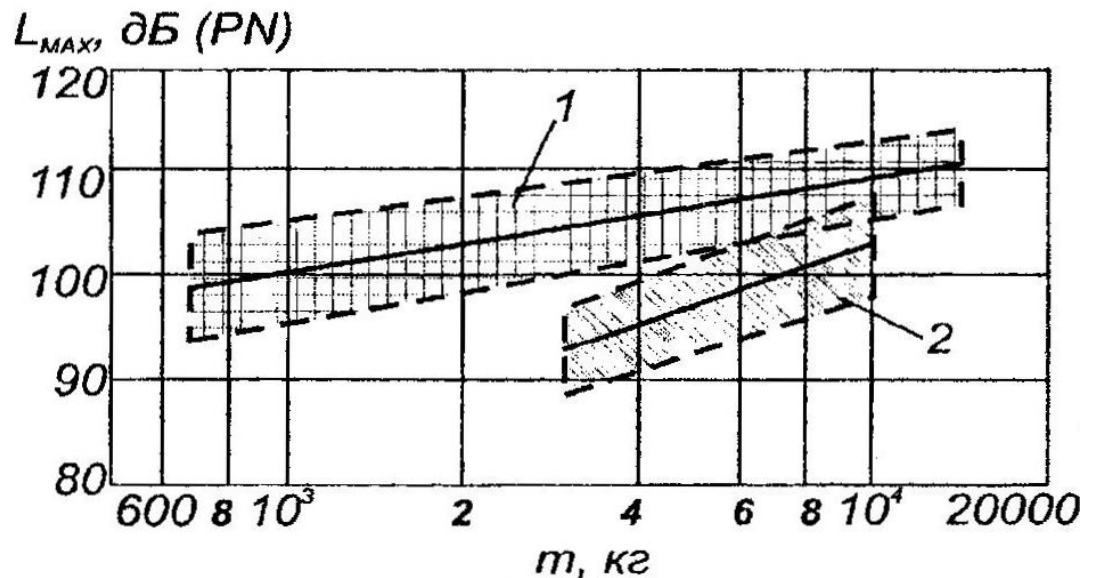


Рис. 2.21 Залежності максимального рівня шуму вертольотів від злітної маси

Деякий розкид у значеннях рівнів (заштриховані зони на рисунку) зумовлений тим, що виміри проводилися в режимі польоту з набором висоти і польоту на постійній висоті.

Спектр акустичних вібрацій, які генеруються ротором вертольота, формується з тональних компонентів (звуки, пов'язані з обертанням) зі стабільною частотою та широкосмуговими шумами. У звуковому спектрі ротора вертольота може бути представлено до 50 гармонік від основного тону. Тональні компоненти виникають через аеродинамічні сили, які діють на лопатки ротора. Ці сили містять як постійні (такі як підйомна сила та опір), так і змінні компоненти.

Основним джерелом змінних аеродинамічних сил є взаємодія між лопаткою ротора та вихровим слідом від попередньої лопатки. Додатково, асиметричне обтікання лопаток під час горизонтального руху вертольота викликає періодичні зміни в аеродинамічних силах, оскільки швидкості польоту та обертання лопаток додаватимуться та відніматимуться взаємно.

Широкосмуговий акустичний відгук виникає через аеродинамічні взаємодії, що впливають на лопатку ротора. Основною причиною цього явища є турбулентні вихори, ініційовані потоком від попередньої лопатки. Такі турбулентні структури взаємодіють з наступною лопаткою, викликаючи широкосмугові коливання та, відповідно, акустичне випромінювання.

Експерименти показали, що інтенсивність тональних складових зростає приблизно пропорційно десятому ступеню швидкості кінців лопатей V_s , тоді як інтенсивність широкосмугового шуму буде приблизно шостого ступеня V_s . Зі збільшенням кількості лопатей B , при постійній потужності, рівень дискретних тонів знижується на 4 ... 5 дБ із кожною додатковою лопаттю. При сталих значеннях B і V_s і змінному кроці гвинта, тональні складові змінюються лише незначно, а інтенсивність широкосмугового шуму приблизно пропорційна квадрату тяги.

Експериментально було встановлено, що при спуску гвинтокрила зі зниженою потужністю двигуна різко зростає звуковипромінювання (гуркотання ротора) на частоті BN і на більш високих, ніж звичайні, гармоніках. Причина цього явища - миттєва різка зміна піднімальної сили лопаті при проходженні біля вихору, що зірвався з однієї із лопатей.

Загалом, існують два основних підходи до регулювання шуму цивільних літаків, які висвітлені у джерелах [75-76].

Перший підхід базується на врахуванні санітарних та гігієнічних стандартів, де встановлюються допустимі рівні шуму, при яких негативний вплив на здоров'я людини мінімізується або відсутній. Другий підхід ґрунтується на технічному нормуванні шуму, де використовуються методи, які дозволяють регулювати інтенсивність шуму літаків на основі перевірених та технічно виконуваних методів зниження шумового випромінювання. Таким чином, санітарно-гігієнічні норми встановлюють

критерії для зниження шуму, тоді як технічні норми вказують на практично досяжні рівні шуму від авіаційних джерел.

Згідно з міжнародними рекомендаціями ІКАО, інтенсивність шуму літаків регулюється в залежності від їх максимальної злітної маси та враховується у трьох ключових контрольних точках. На рис. 2.22 показана схема розташування точок виміру шуму.

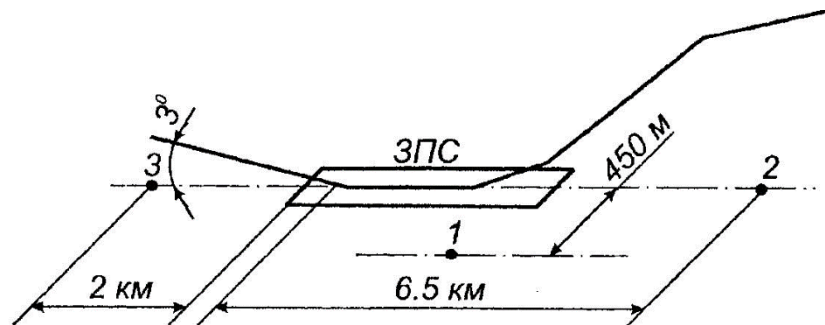


Рис. 2.22 Схема розташування точок виміру шуму

Мікрофони розміщуються у визначених локаціях: 1 - під час підйому літака на відстані 450 м від центральної лінії злітно-посадкової доріжки (ЗПД) для сучасних моделей літаків або 650 м для літаків старіших конструкцій; 2 - під час висхідного руху літака на відстані 6500 м від початкової точки розбігу; 3 - під час зниження для посадки за допомогою звичайної глісади на відстані 2000 м до початку ЗПД. Дійсні показники рівня шуму вітчизняних авіаційних апаратів з реактивними двигунами представлені на рис.2.23. [122-124].

Тип літака	Максимальна злітна маса, т	Кількість двигунів	Тяга двигуна, т	Кут відхилення за крилків (зліт/посадка)	Вимірювані рівні шуму, EPN дБ		
	Максимальна посадочна маса, т	Тип двигуна	Ступінь двоконтурності		Точка 1	Точка 2	Точка 3
Ту-134	$\frac{45}{40}$	$\frac{2}{\text{ДЗ0 Ісер}}$	$\frac{6,3}{1}$	$\frac{10}{38}$	$\frac{101,9}{103}$	$\frac{92,9}{95,5}$	$\frac{101,4}{103}$
Ту-154	$\frac{96,98}{78}$	$\frac{3}{\text{НК 8 - 2У}}$	$\frac{10,5}{1}$	$\frac{28}{45}$	$\frac{97,8}{105}$	$\frac{101,1}{100,5}$	$\frac{106}{105}$
Іл-62 М	$\frac{167}{107}$	$\frac{4}{\text{ДЗ0 КУ}}$	$\frac{11}{2,46}$	$\frac{30}{30}$	$\frac{95,2}{106,5}$	$\frac{107,2}{104,5}$	$\frac{103,2}{106,6}$
Іл-76 Т	$\frac{170}{151,5}$	$\frac{4}{\text{ДЗ0 КП}}$	$\frac{12}{2,3}$	$\frac{30}{30}$	$\frac{102,7}{106,6}$	$\frac{103,1}{104,6}$	$\frac{108,9}{106,6}$
Іл-86	$\frac{206}{175}$	$\frac{4}{\text{НК - 86}}$	$\frac{13}{1,3}$	$\frac{25}{40}$	$\frac{106}{107,2}$	$\frac{107}{106}$	$\frac{107}{107,2}$
Як-42	$\frac{53,5}{49,5}$	$\frac{3}{\text{Д - 36}}$	$\frac{6,5}{5,35}$	$\frac{20}{45}$	$\frac{94,3}{103,3}$	$\frac{93,7}{96,3}$	$\frac{102,5}{103,3}$
Як-40	$\frac{16}{14,7}$	$\frac{3}{\text{АИ - 25}}$	$\frac{1,5}{2}$	$\frac{20}{35}$	$\frac{85,3}{102}$	$\frac{88,7}{93}$	$\frac{99,3}{102}$

Рис 2.23 Фактичні рівні шуму вітчизняних літаків з реактивними двигунами

Для пропелерних літаків цивільного призначення обмежувальні норми шуму прямо корелюють з їхньою максимальною злітною масою. Для великих пропелерних аеронавтичних апаратів (де злітна маса вища за 9000 кг) вводиться система обмежень, аналогічна тій, що застосовується для реактивних літаків. Щодо літаків з меншою злітною масою, обмеження шуму встановлюється в єдиній контрольній точці: безпосередньо під маршрутом горизонтального перельоту на висоті 300 м, де двигуни працюють у максимальному режимі. У такому контексті, допустимий рівень шуму не має перевищувати 68 та 80 дБА для максимальних злітних мас, які становлять, відповідно, менше 600 кг та понад 1500 кг.

Також відомі результати експериментальних досліджень середніх рівнів звуку, дБА сучасних легких двомоторних літаків АН-28 75.7дБА і Л-410 УВП 75.1дБА.

Шум рейкового транспорту

Залежно від функціонального призначення, рейкова транспортна система класифікується на: дальнього сполучення, включаючи надвисокошвидкісні лінії, приміські та міські комунікації [10,71,77].

Зовнішнє акустичне випромінювання на ділянках шляху від поїздів дальнього сполучення охоплює аудіальний діапазон частот, який людина сприймає: від декількох десятків герц до 15...20 кГц (див. рис. 2.24). Варто відзначити, що частина спектра, що перевищує 500 Гц, є типовою для високошвидкісних поїздів, тоді як діапазон до 400 Гц є характерним для вантажних композицій.

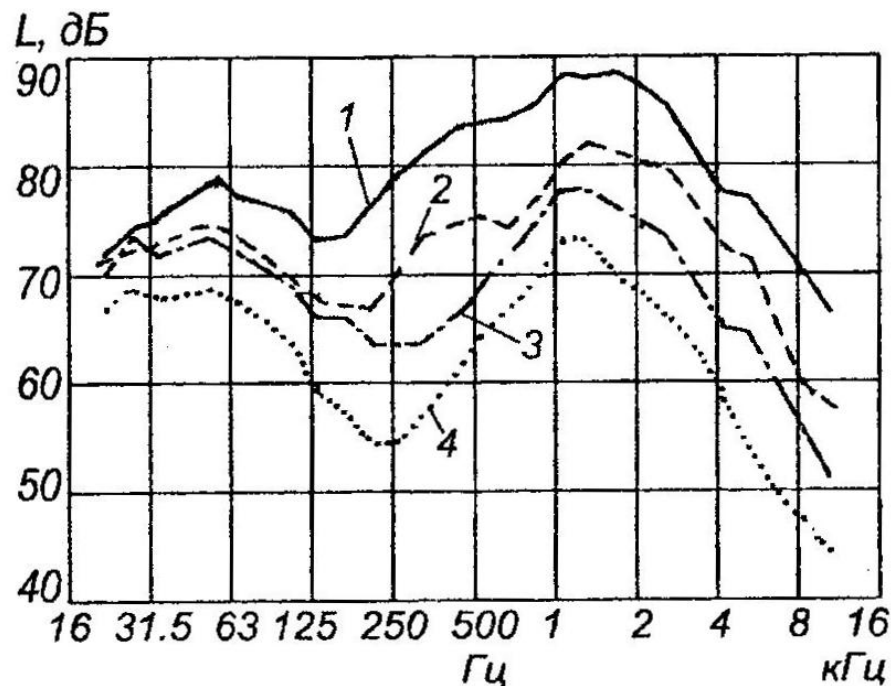


Рис. 2.24 Спектр шумів на перегонах

На рисунку 1,23 наведені третьоктавні усереднені рівні зовнішнього шуму залізничних потягів, що проходять зі швидкістю 120 км/год. Рейки покладені на щебеневу основу. Криві відповідають випадкам, коли вимірювальні датчики розміщувалися на різній відстані від потягу: 1 — відстань 10 м, висота над рейками 2 м, шум 90 дБА; 2 — відстань 25 м, висота над рейками 12 м, шум 89 дБА; 3 — відстань 50 м, висота над

рейками 1,2 м, шум 84 дБА; 4 — відстань 100 м, висота над рейками 1,2 м, шум 79 дБА.

При нерегулярностях на поверхні рейок та колісному обладнанні дії, вказані в таблицях, слід коригувати на додаткові 5 дБА. У випадку вираженої хвилястості ці значення можуть досягати додаткових 15 дБА. Рейки, закріплені на бетонних шпалах, характеризуються на приблизно 2 дБА нижчим рівнем шуму порівняно з тими, що розташовані на дерев'яних шпалах.

Також існують відмінності між вологими та сухими рейками. На частотних діапазонах до 500 Гц при збільшенні швидкості перевищуючи 80 км/год, рівні шуму залишаються майже незмінними. Проте на частотах, що перевищують 500 Гц, вони можуть збільшитися на середнє значення в 10 дБА. [123-125].

Електровози і тепловози з гарними глушниками впуску і вихлопу не виділяються в загальному шумі потягу.

Шум вентиляторів на швидкостях нижче 80 км/год зливається із шумом руху. Шум паровозів може перевищувати шум потягу приблизно на 10 дБА.

Якщо уздовж полотнини залізниці встановлені штучні екрани чи висаджені лісозахисні смуги (чагарники, дерева), то вони можуть істотно знизити шум від потягу.

Заміри показали, що зниження шуму руху потягу за рахунок встановлення уздовж шляху щитових екранів висотою 1...2,5 м уздовж рейок на відстані 3 метрів складає 9... 14 дБА. Зелені насадження, висаджені уздовж полотнини залізниці ефективні лише при значній ширині насадження. Зелена смуга шириною 50 м, що поросла густим чагарником, забезпечує зниження шуму потягу, який йде зі швидкістю 20 км/год на 5...10 дБА.

Шум, що виникає від потяга, що пересувається мостом, обумовлений не лише параметрами швидкості його руху. Важливими факторами є також архітектурні та матеріальні особливості мостової конструкції (чи виготовлений він зі сталі або ж залізобетону) та спосіб, яким рейки кріпляться до мостової платформи.

При неякісній поверхні рейок і коліс рівні шуму у вагонах підвищуються на 5 дБА і більше.

У сучасних спальних вагонах при швидкості руху 120 км/год рівень шуму у купе в кінці вагона досягає 67 дБА, а в середині вагона - 52 дБА. Рівень шуму у вагонах менш сучасної конструкції на 5 дБА вище.

Зменшення удвічі швидкості руху приводить до зниження рівнів шуму у вагоні приблизно на 9 дБА. Неприємні відчуття викликає шум колодкових гальм, що підвищує шум у вагоні на 13 дБА. У вагонах з дисковими гальмами шум зростає усього на 2 дБА.

Рівні шуму потягу метрополітену, який рухається в тунелі зі швидкістю 60 км/год, складають 90... 100 дБА. Неякісність шляху підвищує рівні шуму на 10 дБА, а подвоєння швидкості руху - ще на 10 дБА.

Шум на станціях, які мають звичайні стелі без звукобильного облицювання, при розгоні поїзда і гальмуванні досягає 80 дБА, а за наявності такого облицювання - 74 дБА; середній час реверберації - відповідно 2 і 1 с.

Зовнішнє акустичне випромінювання трамвая, що рухається по дорожньому покриттю на щебеневій підставі зі швидкістю 40 км/год на віддалі 7,5 м від рейкової доріжки та на висоті 1,25 м від рейок, досягає 81 дБА. При збільшенні швидкості до 60 км/год цей показник зростає до 86 дБА. У випадку, коли між рейками розташоване асфальтоване дорожнє

покриття, акустичний рівень трамвая при швидкості 40 км/год становить 87 дБА, тоді як при 60 км/год - 91 дБА.

Коли трамвай пересувається по мостовій конструкції, виконаній з бетону, інтенсивність шуму в середньому збільшується на 4 дБА.

Шум двигунів внутрішнього згоряння

Двигуни внутрішнього згоряння застосовуються в багатьох транспортних засобах і на деяких стаціонарних установках (будівельні машини, агрегати аварійного живлення тощо). Тому в звичайних виробничих умовах вони дуже поширені. Двигуни внутрішнього згоряння внаслідок особливостей принципу їх дії належать до інтенсивних джерел звука. Рух у них часто супроводжується невеликими вибухами. Крім того, двигуни складаються з багатьох механічних деталей, які при різких зворотно-поступальних рухах дістають значні прискорення.

Звукове випромінювання двигунів внутрішнього згоряння формується з трьох основних компонентів: шуму вихлопних газів, шуму процесу всмоктування та акустичного випромінювання самого двигуна. Кожна з цих складових має свої особливості утворення та механізми взаємодії.

Шум, що виникає від вихлопних газів, обумовлений пульсаціями при виведенні відпрацьованих газів з циліндра. У відсутності глушника ця складова домінує в загальному акустичному спектрі двигуна. Її звукова потужність може досягати від 0,01% до 0,1% від загальної потужності двигуна. Вона здається незначною. Однак слід зазначити, що 1 Вт акустичної потужності створює рівень звукового тиску 92 дБ на відстані 10 м.

Шум всмоктування набагато слабший за шум вихлопу, оскільки об'єм впуску повітря (холодне повітря без палива) менший, ніж об'єм

вихлопних газів; крім того, всмоктування повітря відбувається не так різко, як його викидання.

Шум, що випромінюється безпосередньо двигуном (блоком циліндрів, картером з піддоном), за своєю звуковою потужністю на два-три порядки (тобто на 20...30 дБ) нижчий, ніж шум вихлопу.

Акустичне випромінювання двигуна внутрішнього згоряння формується внаслідок ряду факторів. Зокрема, відбуваються процеси згоряння палива в коморах згоряння, а також механічні взаємодії, такі як робота клапанів, рух поршнів, удари паливної системи під час впорскування палива та взаємодія зубчастих передач.

В дизельних двигунах ключовим джерелом шуму є сам процес згоряння. У бензинових двигунах цей процес є менш інтенсивним: іскра від свічки запалювання ініціює горіння в конкретній точці, і потім вогонь розповсюджується по всьому об'єму циліндра. Однією з переваг бензинового двигуна з акустичної точки зору є те, що при низькому навантаженні в циліндр потрапляє менший об'єм повітря, що знижує інтенсивність низькочастотних коливань тиску. У той же час, в дизельних двигунах, незалежно від режиму роботи, низькочастотні компоненти шуму залишаються на стабільному рівні.

Експериментально доведено, що рівень звукової потужності власне двигунів внутрішнього згоряння можна наближено обчислити за формулою:

$$L_p \approx 57 + 10\lg(n_N N) + 10\lg(n/n_N), \quad (2.32)$$

де n_N — номінальна частота обертання ротора; N — номінальна потужність; n — робоча частота обертання ротора.

На рис. 2.25 наведені рівні шуму і вібрації деяких двигунів внутрішнього згоряння. На рис. 2.25, а показано рівні звукової потужності 12-циліндрового двигуна, а на рис. 2.25,б - рівні звукової вібрації деяких двигунів, вимірювані на опорах над амортизаторами.

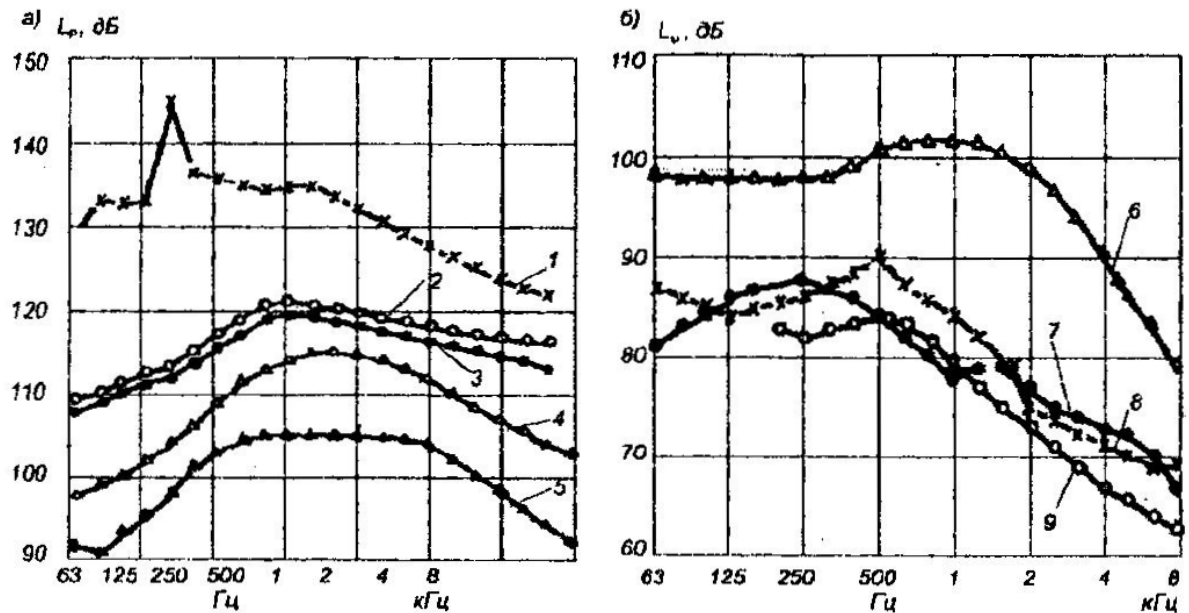


Рис. 2.25 Рівні шуму і вібрації деяких двигунів внутрішнього згоряння

На цих рисунках криві 1...9 наведені для наступних випадків: 1 - 1700 об/хв,

$1,8 \cdot 10^6$ Вт, вихлоп без глушника; 2 - 1700 об/хв, $1,8 \cdot 10^6$ Вт, блок циліндрів із системою всмоктування; 3 - 1700 об/хв, 0 Вт, блок циліндрів із системою всмоктування; 4 - 800 об/хв, $0,26 \cdot 10^6$ Вт, блок циліндра із системою всмоктування; 5 - 600 об/хв, 0 Вт, блок циліндрів із системою всмоктування; 6 - 1700 об/хв, $1,8 \cdot 10^6$ Вт, повне навантаження, дизель з низькою масою на одиницю потужності; 7 - 800 об/хв, $0,22 \cdot 10^6$ Вт, неповне навантаження, дизель з низькою масою на одиницю потужності; 8 - 1200 об/хв, $0,22 \cdot 10^6$ Вт, повне навантаження, дизель з високою масою на одиницю потужності; 9 - 4000 об/хв, $0,004 \cdot 10^6$ Вт, карбюраторний двигун.

Шум електроустаткування

Шум і вібрація електроустаткування визначаються, як правило, механічними, аеродинамічними, магнітними та термоелектрохімічними явищами. Оскільки майже все електроустаткування має рухомі й обертові частини, то шум і вібрація від дисбалансу підшипників, елементів, що вентилують, є неминучими [78-80]. Для реле і контактів характерний ударний механічний шум, пов'язаний з вмиканням і вимиканням їх. Шум переривачів електричної енергії має характер розряду, що супроводжується ударом.

Електричні машини (ЕМ) створюють шум з різними рівнями звука: від 20...30 дБА (практично безшумні спеціальні машини та деякі мікромашини) до 100...110 дБА (великі швидкохідні машини). Рівень шуму більшості ЕМ становить 65...90 дБА. В умовах експлуатації машин до шуму, який випромінюється власне ЕМ, додається шум, котрий випромінюється іншими конструктивними елементами, що збуджуються внаслідок віброактивності ЕМ.

Магнітний шум ЕМ значною мірою залежить від власних частот, форми статора, властивостей випромінювальної поверхні. У більшості типів ЕМ магнітний шум має частоти, які лежать у діапазоні 0,1...4 кГц, тобто в діапазоні найбільшої чутливості вуха. Тому магнітний шум добре прослуховується на фоні шуму інших джерел, що знижується в зоні високих частот. Оскільки магнітні шуми мають дискретний спектр, то вони найбільш небажані для суб'єктивного сприйняття.

Все сказане щодо магнітних радіальних сил справедливе для асинхронних і синхронних машин. У цих ЕМ, крім радіальних сил, виникають також і тангенційні сили, які мають ті самі частоти, що і радіальні.

У більшості випадків тангенційні магнітні сили за модулем істотно менші, ніж радіальні. Тангенційні сили слід урахувати в мік-ромашинах і великих турбогенераторах.

Аеродинамічний шум обертової ЕМ має характер фоновому шуму, на який накладаються дискретні складові. Фоновий шум виникає внаслідок неупорядкованих відривів вихорів у газоподібному середовищі, яке використовується всередині машини для її охолодження.

Причиною аеродинамічних дискретних складових найчастіше є ефект сирени, рідше — періодичні відриви вихорів. Обидва ефекти — «завихрення» охолодженого газу і періодичне “зрізання” потоку — не залежать один від одного, і їх можна розглядати окремо.

Як правило, вважають, що при колових швидкостях ротора і внутрішнього вентилятора, вищих за 50 м/с, аеродинамічний шум повністю визначає загальний шум обертової ЕМ. Шум найбільш гучних швидкохідних ЕМ, що мають примусову вентиляцію, звичайно визначається акустико-аеродинамічними ефектами. Цей висновок привів до переорієнтації на початку 60-х років щодо оцінки складових шуму ЕМ. Перевагу в дослідженнях почали віддавати аеродинамічним шумам. За допомогою експериментальних досліджень удалося встановити закономірності, які дають змогу гарантувати точність прогнозованих рівнів шуму до ± 3 дБ.

Для розрахунку звукової потужності ЕМ як джерела аеродинамічного шуму використовують таку залежність:

$$P = \gamma_0 (v_k / c_r)^{5.5} S_p \quad (2.33)$$

де γ_0 — константа, що залежить від жорсткості поверхні ротора і властивостей охолодженого газу; v_k — колова швидкість ротора; c_r —

швидкість звука в газовому середовищі; $S_p = \pi dl$ — площа зовнішньої поверхні ротора; d — діаметр ротора; l — довжина ротора.

Асинхронні і синхронні двигуни з циліндричними нечітко вираженими полюсними роторами створюють шум зі спектральним максимумом, що знаходиться в інтервалі від 800 Гц до 4 кГц. Спектральний максимум шуму машин з чітко вираженими полюсами ротора, як правило, лежить у діапазоні від 100 до 800 Гц.

Шум вентиляторів

Спектр шуму вентиляторів характеризується широкосмуговим фоном і тональними складовими, що на нього накладаються. Широкосмуговий шум створюється випромінювачами дипольного типу внаслідок зривання вихорів і турбулентності потоку, що набігає на нерухомі елементи конструкції. Тональні дискретні складові породжуються силами, що періодично змінюються і виникають внаслідок взаємодії рухомих і нерухомих жорстких елементів конструкції вентилятора і пов'язаних з цим пульсацій потоку, що набігає на зазначені елементи.

Найчастіше застосовують відцентрові (радіальні) та осьові (аксіальні) вентилятори. На рис. 2.26 наведені середні спектри шуму відцентрового (крива 1) та аксіальних (2,3) вентиляторів. Крива 2 відповідає більшій продуктивності і потужності вентилятора, а крива 3 — меншим, відповідно).

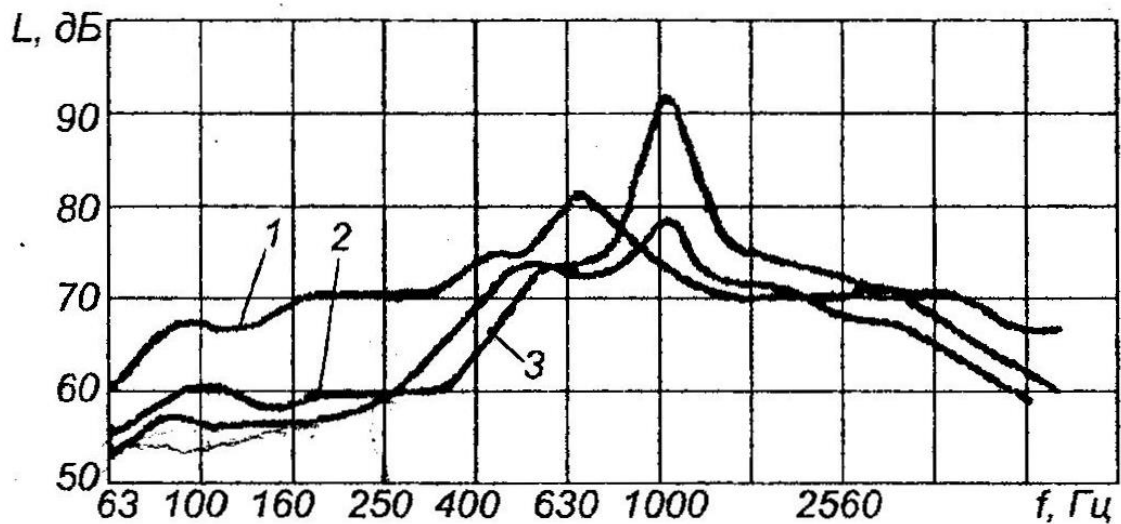


Рис. 2.26 Середні спектри шуму

На підставі багатьох експериментів було розроблено емпіричні залежності для розрахунку рівнів звукової потужності вентиляторів. Одна з них має такий вигляд:

$$L_p \approx 80 + 10 \lg N_K + 10 \lg \Delta p, \quad (2.34)$$

де N_K — корисна потужність вентилятора; Δp — повний напір, тобто різниця тисків між боком нагнітання та боком всмоктування вентилятора.

З формули випливає, що шумність вентиляторів зростає із збільшенням їхньої потужності, і це природно.

Причиною шуму в системах вентиляції, крім власне вентиляторів, є фасонні елементи повітроводів (повороти, трійники, повітророзподільники). Конструктивні заходи щодо зниження шуму вентиляторів допустимі тільки тоді, коли вони істотно не знижують їхню продуктивність. Колова швидкість лопатей як відцентрових, так і осьових вентиляторів відносно середовища, що транспортується, повинна бути мінімально можливою за умови збереження продуктивності вентиляторів.

Зниження шуму відцентрових вентиляторів досягається в основному за рахунок:

- збільшення кількості і розмірів лопатей;
- зниження втрат напору раціональним з погляду аеродинаміки доббором форми вхідного отвору (дифузор, який напрямляє лопаті);
- застосування по можливості угнутих (загнутих уперед) лопатей (для низького тиску).

Крім того, відстань між язиком і робочим колесом має бути максимальною з урахуванням вимог аеродинаміки. Частота лопатей не має бути кратною власним частотам корпусу.

Для зниження шуму осьових вентиляторів вживають таких заходів:

- збільшення кількості, ширини і діаметра лопатей;
- використання профільованих лопатей;
- добір раціональної з погляду аеродинаміки форми вхідного і вихідного отворів для зниження втрат напору (дифузори, конічні маточини);
- збільшення кута встановлення;
- зменшення зазору робочого колеса (у невеликих межах);
- установлення напрямних апаратів за робочими лопатями;
- усунення завад потоку на вході.

Крім того, абсолютно необхідне балансування вентиляторів, центрування валів вентилятора і двигуна, застосування малOSHумних підшипників.

Збільшення кількості лопатей робочого колеса вентилятора введенням другого ярусу, частина лопатей якого укорочені (для запобігання захаращенню вхідного перерізу), не виключає, але знижує (залежно від щільності лопатей) інтенсивність складових на частотах основних (довгих) лопатей.

Для осьових вентиляторів велике значення має вибір оптимального співвідношення кількості лопатей робочого колеса і випрямного

(напрямого) колеса, оскільки від цього залежать дискретні складові спектра. Із збільшенням кількості робочих лопатей зменшується звукова потужність вентиляторів внаслідок зменшення змінних сил тиску на лопатях одночасно із збереженням загальної продуктивності.

Зниження шуму відцентрових вентиляторів досягають збільшенням зазора між колесом і язиком завитки. При віддаленні від колеса на відстань, що приблизно дорівнює кроку, нерівномірність поля швидкостей за колесом практично зникає, а отже, і зникає причина появи дискретного шуму і вібрації на частотах лопатей. Таким чином можна зменшити шум на 10... 15 %

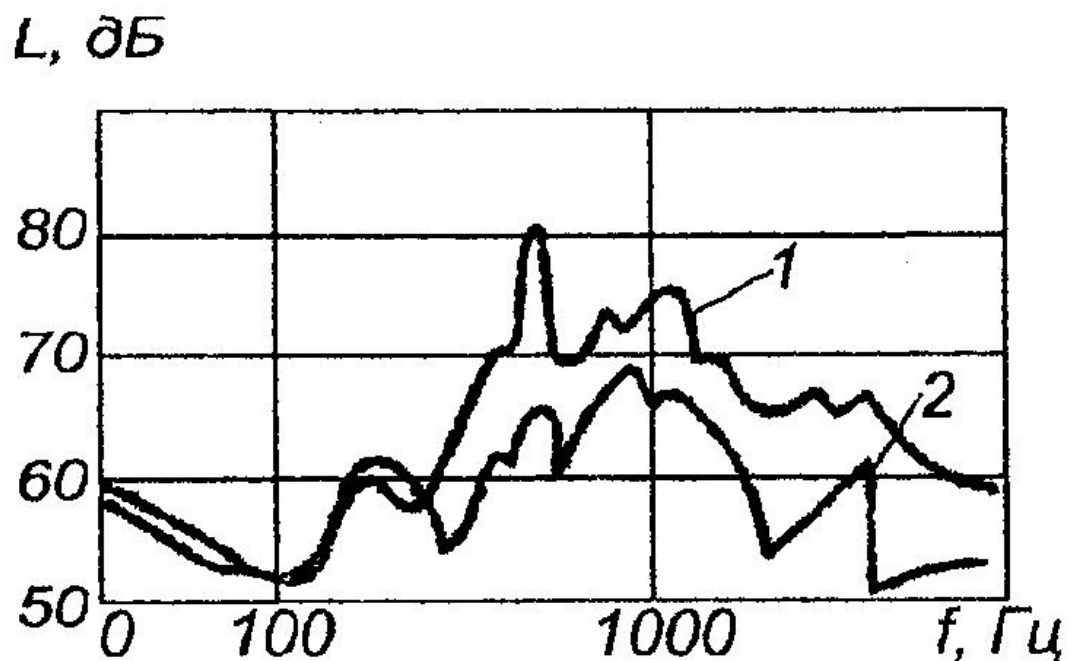


Рис 2.27 Спектри шуму відцентрового вентилятора

Застосування скошеної щодо вихідних кромek лопатей вхідної кромки язика завитки дає змогу істотно зменшити шум вентилятора. На рис. 2.27 наведені спектри шуму відцентрового вентилятора з прямим (крива 1) та скошеним (крива 2) язиками. Ефект від скошення може становити 10... 12 дБ унаслідок заглушення основної частоти шуму та її

гармонік. Оптимальний кут скосу язика, що, як правило, дорівнює 30...40°, визначається за формулою:

$$a = \arctg(t_l - d_k) / l_k, \quad (2.35)$$

де t_l — крок лопатей по зовнішньому радіусу колеса; d_k — діаметр вхідної кромки колеса; l_k — ширина робочого колеса.

При однакових початкових швидкостях колова швидкість на 10 % менша, ніж у звичайних вентиляторів, що забезпечує зниження шуму на 25...30 дБ при значно менших габаритних розмірах.

Хоча у системах вентиляції і кондиціонування повітря основним джерелом шуму є безпосередньо вентилятор (їхні рухомі елементи і створюваний ними аеродинамічний шум), не можна не враховувати шум, що передається від джерела по повітропроводах, а також той, що виникає у повітропроводах (каналах) при проходженні повітряного потоку. Оскільки затухання звука у сталевих вентиляційних повітропроводах, які не облицьовані всередині поглиначем, невелике, то шум власне вентилятора може поширюватися в інші приміщення, що віддалені від цього вентилятора [10,87].

Зниження шуму в системах вентиляції і кондиціонування повітря забезпечується:

- застосуванням простих малорозгалужених віток;
- обмеженням продуктивності (витрата повітря не повинна перевищувати допустимої за санітарними нормами [81-82]);
- раціональним розміщенням регулювальних заслінок (не ближче ніж 1 м від повітророзподільників);
- прикріпленням вентиляційних агрегатів до трубопроводів через еластичні віброізолюючі патрубки;

- віброізоляцією вентиляційних агрегатів, а також усіх місць кріплення трубопроводів до оточуючих конструкцій;
- раціональним прокладанням трас повітроводів і трубопроводів (по можливості минаючи службові та житлові приміщення);
- встановленням усередині повітроводів різних звукозахисних пристроїв.

Висновки по розділу

В другому розділі:

- визначено і досліджено математичні та фізичні засади методології виявлення та пеленгування;
- визначено прогнозовану дальність виявлення БПЛА, що включає геометричну та енергетичну дальності. Прогнозована дальність в 1000 м для БПЛА типу крило і 200 м для БПЛА типу квадрокоптер є досяжними (розрахунки в додатку);
- досліджено існуючі методи та алгоритми обробки та аналізу шумів навколишнього повітряного середовища;
- запропоновано тракт спектрального аналізу, як перспективний засіб виявлення;
- з'ясовано можливість впровадження тракту спектрального аналізу у склад мультисенсорного комплексу виявлення та пеленгування БПЛА;
- запропоновано систему виявлення та пеленгування корисних шумоподібних сигналів, що має містити чотири тракти, фізична реалізація виявлення в яких виконується програмною реалізацією алгоритмів виявлення та, пороговою обробкою та індикацією результатів;

- розглянуто шумоподібні сигнали і завади в задачах шумопеленгування та отриману інформацію можна застосовувати для майбутньої реалізації системи шумопеленгування повітряних об'єктів в програмному середовищі LabView.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИСТРОЮ ШУМОПЕЛЕНУВАННЯ БПЛА

Для реалізації шумопеленгатору було обрано програмний комплекс LabView. LabVIEW представляє собою інструментальну станцію від компанії National Instruments (США), яка спеціалізується на візуальних методах програмування. Основний акцент цього інструменту - автоматизована робота з різноманітним обладнанням та комп'ютерними системами.

Відмінність LabVIEW від інших мов, таких як C чи Pascal, полягає в її візуальному підході. Тут програми представляють собою візуальні схеми, що спрощує їх розробку для тих, хто не є експертом у кодуванні. Часто можна розробляти застосунки, майже не користуючись текстовим введенням.

Основні переваги LabVIEW:

- Повноцінна мова кодування.
- Зручний графічний підхід до програмування.
- Розширений набір інструментів для роботи з даними, керування технікою та інше.
- Підтримка численних приладів.
- Можливість динамічної генерації коду.
- Готові моделі та приклади застосунків.
- Ефективна робота скомпільованих застосунків.
- Робота з різними операційними системами.

LabVIEW може працювати з великою кількістю техніки від різних виробників і має численні вбудовані компоненти. Основа роботи в LabVIEW - це комп'ютерне моделювання, яке об'єднує різні методи аналізу.

При розробці програми в LabView робота ведеться у двох режимах: схематична діаграма та користувацький інтерфейс. Інтерфейс формується на одному вікні, а логіка програми - на іншому, використовуючи спеціалізовані блоки. Така структура дозволяє легко інтегрувати інтерфейс з логікою програми. [33, 34, 88].

3.1 Структурна схема пристрою виявлення безпілотних літальних апаратів

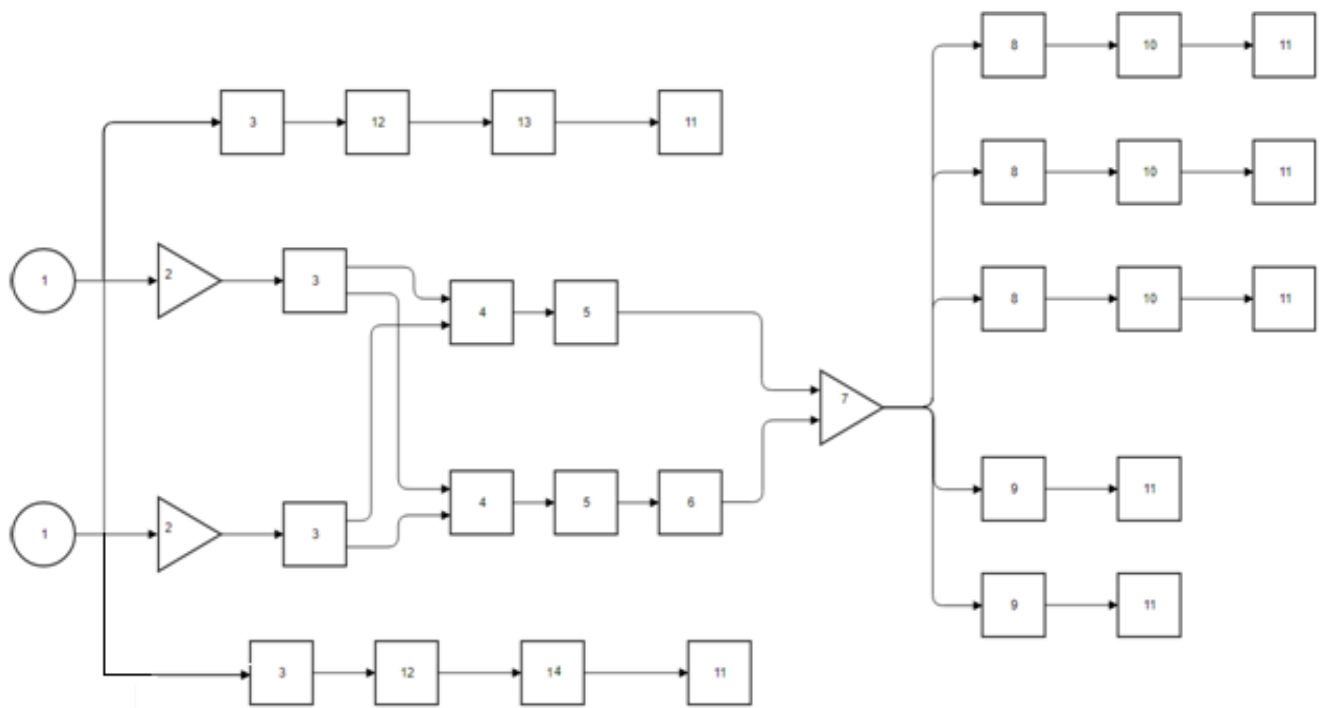


Рис. 3.1 Структурна схема пристрою виявлення

1 – приймачі тиску; 2 – попередні підсилювачі; 3 – широкосмугові фільтри; 4 – зворотно підключений суматор; 5 – коефіцієнти; 6 – фазоінвертор; 7 – помножувач; 8 – третиннооктавні широкосмугові фільтри; 9 – напівоктавні фільтри; 10 – блоки переходу від значення інтенсивності до рівня інтенсивності; 11 – блоки індикації; 12 – блок FFT; 13 – порогова схема; 14 – блок взаємного спектра (спектрального аналізу).

Алгоритм виявлення реалізовано з використанням лінійної дискретної акустичної антени яка забезпечує рівний прийом акустичних сигналів, пристрою спряження (система АЦП) та програм обробки інформації на основі пакету LabView на персональному комп'ютері (ПК) [33, 34, 90].

Ідеологія застосування об'єктного програмування базується на використанні трьох типів систем виявлення:

- вузькосмугового спектру (FFT) або спектру в широкій смузі;
- інтенсивності;
- взаємного спектру.

$$X_1(f) = \int_0^T x_1(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt, \quad X_2(f) = \int_0^T x_2(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt; \quad (3.1)$$

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) v(t) dt; \quad (3.2)$$

$$G_{xy}(t) = 2 \cdot X_1^*(t) \cdot X_2(t) = C_{xy}(t) + iQ_{xy}(t). \quad (3.3)$$

Використання таких дублюючих принципів виявлення базуються на реєстрації проявлення особливостей акустичного поля та впливають на ефективність роботи пристрою [33, 34, 64, 91].

3.2 Функціональна схема пристрою виявлення і пеленгування в програмному середовищі LabVIEW

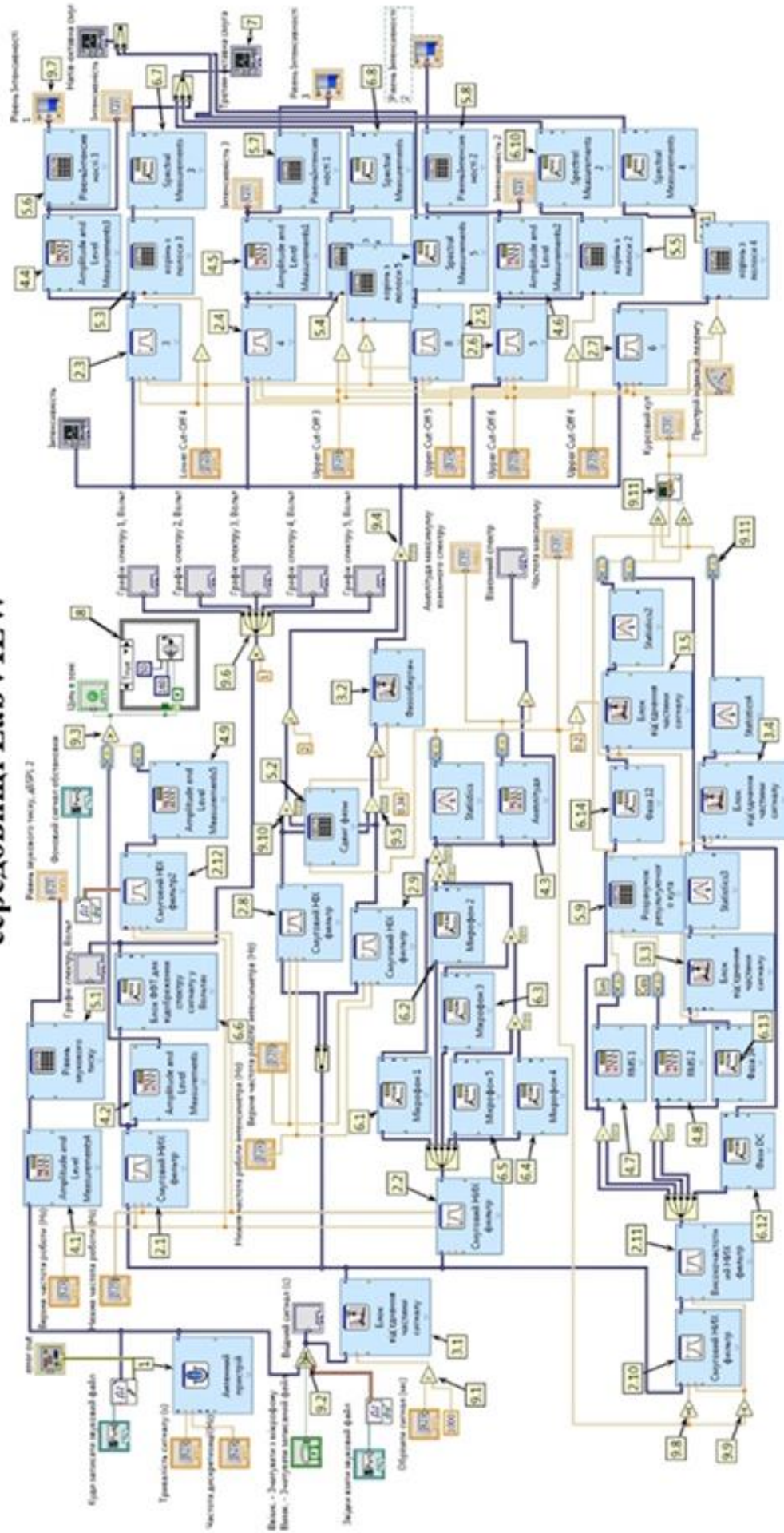


Рис. 3.1a Функціональна схема пристрою виявлення і пеленгування в програмному середовищі LabVIEW

3.3 Загальний устрій пристрою виявлення

Сигнали з оточуючого середовища надходять до антенного пристрою 1, де часові параметри та частота дискретизації встановлюються через панель користувача (Front Panel). З використанням блоку 3.1 можна коригувати тривалість цих сигналів. Після обробки, сигнал розподіляється на три тракти виявлення.

Перший - це тракт інтенсивності, що представляє собою акустичний інтенсиметр, який потребує щонайменше двох елементів антенного пристрою. Сигнали з цих елементів проходять через октавні смугові НІХ фільтри 2.8 та 2.9, параметри яких визначаються через панель користувача. Після обробки в блоку 2.8, сигнал додається з паралельним і розділяється навпіл. Тоді як після обробки в блоку 2.9, сигнал відмінюється від паралельного і направляється до блоку ділення, який моделює фазовий зсув для мікрофонної бази. Далі цей канал відомий як канал різниці, а інший як прямий [29]. Після моделювання бази 9.5, сигнал направляється до фазообертача блок 3.2, де кут фазового повороту залежить від домінуючої частоти вхідного сигналу, який розраховується блоком 5.2 за специфічною формулою.

В результаті, комбінування сигналів прямого та різницевого каналів направляється на три тритинооктавні фільтри 2.3-2.5 та два півоктавні 2.7-2.8, параметри яких встановлюються через панель користувача. Для аналізу роботи цих фільтрів ми створюємо їх спектрограми за допомогою блоків 6.7-6.11. Після цього, корінь зі смуги ділиться для отримання спектральної густини потужності в блоках 5.3-5.5, тобто це потужність приведена в смузі 1 Гц .

Після спектрального аналізу, блоки 4.4-4.5 вимірюють середньоквадратичні амплітуди напруг сигналів, отримуючи інтенсивність.

Ця величина потім перераховується в рівень інтенсивності в блоках 5.6-5.8 і візуалізується в блоку 7 [36, 92].

Другий - це вузькосмуговий спектр, що включає октавний смуговий НІХ фільтр та блок для швидкого перетворення Фур'є. Сигнал проходить через фільтр в блоку 2.1 і перетворюється на спектр в блоку FFT 6.6. Параметр амплітуди вимірюється блоками 4.2 та 4.9, після чого сигнали обробляються в блоку 9.3 і направляються до індикаторів в блоку 8.

Третій - це взаємний спектр, що включає октавний смуговий НІХ фільтр та декілька блоків для швидкого перетворення Фур'є. Сигнали з кожного антенного елементу проходять через фільтр в блоку 2.2 і перетворюються на спектр в блоках FFT 6.1-6.5. Після цього, сигнали комбінуються і аналізуються для визначення максимальної частоти, яка потім використовується в інших трактах [32-34].

3.4 Опис основних блоків, які використовуються

Основні блоки 1-8:

"Acquire Sound Express VI" - це блок, який забезпечує збір даних з аудіо-пристрою. Даний Express VI автоматично конфігурує вхідний процес, збирає інформацію та звільняє ресурси після завершення своєї роботи.

Блок "Acquire Sound" сигналу 1 діє як емулятор антенного обладнання, через який сигнал передається з аудіо-пристрою до LabView через АЦП (звуковий інтерфейс).

Параметри, такі як частота дискретизації та довжина сигналу, встановлюються через користувацьку панель (Front Panel).

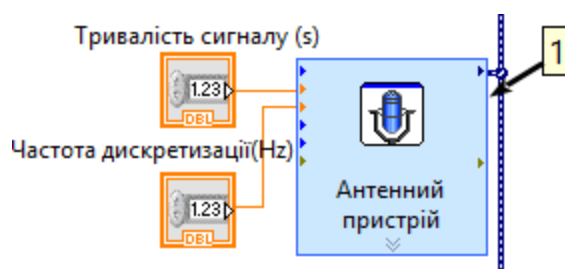


Рис. 3.2 Блок Acquire Sound Express VI

"Bandpass Filter VI" - це блок для виконання частотного фільтрування.

Блоки 2.1, 2.2 та 2.12 представляють собою смугові фільтри з нескінченною імпульсною відгуком та еліптичним профілем, маючи такі межі [33, 34]:

- верхня межа – $f_{\text{в}} = 1250 \text{ Гц}$
- нижня межа – $f_{\text{н}} = 250 \text{ Гц}$

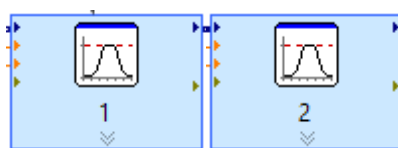


Рис. 3.3 Блоки Bandpass Filter VI – смугові фільтри

Блоки з 2.3 до 2.5 представляють собою три тритинооктавні фільтри, які служать як смугові фільтри з еліптичним профілем та наступними межами:

Блок 2.3 смуговий фільтр першої третьоктави:

- верхня межа – $f_g = 250 \text{ Гц}$
- нижня межа – $f_n = 315 \text{ Гц}$

Блок 2.4 смуговий фільтр другої третьоктави:

- верхня межа – $f_g = 315 \text{ Гц}$
- нижня межа – $f_n = 397 \text{ Гц}$

Блок 2.5 смуговий фільтр третьої третьоктави:

- верхня межа – $f_g = 397 \text{ Гц}$
- нижня межа – $f_n = 500 \text{ Гц}$

Рис. 3.4 Три тритинооктавні фільтри

Блоки 2.6 та 2.7 представляють собою два півоктавні фільтри, які діють як смугові фільтри з еліптичним профілем та мають такі межі:

Блок 2.6 смуговий фільтр першої напівоктави:

- верхня межа – $f_g = 250 \text{ Гц}$
- нижня межа – $f_n = 354 \text{ Гц}$

Блок 2.7 смуговий фільтр другої напівоктави:

- верхня межа – $f_g = 354 \text{ Гц}$
- нижня межа – $f_n = 500 \text{ Гц}$

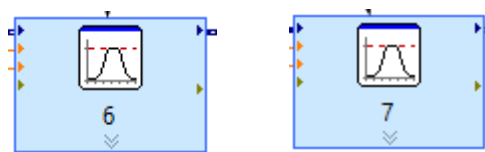


Рис. 3.5 Два напівоктавні фільтри

Блоки 2.8 та 2.9 є смуговими фільтрами з нескінченною імпульсною характеристикою і використовують еліптичний профіль з наступними межами:

- верхня межа – $f_g = 1000 \text{ Гц}$
- нижня межа – $f_n = 125 \text{ Гц}$

Ці параметри можна змінювати на панелі користувача (Front Panel).

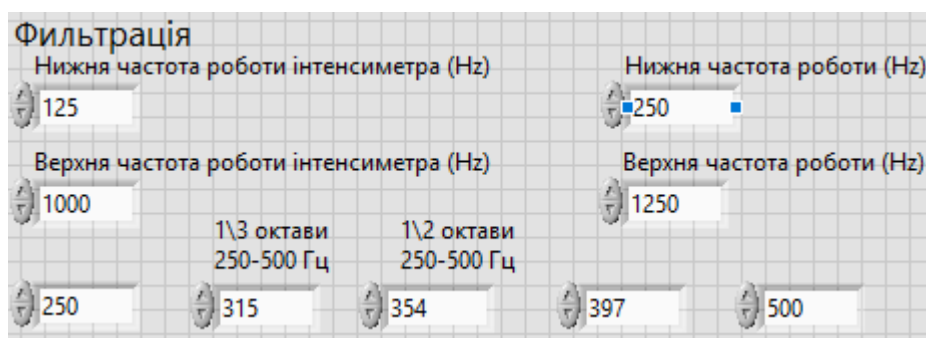


Рис. 3.6 Фрагмент панелі користувача (Front Panel) для зміни параметрів тритинооктавних смугових та напівоктавних фільтрів

Блоки 2.10, 2.11 є фільтрами високих частот з нескінченною імпульсною характеристикою і використовують еліптичний профіль з наступними межами:

- верхня межа – $f_g = 1000 \text{ Гц}$
- нижня межа – $f_n = 125 \text{ Гц}$

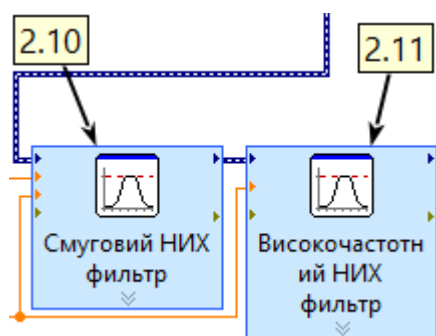


Рис. 3.7 Фільтр високих частот

"Extract Portion of Signal VI" - це блок для реалізації часових затримок.

Блок 3.1 забезпечує вилучення конкретних даних з вхідних сигналів, повертаючи відсічені частини. Цей блок дозволяє ізолювати як окрему точку, так і діапазон даних, при цьому вилучення може відбуватися за часовими параметрами або індексацією. Його основна мета - коригування тривалості сигналу.

Блок 3.2 служить фазовим обертачем. Цей блок дозволяє відсікати небажані частини сигналу на основі визначеного часового параметру, виконуючи роль фазового зсуву. Величина часової затримки розраховується в блоку 5.2 на основі максимальної частоти, визначеної на виході тракту взаємного спектру в блоку 4.3 [33, 34].

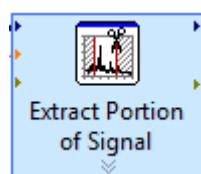


Рис. 3.8 Блок імітації фазообертача, часовими затримками

Блок 3.3-3.5 зчитує інформацію про фазу.

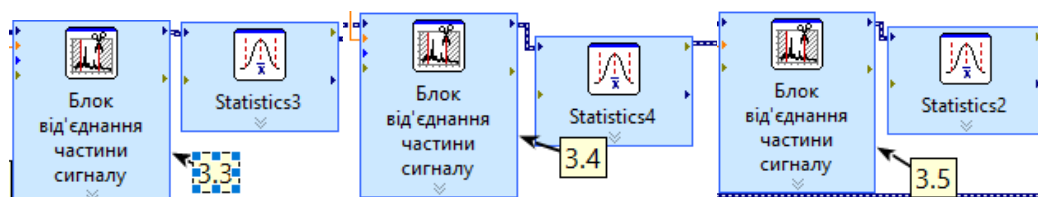


Рис. 3.9 Amplitude and Level Measurements Express VI

"Amplitude and Level Measurements Express VI" - це блок для вимірювання рівнів сигналу за амплітудою, включаючи лінійні, квадратичні та дельта-рівні. Використовуючи блоки 4.1 до 4.3 та 4.9, ми отримуємо амплітудні показники, такі як подвійна амплітуда сигналу (Peak to peak) або позитивний пік амплітуди (Positive peak).

За допомогою блоків 4.4 до 4.8, які служать для відображення електричних характеристик сигналів, ми отримуємо середньоквадратичне значення (RMS) відфільтрованих сигналів.

Цей блок також дозволяє вимірювати такі параметри:

- Позитивний пік амплітуди (Positive peak)
- Негативний пік амплітуди (Negative peak)
- Подвійна амплітуда сигналу (Peak to peak)
- Постійна складова сигналу (Mean (DC))

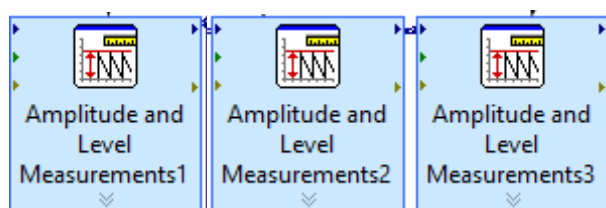


Рис. 3.10 Блок вимірювання амплітуди сигналу

"Formula Express VI" - це блок, який надає калькуляторний інтерфейс для створення та виконання математичних рівнянь. Цей інструмент може бути застосований для обчислення та виконання різноманітних математичних операцій.

Використовуючи блок 5.1, який служить для реалізації математичних рівнянь, ми обчислюємо рівень звукового сигналу. Використовувана формула представлена в джерелах [33, 34]:

$$L_t = 20 \log \left(\frac{X}{2 \cdot 10^{-12}} \right) \quad (3.4)$$

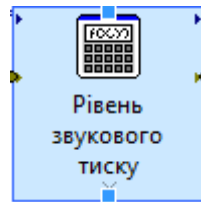


Рис. 3.11 Блок розрахунку рівня звукового тиску (пиктограма)

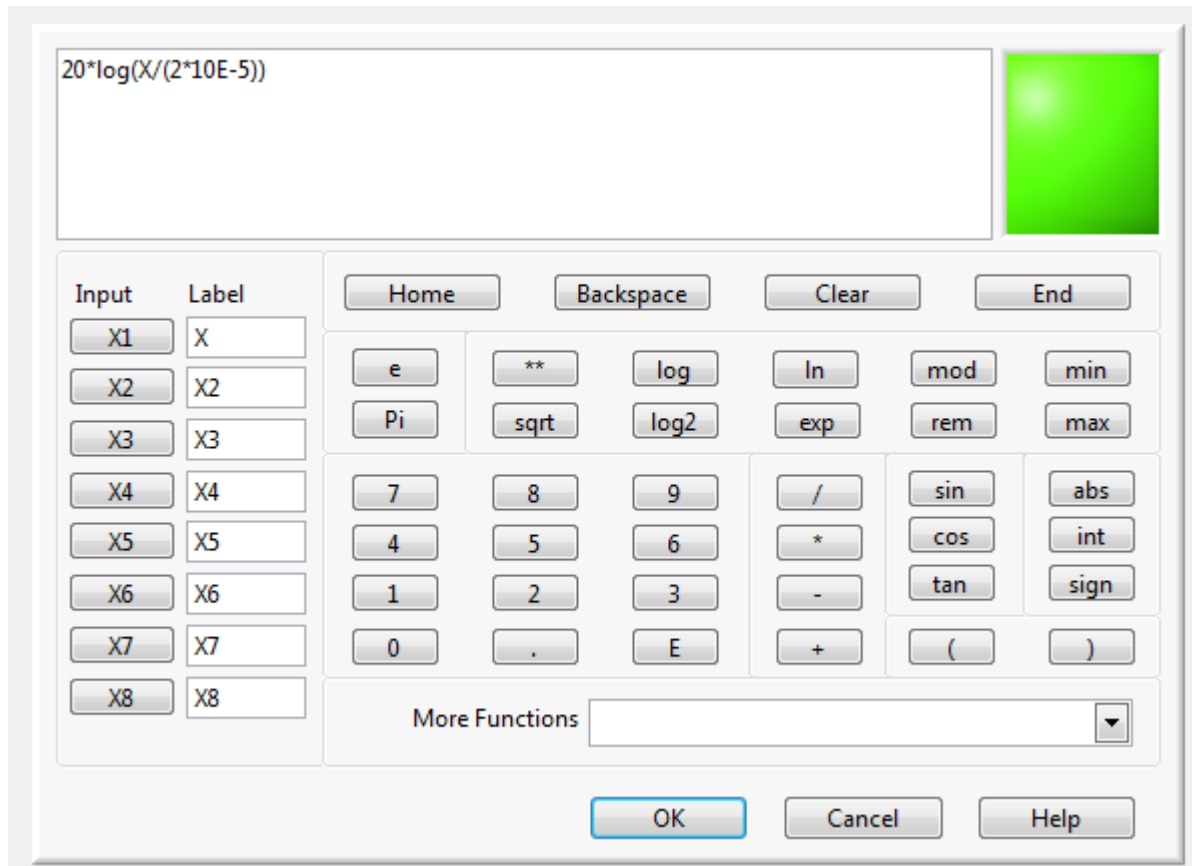


Рис. 3.12 Блок розрахунку рівня звукового тиску (панель вводу)

Використовуючи блок 5.2, який призначений для обчислення фазового зсуву для кожної частоти індивідуально, ми визначаємо часову затримку, яка наслідуює фазовий зсув, використовуючи наступну формулу:

$$\tau = \frac{\left(\frac{1}{f}\right)}{2} \quad (3.5)$$

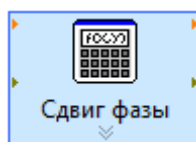


Рис. 3.13 Блок розрахунку часових затримок (піктограма)

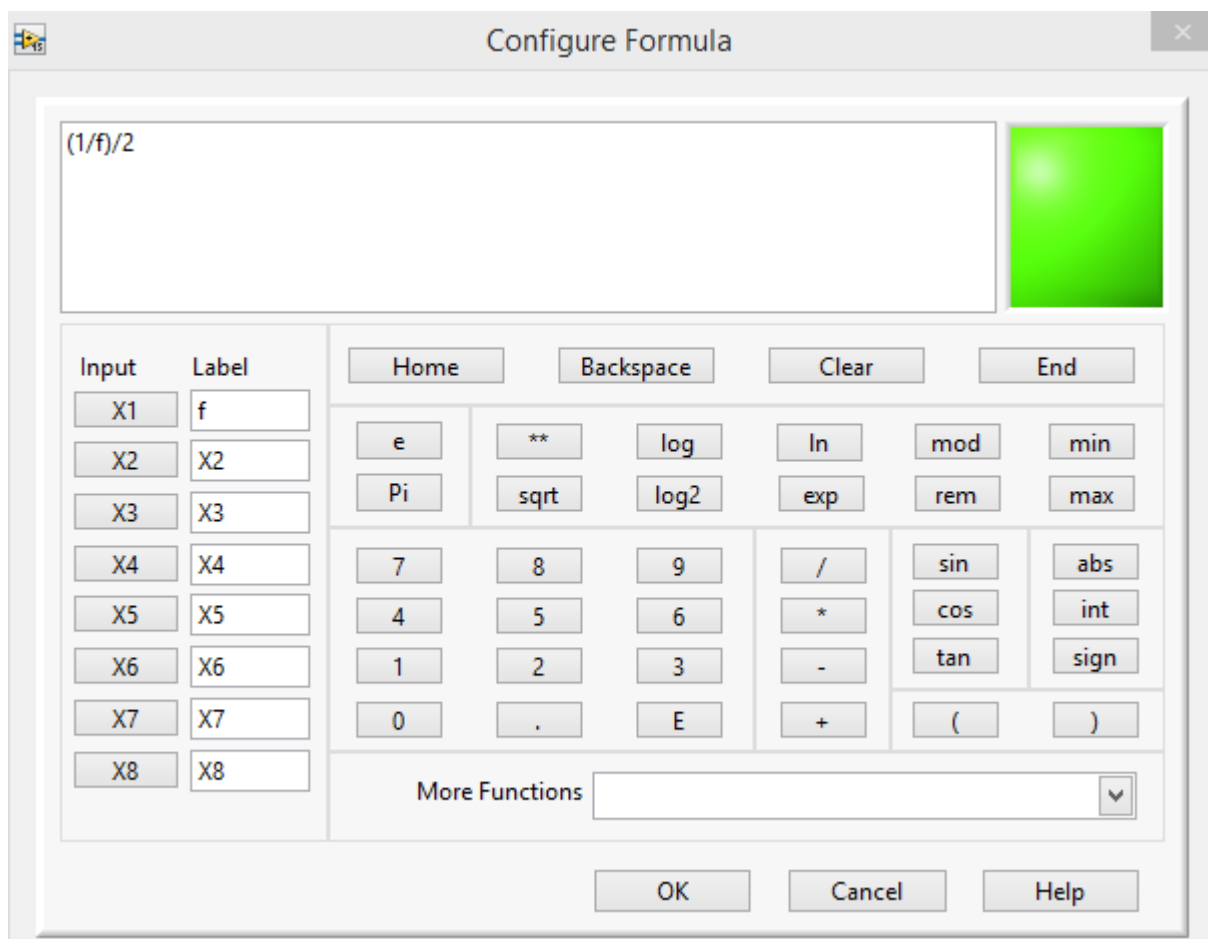


Рис. 3.14 Блок розрахунку часових затримок (панель вводу)

Використовуючи блоки з 5.3 до 5.5, які служать для виконання математичних рівнянь, ми обчислюємо корінь зі смуги частоти, щоб визначити спектральну густину потужності. Це означає, що потужність нормалізована до смуги в 1 Гц. Використовувана формула представлена в джерелах [33, 34]:

$$\left(\frac{X}{\sqrt{f}} \right) \quad (3.6)$$

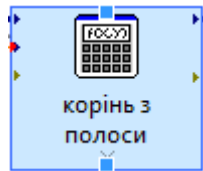


Рис. 3.15 Блок розрахунку кореня зі смуги (піктограма)

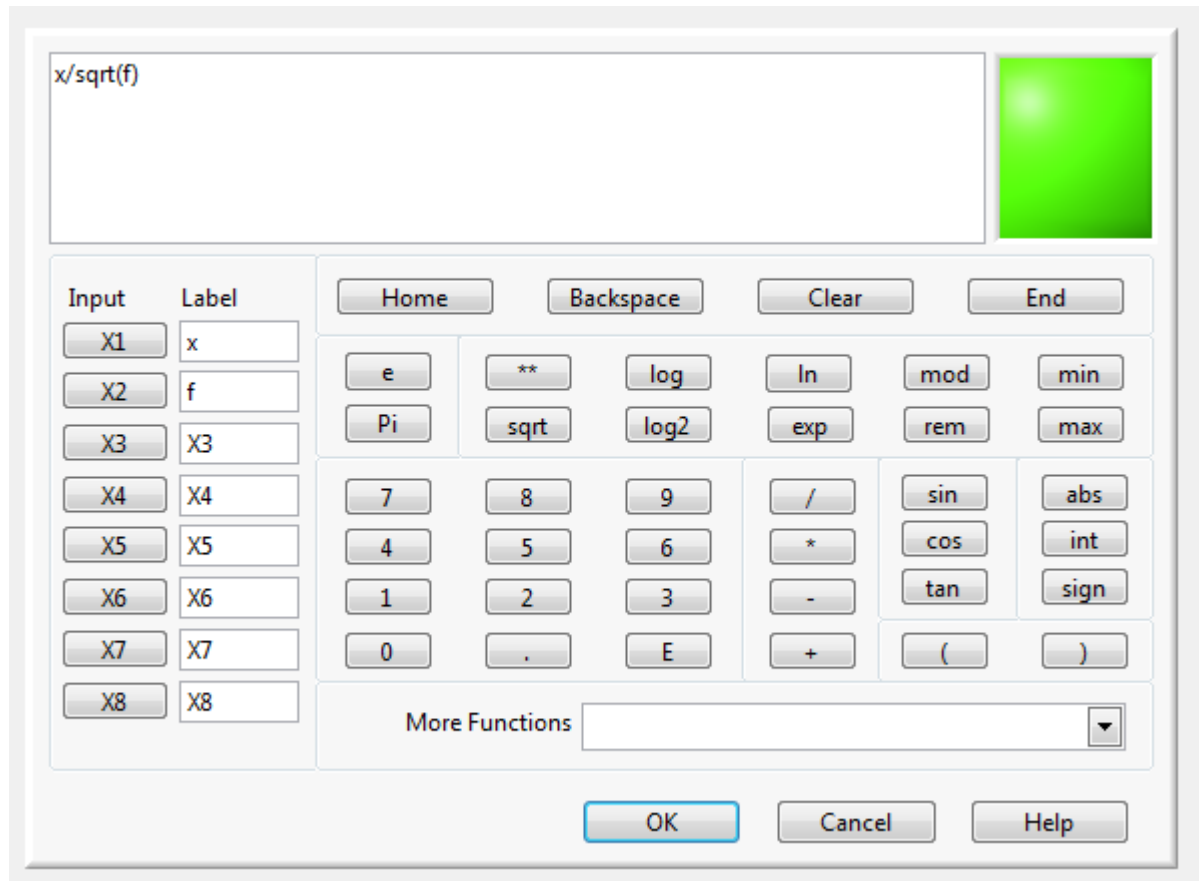


Рис. 3.16 Блок розрахунку кореня зі смуги (панель вводу)

Використовуючи блоки 5.6 до 5.8, призначені для виконання математичних рівнянь, ми обчислюємо рівень інтенсивності сигналу. Формула, яка застосовується для цього обчислення, є наступною:

$$L_t = 10 \log \left(\frac{X}{10E - 12} \right) \quad (3.7)$$

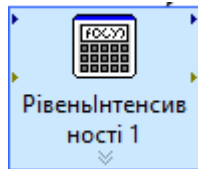


Рис. 3.17 Блок розрахунку рівня інтенсивності (піктограма)

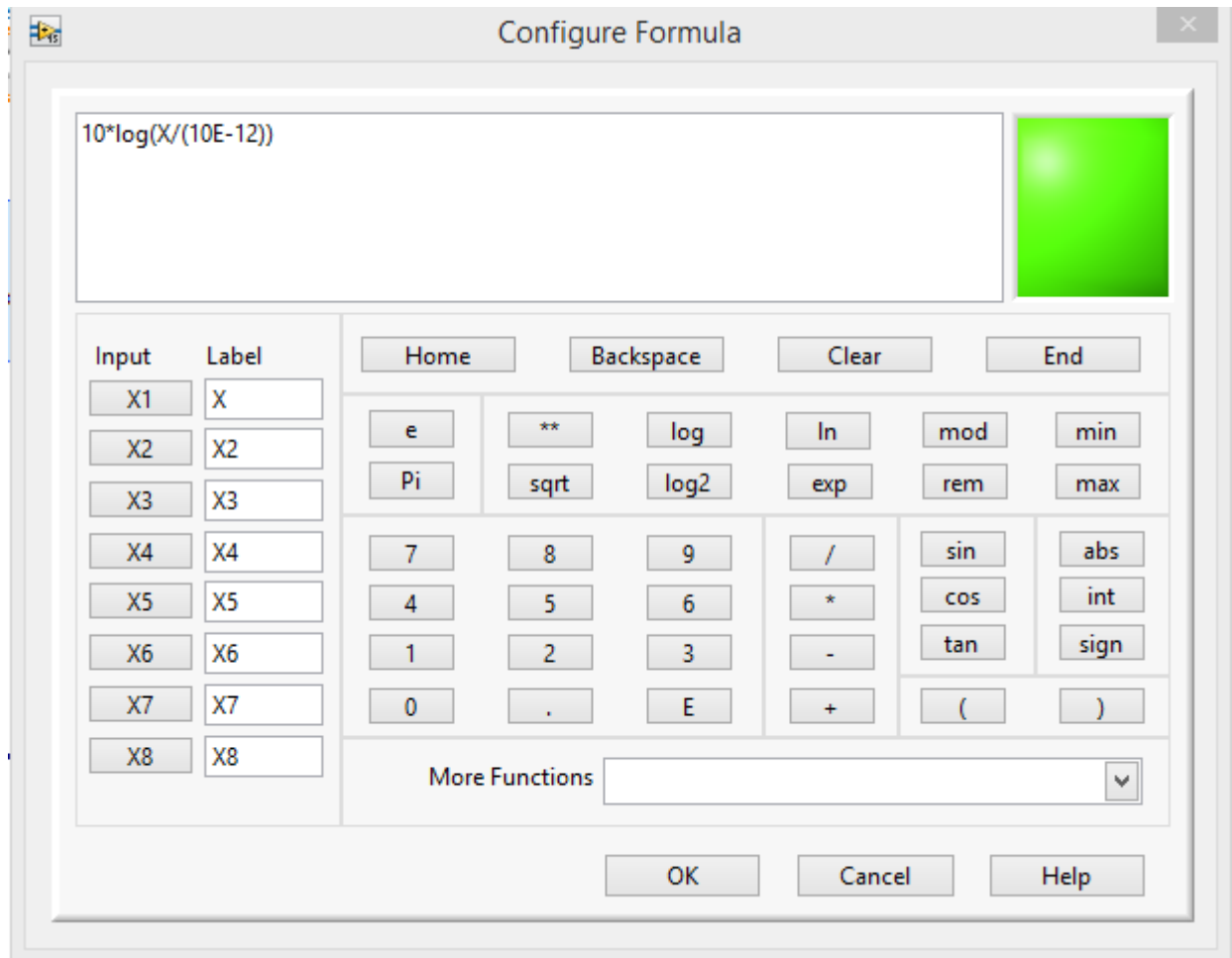


Рис. 3.18 Блок розрахунку рівня інтенсивності (панель вводу)

За допомогою блока 5.9 – блока для розрахунку результуючого кута за допомогою формули:

$$\tau = \frac{180 \left(a \tan \frac{\sin}{\cos} \right)}{\pi} \quad (3.8)$$

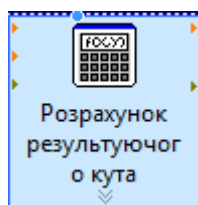


Рис. 3.19 Блок розрахунку результуючого кута (пиктограма)

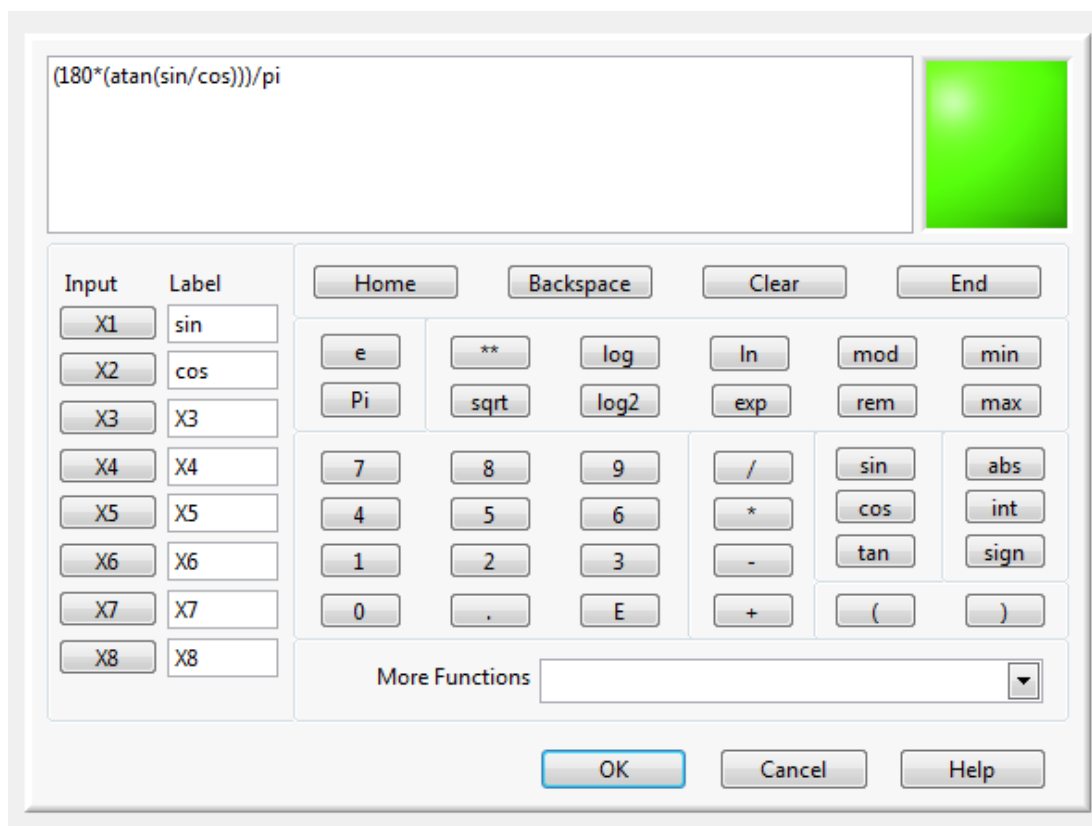


Рис. 3.20 Блок розрахунку результуючого кута (панель вводу)

"Spectral Measurements Express VI" - це інструмент для представлення спектральних вимірювань, які ґрунтуються на швидкому перетворенні Фур'є. Це включає такі характеристики, як амплітудний спектр, спектр потужності та фазовий спектр.

Використовуючи блоки 6.1 до 6.11, які служать для відображення спектральних характеристик сигналу, ми можемо отримати частотні

характеристики сигналів, перетворюючи часовий сигнал на його частотний аналог.

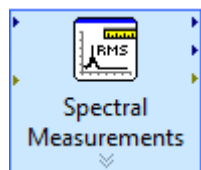


Рис. 3.21 Блок представлення спектру вимірювань

Використовуючи блоки 6.12 та 6.13, які служать для відображення спектральних характеристик сигналу, ми можемо отримати фазові характеристики сигналів.

"Case Structure" - це блок, який реалізує одну з двох можливих умов (True/False) в залежності від даних, що надходять на вхід.

За допомогою блока 8 на рис. 3.22 відбувається порогова обробка сигналу. Це означає, що відбувається порівняння (за допомогою блока 9.3) інтегрованих рівнів поточного сигналу (з блока 4.2) з фоновим інтегрованим рівнем (з блока 4.9). Якщо рівень поточного сигналу перевищує фоновий рівень, активується звукова сигналізація та зелена індикаційна лампа на рис. 3.24 на користувацькій панелі [33, 34].

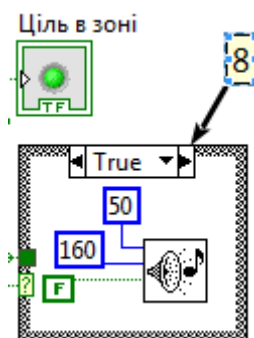


Рис. 3.22 Порогова схема

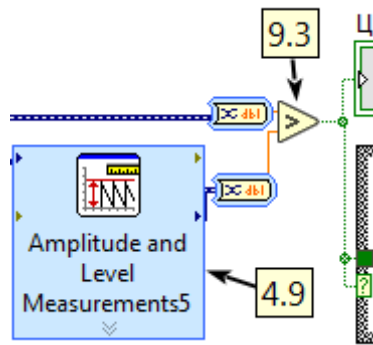


Рис. 3.23 Блок порівняння

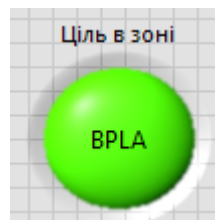


Рис. 3.24 Сигнальна лампа спрацювання порогової схеми

Якщо інтегрований рівень поточного сигналу не перевищує фоновий інтегрований рівень, то на виході з блока порівняння на рис. 3.22 формується команда "False", що блокує активацію порогу. З іншого боку, якщо інтегрований рівень поточного сигналу вищий за фоновий, то на виході з блока порівняння на рис. 3.22 формується команда "True", що запускає схему сигналізації на рис. 3.25.

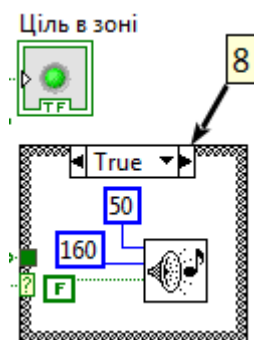


Рис. 3.25 Схему сигналізації

У схемі сигналізації присутні блоки "ціль у зоні", які представляють собою індикатор на користувацькій панелі (Front Panel), а також "Beep VI" - блок для аудіо сигналізації. [33, 34].

Допоміжні блоки 9.1-9.11:

Блок 9.1 виконує функцію ділення.

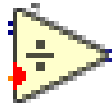


Рис. 3.26 Divide Function з коефіцієнт 0.34

Блок 9.2, відомий як "Select Function", використовується для легкого перемикання між двома можливими станами.

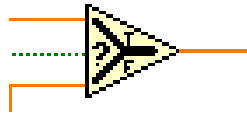


Рис. 3.27 Select Function

Блок 9.3 Greater? Function виконує функцію порівняння сигналів для роботи порогової схеми.



Рис. 3.28 Greater? Function

Блок 9.4, або "Multiply Function", служить для множення сигналів, імітуючи роботу підсилювача. У контексті 9.4, він діє як перемножувач для прямого та диференційного каналів.

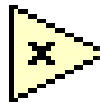


Рис. 3.29 Multiply Function

Блок 9.5 імітує роботу диференційного, зворотно підключеного, підсилювача. Він приймає фільтровані сигнали з блоків 2.8 та 2.9 і виконує операцію віднімання.



Рис. 3.30 Subtract Function диференційний підсилювач підключеного зворотно

Блок 9.6, відомий як "Merge Signals Function", комбінує два або більше сигналів у єдиний вихідний сигнал. Ця функція автоматично з'являється на блок-схемі, коли користувач спробує підключити вихід одного сигналу до іншого. [33, 34].

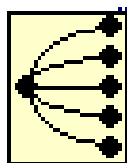


Рис. 3.31 Merge Signals Function

Блок 9.8 блок графічного відображення значення рівня інтенсивності.

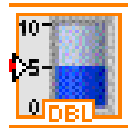


Рис. 3.32 Tank

Блок 9.8 додає 1 до вхідного значення.



Рис. 3.33 Increment Function

Блок 9.9 віднімає 1 від вхідного значення.



Рис. 3.34 Decrement Function

Блок 9.10 Add Function пристрій додавання.



Рис. 3.35 Add Function

Блок 9.11 призначений для визначення курсового кута [31].

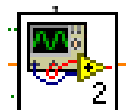


Рис. 3.36 Блок визначення курсового кута.

Нарешті, блок 9.12 конвертує динамічні дані в числові, логічні, сигнальні та масивні формати для подальшого використання з іншими VI та функціями.



Рис. 3.37 Convert from Dynamic Data Express VI

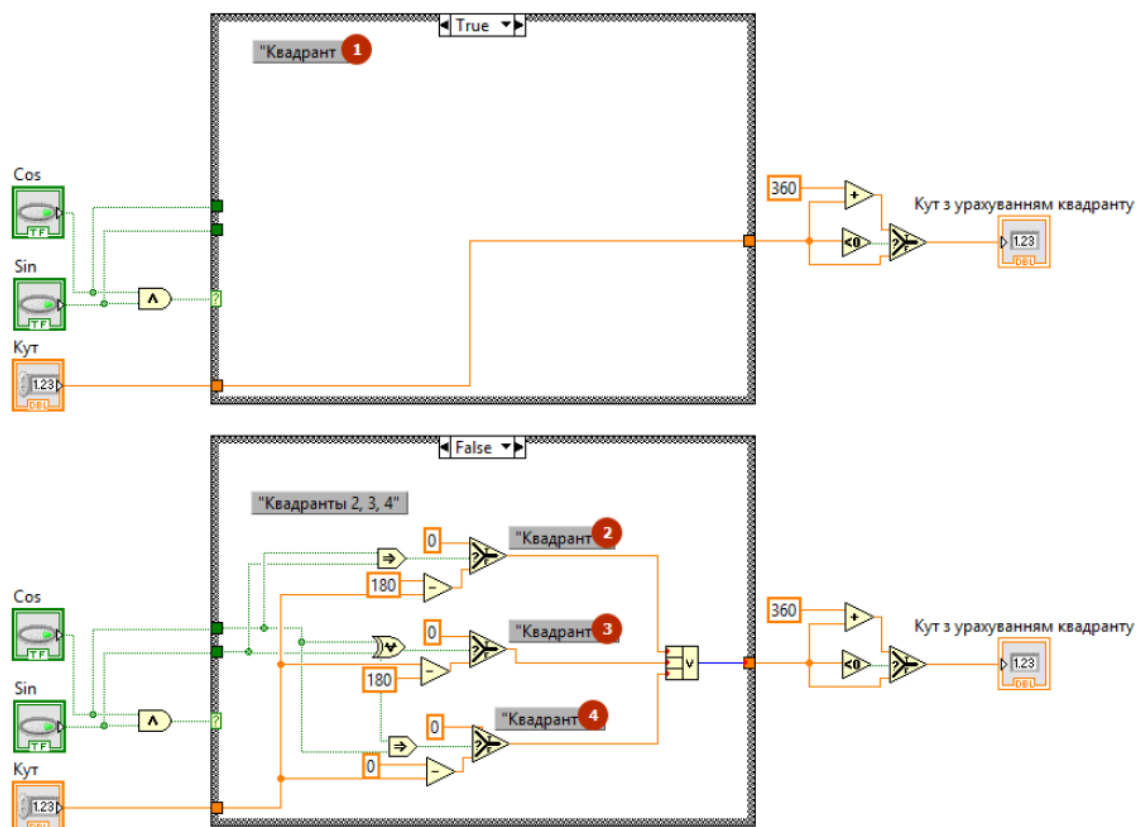


Рис. 3.38 Внутрішній устрій блоку 9.11

Під час аналізу фазових параметрів відбувається зіставлення фаз центрального антенного елементу 5 з каналами 1, 3 для "косінуса" та 2, 4 для "сінуса". Схема приймає логічні входні значення: "True" або "False". У контексті кожного каналу, "True" свідчить про те, що фаза перевищує фазу елементу 5, в той час як "False" вказує на протилежне.

Наступний етап схеми відображає модель визначення квадранту, яку можна побачити на рис. 2.13. У цій моделі "True" асоціюється з умовно

позитивним значенням фази (+), тоді як "False" представляє умовно негативне значення фази (-). [33, 34].

3.5 Панель користувача (Front Panel)

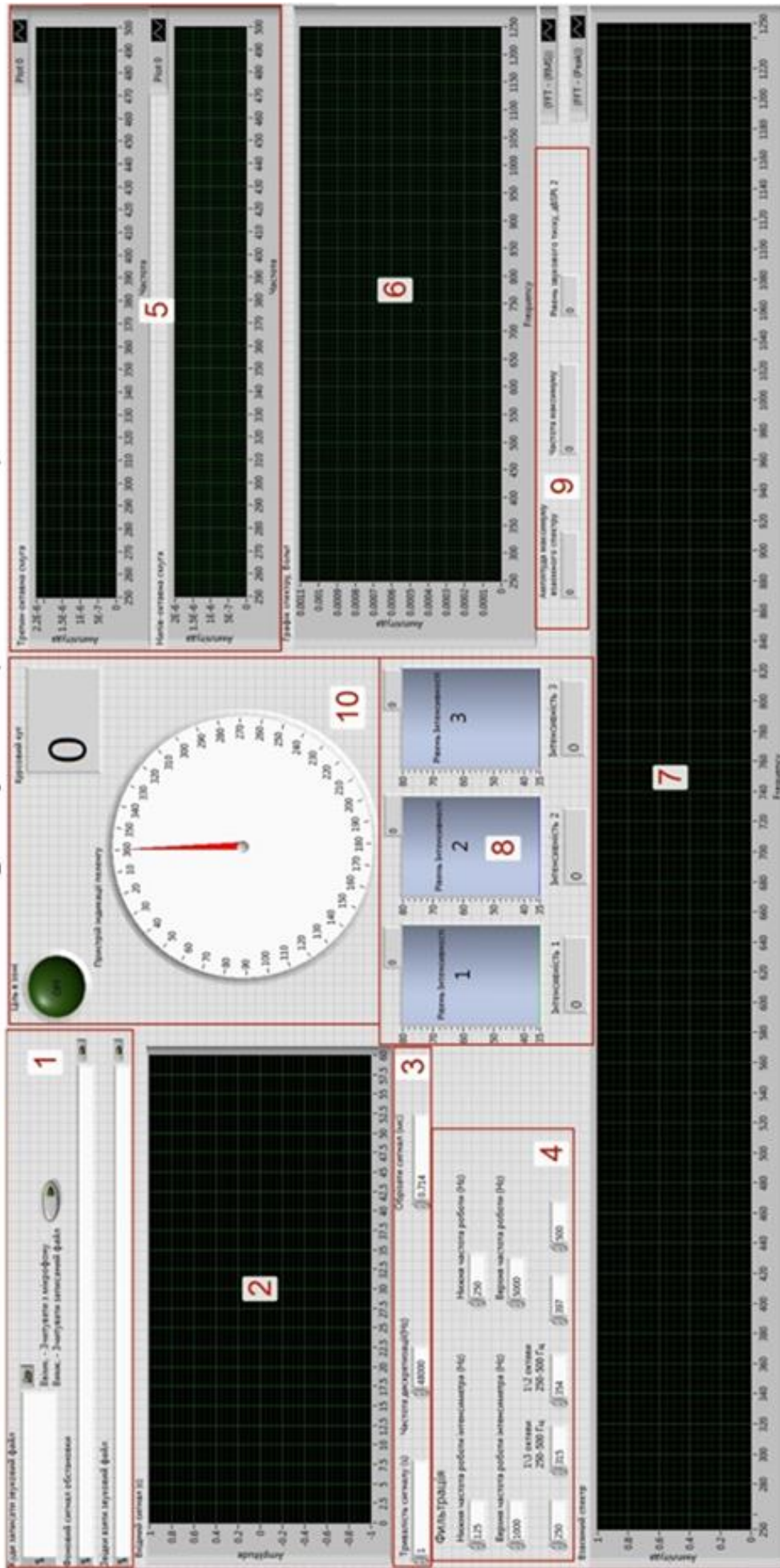


Рис. 3.39 Панель користувача

Пояснення елементів, які використовуються у схемі на рис. 3.39 занесено до табл. 3.1.

Пояснення елементів схеми

Таблиця 3.1

Номер елемента	Назва	Пояснення
1	Поля директорій (Path)	Директорії призначені для зберігання аудіозаписів сигналу та фонового шуму. Шлях розташування аудіофайлу, який підлягає аналізу. Вибір між режимами запису та обробки даних.
2	Графік вхідного сигналу	На графіку показано, як амплітуда сигналу змінюється протягом часу.
3	Вхідні параметри сигналу	Параметри, такі як: тривалість частота дискретизації, а також опція початку аналізу не з самого початку.
4	Фільтрація	Встановлення меж для процесу фільтрації.
5	Тритин-октавна смуга (Спектральна густина потужності)	Графік демонструє амплітудні характеристики сигналу в залежності від частоти після застосування тритино-октавного та напівоктавного фільтрів.
6	Графік спектру (FFT)	Графічне зображення змін амплітуди сигналу відповідно до частоти.
7	Взаємний спектр	На графіку відображена залежність амплітуди сигналу від частоти.

8	Tank рівень інтенсивності	Відображення даних про рівень інтенсивності у графічному та числовому форматах
9	Вихідні параметри сигналу	Амплітудний параметр та частотний показник пікового значення, рівень звукового тиску.
10	Графічна індикація результатів роботи програми	Індикатор виявлення та кругова схема індикації напрямку пеленгації.

Інтерфейс користувача (Front Panel) представляє собою інтерактивний засіб керування розробленим програмним комплексом, надаючи гнучкість в налаштуванні інтерфейсу згідно із потребами конкретного користувача. Він дозволяє модифікувати вхідні параметри, а також налаштовувати графічні блоки для оптимального відображення даних. Інтерфейс дозволяє коригувати кольорову палітру, включаючи кольори тексту, згідно з вподобаннями користувача.

На секції введення директорій 1 надана можливість вказувати шляхи для зберігання записів сигналів та фонового шуму, а також вибирати існуючі аудіофайли для аналітичної обробки. Існує також засіб для перемикання між режимами запису та аналізу.

На сегменті графічного представлення 2 користувач може спостерігати характеристики вхідного сигналу, включаючи його форму, амплітудні та фазові характеристики, а також визначати наявність інтерференцій.

Блоки для введення числових даних 3 дозволяють задавати параметри сигналів. Метричні одиниці цих блоків відповідають стандартам СІ.

Секція введення даних під назвою "Фільтрація" 4 дозволяє користувачеві вказувати діапазон робочих частот, а також верхні та нижні межі тритинооктавних та напівоктавних фільтрів.

На графічних блоках 5-7 відображаються результати аналізу сигналу після фільтрації, включаючи спектральний аналіз та взаємний спектр. Ці блоки демонструють особливості акустичного поля, що впливає на продуктивність системи.

Індикатори "Level Intensity" 8 та дисплей 9 служать для цифрового представлення результатів обробки. На панелі графічних індикаторів 10 розташована індикаторна лампа "Ціль в зоні", яка активується при виявленні об'єкта, ініціюючи процес пеленгації та виведення даних на круговий індикатор напрямку. [33-36].

3.6 Мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування

Використання векторно-фазових підходів у сфері акустики відкриває можливість ефективного використання спрямованих характеристик антени. Це сприяє інтеграції дискретних інтерференційних антен, які фіксують не лише акустичне поле тиску, але й поле коливальної швидкості (p_v). Така конфігурація дозволяє аналізувати флуктуації інтенсивності звукового поля при інтеграції з детектором потужності [30, 90].

Методологія визначення дистанції виявлення, процес нормалізації зовнішніх шумів до входу акустичної антени та безпосередньо розрахунок дистанції були представлені автором у наукових публікаціях [117, 118]. У цьому дослідженні як приймальна система була вибрана група детекторів, яка використовує p_v -зонд і представлена у формі лінійної дискретної акустичної антени. Векторно-фазові характеристики цієї антени дозволяють оцінити її радіус дії. За результатами розрахунку дистанції виявлення для безпілотних літальних апаратів типу "крило", з урахуванням

акустичного шуму оточення та розглянутої антени на основі pv -зондів, було встановлено, що діапазон в 1000 метрів є реалістичним.

Опираючись на вищезазначені теоретичні основи та розрахунки дальності виявлення, була розроблена структурна модель пристрою для виявлення та пеленгації шуму, що призвело до отримання патенту на корисну модель акустичної антени [42]

Реалізація просторових якостей такої антени визначається шляхом використання адитивних методів обробки інформації. Антена може працювати як пристрій, що забезпечує реєстрацію як скалярних, так і векторних характеристик.

Дана мультикомпонентна антена містить три лінійні дискретні акустичні антени, які складаються з приймачів тиску, розміщені взаємно ортогонально, мають однакові розміри баз і спільний фазовий центр, у якому встановлено приймач тиску (рис. 3.40).

Основним покращенням та інновацією є включення до однієї з лінійних дискретних акустичних антен із розширеною базою ще двох додаткових детекторів тиску, розташованих симетрично від фазового центру. Ці додаткові детектори тиску розширюють спектр методів виявлення та пеленгації, доступних для використання пристроєм, що сприяє оптимізації його робочих характеристик у рамках акустичних комплексів для пеленгації шуму та підвищенню точності визначення та пеленгування об'єктів. Важливо відзначити, що завдяки використанню додаткових детекторів ця антена може бути ефективною як у аероакустичних, так і у гідроакустичних застосуваннях [33-35, 90, 117].

Мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування складається з приймачів тиску 0, x_1 – x_2 , y_1 – y_4 , z_1 – z_2 (рис. 3), тракту формування характеристик спрямованості (ТФХС) 1 у складі суматора 2, віднімача 3 дипольного каналу X , віднімача 4 дипольного

каналу Y , віднімача 5 дипольного каналу Z , блоку прослуховування (БП) 6 у складі тракту прослуховування ненаправленого (ТПНН) 7, тракту прослуховування направленого (ТПН) 8, блоку виявлення (БВ) 9 у складі тракту виявлення за спектром (ТВС) 10, тракту виявлення за інтенсивністю (ТВІ) 11, тракту виявлення за взаємним спектром (ТВВС) 12 та блоку пеленгування (БП) 13 у складі тракту кореляційного пеленгування (ТКП) 14, тракту фазового пеленгування (ТФП) 15, тракту пеленгування способом рівносигнальних зон (ТПРЗ) 16 (рис. 3.41).

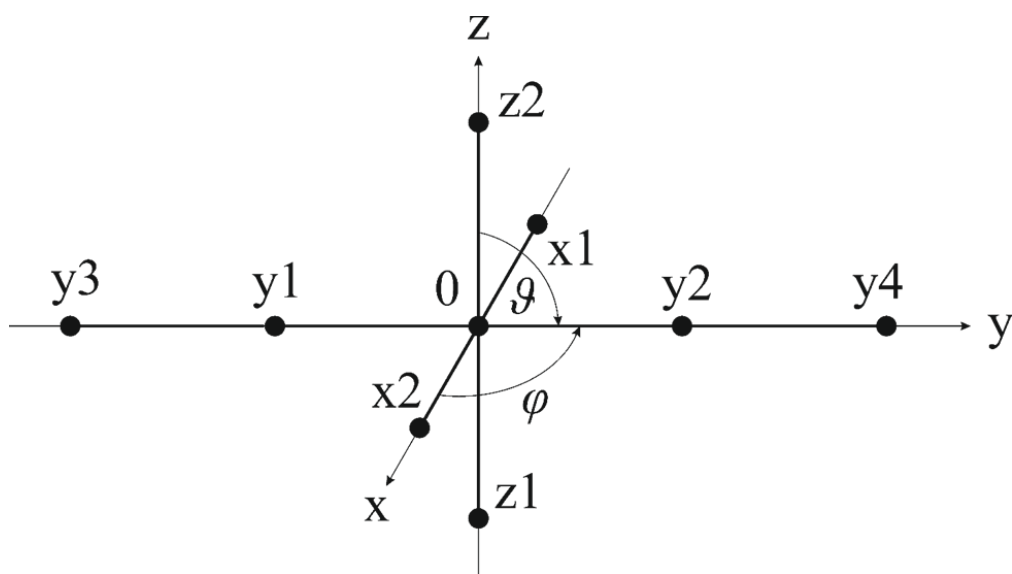


Рис. 3.40 Мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв
виявлення та пеленгування

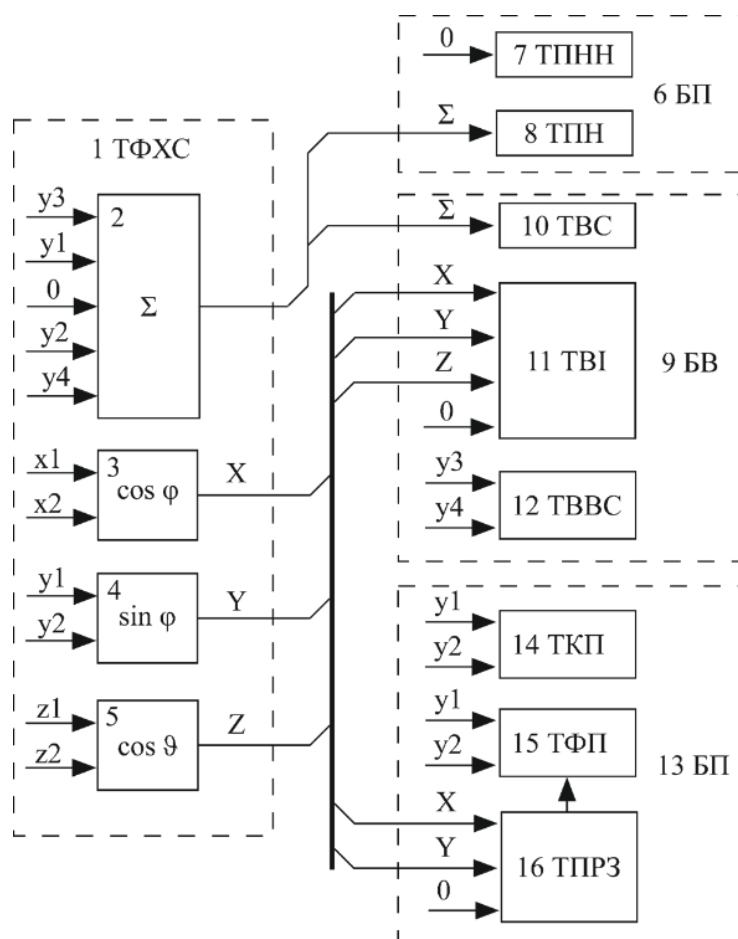


Рис. 3.41 Структурна схема мультикомпонентної векторної акустичної антени пристроїв виявлення та пеленгування

Апаратна частина пристрою діє за наступним принципом: коли акустична хвиля, генерована об'єктом, доходить до мультикомпонентної векторної акустичної антени детектора та пеленгатора, детектори тиску 0, x_1 – x_2 , y_1 – y_4 , z_1 – z_2 фіксують конкретні значення тиску. Електросигнал, що виробляється детектором тиску 0, передається до ТПНН 7 для загального моніторингу території оператором, тоді як електросигнал, створений суматором 2, направляється до ТПН 8 для специфічного моніторингу зони оператором.

Паралельно, електричний сигнал з суматора 2 відправляється до ТВС 10, де відбувається спектральний аналіз просторово-фільтрованого акустичного поля об'єкта, і за допомогою порогового пристрою визначається присутність або відсутність даної цілі. Після отримання

акустичних хвиль детекторами тиску x_1 – x_2 , y_1 – y_2 , z_1 – z_2 , електросигнали, сформовані віднімачами 3–5 з каналів дипольного прийому X , Y , Z , а також електросигнал з детектора тиску 0, передаються до ТВІ 11. Тут відбувається обчислення інтенсивності акустичного поля в різних частотних діапазонах, і за допомогою порогового механізму визначається присутність або відсутність об'єкта. Одночасно, електросигнали з детекторів тиску y_3 – y_4 направляються до ТВВС 12, де відбувається розрахунок взаємного спектру, і на основі вибраного критерію виявлення визначається присутність або відсутність об'єкта. Результати з усіх трьох каналів аналізуються оператором, який приймає кінцеве рішення.

Електричні сигнали, отримані від детекторів тиску y_1 – y_2 , спрямовуються до ТКП 14. Тут вони проходять кореляційну обробку, на основі якої обчислюється напрямок на об'єкт. Паралельно, ці ж сигнали від детекторів тиску y_1 – y_2 направляються до ТФП 15. У цьому блоку використовується фазовий метод пеленгації, який має обмеження через потенційну неоднозначність визначення квадранту розташування об'єкта при певних хвильових характеристиках спектральних компонентів акустичного поля об'єкта та базової відстані лінійної дискретної акустичної антени, реалізованої детекторами тиску y_1 – y_2 .

Ця проблема вирішується в ТПРЗ 16, куди надходять сигнали від детектора тиску 0 та з каналів дипольного прийому X , Y . У ТПРЗ 16 використовується метод рівносигнальних зон, який дозволяє точно визначити квадрант розташування об'єкта та кутове положення пеленгу. Оператор аналізує результати вимірювань напрямку на об'єкт, отримані за допомогою обох методів, і приймає кінцеве рішення.

Таким чином, запропонована мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування реалізує повний комплекс заходів щодо виявлення та визначення кутових координат цілі та може застосовуватись у шумопеленгаторних акустичних комплексах.

Автором в роботах [104, 116] представлені розрахунки дальності та експериментальні дослідження з виявлення БПЛА типу квадрокоптер з використання спрощеного прототипу корисної моделі – акустична антена, що складалась з декількох акустичних перетворювачів.

У майбутньому планується здійснення експериментальних випробувань, використовуючи макету пристрою, розробленого на базі зазначеного патенту та даних про розрахункову дальність виявлення. Методика визначення просторових параметрів, що стосуються організації експерименту з метою отримання характеристики направленості (ХН), повинна бути узгоджена із загальноприйнятими стандартами вимірювання ХН у межах робочого частотного діапазону акустичної антени. Для лабораторних умов необхідно забезпечити, щоб рівень оточуючих шумів не перевищував 15 дБ. Обробка даних вимірювань повинна проводитись із забезпеченням довірчого інтервалу з ймовірністю 0,95. [33-35, 90, 117].

Висновки по розділу

В третьому розділі:

- оцінено якість і переваги програмного середовища розробки LabView. Метою даної мови є автоматизація використання обчислювального та вимірювального лабораторного обладнання;
- отримано тракт виявлення і пеленгування, що є результатом наукового дослідження методології акустичного виявлення повітряних об'єктів;
- окреслено схему та описано її компонування і роботу за цією схемою;

- приведено схему реалізації тракту виявлення і пеленгування, описано їх роботу та розписано усі складові компоненти схеми та їх характеристики у складі пристрою виявлення і шумопеленгування.
- розроблено мультикомпонентну векторну акустичну антену пристроїв виявлення та пеленгування. Розроблена антена може працювати як пристрій, що забезпечує реєстрацію як скалярних, так і векторних характеристик. На основі вказаної антени показано застосування адитивних операцій, що до можливості формування характеристик направленості різних типів. Слід зауважити, що ця антена в силу використання додаткових приймачів може бути віднесеною як до області повітряної, так і до області гідроакустики.

РОЗДІЛ 4.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ключовим моментом у процесі здійснення вимірювань є підготовка відповідних документаційних матеріалів, на основі яких буде здійснюватися експериментальна діяльність [93-96].

Використання сучасних програмних рішень, таких як LabView, для реалізації трактів детекції системи шумопеленгації, а також методики вимірювання інтенсивності та спектрального аналізу, надає можливість ефективно використовувати доступні ресурси, що при традиційних методах було б в рази дорожче. Основними перевагами такого підходу є висока швидкість обробки даних та гнучкість у налаштуванні, що сприяє якісному відображенню результатів.

Таким чином, після розробки відповідного алгоритму та його налагодження, його можна інтегрувати в програмне середовище LabView. В результаті цього процесу ми отримаємо дані про роботу системи шумопеленгації.

4.1 Підготовка апаратури та схеми експерименту

Для здійснення акустичних досліджень, зокрема для виявлення та пеленгації малошумних літаючих апаратів, застосовується наступне обладнання:

- лінійна дискретна акустична антена, яка включає в себе 5 всенаправлених мікрофонів моделі ЕСМ-999 із застосуванням вітрозахисту, а також 5 стійок, що дозволяють регулювати висоту від 1 до 2,2 метра.

- з'єднувальний пристрій, який представляє собою 8-канальну звукову карту Tascam US-16X08, з'єднану з антеною за допомогою п'яти XLR-кабелів. АЦП отримує живлення від мережі 220V.
- персональний обчислювальний пристрій (ноутбук), на якому встановлене програмне забезпечення для обробки та візуалізації даних, базоване на пакеті LabView.

Перед виконанням дослідницької роботи приймальні лінії були калібровані за допомогою стандартного (еталонного) джерела акустичного випромінювання. Звуковий інтерфейс надавав можливість зберігати аудіодані з п'яти мікрофонних входів на комп'ютері з частотою дискретизації 48 кГц.

Перевіряємо, що вихідний сигнал з мікрофонів отримує однорідне підсилення на кожному мікрофоні за допомогою аналогового пристрою підсилення, інтегрованого в систему АЦП.

Переконаємось, що в системних налаштуваннях звуку на ПК в розділі «Пристрої запису» активовано саме наш звуковий інтерфейс Tascam US-16X08. Також рекомендується виконати цю перевірку безпосередньо в програмному обладнанні LabView.

4.2 Збирання вимірювального стенду (лабораторні умови)

Приєднуємо мікрофони до аудіо інтерфейсу за допомогою п'яти XLR-кабелів. Включаємо звуковий інтерфейс Tascam US-16X08 (систему АЦП) до електромережі 220V. Через USB-кабель з'єднуємо систему АЦП із персональним комп'ютером. Важливо попередньо встановити актуальні драйвери для звукової карти на комп'ютері. Звертаємо увагу, що для правильної інтеграції програми і апаратного забезпечення спочатку слід під'єднати систему АЦП до ПК, а вже після цього ініціювати програму в програмному середовищі LabView. Такий порядок дій забезпечує коректне розпізнавання АЦП комп'ютером.

4.3 Проведення вимірювань у лабораторних умовах



Рис.4.1. Квадрокоптер для випробувань

Для випробування програми було використано саморобний чотирьох гвинтовий квадрокоптер з довжиною гвинта 46см, типова конструкція та технічні характеристики якого описані у [97] і двигунами Rctimer 5010/14 360KV Multicopter Brushless Motor з характеристиками:

KV: 360

Конфігурація: 12N14P

Діаметр валу (вихідний розмір): 4 мм

Діаметр валу (внутрішній розмір): 5мм

Розміри двигуна: Ф50х26

Вага (г): 92г, Кабель 40см

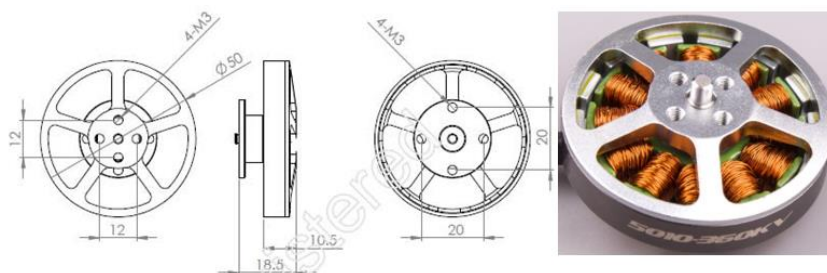


Рис. 4.2. Двигун Rctimer 5010/14

Дослідження з метою встановлення акустичних характеристик самостійно виготовленого квадрокоптера із гвинтами діаметром 46 см виконувалося у приміщенні 220, розташованому в 12 корпусі. Дане приміщення представляє собою заглушену кімнату з габаритами 6.9х4.3х3.3 м. У час проведення досліду температурний режим в кімнаті відповідав 22°C.

Для збору даних було задіяно антенний модуль, що складається з п'яти мікрофонів, а також аудіо інтерфейс і комп'ютерне обладнання. Квадрокоптер розміщувався на акустичній осі, зберігаючи відстань 2.5 м від антенного комплексу. Оператор, керуючий комп'ютером, розташовувався на відстані приблизно 4 м.

Схема експерименту приведена на рисунку 4.3.



Рис. 4.3. Схема експерименту

Було здійснено п'ять реєстрацій загальних акустичних відбитків від квадрокоптера. Під час цих записів, літальний апарат було надійно закріплено на поверхні за допомогою важких предметів, і він працював у двох основних режимах: середньої та пікової потужності.

Аналіз отриманих аудіо даних виконувався на комп'ютері, використовуючи програмне забезпечення LabView. Основний процес обробки включав у себе третин-октавну та напів-октавну смугову фільтрацію запису в частотному діапазоні від 250 до 500 Гц. Додатково, було проведено розрахунок спектральних характеристик за допомогою швидкого перетворення Фур'є, а також визначення взаємного спектру.

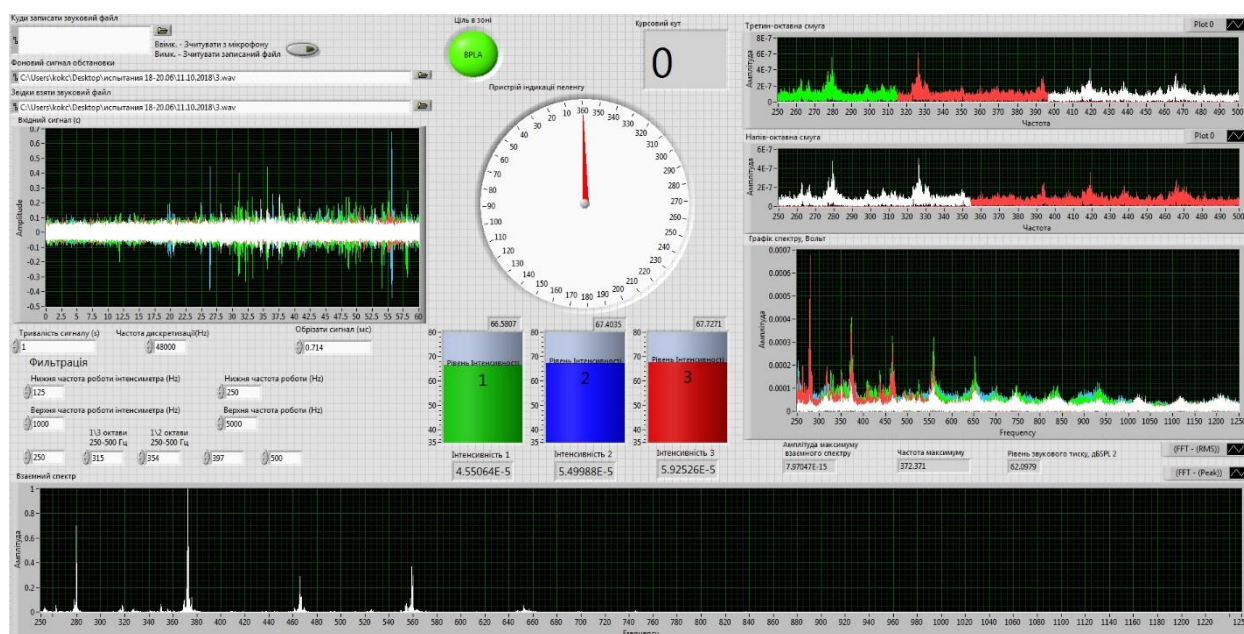


Рис. 4.4. Результат роботи програми.

В результаті роботи програми було на графіку FFT отримано п'ять сплесків спектрального сигналу в діапазоні (250-1250) Гц на частотах 280 Гц, 370 Гц, 465 Гц, 560 Гц, 660 Гц. Отриманий сумарний рівень випромінювання становив $L_{sn} = 62 \text{ dB SPL}$ на відстані $r_s = 2.5 \text{ м}$ від об'єкту.

Після проходження через систему обробки інтенсивності, ми отримали результат у 67 дБ для кожної з третино-октавних частотних смуг. Найбільш виражена частота для квадрокоптера встановлена на рівні 372 Гц. Ця конкретна частота була виявлена в двох з трьох використаних трактів, що підтверджує важливість використання трьох різних методів виявлення, заснованих на різних фізичних принципах. Застосування такого підходу, що включає в себе дублювання, дозволяє нам реєструвати специфічні характеристики акустичного поля, що підвищує точність та надійність системи виявлення.

Таким чином, головною ціллю цього дослідження було тестування та аналіз трьох різних трактів виявлення, а також визначення характерних частот квадрокоптера, що було успішно виконано.

4.4 Підготовка матеріальної бази для вимірювання на відкритих просторах, збирання стенду, проведення вимірювань в натурних умовах

Дослідження з метою виявлення квадрокоптера Phantom 3 standard [99,119] було здійснено поза межами населеного пункту, у відкритому полі. Умови проведення експерименту характеризувалися теплою та вологою погодою з температурою атмосферного повітря приблизно 20°C. Додатковими факторами, які могли впливати на результати, були пориви вітру, звуки коливань дерев та шум від рухомих автомобілів на автодорозі, розташованій приблизно в 1 км від місця проведення експерименту.

Схема експерименту приведена на рисунку 4.6.

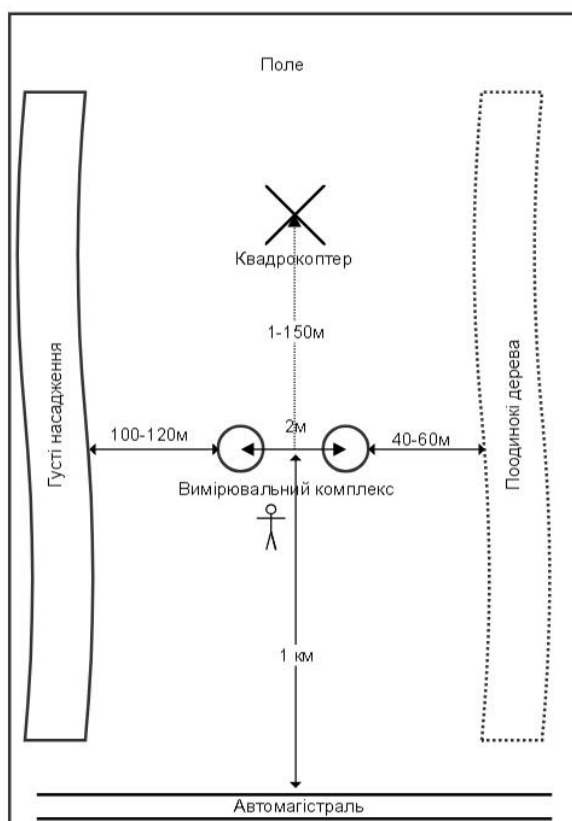


Рис. 4.6. Схема експерименту

Вимірювальний апаратний комплекс включав у себе два мікрофони, аудіо-інтерфейс та персональний комп'ютер. Мікрофони розташовувались на відстані 1,5 м від поверхні землі, яка була вкрита рослинністю. Відстань між мікрофонами (акустична база) дорівнювала 2 м. Перед початком дослідження канали реєстрації були калібровані за допомогою стандартного джерела звукового сигналу. Аудіо-інтерфейс давав можливість здійснювати запис з частотою дискретизації 48 кГц з обох мікрофонів безпосередньо на ПК.

Експеримент було розбито на кілька послідовних етапів. Під час першого етапу здійснювався запис акустичного фону без участі квадрокоптера. На другому етапі фіксувалися комбіновані звукові вібрації від квадрокоптера та зовнішнього середовища, коли дрон знаходився у режимі польоту безпосередньо над мікрофонами на висоті близько 5 м, визначеної за допомогою навігаційного обладнання. Важливо відзначити,

що під час польоту квадрокоптер дещо відхилявся від заданої точки через дію вітру, що призводило до зміни режиму роботи його двигунів.

Аналіз аудіофайлів виконувався на комп'ютері за допомогою програмного комплексу LabView. Основні етапи обробки включали в себе третин-октавну та напів-октавну фільтрацію записів у частотному діапазоні від 250 до 500 Гц. Додатково, застосовувалась процедура розрахунку спектру за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) та визначення взаємного спектру.

Загалом було отримано 20 аудіозаписів. Нижче представлені результати аналізу декількох з них для демонстрації основних характеристик та особливостей отриманих даних.

На рис. 4.7 зображена роботи програми при відстані до квадрокоптера 5м і висотою на землю в 2м.

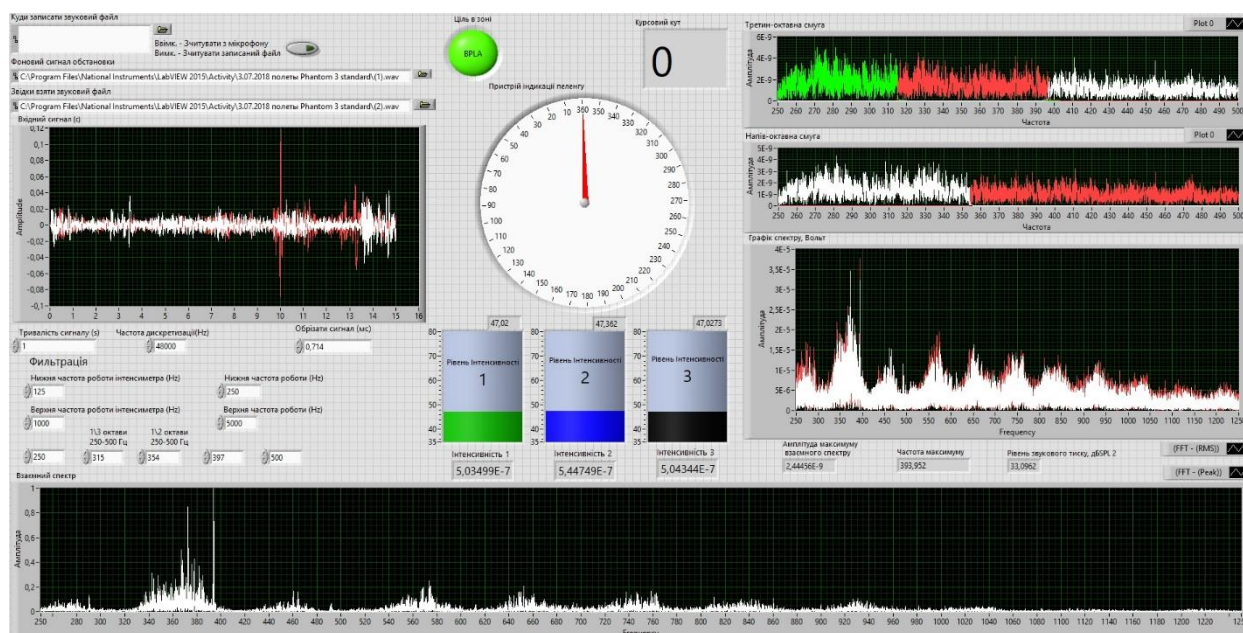


Рис. 4.7. Результат роботи програми.

На рис. 4.8 зображена роботи програми при відстані до квадрокоптера 150м і висотою на землю в 10м.

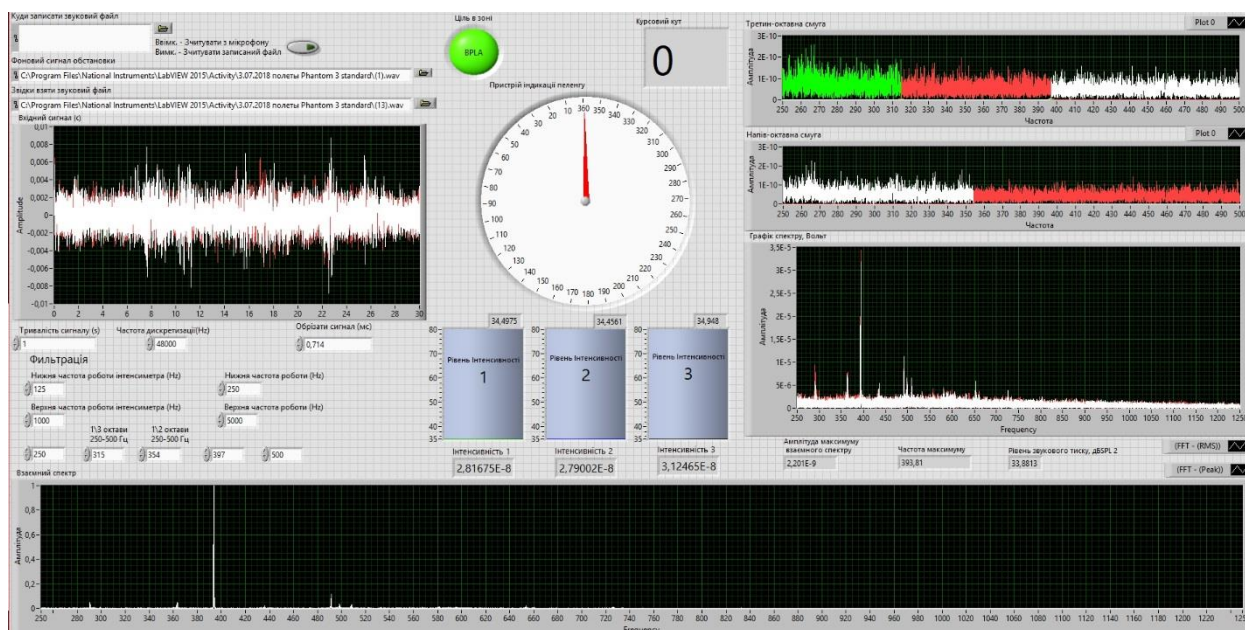


Рис. 4.8 Результат роботи програми.

Дослідження, проведені в польових умовах, дали можливість отримати записи роботи квадрокоптера та провести їх детальний аналіз, результати якого представлені на графіках 4.7 та 4.8.

В ході аналізу було встановлено, що домінуюча частота квадрокоптера дорівнює 393 Гц. Ця частота була стабільно виявлена в усіх проведених вимірюваннях.

За критерієм Неймана – Персона вірогідності правильного виявлення $D = 0.9$ та вірогідності хибної тривоги $F = 0.01$. Правильність прогнозу було перевірено по результатам обробки записів польоту дрону. Квадрокоптер виконував політ в напрямку до мікрофонів вздовж акустичної бази. Відстань до точки підйому дрону була виміряна та склала 100 м, а висота польоту, визначена за допомогою навігаційного приладу, була 30 м. Під час польоту намагалися підтримувати стабільну горизонтальну швидкість приблизно 3 м/с.

Об'єкт вважався виявленим, коли рівень вихідної реакції детектора перевищував рівень завади [100-104].

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок про те, що тракти виявлення, що входять до складу розробленого пристрою, є робочими.

Експеримент з метою пеленгування самостійно виготовленого квадрокоптера із гвинтами діаметром 46 см відбувався в приміщенні 12 корпусу НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", а саме в його дворі. Погодні умови були сприятливими: ясний день, температура повітря близько 15°C. Проте були відчутні пориви вітру, а також шум від дерев та рухомих автомобілів на дорозі, розташованій приблизно в 30 метрах.

Для проведення вимірювань було використано комплекс, що включав в себе акустичну антену із 5 мікрофонів, звукову карту та персональний комп'ютер. Мікрофони розміщувались на висоті 2 метри від асфальтованої поверхні. Відстань між мікрофонами (акустична база) складала 0,5 метра.

Схема експерименту приведена на рис. 4.9.

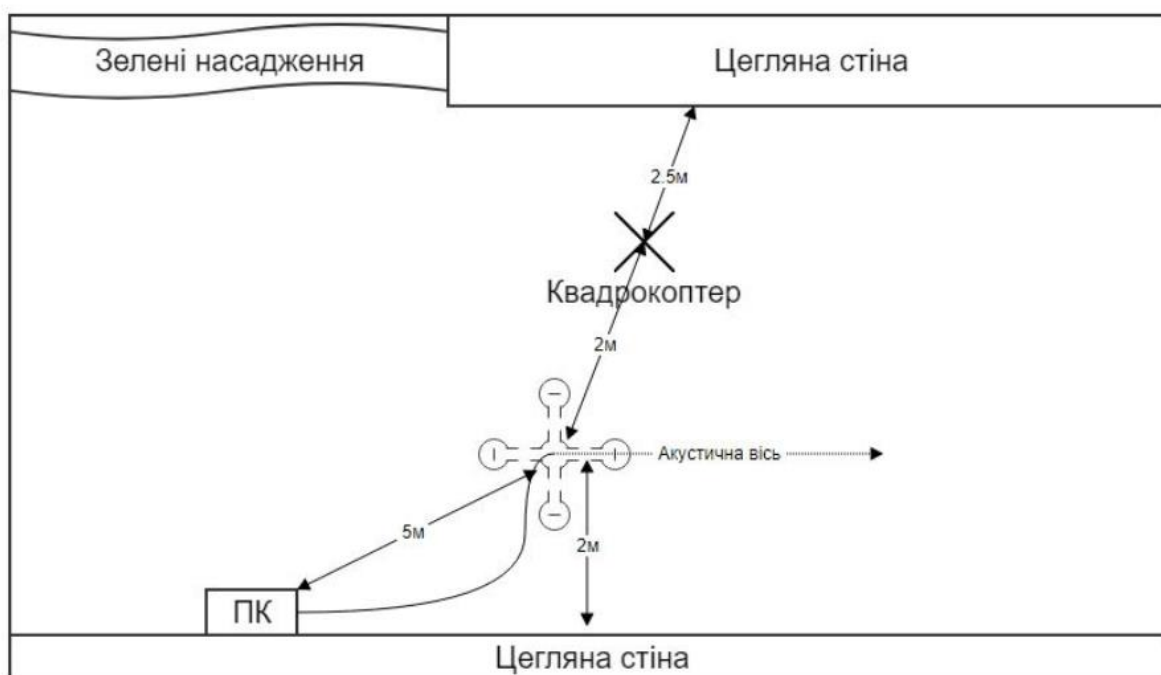


Рис. 4.9. Схема експерименту

Експеримент було розбито на декілька послідовних етапів. Перший етап передбачав запис акустичного фону місцевості, щоб мати можливість відфільтровувати зовнішні завади під час аналізу записів. На наступному етапі було здійснено запис сумарних шумів від роботи квадрокоптера, який був розташований на висоті 2 метри від землі в увімкненому стані. Важливо відзначити, що через дію поривів вітру квадрокоптер не завжди утримувався строго в заданому положенні, відхиляючись як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках. Проте, зміни в режимі роботи його двигунів були майже непомітними на запису.

У процесі експерименту акустична антена залишалася стаціонарною. Тим часом, квадрокоптера переміщували на різні відстані від антени, в межах від 1 до 10 метрів, а також під різними горизонтальними кутами відносно неї, щоб вивчити його акустичні характеристики з різних позицій.

На рис. 4.10 показано зміну положення квадрокоптера у просторі під час проведення експерименту.

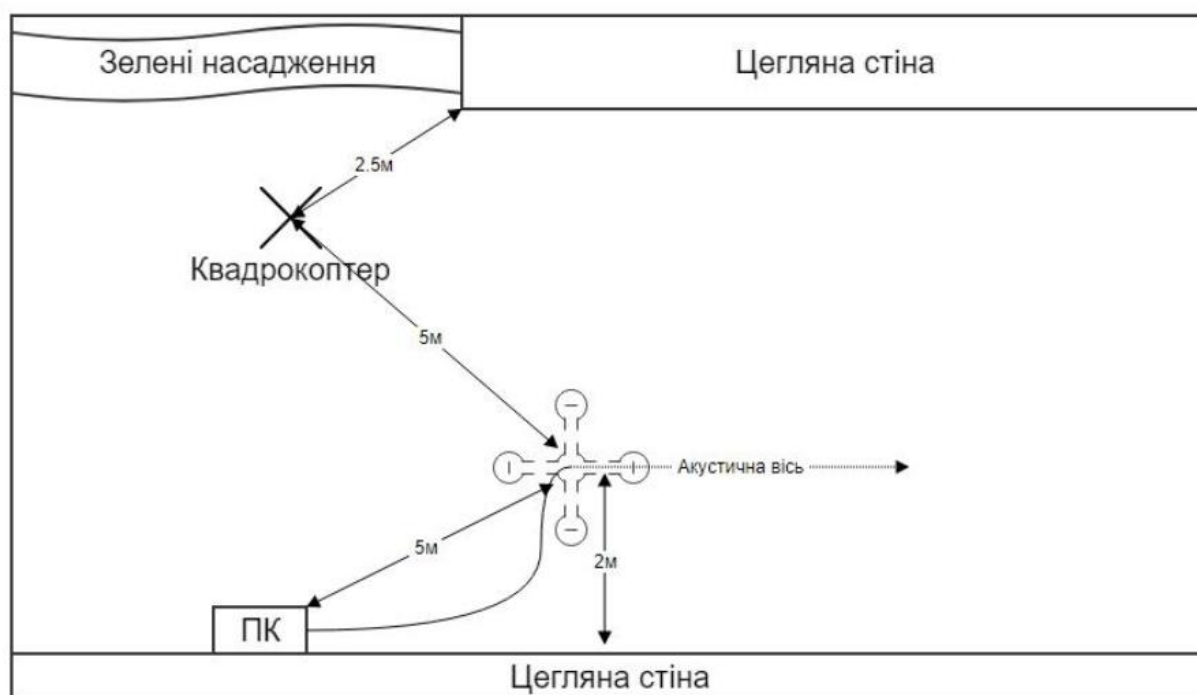


Рис. 4.10. Зміна положення квадрокоптера у просторі

Було проведено 12 записів, далі будуть приведені декілька з них. На рис. 4.11 зображена робота програми при відстані до квадрокоптера 2м і висотою над землею в 2м і у першому квадранті (0° - 90° від акустичної вісі ліворуч).

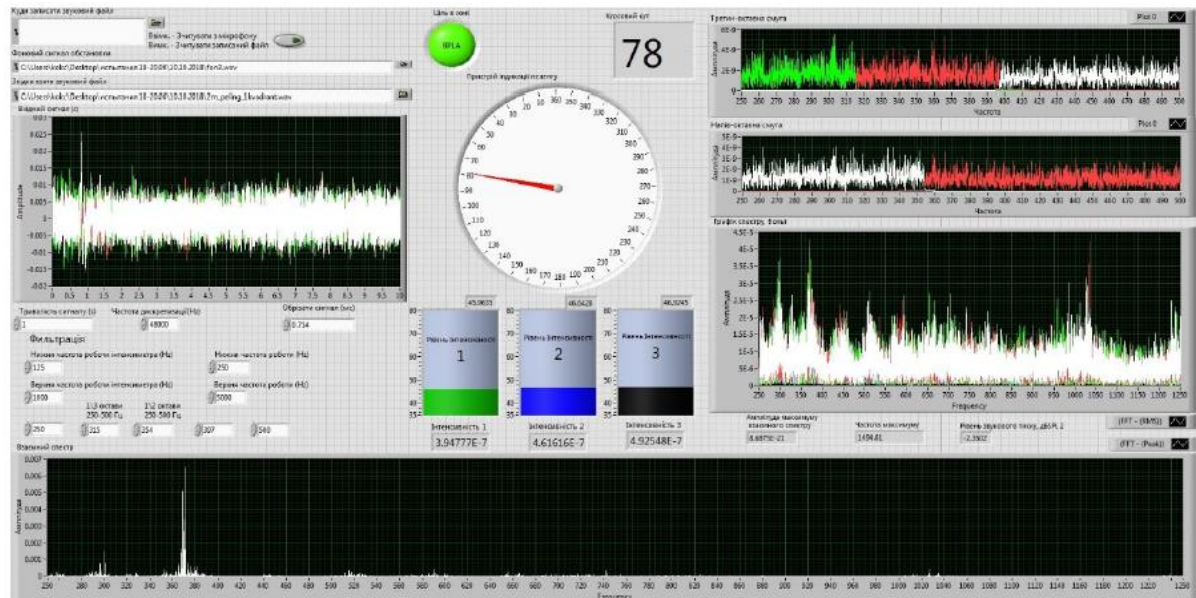


Рис. 4.11. Результат роботи програми.

На рис. 4.12 зображена роботи програми при відстані до квадрокоптера 5м і висотою на землею в 2м і у другому квадранті (0° - 90° від акустичної вісі ліворуч).

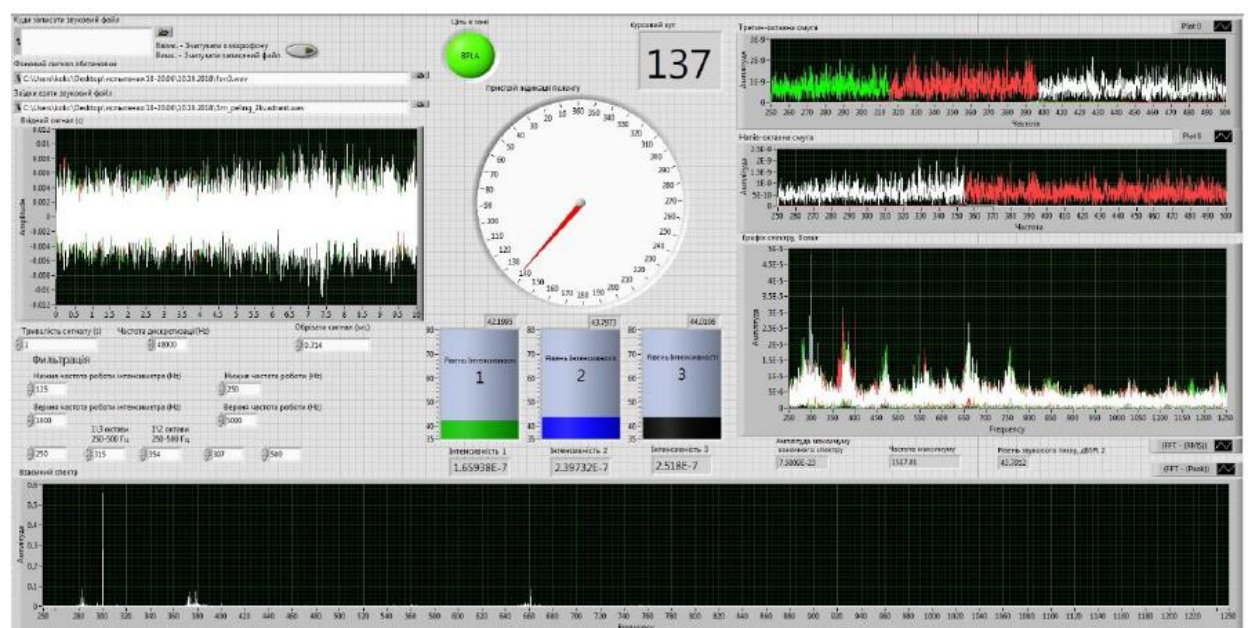


Рис. 4.12. Результат роботи програми.

Експеримент, здійснений у польових умовах, демонструє ефективність тракту пеленгації для визначення напрямку на об'єкт в умовах відносної тиші. Рисунки 4.11 та 4.12 ілюструють результати виявлення квадрокоптера, коли він розташований в першому (див. рис. 4.11) та другому (див. рис. 4.12) квадрантах відносно акустичної вісі [34].

Під час цього етапу експерименту положення квадрокоптера залишалося стабільним. Він був розташований під кутом 80 градусів від акустичної вісі, тоді як результати показали кут 78 градусів на відстані 2 метри. Важливо відзначити, що квадрокоптер знаходився на відстані 2,5 метра від цегляної стіни, що могло внести певні відхилення в результати вимірювань.

Під час наступного етапу експерименту квадрокоптер було переміщено для перевірки його пеленгації в другому квадранті. Він був розташований під кутом 145 градусів і на відстані 5 метрів від акустичної антени.

Загалом, результати експерименту підтвердили, що пеленгаційний тракт пристрою функціонує належним чином.

Висновки по розділу

В четвертому розділі:

- визначено усі необхідні компоненти для правильної роботи алгоритму;
- отримано фінальний вигляд трактів виявлення та пеленгування, що був застосований у лабораторних та натурних умовах;

- підготовлено апаратуру та схему вимірювання до експерименту, збирано стенд, проведено вимірювання в лабораторних і натурних умовах

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі було запропоновано акустичну систему повітряного шумопеленгування, що реалізує принципи виявлення шумоподібних сигналів із залучення спектральних та кореляційних методів. Виконано огляди актуальних досліджень і систем, аналітичні розрахунки, лабораторні та натурні експерименти, що дало змогу отримати наступні результати:

1. Адаптація принципів шумопеленгування в морському середовищі до принципів пеленгування в повітрі. Досліджено існуючі методи та алгоритми обробки та аналізу шумів навколишнього повітряного середовища. Розглянуто стан розвитку сучасних систем шумопеленгування БПЛА та отриману інформацію застосовувано для реалізації системи шумопеленгування повітряних об'єктів в програмному середовищі LabView.;
2. Вперше для повітряних об'єктів розрахована енергетична дальність виявлення БПЛА типу КРИЛО. Також визначено прогнозовану дальність виявлення БПЛА, що включає геометричну та енергетичну дальності. Прогнозована дальність в 1000 м для БПЛА типу крило і 200 м для БПЛА типу квадрокоптер є досяжними;
3. Вперше використано середовище LabView для моделювання алгоритму і структури пристрою шумопеленгування;
4. Вперше програмно були об'єднані пристрій виявлення і вимірювання параметрів виявленого сигналу в комплексі, тобто підвищення надійності забезпечувалося паралельним використанням трьох трактів виявлення. Приведено схему реалізації трактів виявлення і пеленгування, описано їх робота та розписано усі складові компоненти схеми та їх характеристики у складі пристрою виявлення і шумопеленгування;

5. Вперше була запропонована мультикомпонентна акустична антена, конструкція якої дозволяє працювати як з скалярними та векторними полем тиску, так і з коливальною швидкістю. Слід зауважити, що ця антена в силу використання додаткових приймачів може бути віднесеною як до області повітряної, так і до області гідроакустики;

6. За результатами розробки було створено макет пристрою шумопеленгування, функціональні можливості якого, було перевірено в практичних умовах із залученням БПЛА квадрокоптерного типу в лабораторних та натурних умовах. В подальшому напрямки дослідження і розробки систем виявлення БПЛА має бути спрямоване на удосконалення трактів виявлення та вимірювання основних характеристик акустичного поля в умовах додаткових лабораторних та натурних експериментів.

Практична значимість роботи полягає в подальшому розвитку засобів повітряного шумопеленгування, а саме створення оригінальних комбінованих пристроїв виявлення БПЛА та впровадження віртуальних інструментів для пеленгування і виявлення на основі лабораторного пакету програм LabView та MathLab.

Як результат, створено макет пристрою шумопеленгування повітряних об'єктів за допомогою сучасного програмного забезпечення, яку можливо впровадити в у склад мультисенсорної системи виявлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A. Hassanalian, M. and Abdelkefi, “Classifications, applications, and design challenges of drones: A review,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 91, pp. 99–131, 2017, DOI: 10.1016/j.paerosci.2017.04.003.
2. M. Bangura, *Aerodynamics and Control of Quadrotors*. The Australian National University, 2017, URL: <https://openresearch-repository.anu.edu.au/bitstream/1885/112382/1/Bangura%20Thesis%202017.pdf>
3. Moshkov, P & Samokhin, V & Yakovlev, A. (2013). Study of the noise sources of an UAV with a two-stroke engine and shrouded propeller. *Journal of Physics: Conference Series*. 1925. 012001. 10.1088/1742-6596/1925/1/012001.
4. DroneUA: веб-сайт. URL: <http://drone.ua/> (дата звернення: 12.11.2021).
5. Cho, R. (2017). How Drones are Advancing Scientific Research. Retrieved from <https://blogs.ei.columbia.edu/2017/06/16/how-drones-are-advancing-scientific-research/>
6. Gregory, D. (2012). From a View to a Kill: Drones and Late Modern War. *SAGE Journals*, 28(7–8), pp. 188–215. <https://doi.org/10.1177/0263276411423027>
7. Karaca, Y., Cicek, M., Tatli, O., Sahin, A., Pasli, S., Beser, M. F. and Turedi, S. (2018). The potential use of unmanned aircraft systems (drones) in mountain search and rescue operations. *The American journal of emergency medicine*, 36(4), pp. 583–588. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2017.09.025>
8. Клюкин И. И. Акустические измерения в судостроении / И. И. Клюкин, А. Е. Колесников. — Ленинград: «Судостроение», 1968.-403 с.
9. Скребнев Г. К. Комбинированные гидроакустические приемники / Скребнев Г. К. - СПб.: Злмор, 1997.-200 с.
10. Дідковський В.С. Основи акустичної екології / В.С. Дідковський, В.Я. Акименко, О.І. Запорожець, В.Г. Савін, В.І.Токарев. — Кіровоград: Папір.-вид. центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. — 519 с

11. DroneShield : веб-сайт. URL: www.droneshield.com (дата звернення: 15.10.2018).
12. CERBAIR : веб-сайт. URL: <https://www.cerbair.com/> (дата звернення: 15.10.2018).
13. BLACK SAGE TECHNOLOGIES BST-UAVX : веб-сайт. URL: <https://www.blacksagetechnologies.com/> (дата звернення: 15.10.2018).
14. AARONIA DRONE DETECTOR : веб-сайт. URL: <https://drone-detection-system.com/> (дата звернення: 08.11.2017).
15. Drone Labs : веб-сайт. URL: <http://www.dronedetector.com> (дата звернення: 08.11.2017).
16. ORELIA : веб-сайт. URL: <http://www.drone-detector.com> (дата звернення: 08.11.2017).
17. Advanced Protection Systems : веб-сайт. URL: <http://www.detectdrones.com> (дата звернення: 17.11.2022).
18. Dedrone Smart Airspace Security: веб-сайт. URL: <https://www.dedrone.com/> (дата звернення: 17.11.2022).
19. Sedunov, A., Salloum, H., Sutin, A. and Sedunov, N. (2018). UAV Passive Acoustic Detection. 2018 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST), 23–24 Oct. 2018. <https://doi.org/10.1109/THS.2018.8574129>
20. Sedunov, A. (2016). Real-time time difference of arrival estimation for moving wideband acoustic sources. The Journal of the Acoustical Society of America, Proc. Mtgs. Acoust. 29, 055006. <https://doi.org/10.1121/2.0000815>
21. Ferguson, B. G. and Lo, K. W. (1999). Passive wideband cross correlation with differential Doppler compensation using the continuous wavelet transform. The Journal of the Acoustical Society of America 106, 3434. <https://doi.org/10.1121/1.428197>
22. Sutin, A., Salloum, H., Sedunov, A. and Sedunov, N. (2013). Acoustic Detection, Tracking and Classification of Low Flying Aircraft. 2013 IEEE

International Conference on Technologies for Homeland Security (HST).

<https://doi.org/10.1109/THS.2013.6698990>

23. Knapp, C. and Carter, G. (1976). The generalized correlation method for estimation of time delay. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 24(4), pp. 320–327. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1976.1162830>

24. Van Den Broeck, B., Bertrand, A., Karsmakers P., Vanrumste, B., Van Hamme, H. and Moonen, M. (2012). Time-domain generalized cross correlation phase transform sound source localization for small microphone arrays. 2012 5th European DSP Education and Research Conference (EDERC). <https://doi.org/10.1109/EDERC.2012.6532229>

25. Clair, V. and Gabard, G. (2015) Computational study of the spectral broadening of an acoustic tone by turbulence. 22nd International Congress on Sound and Vibration, Italy. 12 - 16 Jul 2015.

26. Harvey, B. and O'Young, S. (2018). Acoustic Detection of a Fixed-Wing UAV. Drones, 2(1). <https://doi.org/10.3390/drones2010004>

27. Pham, T. and Srour N. (2004). TTCP AG-6: acoustic detection and tracking of UAVs. Unattended/Unmanned Ground, Ocean, and Air Sensor Technologies and Applications VI, 5417. <https://doi.org/10.1117/12.548194>

28. Kim, J., Park, C., Ahn, J., Ko, Y., Park, J. and Gallagher, J. C. (2017). Real-time UAV sound detection and analysis system. 2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), 13-15 March 2017. <https://doi.org/10.1109/SAS.2017.7894058>

29. Костюк Р. Ю., Козак А. В., Ларін П. М. Розробка мікрофонного тракту для систем повітряної шумопеленгації. X Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка–2017» : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 25–27 квітня 2017 р. Київ, 2017. С. 27–30.

30. Козак А. В., Ларін П. М., Костюк Р. Ю., Коржик О. В. (2018). Імітаційне моделювання вимірювача інтенсивності звуку в задачах

- шумопеленгування. Електронна та Акустична Інженерія, 1(1), 27–33.
<https://doi.org/10.20535/2617-0965.2018.1.1.104510>
31. Ларін П. М., Козак А. В., Костюк Р. Ю. Пристрій пеленгування безпілотних літальних апаратів у програмному середовищі LabView. XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка–2018» : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 3–5 квітня 2018 р. Київ, 2018. С. 74–78.
 32. Козак А. В., Ларін П. М., Костюк Р. Ю. Пристрій виявлення безпілотних літальних апаратів у програмному середовищі LabView. XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка–2018» : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 3–5 квітня 2018 р. Київ, 2018. С. 78–81.
 33. Козак, А. В. Пристрій виявлення повітряних об'єктів : магістерська дис. : 171 Електроніка / Козак Андрій Віталійович. – Київ, 2018. – 123 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25474>
 34. Ларін, П. М. Пристрій пеленгування повітряних об'єктів : магістерська дис. : 171 Електроніка / Ларін Пилип Миколайович. – Київ, 2018. – 108 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25601>
 35. Костюк, Р. Ю. Завадостійкість акустичних антен систем повітряного шумопеленгування : магістерська дис. : 171 Електроніка / Костюк Роман Юрійович. – Київ, 2019. – 117 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27642>
 36. Горовий, К. В. Вимірювання шумових характеристик малогабаритних повітряних об'єктів гелікоптерного типу : магістерська дис. : 171 Електроніка / Горовий Костянтин Володимирович. – Київ, 2020. – 75 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38649>
 37. Дальность обнаружения малых воздушных объектов наземной системой шумопеленгования / Кабушка Я. В., Зотько А. С., Коржик О. В., Кандрачук І. В. // Мікросистеми, Електроніка та Акустика : науково-

- технічний журнал. – 2018. – Т. 23, № 5(106). – С. 48–56. – Бібліогр.: 14 назв. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.5.131483>
38. Flying object detection system and flying object detection method. Патент США № 10,791,395. Виданий 29 вересня 2020 року. Заявник: Panasonic. URL: <https://patents.justia.com/patent/10791395>.
39. Hearing, B. and Franklin, J. (2016). Drone detection and classification methods and apparatus. United States Patent No. US 9,275,645 B2.
40. Acoustic direction finder for use as an active responder. Європейська патентна заявка № EP 0219340 A3. Дата публікації: 30 березня 1988 року. Заявник: GEC AVIONICS LIMITED. URL: <https://data.epo.org/publication-server/html-document?PN=EP0219340%20EP%200219340&iDocId=421895>.
41. Способ определения пеленга источника звука: пат. 2 323 449 Россия: МПК G01S 3/80. №2323449; заявл. 02.11.2006; опубл. 27.04.2008,. Бюл. № 12 40 с.
42. Мультикомпонентна векторна акустична антена пристроїв виявлення та пеленгування: пат. 132160 Україна: МПК G01S 3/808 (2006.01). № u201809649; заявл. 26.09.2018; опубл. 11.02.19, бюл. № 3/2019. 3 с.
43. Шоцкий Б.И. Проектирование гидролокаторов. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию по курсу "Гидроакустические устройства" для студентов специальности 0610 всех форм обучения, часть 1. Киев : КПИ, 1984. 48 с.
44. Шоцкий Б.И. Проектирование гидролокаторов. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию по курсу "Гидроакустические устройства" для студентов специальности 0610 всех форм обучения, часть 2. Киев : КПИ, 1985. 84 с.
45. Шоцкий Б.И. Проектирование гидролокаторов. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию по курсу "Гидроакустические устройства" для студентов специальности 0610 всех форм обучения, часть 3. Киев : КПИ, 1986. 60 с.

46. Справочник по гидроакустике / под ред. А. Е. Колесникова. Ленинград: Судостроение, 1982. 344 с.
47. Применение измерительных систем фирмы Брюль и Кьер для измерений акустического шума. Копенгаген:, К.Ларсен и сын, 1971. – 224 с.
48. Краткий каталог оборудования для вибрационных и акустических измерений Брюль и Кьер : веб-сайт. URL: <http://www.istcgroup.com/pdf/bruel%20catalog.pdf>(дата звернения: 11.10.2018).
49. Митько. В. Б. Гидроакустические средства связи и наблюдения / В. Б. Митько. А. П. Евтютов. С. Е. Гу-щин. - Л.: Судостроение, 1982. - 200 с.
50. Евтютов. А. П. Справочник по гидроакустике / А. П. Евтютов, А. Е. Колесников и др. - Л.: Судостроение, 1982. - 344 с.
51. Горбатов. А. А. Акустические методы измерения расстояний и управления / А. А. Горбатов. Г. Е. Рудашевский. - М.: Энергоиздат, 1981. - 208 с.
52. Cabel, R., McSwain, R. and Ferdinand, G. (2016). Measured Noise from Small Unmanned Aerial Vehicles. Paper presented at the NOISE-CON 2016. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160010139.pdf>
53. Marino, L. (2010). Experimental analysis of UAV-propellers noise. Paper presented at the 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2010-3854>
54. Intaratep, N., Alexander, W. N. and Devenport, W. J. (2016). Experimental Study of Quadcopter Acoustics and Performance at Static Thrust Conditions. Paper presented at the 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2016-2873>
55. Sinibaldi, G. and Marino, L. (2013). Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV. Applied Acoustics, 74(1), pp. 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.06.011>

56. Ольшевський В.В. Статистические методы в гидролокации. / Ольшевський В.В. - Л.: Судостроение, 1973
57. Smith, Steven W. "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing". San Diego, California: California Technical Publishing, 1997. 640 pp.
58. Новиков. А. К. Статистические измерения в судовой акустике / А. К. Новиков. - Л.: Судостроение. 1985.-272 с.
59. Бендат. Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат. А. Пирсол. - М.: Мир. 1989. - 540 с.
60. Акустичні інформаційні системи [Електронний ресурс] : теоретичні основи та лабораторний практикум для студентів спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізацій «Акустичні мультимедійні технології», «Акустичний моніторинг, біо-та психоакустика» / С. О. Козерук ; КПІ ім.Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 168 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22800>
61. Румынская И.А. Основы гидроакустики / И.А. Румынская. - Л.: Судостроение. 1979. - 209с.
62. Simmons, Greg. "Microphones: An Introduction". AudioTechnology, November 27, 2020. URL: <https://www.audiotechnology.com/tutorials/microphones-an-introduction>.
63. Mit'ko, Valery B. "Perspective directions of vector-phase methods application in acoustic-seismic environmental monitoring". Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 102, No. 5_Supplement, 3157, November 1, 1997. <https://doi.org/10.1121/1.420735>
64. Сапожков М. А. Электроакустика. Учебник для вузов. М.: Связь, 1978. — 272с. С ил.
65. Колесников, А.Е. Шум и вибрация /А.Е. Колесников - Л.: Судостроение, 1988. - 248
66. Ковригин С.Д., Крышов С.И. Архитектурно-строительная акустика - М.: Высш. шк., 1986. - 256 с

67. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Е.Я. Юдин, Л.А. Борисов, И.В. Горенштейн и др. - М.: Машиностроение, 1985.-400 с.
68. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция. - Л.: Судостроение, 1986. - 386 с
69. Исакович М.А. Общая акустика. - М.: Наука. 1973. - 495 с
70. Дьяков А.Б., Игнатьев Ю.В. Экологическая безопасность транспортных потоков. - М.: Транспорт, 1989. - 128 с.
71. Иванов Н.И. Борьба с шумом и вибрациями на путевых и строительных машинах. - М.: Транспорт, 1979. - 272 с.
72. Самойлюк Е.П. Борьба с шумом в населенных местах / Самойлюк. Е.П., Денисенко В.И., Пилипенко А.П. – К.: Будівельник, 1981. – 144 с
73. Авиационная акустика: В 2-х ч. / Под ред. А.Г. Мунина. - М.: Машиностроение, 1986.
74. Квитка В Е . Мельников Б.Н., Токарев В.И. Гражданская авиация и охрана окружающей среды. - К. Вища шк.. Головное издательство, 1984.- 136 с.
75. International Civil Aviation Organization. "Balanced Approach to Aircraft Noise Management." Adopted by the 33rd ICAO Assembly, 2001. ICAO Doc 9829, Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management.
76. International Civil Aviation Organization. "Aircraft Noise." Main policy on aircraft noise management.
77. Изяк Г.Д., Гомзиков Э.А. Шум на судах и методы его уменьшения. - М.: Транспорт, 1987. - 303 с.
78. Волков Л.К., Ковалев Р.Н., Никифорова Г.Н. и др. Вибрация и шум электрических машин малой мощности. - Л.: Энергия, 1979.-206 с.
79. Контроль шума в промышленности: Предупреждение, снижение и контроль промышленного шума в Англии / Под ред. Дж Д. Вейба. - Л.: Судостроение, 1981 - 312 с.

80. Исаков В.М., Федорович М. А. Виброшумозащита в электромашиностроении. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 208 с.
81. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991.
82. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992.
83. Hygienic criteria for the state of the environment: 12. Noise. - Geneva: WHO, 1983. - 115 p
84. ISO 14001:2015. "Environmental Management Systems – Requirements with Guidance for Use." International Organization for Standardization URL: <https://www.iso.org/standard/60857.html>
85. Заборов В.И., Лапасв Э.М., Никольский В.Н. Звукоизоляция в жилых и общественных зданиях. - М.: Стройиздат, 1979. - 254 с.
86. World Health Organization. "Noise." Guidelines for community and night noise, 27 April 2010.
87. Pocketbook of Technical Acoustics by Gerhard Müller, Manfred Heckl, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York - Springer; Softcover reprint of the original 2nd ed. 1994 edition (February 18, 2012). - 436 p.
88. Jennings, Richard, and Fabiola De la Cueva. *LabVIEW Graphical Programming, Fifth Edition*. Publisher : McGraw Hill; 5th edition (November 11, 2019) 640p.
89. П784 Івашко В.В. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Програмне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем». Чернівці: Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича 2021. – 80 с.
90. Козак, А. В. (2021). Удосконалена система шумопеленгування безпілотних літальних апаратів. Електронна та Акустична Інженерія, 4(1), 228902–1 . <https://doi.org/10.20535/2617-0965.eae.228902>
91. Е.С. Швець, Я.Л. Сичков, І.А.Третьяков, О.В. Коржик. Використання графічного програмування для організації аналізаторів спектру

паралельного типу Electronics and communications/Vol. 20,№ 4(87). 2015, С. 89-93.

92. А.В. Козак, П.М. Ларін, Р.Ю. Костюк. Імітаційне моделювання приладу вимірювання інтенсивності звуку та формування просторової вибіркості в повітряному середовищі. X Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2017»/Збірник статей /Vol.10, №9. 2017 С. 46-50.

93. “ISO — ISO 3745:2012 — Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms.” URL: <https://www.iso.org/standard/45362.html>.

94. ISO 9688, Mechanical Vibration and Shock – Analytical Methods of Assessing Shock Resistance of Mechanical Systems – Information Exchange Between Suppliers and Users of Analyses.

95. ISO/IEC 25000:2005, Software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). Publisher: International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission.

96. ISO 9613-1:1993, Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere.- 1993.

97. Quan, Quan & Fu, Rao & Cai, Kai-Yuan. (2021). Practical Control for Multicopters to Avoid Non-Cooperative Moving Obstacles. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. PP. 1-19. 10.1109/TITS.2021.3096558.

98. Принципи проектування екоміста і житла в умовах мінімального впливу шуму: веб-сайт. URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=667801> (дата звернення: 11.08.2021).

99. PHANTOM 4 PRO. User's Manual: PDF. URL: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20180508/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_Series_User_Manual_EN.pdf (дата звернення: 12.11.2021).

100. Виявлення малих літальних апаратів по акустичному випромінюванню- прогноз і експеримент/ С.О.Козерук, О.В.Коржик, К.В.Горовий // Електронна та акустична інженерія. – 2018. – №1. – С. 27 – 33.
101. S. O. Kozeruk and O. V. Korzhyk, “Correlation direction finder for small aircraft,” Visnyk NTUU KPI Seriiia — Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, no. 79, pp. 41–47, Dec. 2019, DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.79.41-47>
102. Пристрій виявлення та пеленгування повітряних об’єктів /Дідковський В.С. , Коржик О.В., Горовий К.В. , Козак А.В. , Ларін П.М. , Ляхевич С.В. // XI науково-практичній конференції "Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил" , 8–9 листопада, 2018 р., Київ, Україна.
103. Kozak A., Didkovskyi V., Korzhyk O., Naida, S., Kostiuk R., Liakhevych S., «Noise measurement of the multicopter UAV» DOI: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943922
104. Kozak A., Didkovskyi V., Korzhyk O., Naida, S.,. «Construction the Device of Acoustic Noise Air Bearing,» 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 683-687, 2020, DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088899
105. G. K. Baydauletova, D. Z. Bastaubaeva, and M. Aukenova, “Primenenie bespilotnyih letayuschih apparatov [The use of unmanned aerial vehicles],” Kaz. Natsionalnyi Univ., pp. 98– 101, 2014, URL: <http://pps.kaznu.kz/kz/Main/FileShow2/11472/94/124/7693/БастаубаеваДженискульЖумахановна/2015/2>
106. ДБН В.1.1.31. Захист територій, будинків і споруд від шуму.
107. I. Y. Biryukov, M. Y. Busyak, and O. B. Anipko, “Zvukovye portretyi ob’ektov bronetehniki dlya obnaruzheniya i raspoznaniya tseley [Sound portraits of armored vehicles for detection and recognition of targets],” Integrovani

Tehnoł. ta energozberezhennya., vol. 3, pp. 31–36, 2011, URL:
<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/2108>

108. Шуми і вібрації: Підручник/ В.С. Дідковський, О.В. Коржик , ОГ. Лейко. –К.: ТОВ Імекс-ЛТД, 2010. – 336 с.

109. Смарышев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Справочник по расчету направленных свойств гидроакустических антенн. –Л.: Судостроение.1984. – 304 с.

110. Тюлин В.Н. Основные явления, связанные с распространением акустических волн в морской среде.– Л.: ВМА им. А.Н. Крылова.1956.- 238 с.

111. ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013. Настанова з проведення розрахунку шуму в приміщеннях і на територіях

112. ДСТУ 31295.2:2007 Шум. Затухання звуку під час розповсюдження на місцевості. Частина 2. Загальний метод розрахування (ІСО 9613-2:1996)

113. Вахитов Я.Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура.-М.: Издательство "Искусство".1982. - 416 с.

114. Соловйов О.В. Експериментальні дослідження рівня шуму БПЛА “СТРЕПЕТ-М”//Збірник наукових праць ХУПС. Вип. 2(24). 2010. – С.36-39.

115. Шишкова К. А., Козак А. В (2023). Направлені властивості кругового циліндричного п’єзокерамічного перетворювача з плоским екраном в діаметральній площині. Технології та інжиніринг, № 4(15), <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.4.6>

116. Козак А. В., Коржик О. В. (2023). Метод взаємних спектрів в задачах шумопеленгування бпла. Наукоємні технології № 1(57), <https://doi.org/10.18372/2310-5461.57.17442>

117. Козак А. В., Коржик О. В. (2023). Удосконалення систем шумопеленгування бпла з використанням векторно-фазових методів та

наднаправленості. Технології та інжиніринг, № 2(13),
<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.2.4>

118. Кабушка Я. В., Зотько А. С., Кандрачук І. В., Коржик О. В. Дальність виявлення малих повітряних об'єктів наземною системою шумопеленгування. Мікросист., Електрон. та Акуст. 2018. Т. 23, Вип. 5. С. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.5.131483>.

119. Phantom 3 standard: веб-сайт. URL: <https://www.dji.com/phantom-3-standard/info> (дата звернення: 12.11.2021)

120. Транспортна екологія: навчальний посібник / О. І. Запорожець, С. В. Бойченко, О. Л. Матвєєва, С. Й. Шаманський, Т. І. Дмитруха, С. М. Маджд; за заг. редакцією С. В. Бойченка. – К.: НАУ, 2017. – 507 с.

121. Акустичні інформаційні системи: Електронний ресурс : навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізацій «Акустичні мультимедійні технології», «Акустичний моніторинг, біо- та психоакустика» / С.О. Козерук ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2.70 Мбайт). – Київ :КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 168 с URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/22800/1/AIS-18.pdf>

122. Захист навколишнього середовища в авіатранспортних процесах : підручник / В. М. Ісаєнко, С. В. Бойченко, К. О. Бабікова, О. О. Вовк. – К. : НАУ, 2020. – 320 с.

123. Акустична екологія. Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації» спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. С. А. Луньова. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,47 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 169 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46032>

124. Акустичний моніторинг: Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. Для студ. спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.А.Луньова. – Електронні текстові дані (1 файл: 10,

381 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. –180 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/46031/1/Akustychnyi_monitorynh_KL.pdf

125. Принципи проектування екоміста і житла в умовах мінімального впливу шуму: веб-сайт. URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=667801> (дата звернення: 12.11.2022)

126. Курдюк, С. В. Особливості формування інформаційного гідроакустичного каналу в мілкому морі : дис. : 171 Електроніка / Курдюк Сергій Вікторович. – Київ, 2021. – 156 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45138/1/Kurdiuk_dys.pdf

ДОДАТОК

Методика розрахунку дальності

Можливі варіанти реалізації та використання приладу:

- Стационарно
- У складі рухомого носія (типу БТР 80)
- У складі мультисенсорного комплексу (включає оптичне, радіолокаційне та акустичне виявлення)

Далі будуть розглянуті та представлені розрахунки завадостійкості на прикладі реалізованого приладу у складі рухомого носія типу БТР 80 для виявлення БПЛА типу КРИЛО [105].

Розрахунок поля завад в точці спостереження.

Вважаємо, що в точці спостереження в нормальних рефракційних умовах поле завад формується, в основному, оточуючими шумами, шумами носія і вітровими ефектами. При цьому:

- поле навколишніх шумів визначається як ізотропне зі стандартними рівнями шумів навколишнього середовища відповідно до [106];
- анізотропне поле шумів носія визначається при використанні в якості носія- машини БТР-80, двигун якої працює на нижніх передачах;
- вплив вітрових шумів враховується шляхом введення певних поправочних коефіцієнтів, що враховують турбулентність відповідно до [87].

Ізотропне поле навколишнього шуму

Рівні звукового тиску навколишнього шуму у відповідності з [106] традиційно визначаються в октавних смугах, що вимагає приведення їх до стандартних умов - виду спектральної щільності. Шумові навантаження при цьому обираємо відповідними категорії "Території, що безпосередньо

прилягають до будинків (житловим), будинкам відпочинку, домам-інтернатам для громадян похилого віку та інвалідів".

Для октавних смуг із середніми частотами $f_{cp} \approx 250 \text{ Гц}$ і $f_{cp} \approx 500 \text{ Гц}$ згідно з [106] рівні звукового тиску в октавних смугах, складають $L_{\Delta f_o} = 49 \text{ дБ}$ і $L_{\Delta f_o} = 44 \text{ дБ}$ відповідно. Рівні звукового тиску, $L_{\Delta f_o} \text{ дБ}$ і можуть бути переведені в Па , щодо порогового значення тиску $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, використовуючи відоме співвідношення:

$$L_{\Delta f_o}, \text{дБ} = 20 \lg \left(\frac{p_{\Delta f_o}}{p_0} \right) \Rightarrow p_{\Delta f_o} = p_0 \cdot 10^{0.05 L_{\Delta f_o}} \quad (1)$$

При цьому отримаємо:

- Для октавної смуги із середньою частотою $f_{cp} \approx 250 \text{ Гц}$ -
 $p_{\Delta f_o} = 0.0056 \text{ Па}$
- Для октавної смуги із середньою частотою $f_{cp} \approx 500 \text{ Гц}$ -
 $p_{\Delta f_o} = 0.0032 \text{ Па}$

Визначимо спектральні характеристики навколишніх шумів в смузі 1 Гц (спектральну щільність тиску, $N_{рош}, \text{Па} / \sqrt{\text{Гц}}$) шляхом ділення $p_{\Delta f_o}$ на $\sqrt{\Delta f_o}$, де $\Delta f_o = \Delta f_{абс}$ - абсолютне значення ширини відповідної октавної смуги:

$$N_{рош} = \frac{p_{\Delta f_o}}{\sqrt{\Delta f_o}}, \text{Па} / \sqrt{\text{Гц}} \quad (2)$$

Для прийнятих октавних смуг, в сукупності що визначають робочий діапазон частот, маємо:

- Для $\Delta f_o = (180 - 355) \Big|_{\Delta f_{абс}=175 \text{ Гц}}$, Гц, $N_{рош} = 0.00042 \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}$;
- Для $\Delta f_o = (355 - 710) \Big|_{\Delta f_{абс}=355 \text{ Гц}}$, Гц, $N_{рош} = 0.00017 \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}$;

Спектральна щільність тиску, виражена в дБ ($N_{рош}, \text{дБ}$) з

використанням опорного значення $n_{po} = 1 \frac{Pa}{\sqrt{\Gamma_{\Pi}}}$, визначиться співвідношенням:

$$N_{рош}, дБ = 20 \lg \left(\frac{N_{рош}, Pa / \sqrt{\Gamma_{\Pi}}}{n_{po}, Pa / \sqrt{\Gamma_{\Pi}}} \right) \quad (3)$$

- Для $\Delta f_o = (180 - 355) \Big|_{\Delta f_o абс = 175 \Gamma_{\Pi}}$, Γ_{Π} , $N_{рош} = -67.37 дБ$;
- Для $\Delta f_o = (355 - 710) \Big|_{\Delta f_o абс = 355 \Gamma_{\Pi}}$, Γ_{Π} , $N_{рош} = -75.39 дБ$;

Анізотропне поле шумів носія

Дані щодо шумів носія запозичуємо з джерела [107]. Виміри проводилися стандартним шумоміром «Шум 1М30» (показання якого представляються в дБ за шкалою А (дБА)) при температурі навколишнього середовища $20^{\circ}C$, відносної вологості 50%, швидкості вітру 2-3 м / с. При цьому рівень шуму носія БТР-80 на несучих курсових кутах склав величину $L_{бтр} \approx 64 дБА$. Коригувальні добавки, що забезпечують приведення суб'єктивних рівнів до істинних, взяті з [10,47,108].

Перехід від дБА до значень тиску $P_{Абтр}$ проводимо за формулою:

$$L_{бтр}, дБА = 20 \lg \left(\frac{P_{Абтр}}{P_0} \right) \Rightarrow P_{Абтр} = P_0 \cdot 10^{0.05 L_{Абтр}, дБА}, \quad (4)$$

відповідно до якої $P_{Абтр} = 0.032 Pa$ при вибраному $L_{бтр} \approx 64 дБА$

Отримана величина тиску $P_{Абтр}$ визначена в смузі шумоміра $\Delta f_{ш} = (31.5 - 8000) \Gamma_{\Pi}$. Приведемо тиск $P_{Абтр} = 0.032 Pa$ до спектральної щільності тиску БТР:

$$N_{\text{Абтр}} = \frac{P_{\Delta f_o}}{\sqrt{\Delta f_o}} = \frac{0.032}{\sqrt{7968.5}} = 3.6 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Гц}}}, \text{ за шкалою } A. \quad (5)$$

Врахуємо частотну корекцію за шкалою А, використовуючи поправку на частоті 500 Гц $\Delta L_{\text{А}500\text{Гц}} \approx -3.2\text{дБ}$ - тобто перейдемо до істинних значень тиску (від $p_{\text{Абтр}}$ до $p_{\text{бтр}}$) шляхом збільшення $N_{\text{Абтр}}$ в 1.44 рази:

$$N_{\text{Абтр}} \Big|_{\Delta L, 500\text{Гц}} = 1.44 \cdot N_{p\text{Абтр}} = 5.2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Гц}}} \quad (6)$$

Поправка на частоті 400 Гц складе $\Delta L_{\text{А}400\text{Гц}} \approx -6\text{дБ}$, а спектральна щільність тиску з врахуванням коригування складе:

$$N_{\text{Абтр}} \Big|_{\Delta L, 400\text{Гц}} = 6 \cdot N_{p\text{Абтр}} = 7.2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Гц}}} \quad (7)$$

Далі, з врахуванням (6), (7) переводимо $N_{\text{Абтр}} \Big|_{\Delta L, 400\text{Гц}}, N_{\text{Абтр}} \Big|_{\Delta L, 500\text{Гц}}$ в логарифмічні одиниці:

$$\begin{aligned} N_{\text{Абтр}} \Big|_{\Delta L, 400\text{Гц}}, \text{ дБА} &= 20 \lg \left(\frac{N_{p\text{Абтр}} 400\text{Гц}}{n_{p_0}} \right) = -62.3 \text{ дБ} \\ N_{\text{Абтр}} \Big|_{\Delta L, 500\text{Гц}}, \text{ дБА} &= 20 \lg \left(\frac{N_{p\text{Абтр}} 500\text{Гц}}{n_{p_0}} \right) = -65.7 \text{ дБ} \end{aligned} \quad (8)$$

Визначення та врахування завадостійкості АА

Особливістю визначення завадостійкості АА є те, що по відношенню до перешкод різного типу, - завадостійкості однієї і тієї ж АА визначається по-різному.

Як відомо [109,43,110], якщо поле завад можна вважати дифузним однорідним і ізотропним, то по відношенню до поля такого характеру (полю оточуючих шумів) завадостійкість $\delta = \delta_{\text{ош}}$ визначиться значенням

коефіцієнта осьової концентрації (КОК) $\Omega = \Omega_0$. Тому, по відношенню до поля навколишніх шумів $\delta_{ou} = \Omega_0$.

Таким чином, для кожної запропонованої АА виникає своя розрахункова ситуація для завад різного типу.

Завадостійкість лінійної дискретної АА на основі приймального рв зонда в умовах перешкод різної природи.

Завадостійкість по відношенню до оточуючих шумів

Спрямовані властивості рв зонда визначаються співвідношеннями:

$$\Omega = \frac{2}{\int_0^\pi R^2(\vartheta) \sin \vartheta d\vartheta} \quad (9)$$

$$R_3(\theta) = \left| \frac{1 + \cos \theta}{2} \right|$$

і для лінійної системи, що складається з 11 прийомних рв зондів - при $M = 11$ і $d_1 = 0.2$ м:

$$R(\theta) = R_3(\theta) \cdot \left| \frac{\sin(M \cdot \pi d_1 / \lambda \cdot \sin \theta)}{M \sin(\pi d_1 / \lambda \cdot \sin \theta)} \right| \quad (10)$$

Тоді стійкість по відношенню до оточуючих шумів $\delta_{ou} = \Omega_0$ складає:

- Частоту $f = 400$ Гц, $\Omega_0 \big|_{400 \text{ Гц}} = 71.77$;
- Частоту $f = 450$ Гц, $\Omega_0 \big|_{450 \text{ Гц}} = 91.82$;
- Частоту $f = 500$ Гц, $\Omega_0 \big|_{500 \text{ Гц}} = 110.2$;

Завадостійкість по відношенню до шумів носія

Виходячи з анізотропності шумів носія, а також з огляду на природну

односпрямованість зонда і лінійної системи зондів, прийнемо, що найбільш несприятливий сектор впливу шумів носія на АА - припадає на кормові курсові кути. При цьому анізотропія проявляється як результат впливу локального шумового джерела в кормовому секторі курсових кутів $\pm 45^\circ$ щодо діаметричної площини БТР.

За матеріалами роботи [43] для кормового ракурсу локалізованих перешкод (перешкод носія) стійкість може бути знайдена як:

$$\delta_{\text{отр}} = \Omega_{\text{отр}} = 1 / R^2(\vartheta), \quad (11)$$

Де $R(\theta)$ визначається співвідношенням:

$$R(\theta) = R_3(\theta) \cdot \left| \frac{\sin(M \cdot \pi d_1 / \lambda \sin \theta)}{M \sin(\pi d_1 / \lambda \sin \theta)} \right| \quad (12)$$

Розуміючи, що розміри лінійної АА більше λ .

Крім того для обраного сектора перешкоди значення $R(\theta)$ слід брати саме з напрямків кормового сектора курсових кутів $\vartheta_n = \pm 45^\circ$ щодо діаметричної площини БТР $R(\vartheta_n)$. При цьому, критерієм оцінки $\delta_{\text{отр}}$ буде вираз:

$$\delta_{\text{отр}} = \Omega_{\text{отр}} = 1 / R^2(\vartheta_n) = 1 / \langle \beta_n^2 \rangle, \quad \beta_n = R(\vartheta_n), \quad (13)$$

де статистичне усереднення проводиться по області перешкоди.

Тоді по 10 значень $R(\vartheta_n)$ з кожного борту для усередненої в секторі $\vartheta_n = \pm 45^\circ$ ХН отримаємо:

$$\langle \beta_n^2 \rangle = 1.1 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \delta_{\text{отр}} = \Omega_{\text{отр}} \approx 889 \quad (14)$$

Отриману завадостійкість $\delta_{\text{отр}} = \Omega_{\text{отр}}$ вважаємо рівномірною в робочій смузі частот.

Завадостійкість АА по відношенню до шумів об'єкта

Виходячи з просторових властивостей АА в напрямку несучих курсових кутів носія і положень попереднього пункту для направлення компенсації АА $\vartheta_0 = 0^\circ$ в межах кутів $\vartheta_u = \pm 10^\circ$ області головного максимуму ХН АА, стійкість складе найменшу величину $\langle \beta_n^2 \rangle = 0.74 \Rightarrow \delta_{\text{щ}} = \Omega_{\text{щ}} \approx 1.35$, що й зрозуміло, тому що напрямки $\vartheta_0 = 0^\circ$ і його околиці відповідають найбільшим значенням ХН.

Приведення завадо-сигнальної ситуації до входу АА

Виконання операції приведення тисків перешкод і об'єкта до входу АА викликано рядом обставин, серед яких специфіка завадостійкості АА по відношенню до різних видів шумів, нерівномірність огинаючої спектра шумів об'єкта і кінець обраної робочої смуги частот.

Приведення тиску оточуючих шумів до входу лінійної дискретної АА на основі приймального рч зонда.

Для ширококутового прийому, приведене до входу АА тиск $p_{\text{шп}}$ визначиться за формулою:

$$p_{\text{шп}} = N_{p0\text{ш}} \left\{ \frac{f_0}{\Omega_{e0}(n+1)} \left[\left(\frac{f_2}{f_0} \right)^{n+1} - \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^{n+1} \right] \right\}^{1/2}, n = n_1 - n_2 \quad (15)$$

Згідно з джерелами [43,110] і результатами роботи [3] - спектральні характеристики оточуючих ізотропних шумів відмінні від характеристик білих і слабоокрашених шумів і можуть бути

представлені степеневими функціями частоти:

$$N_{p_{oui}}(f) = N_{p_{0oui}}(f_0) \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^{n_1},$$

$$n = \frac{N_{p_{oui}}(f_2) - N_{p_{oui}}(f_1)}{10 \lg(f_2 / f_1)}, \quad (16)$$

$$\Omega_{p_{oui}}(f) = \Omega_{p_{0oui}}(f_0) \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^{n_2}$$

$f_1 = 400 \text{ Гц}$, $f_2 = 500 \text{ Гц}$, вважаючи зміни $N_{p_{oui}}(f)$ незначними вище 500 Гц і нижче 600 Гц.

Виходячи з результатів для спектральної щільності тиску оточуючих шумів маємо:

- Частоту 400 Гц

$$N_{p_{oui}}(f) \Big|_{f_1=400 \text{ Гц}} = 0.00031 \frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Гц}}} \Rightarrow N_{p_{oui}}(f) \Big|_{f_1=400 \text{ Гц}} = -70.17 \text{ дБ}; \quad (17)$$

- Частоту 500 Гц

$$N_{p_{oui}}(f) \Big|_{f_2=500 \text{ Гц}} = 0.00017 \frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Гц}}} \Rightarrow N_{p_{oui}}(f) \Big|_{f_2=500 \text{ Гц}} = -75.39 \text{ дБ}, \quad (18)$$

тоді $n_1 = -5.38$.

В якості $N_{p_{0oui}}(f_0)$ вибираємо $N_{p_{oui}}(f_0)$ на частоті 450 Гц:

$$N_{p_{oui}}(f_0) \Big|_{f_0=450 \text{ Гц}} = 72 \text{ дБ}. \quad (19)$$

Вважаємо, що коефіцієнт концентрації в обраному діапазоні частот не залежить від частоти, тому для $\Omega_{p_{0oui}}(f_0)$, $n_2 = 0$.

Використовуючи співвідношення (16) - (19), отримуємо:

$$p_{outr} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \quad (20)$$

Приведення тиску шумів носія до входу лінійної дискретної АА на основі приймального рч зонда.

Виконуючи послідовно кроки і положення для визначених значень спектральної щільності тиску шуму БТР і відповідної завадостійкості АА в обумовленому вище діапазоні частот $f_1 = 400 \text{ Гц}$, $f_2 = 500 \text{ Гц}$, отримуємо значення приведенного до входу АА тиску ходової перешкоди $P_{шБТРпр}$:

$$P_{шБТРпр} = 2.7 \cdot 10^{-4} \text{ Па}. \quad (21)$$

Приведення тиску шумів об'єкта до входу лінійної дискретної АА на основі приймального рч зонда.

Значення рівня спектральної щільності тиску, створюваного об'єктом об'єкта $N_{рца} \text{ дБ}$ на відстані 1000 м, становить $N_{рца} = -8.6 \text{ дБ}$, що відповідає:

$$N_{рца} = 0,37 \frac{\text{Па}}{\sqrt{\text{Гц}}} \quad (22)$$

Завадостійкість в цьому випадку склала $\delta_{шц} = \Omega_{шц} \approx 1.35$.

З врахуванням сталості $\Omega_{шц}$ в досліджуваному діапазоні частот, тиск, що створюється об'єктом на відстані 1000 м з врахуванням просторово загасання, приведені до входу АА тиск $P_{шОБпр}$ складе:

$$P_{шОБпр} = 3.28 \text{ Па}. \quad (23)$$

Попередня оцінка результуючої завадо-сигнальної ситуації

За результатами розрахунків, поле перешкоди в точці прийому визначиться сумою квадратів складових полів виду:

$$P_{\Sigma n} = \sqrt{P_{\text{оупр}}^2 + P_{\text{шБТРпр}}^2} = \sqrt{(4 \cdot 10^{-4})^2 + (2.7 \cdot 10^{-4})^2} = 4.8 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (24)$$

Відповідно, поле, створюване об'єктом в точці прийому в розрахункових умовах з врахуванням втрат на просторове загасання і втрат на розширення фронту сферичної хвилі характеризується тиском:

$$P_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{шОбпр}}}{1000} = \frac{3.28}{1000} = 3.28 \cdot 10^{-3} \text{ Па.} \quad (25)$$

Таким чином, за результатами останніх двох виразів, в розрахункових умовах тиск корисного сигналу приблизно в 7 разів перевищує тиск перешкод в точці прийому, що задовольняє вихідним імовірнісним умов. Таким чином енергетична дальність виявлення 1000м є досяжною.

Врахування наявності зелених насаджень

При роботі приладу в польових умовах може скластись ситуація впливу на результати роботи - зелених насаджень різних видів згідно з [87,108] вплив лісового масиву на сформоване поле об'єкта (як додаткового фактору, що вносить загасання), може бути оцінений або співвідношенням:

$$\alpha_{\text{лес}} \approx 0.01 \cdot a^{1/3} \text{ дБ / м} \quad (26)$$

(ліс середньої щільності), або коригуючим значенням зменшення рівня тиску для густого лісу – як - 25 дБ на 100м .

Таким чином, для лісопосадки шириною 100 м середньої щільності, отримаємо:

$$\alpha_{\text{лес}} \approx 0.01 \cdot a^{1/3} \text{ дБ / м} \approx 0.01 \cdot (450)^{1/3} \Big|_{100\text{м}} \Rightarrow \Delta L_{\text{лес}} \approx -7.6 \text{ дБ.} \quad (27)$$

$$P_{\text{цлес}} = \frac{P_{\text{ц}}}{2.2} \approx 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ Па.}$$

Відношення тисків об'єкта $P_{\text{ц}}$ і перешкоди P_{Sn} в цьому випадку складе ≈ 4 що відповідає вихідним імовірнісним умовам і дальність 1000 м

при цьому залишається ще досяжною.

Врахування наявності інженерних наземних об'єктів

Зниження рівня звукового тиску залежить також від наявності штучних об'єктів - перешкод. Така залежність визначається:

- взаємним розташуванням об'єкта, приймача і перешкоди;
- частоти;
- геометричних розмірів перешкоди.

Відповідно до положень стандартів [111,112], зниження рівня звукового тиску визначиться співвідношенням:

$$\Delta L_i = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{0.037 f \delta_i}}{th \sqrt{0.037 f \delta_i}} \right) + 5, \quad (28)$$

де f - частота звуку, Гц;

$\delta_i = a_i + b_i - d$ визначається згідно з рис. 1. , де $a_i + b_i$ - довжина найкоротшого шляху від джерела до точки прийому, який проходить через i -ту кромку перешкоди, м;

d - найкоротша відстань між джерелом і приймачем за відсутності перешкоди, м.

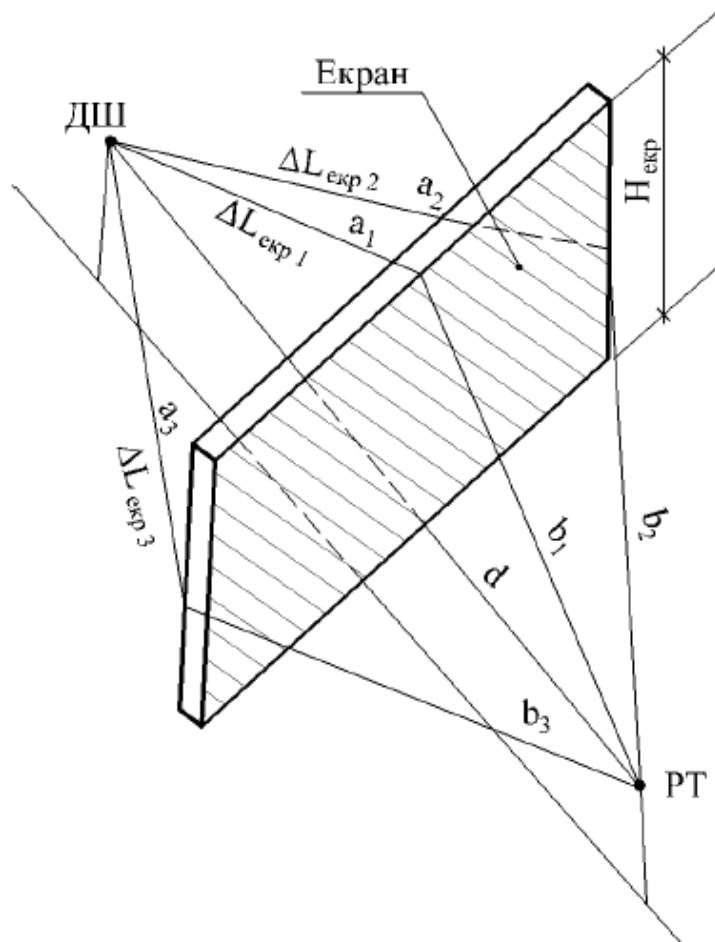


Рис. 1. Схема обліку штучних об'єктів - перешкод при оцінці зміни рівня звукового тиску

Величину результуючого зниження рівня звукового тиску ΔL , дБ, при використанні тонких екранів-перешкод в точці прийому, визначимо за формулою:

$$\Delta L = -10 \lg \left(\sum_{i=1}^N 10^{-0.1 \Delta L_i} \right), \quad (29)$$

де N - кількість крайок перешкоди.

Врахування турбулентності

Статистичні результати показують, що локальні турболізовані області поля в точках розміщення приймачів АА дають зміну рівня звукового тиску приблизно на (2-3) дБ. Вплив такого роду досить незначний і може бути усунутий шляхом використання

конструктивних пористих або нитяних мікрофонних насадок.

Постановка задачі для ситуації розрахунку дальності

Пропонується здійснювати виявлення малих повітряних об'єктів типу "крило" та "квадрокоптер" на висотах і при швидкостях руху, які відповідають їх технічним характеристикам в нормальних рефракційних умовах при обраних відповідно до [114] стандартних рівнях шуму навколишнього середовища. При розрахунках для БПЛА типу "крило" використовуємо носій типу БТР-80, що знаходиться на " стопі "або маневрує на нижніх передачах (частота обертів двигуна - 1000 об / с). Імовірність помилкової тривоги з використанням критеріїв Неймана - Пірсона повинна складати - не більш 0.01.

Сектор огляду - вибирається відповідно до характеристики спрямованості (ХН) приймальні системи з можливістю механічного сканування в секторі огляду - "плюс-мінус".

Робоча смуга частот приймальних систем формується, виходячи з частотних характеристик шумності і діапазону робочих швидкостей повітряних об'єктів. Також слід враховувати, залежність акустичної м'якості від робочого діапазону частот [115].

Пропонується визначити похилу "прогнозовану" дальність, що враховує "енергетичну" і "геометричну" дальності. До проведення розрахунків повинні бути притягнуті дані по втратах на розширення фронту акустичних хвиль, дані по просторовому загасанню, за впливом кліматичних факторів і зелених насаджень, а також особливостей "с - профілю" та особливостей рельєфу місцевості - у вигляді "інженерних споруд".

Розрахунок прогнозованої дальності виявлення шумлячого об'єкту з урахуванням уявлень і підходів [43,113] проведемо, спираючись на

акустичні властивості, як шумлячого об'єкта і перешкоджаючі ситуацію в районі застосування засобів виявлення. Формально, ми маємо справу з декількома різновидами дальності:

- "енергетичною" (визначається просторово-енергетичними властивостями приймального пристрою і рівнем шуму джерела);
- "геометричною" (визначається з урахуванням впливу рефракції звукових променів);
- "прогнозованою" (що поєднує результати визначення енергетичної та геометричної дальності).

При цьому розрахунок енергетичної дальності підпорядковується наступній основній умові: на деякій граничній відстані від об'єкта r_0 інтенсивність (або тиск) шуму, створюване ним у точці прийому є мінімально забезпечуючим виділення корисного шумоподобного сигналу на тлі акустичних перешкод, що оточують приймальний пристрій.

Розрахунок енергетичної дальності для БПЛА типу КРИЛО

Спираючись на результати експериментальних досліджень "джерел шумності БПЛА з гвинтовими-кільцевими рушієм в штовхає компонуванні" [3], в якості вихідних даних по визначенню рівня шуму повітряного об'єкта і вибору робочого частотного діапазону пристрою використовуємо спектральні характеристики акустичного випромінювання в третьоктавних смугах частот, приведені до віддалі 1 м. При цьому найбільш інформативним вважаємо частотний діапазон $\Delta f_p \approx (350 - 550) \text{ Гц}$ для якого рівні звукового тиску $L_{\Delta f 1/3_o}, \text{ дБ}$ в третьоктавних полосах в околицях середніх частот — відповідають наступним значенням [3]:

$$\begin{aligned}
f_{cp} &\approx 350 \text{ Гц} - L_{\Delta f_{1/3_o}} = 108 \text{ дБ}; \\
f_{cp} &\approx 450 \text{ Гц} - L_{\Delta f_{1/3_o}} = 108 \text{ дБ}; \\
f_{cp} &\approx 550 \text{ Гц} - L_{\Delta f_{1/3_o}} = 109 \text{ дБ}.
\end{aligned} \tag{30}$$

Розглянемо відносно порогового значення тиску $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, використовуючи відоме співвідношення:

$$L_{\Delta f_{1/3_o}}, \text{дБ} = 20 \lg \left(\frac{p_{\Delta f_{1/3_o}}}{p_0} \right) \Rightarrow p_{\Delta f_{1/3_o}} = p_0 \cdot 10^{0.05 L_{\Delta f_{1/3_o}}} \tag{31}$$

Використовуючи (31) визначимо значення звукового тиску в третьоктавних смугах:

$$\begin{aligned}
f_{cp} &\approx 350 \text{ Гц} - p_{\Delta f_{1/3_o}} = 5,02 \text{ Па}; \\
f_{cp} &\approx 450 \text{ Гц} - p_{\Delta f_{1/3_o}} = 5,02 \text{ Па}; \\
f_{cp} &\approx 550 \text{ Гц} - p_{\Delta f_{1/3_o}} = 5,6 \text{ Па}.
\end{aligned} \tag{32}$$

Визначимо спектральні характеристики навколишніх шумів в смузі 1Гц (спектральну щільність тиску, $N_{рош}, \text{Па} / \sqrt{\text{Гц}}$) шляхом ділення $p_{\Delta f_{1/3_o}}$ на $\sqrt{\Delta f_{1/3_o}}$, де $\Delta f_{1/3_o} = \Delta f_{1/3_o \text{ абс}}$ - абсолютне значення ширини відповідної октавної смуги:

$$N_{рош} = \frac{p_{\Delta f_{1/3_o}}}{\sqrt{\Delta f_{1/3_o}}}, \text{Па} / \sqrt{\text{Гц}} \tag{33}$$

Для прийнятих 1/3 октавних полос, в сукупності визначаючих робочий діапазон частот, маємо:

$$\begin{aligned}
\Delta f_{1/3_o} &= (315 - 400) \Big|_{\Delta f_{1/3_o \text{ абс}}=85 \text{ Гц}}, \text{Гц}, N_{рош} = 0.54 \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}; \\
\Delta f_{1/3_o} &= (400 - 500) \Big|_{\Delta f_{1/3_o \text{ абс}}=100 \text{ Гц}}, \text{Гц}, N_{рош} = 0.502 \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}; \\
\Delta f_{1/3_o} &= (500 - 630) \Big|_{\Delta f_{1/3_o \text{ абс}}=130 \text{ Гц}}, \text{Гц}, N_{рош} = 0.44 \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}.
\end{aligned} \tag{34}$$

Спектральна щільність тиску, виражена в дБ ($N_{рош}, \text{дБ}$) з

використанням опорного значення $n_{po} = 1 \frac{Pa}{\sqrt{\Gamma_{\Pi}}}$, визначиться співвідношенням:

$$N_{poш}, дБ = 20 \lg \left(\frac{N_{poш}, Pa / \sqrt{\Gamma_{\Pi}}}{n_{po}, Pa / \sqrt{\Gamma_{\Pi}}} \right), \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \Delta f_{1/3_o} &= (315 - 400) \Big|_{\Delta f_{1/3_o} abc=85 Гц}, \Gamma_{\Pi}, N_{poш} = -5.35 дБ; \\ \Delta f_{1/3_o} &= (400 - 500) \Big|_{\Delta f_{1/3_o} abc=100 Гц}, \Gamma_{\Pi}, N_{poш} = -5.98 дБ; \\ \Delta f_{1/3_o} &= (500 - 630) \Big|_{\Delta f_{1/3_o} abc=130 Гц}, \Gamma_{\Pi}, N_{poш} = -7.13 дБ. \end{aligned} \quad (36)$$

Врахуємо просторове загасання звукових хвиль при поширенні в повітрі α , дБ / 100м, скориставшись даними джерела [87], з урахуванням якого для обраного діапазону частот : $\alpha = 0.21$, дБ / 100м.

Результати визначення спектральної щільності тиску шуму об'єкта в дБ з врахуванням просторового згасання ($N_{poш}$) зведені в таблицю 1.

Спектральні щільності тиску шума (дБ) с врахуванням просторового затухання ($N_{poш}$) в діапазоні робочих частот

Таблиця 1.

r , м	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$N_{poш}$, дБ	-6.71	-6.92	-7.13	-7.34	-7.55	-7.76	-7.97	-8.18	-8.30	-8.6	-8.81	-9.02

Отримані рівні характеризують шумове поле об'єкта виявлення в точці спостереження, яка віднесена від нього на 100 – 1200 м.

Розрахунок енергетичної дальності для БПЛА типу КВАДРОКОПТЕР

Спираючись на результати експериментальних досліджень проведені в акустичній камері [35], в якості вихідних даних по визначенню рівня шуму повітряного об'єкта і вибору робочого частотного діапазон пристрою використовуємо спектральні характеристики акустичного випромінювання в третьоктавних смугах частот, приведені до віддалі 1 м. При цьому найбільш інформативним вважаємо частотний діапазон $\Delta f_p \approx (250 - 400) \text{ Гц}$ для якого рівні звукового тиску $L_{\Delta f 1/3_o}, \text{ дБ}$ в третьоктавних смугах в околицях середніх частот – відповідають наступним значенням :

$$\begin{aligned} f_{cp} &\approx 250 \text{ Гц} - L_{\Delta f 1/3_o} = 58 \text{ дБ}; \\ f_{cp} &\approx 400 \text{ Гц} - L_{\Delta f 1/3_o} = 60 \text{ дБ}. \end{aligned} \quad (37)$$

Розглянемо відносно порогового значення тиску $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, використовуючи відоме співвідношення:

$$L_{\Delta f 1/3_o}, \text{ дБ} = 20 \lg \left(\frac{p_{\Delta f 1/3_o}}{p_0} \right) \Rightarrow p_{\Delta f 1/3_o} = p_0 \cdot 10^{0.05 L_{\Delta f 1/3_o}} \quad (38)$$

Використовуючи (38) визначимо значення звукового тиску в третьоктавних смугах:

$$\begin{aligned} f_{cp} &\approx 250 \text{ Гц} - p_{\Delta f 1/3_o} = 0,016 \text{ Па}; \\ f_{cp} &\approx 400 \text{ Гц} - p_{\Delta f 1/3_o} = 0,02 \text{ Па}. \end{aligned} \quad (39)$$

Визначимо спектральні характеристики навколишніх шумів в смузі 1 Гц (спектральну щільність тиску, $N_{рош}, \text{ Па} / \sqrt{\text{Гц}}$) шляхом ділення $p_{\Delta f 1/3_o}$ на $\sqrt{\Delta f_{1/3_o}}$, де $\Delta f_{1/3_o} = \Delta f_{1/3_o \text{ абс}}$ - абсолютне значення ширини відповідної октавної смуги:

$$N_{рош} = \frac{P_{\Delta f_{1/3_o}}}{\sqrt{\Delta f_{1/3_o}}}, Pa / \sqrt{\Gamma_{ц}} \quad (40)$$

Спектральна щільність тиску, виражена в дБ ($N_{рош}, дБ$) з використанням опорного значення $n_{ро} = 1 \frac{Pa}{\sqrt{\Gamma_{ц}}}$, визначиться співвідношенням:

$$N_{рош}, дБ = 20 \lg \left(\frac{N_{рош}, Pa / \sqrt{\Gamma_{ц}}}{n_{ро}, Pa / \sqrt{\Gamma_{ц}}} \right), \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \Delta f_{1/3_o} &= (250 - 315), \Gamma_{ц}, N_{рош} = -54.11 дБ; \\ \Delta f_{1/3_o} &= (315 - 400), \Gamma_{ц}, N_{рош} = -53.27 дБ. \end{aligned} \quad (42)$$

Врахуємо просторове загасання звукових хвиль при поширенні в повітрі $\alpha, дБ / 100м$, скориставшись даними джерела [87], з урахуванням якого для обраного діапазону частот : $\alpha = 0.21, дБ / 100м$.

Приведення завадо-сигнальної ситуації до входу АА для БПЛА типу КВАДРОКОПТЕР

Для широкосмугового прийому, приведене до входу 9-ти елементної АА тиск визначиться за формулою:

$$P_{шпр} = N_{рош} \left\{ \frac{f_0}{\Omega_{e0}(n+1)} \left[\left(\frac{f_2}{f_0} \right)^{n+1} - \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^{n+1} \right] \right\}^{1/2}, n = n_1 - n_2 \quad (43)$$

Згідно з джерелами [43,110] і результатами роботи [3] - спектральні характеристики оточуючих ізотропних шумів відмінні від характеристик білих і слабо забарвлених шумів і можуть бути

представлені степеневими функціями частоти:

$$N_{pou}(f) = N_{p0ou}(f_0) \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^{n_1},$$

$$n = \frac{N_{pou}(f_2) - N_{pou}(f_1)}{10 \lg(f_2 / f_1)}, \quad (44)$$

$$\Omega_{pou}(f) = \Omega_{p0ou}(f_0) \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^{n_2}$$

Вважаємо завадостійкість приймального тракту як $\Omega_0 = 216$, та робочі частоти $f_1 = 250 \text{ Hz}$, $f_2 = 400 \text{ Hz}$.

Використовуючи співвідношення (43) - (44), отримуємо:

$$p_{oupr} = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (45)$$

Попередня оцінка результуючої завадо-сигнальної ситуації

За результатами розрахунків, поле перешкоди в точці прийому визначиться сумою квадратів складових полів виду:

$$p_{\Sigma n} = \sqrt{p_{oupr}^2 + p_{unpr}^2} = 4.2 \cdot 10^{-4} \text{ Па}. \quad (46)$$

Для визначення енергетичної дальності скористуємося рівнянням локації (47), доповнюючи його завадостійкістю приймального тракту $\Omega_1 = 216$ та коефіцієнт концентрації джерела $\Omega_2 = 139$, в якості моделі джерела було використано чотирьох елементу решітку 2×2 , де кожен елемент являє собою круговий поршень [43]:

$$q_0^2 = \frac{P_{AK} \cdot \Omega_1 \cdot T_s \cdot \Omega_2 \cdot R_e^2}{16 \cdot \pi \cdot r^4 \cdot N_0} \cdot 10^{-0.2\beta r} \quad (47)$$

де $R_e^2 = 4 \cdot 10^{0.1T}$, а βr - втрати на згасання

Отже, при ймовірності правильного виявлення 0.75 і ймовірності помилкової тривоги 0.01 в обраній смузі частот при роботі в нормальних рефракційних умовах по об'єкту дальність в 200 м є досяжною.

Геометрична і прогнозована дальність виявлення БПЛА різного типу

Поняття геометричної дальності виявлення передбачає відстань джерела звуку до межі акустичної тіні.

Розглянемо три ситуації

1. Від'ємно стійкий градієнт $g_c < 0$
2. Позитивно стійкий градієнт $g_c > 0$
3. Реальна ситуація

1. Від'ємно стійкий градієнт $g_c < 0$

Швидкість акустичних хвиль зменшується з висотою. Траєкторія акустичного променя представляє дугу кола радіусом $R = c_0 / g_c$. У сприятливих рефракційних умовах, що відповідають ситуації негативної рефракції, геометрична дальність D_z представляє собою горизонтальну відстань від джерела до місця зустрічі променя, випущеного під кутом 0 з джерела, до зустрічі з приймачем, який знаходиться на землі. При цьому:

$$D_z = \sqrt{2 \frac{c_0}{\Delta c / \Delta h} \cdot h} \quad (48)$$

де c_0 - швидкість звуку на рівні джерела; $\Delta c / \Delta h$ - градієнт швидкості звуку.

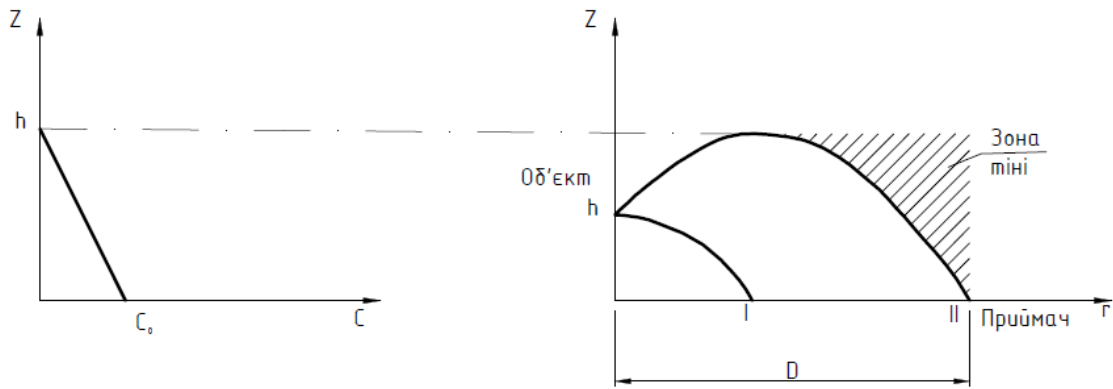


Рис. 2 Геометричною дальністю дії

Геометричною дальністю дії буде горизонтальна відстань від джерела до місця зустрічі променя з приймачем, що знаходиться на висоті h (рис. 2). Область акустичної тіні на малюнку заштрихована.

Для БПЛА типу КРИЛО геометрична дальність $D_2 \approx 8425\text{м}$, при $h=400\text{м}$, $c_0=338,76\text{ м/с}$ та $\Delta c/\Delta h=0,003825$

Для БПЛА типу КВАДРОКОПТЕР геометрична дальність $D_2 \approx 4614\text{м}$, при $h=120\text{ м}$, $c_0=339,83\text{ м/с}$ та $\Delta c/\Delta h=0,00383$

2. Позитивно стійкий градієнт $g_c > 0$

Швидкість акустичних хвиль зростає з висотою. У цьому випадку найбільша дальність виявлення забезпечується променем, що вийшов з джерела під кутом ϕ і зазнає повного внутрішнього відбиття від шару, що лежить на висоті H (рис. 3).

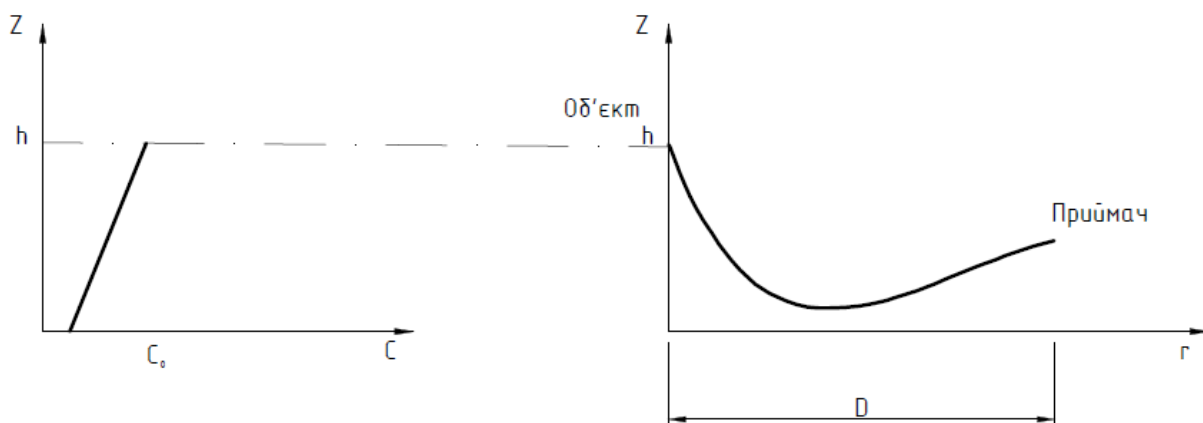


Рис. 3 Геометрична дальність

Геометрична дальність виявлення визначається за формулою:

$$D_z = \sqrt{2 \frac{c_0}{\Delta c / \Delta h}} (\sqrt{H - h_1}) + (\sqrt{H - h_2}), \quad (49)$$

де c_0 - швидкість звуку на рівні джерела; $\Delta c / \Delta h$ - градієнт швидкості звуку.

Для висот джерела і приймача $h_1 = 400 \text{ м}$, $h_2 = 1.5 \text{ м}$ у випадку БПЛА типу КРИЛО $D_z \approx 8400 \text{ м}$

Для висот джерела і приймача $h_1 = 120 \text{ м}$, $h_2 = 1.5 \text{ м}$ у випадку БПЛА типу КВАДРОКОПТЕР $D_z \approx 4580 \text{ м}$

В першому и другому випадку значення геометричної дальності забезпечують енергетичну (в нашому випадку - похилу) дальність.

Геометрична дальність виявлення залежить від градієнта швидкості, характеру зміни швидкості акустичних хвиль з висотою та кута, під яким акустичні промені виходять із джерела.

Зауважимо, що градієнт швидкості звуку має температурну і вітрову природу, що вимагає додаткових модельних і розрахункових уявлень, що розглянемо в третьому пункті.

3. Реальна ситуація

У реальних умовах температурні та вітрові чинники діють одночасно, тому реальна картина поширення звука в атмосфері землі є досить складною. У разі існування інверсійних шарів в атмосфері можуть спостерігатися аномальні закономірності поширення звука через хвилеводні ефекти [10].

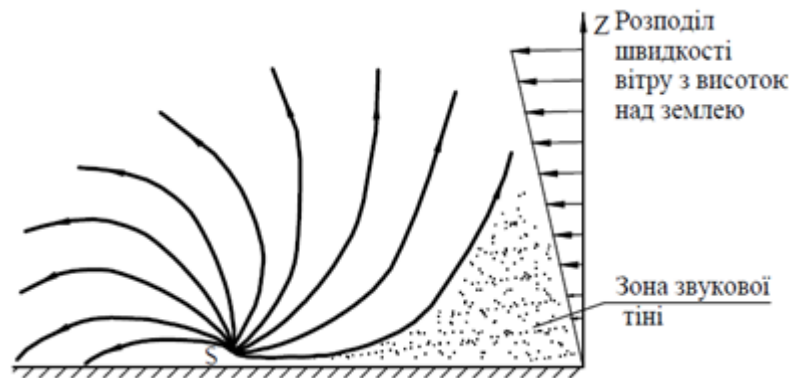


Рис. 4 Поширення звукових променів при впливі вітру

Якщо вплив градієнтів вітру і температури впливають одночасно (поширення звука відбувається проти вітру, температура повітря з висотою меншає, а величина розглянутих градієнтів є приблизно сталою), відстань від джерела до межі акустичної тіні визначається за формулою:

$$D_z = \sqrt{\frac{2}{\frac{\frac{\partial v}{\partial z} \cos \varphi}{a_0} - \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{T_0}}} \cdot (\sqrt{z_s} + \sqrt{z_r}), \quad (50)$$

де $\frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial T}{\partial z}$, - відповідно градієнти швидкості вітру і температури;

T_0 - температура повітря біля поверхні землі; (φ - кут між напрямком вітру і напрямком приймач - джерело, z_s, z_r - відповідно висоти над поверхнею землі джерела і приймача звука.

Для розрахунку впливу метеорологічних чинників на поширення звуку в атмосфері використовуються емпіричні дані.

Для БПЛА типу КРИЛО на висоті 400м: $D_z \approx 2400\text{м}$

Для БПЛА типу КВАДРОКОПТЕР на висоті 120м: $D_z \approx 748\text{м}$

Геометрична дальність забезпечує значення енергетичної. А отже, прогнозована дальність для використаних вихідних умов - не гірше розрахункової енергетичної.

В результаті розрахунку енергетичної дальності встановлено:

У запропонованій ймовірнісній ситуації для ймовірності правильного виявлення 0.75 і ймовірності помилкової тривоги 0.01, в обраній смузі частот при роботі в нормальних рефракційних умовах по об'єкту, шуми якого визначені згідно з [87], при використанні носія виду БТР-80 (частота обертів двигуна 1000 об / хв) з врахуванням обставин, відповідних стандартним рівням шуму навколишнього середовища і розглянутої АА на основі pv зондів, дальність для БПЛА типу КРИЛО до 1000 м є досяжною.

В свою чергу для БПЛА типу КВАДРОКОПТЕР при ймовірності правильного виявлення 0.75 і ймовірності помилкової тривоги 0.01, в обраній смузі частот при роботі в нормальних рефракційних умовах по об'єкту дальність в 200 м є досяжною.

Заявлена дальність може коригуватися за рахунок наявності зелених насаджень та інженерних споруд. Також слід зауважити, що при високому рівні зашумленості, а саме у містах, системи акустично-го детектування є менш ефективними і частіше їх застосовувати на замських територіях.