

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розробка лабораторного макету для дослідження  
акустичних характеристик приміщень.  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи МІм-22-1  
Пивоваров О.С.  
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ситнік О.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ Володимир КАРТАШОВ  
(підпис)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Пивоварову Олександр Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка лабораторного макету для дослідження акустичних характеристик приміщень.

затверджена наказом по університету від " 20 " 10 2023 р. № 1224 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Виконати аналіз характеристик звукових сигналів і акустичних параметрів приміщень, розробити методику вимірювань. Розробити і розрахувати конфігурацію апаратної частини системи, обґрунтувати вибір її складових частин. Розробити пакет програм в середовищі MATLAB для генерації і запису тестових сигналів, а також для обчислення акустичних характеристик приміщення: імпульсної характеристики, АЧХ, ФЧХ. Провести експериментальні дослідження і виконати налагодження програмного пакету. Визначити практичні можливості та обмеження лабораторного макету.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

Вступ

1 Аналіз акустичних характеристик приміщення та методів їх вимірювання.

2 Методика дослідження акустичних характеристик приміщення.

3 Дослідження акустичних характеристик приміщення за допомогою розробленого лабораторного макету.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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


1. Постановка задачі.
2. Врахування характеристик мікрофону і акустичних систем.
3. Випробувальні сигнали.
5. Генерація випробувальних сигналів.
6. Вимірювання характеристик акустичних систем і мікрофона.
7. Обробка імпульсного відгуку.
8. Результати вимірювання імпульсної характеристики.
9. Результати вимірювання АЧХ.
10. Результати вимірювання ФЧХ.
11. Висновки.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	01.09.23–27.09.23	
2	Розробка методики досліджень	28.09.23–11.10.23	
3	Розробка алгоритму і тексту програм	12.10.23–10.11.23	
4	Вимірювання відгуків приміщення	11.11.23–03.12.23	
5	Вимірювання АЧХ і ФЧХ приміщення	04.12.23–17.12.23	
6	Графічна частина роботи	18.12.23–17.12.23	
7	Перевірка керівником	18.12.23–30.12.23	
8	Перевірка на академічний плагіат	02.01.24–05.01.24	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	06.01.24–09.01.24	

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 20.10.2023 р. \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ Олександр ПИВОВАРОВ \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ Олег СИТНИК \_\_\_\_\_  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 61 сторінка, 25 рисунків, 1 таблиця, 28 джерел.

АКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКА, АЧХ, ЗВУКОВА КАРТА, ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, ІМПУЛЬСНА ХАРАКТЕРИСТИКА, СПОТВОРЕННЯ, ПІДСИЛЮВАЧ, ФЧХ

Об'єкт дослідження – процес вимірювання акустичних характеристик приміщень.

Мета дослідження – визначення можливостей об'єктивного дослідження акустичних характеристик приміщень за допомогою лабораторного макету, що складається з персонального комп'ютера зі звуковою картою і програмного забезпечення в пакеті MATLAB.

В кваліфікаційній роботі виконано аналіз характеристик звукових сигналів і акустичних параметрів приміщень, розроблена методика вимірювань. Розроблена і розрахована конфігурація апаратної частини системи, обґрунтовано вибір її складових частин. Розроблено пакет програм в середовищі MATLAB для генерації і запису випробувальних сигналів, а також для обчислення акустичних характеристик приміщення: імпульсної характеристики, АЧХ, ФЧХ. Проведено експериментальні дослідження і виконано налагодження програмного пакету. Визначено практичні можливості та обмеження лабораторного макету.

## ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 61 pages, 25 figures, 1 table, 28 sources.

ACOUSTIC CHARACTERISTICS, FREQUENCY RESPONSE, AFC, MEASUREMENT SYSTEM, IMPULSE CHARACTERISTICS, DISTORTION, AMPLIFIER, PFC

The object of research is the process of measuring the acoustic characteristics of premises.

The purpose of the research is to determine the possibilities of objective research of the acoustic characteristics of the premises using a laboratory model consisting of a personal computer with a sound card and software in the MATLAB package.

In the qualification work, an analysis of the characteristics of sound signals and acoustic parameters of premises was performed, and a measurement technique was developed. The configuration of the hardware part of the system has been developed and calculated, and the choice of its constituent parts has been substantiated. A package of programs in the MATLAB environment was developed for generating and recording test signals, as well as for calculating the acoustic characteristics of the room: impulse response, frequency response, frequency response. Experimental studies were carried out and the software package was debugged. The practical possibilities and limitations of the laboratory layout are determined.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
<b>1 АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИМІЩЕННЯ ТА МЕТОДІВ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Фізичні закономірності поширення звуку.....	11
1.2 Взаємодія звуку з перешкодами.....	15
1.3 Поширення звуку у замкнутому просторі.....	17
1.4 Ранні і пізні відбиття.....	19
1.5 Реверберація.....	21
1.6 Особливості поведінки звукових хвиль різної довжини в умовах замкнутого простору.....	24
1.6.1 Середньо- та високочастотні хвилі (хвилі малої довжини).....	24
1.6.2 Низькочастотні або басові хвилі (хвилі великої довжини).....	25
1.7 Висновки по розділу 1.....	27
<b>2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИМІЩЕННЯ.....</b>	<b>29</b>
2.1 Загальна структурна схема дослідження.....	29
2.2 Перевірка характеристик звукової карти.....	31
2.3 Перевірка характеристик акустичного тракту.....	38
2.4 Загальна методика вимірювання.....	39
2.5 Висновки по розділу 2.....	40
<b>3 ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИМІЩЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗРОБЛЕНОГО ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТУ.....</b>	<b>41</b>

3.1 Розробка програми для дослідження акустичних характеристик приміщення за допомогою ЛЧМ-сигналу.....	41
3.2 Розробка програми для дослідження акустичних характеристик приміщення за допомогою сигналів MLS.....	45
3.3 Запис акустичних відгуків досліджуваного приміщення.....	49
3.4 Обчислення акустичних характеристик досліджуваного приміщення.....	50
3.5 Висновки по розділу 3.....	55
Висновки.....	57
Перелік джерел посилання.....	59
ДОДАТКИ.....	62
Додаток А. Графічний матеріал.....	63
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ  
І ТЕРМІНІВ

- АС – акустична система;
- АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
- ЕЧМ – експоненціальна частотна модуляція;
- ІХ – імпульсна характеристика;
- КЗП – коефіцієнт звукопоглинання;
- Лк – лівий канал;
- ЛЧМ – лінійна частотна модуляція;
- М – мікрофон;
- МП – мікрофонний підсилювач;
- Пк – правий канал;
- ПК – персональний комп'ютер;
- ПП – підсилювач потужності;
- ФЧХ – фазо-частотна характеристика;
- ЧМ – частотна модуляція;
- AI (articulation Index) – індекс артикуляції;
- Arrival Time – час прибуття прямого звуку від гучномовців.
- MLS – Maximum length sequence – послідовність з максимальною довжиною;
- PWL – Power Level – рівень потужності звуку;
- RT – Reverberation Time;
- SPL – Sound Pressure Level – рівень звукового тиску;
- TDS – Time Delay Spectrometry – метод спектрометрії часових затримок.

## ВСТУП

Досі час реверберації приміщення вважався найбільш істотним параметром опису його акустичних якостей. У той час як час реверберації продовжує вважатися основним параметром, інші вимірювання, такі як відносні рівні тиску звуку, відносини ранньої/пізньої енергії, що прибуває, бічні відбиття, міжслухові взаємні функції кореляції і рівень фонового шуму дозволяють зробити більш широку оцінку акустичних якостей приміщення.

У ході роботи продовжується визначатися акустична якість часу реверберації, але вводяться 2 додаткові рівні складності при акустичних вимірюваннях.

Робота буде базуватися на методі вимірювання, при якому час реверберації виходить з імпульсного відгуку після вимкнення шумового сигналу. У ході розрахунку буде зводитися в квадрат імпульсний відгук і за імпульсними характеристиками з'явиться можливість отримати: подальше вимірювання часу реверберації (ранній період загасання) і вимірювання для відносних рівнів звуку, відношення ранньої/пізньої енергії прибуття і звуків, що приходять з боків у приміщенні.

У межах цих груп вимірювальних величин ще необхідно вирішувати, які з величин підходять найкраще, але оскільки вони визначаються з імпульсних відгуків, належить представляти імпульсний відгук як основу для стандартних вимірювань.

Актуальність даного методу полягає в тому, що за його допомогою ми можемо розраховувати не акустичні характеристики зали, як це виходить у випадку з часом реверберації, а надається можливість отримати досить чіткі суб'єктивні оцінки якості звучання в даному приміщенні.

Проблема актуальна, проте не дуже часто зустрічається в літературі. Вперше згадки про розрахунок приміщення, даним методом було зроблено ще далекого 1962 року радянським ученим у сфері акустики А. Качеровичем

у книзі «Акустика і архітектура кінотеатрів». Однак у той час метод не отримав великого визнання і не є популярним і сьогодні.

В даний час цей метод знову був згаданий у виданнях американських інженерів Дж. Альона і Д. Беркла. На відміну від Качеровича, вони зробили ухил на приміщення різного типу, тоді як у Качеровича йшлося безпосередньо про приміщення кінотеатрів. Теорія Дж. Альона та Д. Беркла є більш універсальною і у зв'язку з цим може мати місце для розрахунку всіх типів приміщень

Метою роботи є розробка лабораторного макету, здатного отримати достовірні оцінки якості звучання в приміщенні, визначення всіх параметрів, що відносяться до даного методу та порівняння отриманих результатів з результатами, отриманими при розрахунку класичним методом акустичних властивостей приміщення.



# 1 АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИМІЩЕННЯ ТА МЕТОДІВ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ

## 1.1 Фізичні закономірності поширення звуку

Звук – це механічні коливання, що поширюються в твердих, рідких та газоподібних середовищах.

Основними параметрами звуку є:

- звуковий тиск  $p_{зв}$ , Па;
- інтенсивність звуку  $I$ , Вт/м<sup>2</sup>.
- довжина звукової хвилі  $\lambda$ , м;
- швидкість поширення хвилі  $c$ , м/с;
- частота коливань  $f$ , Гц.

Швидкість поширення звукової хвилі  $c$  (м/с) – це фізична властивість середовища.

Частота  $f$  (Гц) та довжина хвилі  $\lambda$  (м) пов'язані між собою простим хвильовим рівнянням:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (1.1)$$

де  $c$  – швидкість звукової хвилі у цьому середовищі, м/с.

Швидкість звуку в повітрі становить приблизно 330 м / с. В рідинах і в твердих тілах вона більша.

Звукові коливання в повітрі призводять до його стиснення та розрідження. У областях стиснення тиск повітря зростає, а областях розрідження знижується.

Різниця між тиском, що існує в збуреному середовищі  $p_{сер}(t)$  в даний момент  $t$ , і атмосферним тиском  $p_{атм}$ , називається звуковим тиском  $p_{зв}$ .

В акустиці цей параметр є основним, через який визначаються всі інші.

$$P_{зв} = P_{сер} - P_{атм}. \quad (1.2)$$

Звукова хвиля є носієм енергії у напрямку свого руху. Кількість енергії, що переноситься звуковою хвилею за одну секунду через переріз площею  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярний до напрямку руху, називається інтенсивністю звуку.

Поверхня тіла, що робить коливання, є випромінювачем (джерелом) звукової енергії, що створює акустичне поле.

Акустичним полем називають область пружного середовища, яке є засобом передачі акустичних хвиль.

Акустичне поле характеризується:

- звуковим тиском  $p_{зв}$ , Па;
- акустичним опором  $Z_a$ , Па с/м.

Акустичний опір середовища – відношення звукового тиску  $p_{зв}$  до швидкості коливання частинок середовища.

Енергетичними характеристиками акустичного поля є:

- інтенсивність  $I$ , Вт/м<sup>2</sup>;
- потужність звуку  $W$ , Вт.

Потужність звуку – кількість енергії, що проходить за одиницю часу через охоплюючу джерело звуку поверхню.

Усі перелічені величини взаємозалежні і залежить від властивостей середовища, у якій поширюється звук.

Якщо акустичне поле не обмежене поверхнею і поширюється практично до нескінченності, то таке поле називають вільним акустичним полем.

В обмеженому просторі (наприклад, у закритому приміщенні) поширення звукових хвиль залежить від геометрії та акустичних властивостей поверхонь, розташованих на шляху розповсюдження хвиль.

Процес формування звукового поля в приміщенні пов'язаний з явищами реверберації та дифузії.

Якщо в приміщенні починає діяти джерело звуку, то в перший момент часу маємо тільки прямий звук (рис. 1.1).

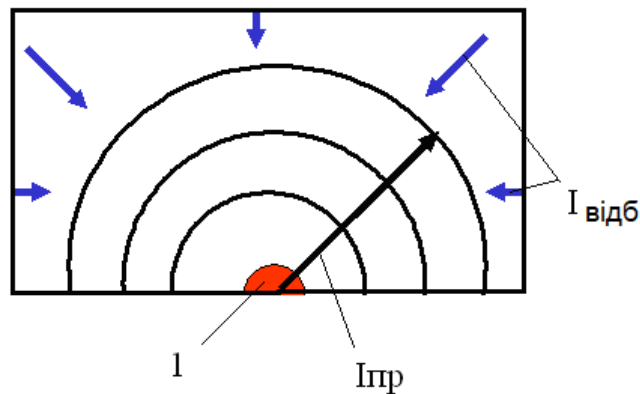


Рисунок 1.1 – Розповсюдження звуку у приміщенні з точковим джерелом звуку

Після досягнення хвилею звуковідбиваючої перешкоди картина поля змінюється через появу відбитих хвиль. Якщо в звуковому полі помістити предмет, розміри якого малі в порівнянні з довжиною звукової хвилі, то практично не спостерігається спотворення звукового поля. Для ефективного відображення необхідно, щоб розміри перешкоди, що відбиває, були більше або рівні довжині звукової хвилі.

У приміщенні, де встановлене джерело звуку (1.1), інтенсивність звуку в будь-якій точці складається з інтенсивності прямого звуку  $I_{пр}$  і звуку багаторазово відбитого від стін приміщення  $I_{відб}$ .

Відбитий звук спрощено вважається дифузним, тобто таким, що має однакову щільність звукової енергії у всіх точках приміщення, а прямий звук спадає з відстанню від джерела.

Таким чином, інтенсивність сумарного звуку

$$I_{сум} = I_{пр} + I_{відб} \quad (1.3)$$

Звукове поле, в якому виникає велика кількість відбитих хвиль з різними напрямками, в результаті чого питома щільність звукової енергії однакова по всьому полю, називається дифузним полем.

Після припинення дії джерела випромінювання звуку акустична інтенсивність звукового поля зменшується до нульового рівня протягом тривалого часу. Будь-яке звукове поле як елемент коливання середовища має власну характеристику згасання звуку - реверберацією ("післязвучання").

Людина відчуває звук широкому діапазоні звукових тисків  $p_{зв}$  (інтенсивностей  $I$ ).

Стандартним порогом чутності називають ефективне значення звукового тиску (інтенсивності), створюваного гармонічним коливанням з частотою  $f = 1000$  Гц, ледь чутною людиною із середньою чутливістю слуху.

Стандартний поріг чутності відповідає звуковий тиск  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па або інтенсивність звуку  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Верхня межа звукових тисків, що відчуваються слуховим апаратом людини, обмежується больовим відчуттям і прийнятий рівним

$$p_{\max} = 200 \text{ Па}, \quad I_{\max} = 100 \text{ Вт/м}^2. \quad (1.4)$$

Величина слухового відчуття  $L$  при перевищенні звуковим тиском  $p_{зв}$  стандартного порога чутності визначається за законом психофізики Вебера - Фехнера:

$$L = q \lg \left( \frac{p_{зв}}{p_0} \right), \quad (1.5)$$

де  $q$  – деяка стала, залежить від умов проведення експерименту.

З урахуванням психофізичного сприйняття звуку людиною для характеристики значень звукового тиску  $p_{зв}$  і інтенсивності  $I$  були введені

логарифмічні величини – рівні  $L$  (з відповідним індексом), виражені в безрозмірних одиницях – децибелах, дБ, названих на честь Грейма Бела (збільшення інтенсивно звуку у 10 разів відповідає 1 Белу (Б): 1Б = 10 дБ).

Рівень звукового тиску визначається за формулою

$$L_p = 20 \lg \left( \frac{p_{ze}}{p_0} \right), \quad (1.6)$$

де  $p_{ze}$  – середньоквадратична величина звукового тиску, Па;

$p_0$  – нижній поріг чутливості звукового тиску повітря, рівний  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па.

Рівень інтенсивності звуку визначається за формулою

$$L_I = 10 \lg \left( \frac{I}{I_0} \right), \quad (1.7)$$

Слід зазначити, що за нормальних атмосферних умов  $L_p = L_I$ .

За аналогією були введені також рівні звукової потужності

$$L_W = 10 \lg \left( \frac{W}{W_0} \right), \quad (1.8)$$

де  $W_0 = 10^{-12}$  Вт – нижній поріг чутливості звукової потужності на частоті 1000 Гц при  $S_0 = 1$  м<sup>2</sup>.

## 1.2 Взаємодія звуку з перешкодами

Звукові (чутні) хвилі, зустрічаючи на своєму шляху перешкоду, частково поглинаються ним, частково відбиваються від нього, тобто перевипромінюються перешкодою назад у приміщення і частково проходять через нього наскрізь (рис.1.2).

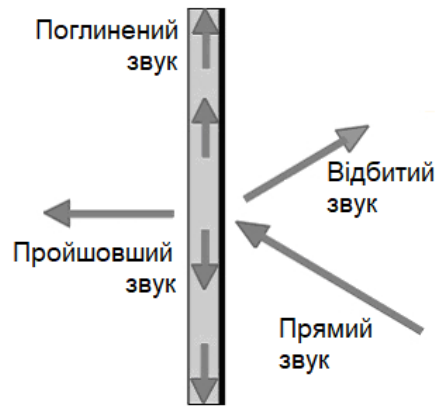


Рисунок 1.2 – Взаємодія звуку з перешкодою

Відразу слід зазначити, що відсоткове співвідношення цих процесів буде різним для звукових хвиль різної довжини, що з особливостями поведінки ВЧ, СЧ і НЧ хвиль. Крім цього, важливу роль відіграють характеристики самої перешкоди такі, як його товщина, щільність матеріалу з якого вона виготовлена, а також властивості поверхні (гладка/рельєфна, щільна/пухка).

Вводять поняття коефіцієнтів поглинання  $\alpha$ , відбиття  $\beta$  та проходження  $\gamma$  звукової хвилі. Вони дорівнюють відношенню відповідних звукових енергій – поглинутої  $E_{\text{погл}}$ , відбитої  $E_{\text{відб}}$  та пройшовшої  $E_{\text{пр}}$  – до всієї енергії звуку  $E$ , що потрапляє на перешкоду [2]:

$$\alpha = \frac{E_{\text{погл}}}{E}, \quad \beta = \frac{E_{\text{відб}}}{E}, \quad \gamma = \frac{E_{\text{пр}}}{E}. \quad (1.9)$$

При цьому має виконуватися закон збереження енергії, тобто:

$$E_{\text{погл}} + E_{\text{відб}} + E_{\text{пр}} = E, \quad (1.10)$$

$$\alpha + \beta + \gamma = 1. \quad (1.11)$$

Значення коефіцієнтів поглинання, відбиття і проходження звуку є довідковими. Вони вимірюються в дифузному (розсіяному) полі з рівно

вірогідним поширенням звукових хвиль в усіх напрямках. Дані коефіцієнти визначають в октавних (або в третьоктавних) смугах частот в діапазоні, як правило, 125 Гц ...4 кГц.

### 1.3 Поширення звуку у замкнутому просторі

Поширення звуку в замкнутому просторі (в умовах приміщення) кардинальним чином відрізняється від умов його поширення у вільному просторі, оскільки звукова хвиля зустрічає на своєму шляху безліч перепон (стіни, стеля, підлога, меблі, предмети інтер'єру і т.п.).

Численні відображення основного звуку, що виникають в результаті цього, взаємодіють, як з прямим звуком, що виходить безпосередньо з динаміка і досягає вух слухача найкоротшим шляхом, тобто, по прямій, так і між собою. Схематично цю відмінність ілюструє ехограма, зображена на рис.1.3.

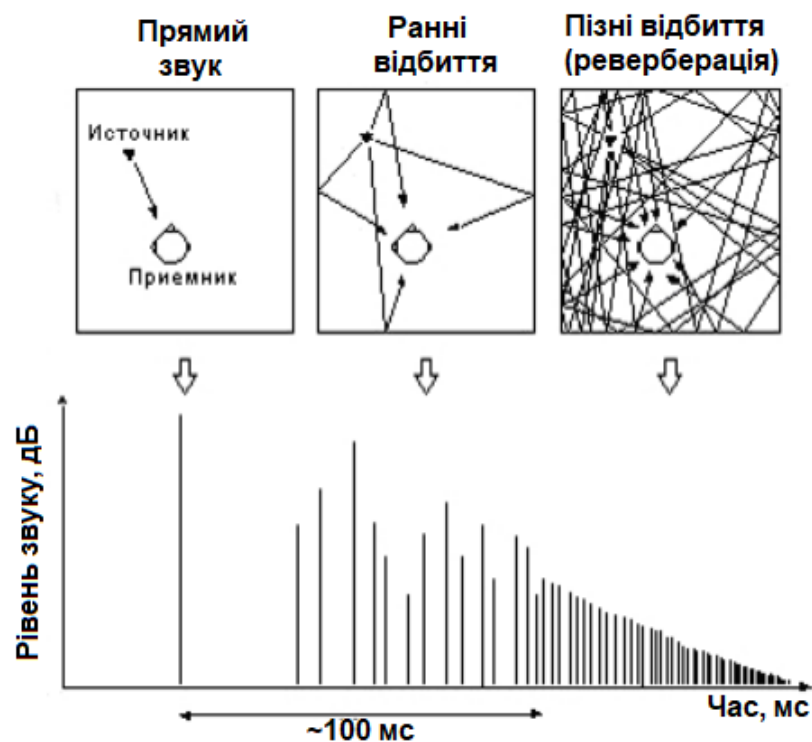


Рисунок 1.3 – Ехограма, що відображає етапи прямого звуку, рінніх відбиттів і пізніх відбиттів

Діаграма ілюструє наступні ситуації:

- відкритий простір: прямий звук;
- замкнутий простір: прямий звук + ранні відбиття + реверберація.

Звук відбивається від стін, підлоги та стелі. Процес відбувається так: звукова хвиля, ударяючись про перешкоду, частково відбивається від неї, частково поглинається, а частково проходить крізь перешкоду. Звичайно, чим твердіше і щільніше стіна, тим більшу частину акустичної енергії вона відбиватиме назад у внутрішній простір приміщення.

Звукові хвилі відбиваються від перешкод гостроспрямовано, у місцях їх відбиттів від стін, стелі і підлоги, тобто, осторонь основного джерела звуку з'являються його додаткові "образи" (вторинні, «уявні» джерела звуку чи, звані «фантоми». У деяких зарубіжних джерелах їх також називають «гарячими областями»).

Відображення, взаємодіючи між собою та з прямим звуком, спотворюють його та погіршують виразність звукової картини. А тепер уявімо, що відбувається, коли багаточастотний звук відразу від двох або більше акустичних систем відбивається відразу від шести поверхонь кімнати (чотирьох стін, стелі та підлоги). Тобто, зрозуміло, який колосальний вплив має акустика приміщення на якість звуку, що відтворюється в ньому.

Отже, в замкнутому просторі (в умовах приміщення) виділяють три джерела звуку:

- прямий звук – це звук, що виходить безпосередньо з динаміків АС (акустичної системи) і досягає вух слухача найкоротшим шляхом – прямою, тобто, не відбиваючись від поверхонь стін, підлоги і стелі приміщення (умовно можна вважати його оригінальним звуком, записаним на музичному носії);

- ранні відображення (перші відображення) – це відображення основного звуку від стін, підлоги і стелі приміщення, а також від предметів інтер'єру, що знаходяться в ньому, що досягають вух слухача найкоротшими шляхами, тобто, зазнаючи єдиного відображення, завдяки чому вони

зберігають досить велику амплітуду і формують в областях відображення на поверхнях стін, підлоги та стелі приміщення «образи» (вторинні, віртуальні, «уявні» джерела, «фантоми») прямого звуку. Саме тому перші відображення є найбільш важливими у загальній структурі відображень і, відповідно, серйозно впливають на якість звучання та формування стереокартини;

– ревербераційні відбиття (пізні відбиття, реверберація, відлуння). На відміну від ранніх відбиття, вони є результатом багаторазових перевідбиття основного звуку від поверхонь стін, підлоги та стелі приміщення. Вони досягають вух слухача складними, довгими шляхами і мають низьку амплітуду.

Під основним звуком мається на увазі звук, що виходить безпосередньо з динаміка, але, на відміну прямого звуку, має кругову спрямованість.

#### 1.4 Ранні і пізні відбиття

Розглянемо, чим відрізняються ранні та пізні відображення. Щоб відповісти на це питання, необхідно ознайомитися з деякими суб'єктивними особливостями людського звукосприйняття, пов'язаними з часовою характеристикою звуку.

Це так званий ефект Хааса (Haas effect), суть якого полягає в тому, що, якщо звук приходить від кількох різновидалених джерел, то наша система вух/мозок ідентифікує (сприймає) тільки той звук, який прийшов раніше.

Якщо різниця в часі прибуття кількох звукових сигналів становить до 50 мс, то звук, що раніше прибув, домінує над тим, що прийшов пізніше, навіть у разі, якщо останній на 10 дБ голосніше (тобто голосніше в 3 рази).

Таким чином, всі відображення, що досягають вух слухача протягом перших 50 мс слідом за прямим звуком, сприймаються людським вухом разом з прямим сигналом, тобто, як один загальний сигнал. З одного боку, це призводить до поліпшення сприйняття мови і суб'єктивного збільшення її гучності, проте, у разі звуковідтворення це значно погіршує його якість за

рахунок спотворення оригінальної музичної інформації відбитими звуковими сигналами, що зливаються з нею (рис.1.4).

Якщо ж відображення надходять із затримкою більше, ніж 50 мс і мають порівнянний рівень із прямим сигналом, людське вухо сприймає їх як повторення прямого сигналу, тобто у вигляді окремих звукових сигналів. У разі ці відображення називають «луною» (реверберацією). Відлуння істотно погіршує розбірливість мови та сприйняття музичної інформації.

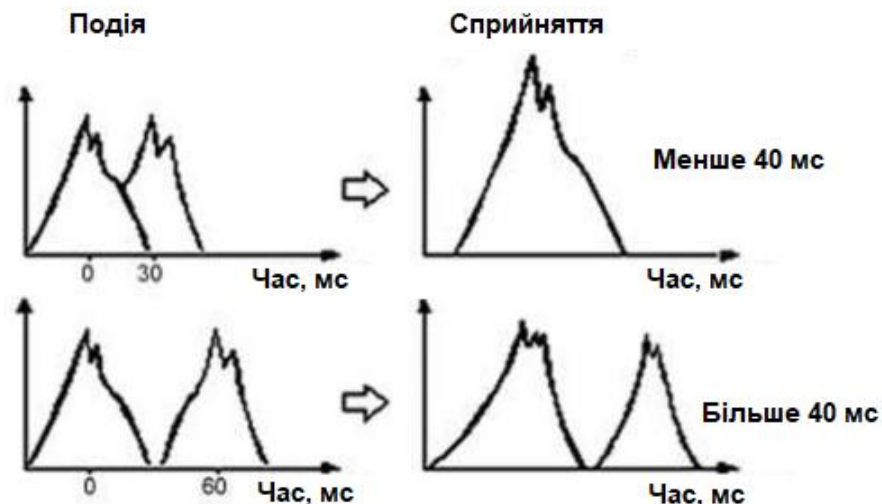


Рисунок 1.4 – Фактичні звукові сигнали та їхнє суб’єктивне сприйняття

Особливе практичне значення мають ранні відбиття (перші відбиття), що досягають вуха слухача в часовому проміжку до 20 мс. після прямого сигналу.

Як зазначалося раніше, вони зберігають велику амплітуду і сприймаються людським вухом разом із прямим сигналом і, отже, спотворюють його початкову (оригінальну) структуру. Таким чином, перші відображення є одним із основних ворогів якісного звуку.

Геометричні характеристики ранніх відбиттів безпосередньо залежить від форми приміщення, розташування джерела звуку (наприклад, акустичних систем) і слухача у ньому, будучи унікальними кожної конкретної точки даного приміщення.

Амплітудні характеристики перших відбитків залежать від:

- відстані між джерелом звуку і поверхнею, що відбиває;
- відстані від вух слухача до поверхні, що відбиває;
- від акустичних властивостей самої поверхні, що відбиває.

Таким чином, акустична характеристика кожної точки внутрішнього простору приміщення, головним чином, визначається поєднанням характеристик прямого звуку та ранніх відбиттів, що приходять у цю точку.

### 1.5 Реверберація

При відтворенні звуку в приміщенні ми чуємо не тільки прямий звук від джерела і ранні відбиття, але й слабкіші (тихі) відбиті сигнали, що є результатом тривалих багаторазових перевідбиття основного звуку від стін, підлоги і стелі приміщення. Ці звукові сигнали досягають вух слухача з великим запізненням щодо моменту прибуття прямого звуку і перших відображень. Суб'єктивно це сприймається як луна.

Таким чином, ефект, при якому згасання звуку відбувається не відразу, а поступово, за рахунок численних його перевідбиття від стін, підлоги та стелі приміщення, називається реверберацією.

Спектральний склад відбитих сигналів у великих і малих приміщеннях відрізняється, оскільки реверберація несе у собі інформацію розміри приміщення. Крім цього спектр ревербераційних сигналів також містить інформацію про властивості матеріалів, з яких виготовлені поверхні, що відбивають.

Наприклад, реверберація з високим рівнем високочастотних складових асоціюється з кімнатою, що має тверді стіни, які добре відображають високі частоти. Якщо ж звук реверберації глухий, то слухач приходить до висновку, що стіни кімнати вкриті килимами або драпіруванням, що поглинає високі частоти.

Також слід зазначити, що спектр сигналів реверберації дозволяє визначити відстань до джерела звуку.

Наша система вухо/мозок, автоматично оцінюючи співвідношення між рівнями прямого звуку та реверберації, самостійно робить висновок про те, чи є джерело звуку близько (слабка реверберація) чи далеко (сильна реверберація).

Крім того, орган слуху людини влаштований таким чином, що якість звукосприйняття залежить не тільки від кількісного співвідношення між прямим звуком і реверберацією, але також від часу запізнення ревербераційного сигналу по відношенню до моменту сприйняття прямого звуку.

Час реверберації є проміжок часу, протягом якого звукова хвиля, багаторазово перебиваючись луною по кімнаті, поступово згасає. Цей параметр є одним із головних критеріїв акустичної характеристики приміщення.

Цей параметр характеризує розміри приміщення: у малих приміщеннях за одиницю часу відбувається більша кількість перевідбиття, що, на відміну від ситуації у великих кімнатах, веде до швидкого ослаблення та подальшого загасання реверберації. А також і властивості його поверхонь, що відбивають: тверді глянцеві поверхні, на відміну від рельєфних і м'яких, добре відображають звук, практично не послаблюючи його, що в свою чергу, природно, продовжує час реверберації.

Для позначення даного параметра було прийнято скорочення RT60, тобто час (у секундах), протягом якого рівень звукового тиску (SPL) в приміщенні знижується на 60 дБ, після того, як джерело звуку припинить випромінювання.

Багаторазове відлуння суб'єктивно сприймається як гучність приміщення. Чим менше загасання, тим більший час реверберації і, відповідно, тим сильніша гучність.

Як зазначалося, час реверберації визначається як розмірами приміщення, а й відбиває здатністю його стін, підлоги і стелі. Для визначення часу реверберації У. Себін запропонував емпіричну формулу:

$$T = \frac{kV}{\alpha_{сер}S}, \quad (1.12)$$

де  $k$  – константа,

$V$  – об'єм приміщення,

$S$  – площа обмежуючих поверхонь,

$\alpha_{сер}$  – середній коефіцієнт звукопоглинання:

$$\alpha_{сер} = (\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots) / S = \sum_i \alpha_i S_i / \sum_i S_i, \quad (1.13)$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнти поглинання покриттів;

$S$  – загальна площа покриттів.

Значення  $k$  у виразі (1.13) є різними для різної форми приміщень.

Експериментально визначені значення  $k$  показані в табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнту  $k$  для приміщень різної форми

Форма приміщення	$k$
Хрестоподібне у плані, з куполоподібною стелею	0,177
Близьке до "золотого перетину"	0,164
Трапецієподібне у плані, театрального типу	0,160
Кубічної форми	0,157
Дуже широке у плані, з низькою стелею	0,152

Точніші дослідження процесу реверберації було проведено у 1930 р. К. Ейрінгом. Формула Ейрінга має такий вигляд:

$$T = \frac{0,167 \cdot V}{-\sum S_i \ln(1 - \alpha_i)}, \quad (1.14)$$

Формули У. Себіна і К. Ейрінга можуть бути використані, якщо звукопоглинаючі матеріали розподілені по поверхнях досить рівномірно, щоби можна було використовувати поняття середнього коефіцієнта поглинання.

## 1.6 Особливості поведінки звукових хвиль різної довжини в умовах замкнутого простору

Очевидно, що поведінка звуку в музичній студії підпорядковується законам його поширення у замкнутому просторі. Розглянемо цей процес детальніше.

Поведінка звукових хвиль у замкнутому просторі залежить від їхньої довжини  $\lambda$ , відповідно, від частоти їх коливань, що варіюють у межах від 17 метрів (20 Гц – на початку відчутного басового діапазону) до 17 міліметрів (20 кГц – в кінці чутного високочастотного діапазону).

Спрощено поведінку звукових хвиль усередині приміщення, залежно від їхньої довжини, можна представити у вигляді двох незалежних моделей.

Одна – для НЧ виглядає як суто хвильовий процес – інтерференція (складання) всіх джерел НЧ (як басу від динаміків, так і низькочастотних відбиття від стін, підлоги і стелі), що призводить до утворення тривимірної картини для кожної частоти подібно до гірського рельєфу з піками, що чергуються провалами гучності.

Друга – для ВЧ, подібна до випромінювання світла з відомими законами заломлення, відображення та дифракції. Вона використовує наочні методи геометричної оптики, оскільки у цих сферах діють аналогічні правила. Наприклад, частина енергії звукової хвилі, що досягла твердої поверхні, відбивається нею під кутом, що дорівнює куту падіння.

Загальну картину доповнює змішання цих двох процесів СЧ.

### 1.6.1 Середньо- та високочастотні хвилі (хвилі малої довжини)

Як мовилося раніше, поведінка звукових хвиль ВЧ діапазону загалом підпорядковується законам поширення світла. Це безпосередньо відноситься до хвиль ВЧ діапазону і більш менш справедливо по відношенню до ВСЧ піддіапазону.

Першою особливістю звукових хвиль даного діапазону є їхня виражена спрямованість, тобто зміна (посилення або ослаблення) сприйняття рівня ВЧ навіть при незначному відхиленні від осі їх випромінювання. Простіше кажучи, високі частоти поширюються у напрямку слухача подібно до променя прожектора.

Спрямованість зростає із збільшенням частоти сигналу, досягаючи максимуму на найвищих частотах. Саме спрямованість визначає основне значення ВЧ хвиль у формуванні стереокартини.

Другою характерною особливістю ВЧ є здатність до багаторазового відображення від твердих поверхонь, подібно до рекошетної кулі або більярдної кулі, що, у свою чергу, обумовлює їхню легку розсіюваність (дифузю).

Третя особливість – легка поглинання навіть тонкими м'якими поверхнями, такими як, наприклад, штори.

Саме завдяки спрямованості та здатності до відображення ВЧ, як зазначалося вище, беруть активну участь у формуванні ревербераційної картини.

### 1.6.2 Низькочастотні або басові хвилі (хвилі великої довжини)

Отже, поведінка НЧ в умовах замкнутого простору виглядає як суто хвильовий процес, в основі якого лежить інтерференція, тобто, процес складання (накладання) звукових хвиль, що виходять абсолютно від усіх НЧ джерел, що знаходяться в приміщенні, а також безлічі НЧ-відбиття від стін, підлоги та стелі даного приміщення.

Це зумовлено тим, що на відміну від СЧ і ВЧ хвиль, що є спрямованими, басові хвилі рівномірно поширюються у всіх напрямках подібно до сфер, що розходяться від випромінюючого центру. Таким чином, НЧ звукові хвилі є всепрямованими, саме тому із закритими очима неможливо визначити місце розташування вуфера.

Ця властивість НЧ хвиль пояснює нездатність їх у формуванні стереокартини.

Крім цього, завдяки великій довжині хвилі та високої енергії, НЧ хвилі здатні не тільки огинати перешкоду, а й, частково відбиваючись, «проходити» наскрізь навіть через бетонні стіни (це саме той випадок, коли Ваші далекі сусіди по «багатоповерхівці» чують низькочастотне "гудіння", під час прослуховування Вами музики).

Таким чином, на відміну від ВЧ, які легко відбиваються від твердих поверхонь, басові хвилі відбиваються набагато гірше, частково поглинаючись і частково проходячи крізь перешкоду, причому зі зниженням частоти вони все більше втрачають здатність до відображення і вважають за краще «йти напролом».

А ще НЧ хвилі «вміють» «витікати» з приміщення через відкриті віконні та дверні отвори, а також легко проникати через скло, наче його взагалі немає.

Враховуючи всі вищеперелічені моменти, а також беручи до уваги той факт, що довжини НЧ хвиль можна порівняти з лінійними розмірами кімнати (довжиною, шириною та висотою), стає зрозумілим, чому на поведінку басових хвиль основний вплив мають саме параметри приміщення.

Якщо довжина хвилі звукового сигналу вдвічі більше одного з лінійних розмірів кімнати, то на її частоті між цією парою стін виникає найгрізніше і важко придушується акустичне явище, буквально, що «вбиває» звук, - резонанс повітряного об'єму.

Суб'єктивно це виявляється у посиленні сигналу цієї конкретної частоти по відношенню до рівня інших частот і появі гучності звучання.

Низькочастотні резонанси та стоячі хвилі виникають між двома паралельними поверхнями (наприклад, між фронтальною та тиловою стінами).

## 1.7 Висновки по розділу 1

Акустичні характеристики приміщення є складними функціями, що залежать від багатьох параметрів. Це не тільки об'єм приміщення, площа обмежуючих поверхонь, коефіцієнти звукопоглинання покриттів. Звучання визначається імпульсною характеристикою приміщення, яка залежить від взаємного розташування джерела звуку і приймача, їх орієнтації і розташування відносно перешкод і т.д.

Отже, дослідження акустичних характеристик приміщень є складною задачею, але одночасно представляє великий інтерес із навчальної, наукової і комерційної точок зору. При тому, коли йдеться про навчальні задачі, вимірювальна техніка не має бути дорогою, а дослідження мають відбуватися так, щоби можна було швидко змінювати алгоритми вимірювання, оброблення і представлення результатів вимірювань.

В кваліфікаційній роботі магітра розробляється концепція лабораторного макету для вимірювання і аналізу акустичних параметрів приміщень з використанням доступних акустичних систем і мікрофонів на базі персонального комп'ютера зі звуковою картою і власним програмним забезпеченням в середовищі MATLAB. Експериментально досліджено можливості спроектованої системи ж вимірювання акустичного імпульсного відгуку приміщення, його АЧХ і ФЧХ.

Кваліфікаційна робота виконується на кафедрі МІРЕС ХНУРЕ. На кафедрі проводяться дослідження в таких наукових областях, як виявлення та розпізнавання БПЛА за результатами акустичного спостереження [14-17], створення систем зондування атмосфери за допомогою акустичних хвиль [18-21]. Цілий ряд студентських доповідей [22-25] і атестаційних робіт магістрів минулих років [26-28] присвячені дослідженню систем звукозапису. Отже, дослідження в даній роботі пов'язані і ґрунтуються на традиційному напрямку робіт колективу і студентів кафедри МІРЕС.

## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИМІЩЕННЯ

### 2.1 Загальна структурна схема дослідження

Складність вимірювань акустичних параметрів приміщень часто підштовхує на відмову від даної процедури і згодом процес акустичного оформлення приміщення відбувається з орієнтиром на прості формули розрахунку, що враховують лише геометричні параметри приміщення і середні коефіцієнти звукопоглинання. Природно, що результат у такому разі навіть близько не виправдовує очікування.

Зрозуміло, процес акустичних вимірювань складний, вимагає деякого спеціального обладнання і, що дуже важливо, навичок роботи з програмами для вимірювання. Мало просто виміряти, потрібно зробити це максимально об'єктивно, і єдиним обмеженням при вимірюваннях має залишатись похибка вимірювального обладнання. Далі більш докладно викладемо методику проведення вимірювань за допомогою програм у пакеті MATLAB.

Звукові карти всіх ПК можуть працювати в дуплексному режимі. Це означає, що можуть одночасно відтворювати і приймати звукові сигнали, що надає можливість вихід звукової карти використовувати як генератор звукового сигналу, а вхід карти – як реєстратор сигналів, що пройшли через випробуваний акустичний тракт. Всі завдання із синхронізації даних процесів і з обчислення показників виконуються в персональному комп'ютері за допомогою розробленого програмного забезпечення.

Загальна структурна схема лабораторного макета для вимірювання акустичних характеристик приміщення наведена на рис.2.1.

Віртуальний генератор  $\Gamma$  продукує звуковий сигнал на частоті  $f$ .

$$s(t) = A \sin(2\pi ft), \quad (2.1)$$

де  $A$  – постійна амплітуда звукового сигналу.

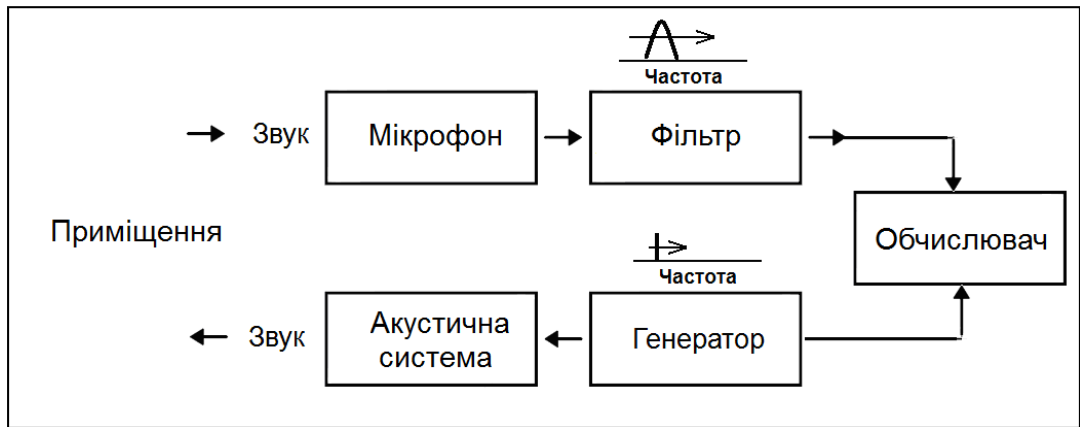


Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема лабораторного макету

Акустична система збуджує приміщення акустичний сигнал відповідно до звукових сигналів генератора:

$$a(t) = K_a(f) \cdot \exp(-j2\pi\varphi_a(f)) \cdot A \sin(2\pi f_1 t), \quad (2.2)$$

де  $K_a(f)$  и  $\varphi_a(f)$  – відповідно модуль і фаза частотної характеристики акустичної системи на частоті  $f$ .

Мікрофон реєструє акустичні сигнали, що пройшли досліджуване приміщення, і видає на своєму виході електричні сигнали:

$$s_M(t) = K_a(f) \cdot K_M(f) \cdot K_n(f) \cdot \exp(-j2\pi(\varphi_a(f) + \varphi_M(f) + \varphi_n(f))) \cdot A \cdot \sin(2\pi f_1 t), \quad (2.3)$$

де  $K_M(f)$  и  $\varphi_M(f)$  – модуль і фаза частотної характеристики мікрофону на частоті  $f$ .

$K_n(f)$  і  $\varphi_n(f)$  – модуль і фаза коефіцієнта частотної характеристики досліджуваного приміщення на частоті  $f$ .

Резонансний фільтр виділяє звуковий сигнал випромінюваної частоти  $f$ , зареєстрований мікрофоном. На блок обчислення надходять одночасно сигнал генератора і зареєстрований сигнал. Після цього можна обчислити коефіцієнт передачі досліджуваного приміщення на випромінюваній частоті:

$$\dot{K}(f) = K_a(f) \cdot K_m(f) \cdot K_n(f) \cdot \exp(-j2\pi(\varphi_a(f) + \varphi_m(f) + \varphi_n(f))) = \frac{s_m(t)}{s(t)}. \quad (2.4)$$

У даній методиці мають бути ідеальними або точно відомими частотні характеристики мікрофона і акустичної системи. В ідеальному випадку дані акустичні пристрої можуть мати рівномірну АЧХ та лінійну ФЧХ в діапазоні досліджуваних частот. Сучасні вимірювальні мікрофони та акустичні системи часто супроводжуються спеціальними файлами для калібрування АЧХ. Ці файли або йдуть в комплекті поставки, або розташовуються на сайті виробника. Крім цього, вимірювальні акустичні пристрої мають бути максимально всіспрямованими.

## 2.2 Перевірка характеристик звукової карти

Отже, для проведення вимірювань знадобиться певне обладнання. Нижче наведено те, що використовується в даній роботі:

- ноутбук Dell Inspiron 1720 з операційною системою Windows 10 Professional 64 bit та встановленим програмними пакетами Arta Software та MATLAB;
- звукова картка E-MU 0404 USB;
- підсилювач Denon PMA-500AE. Він підходить, оскільки має функцію обходу корекції тембру, тонкомпенсації та балансу – Source Direct;
- вольтметр В7-38;
- мікрофон вимірювальний Nady CM 100;
- стійка для мікрофону У її ролі виступає стійка від фотоапарата, що володіє функціями нахилу, повороту та регулювання висоти;
- два кабелі з дільниками, що захищають вхід звукової карти від небезпечних для неї величин напруги. Дільники розпаяні всередині TRS-джеку;

– мікрофонний кабель XLR та кілька кабелів для з'єднання входів/виходів звукової карти та її з'єднання з підсилювачем.

Перед початком безпосередньо вимірювань необхідно переконатися, що вимірювальний тракт має достатню лінійність. Для цього провадиться підключення обладнання за схемою рис. 2.2.

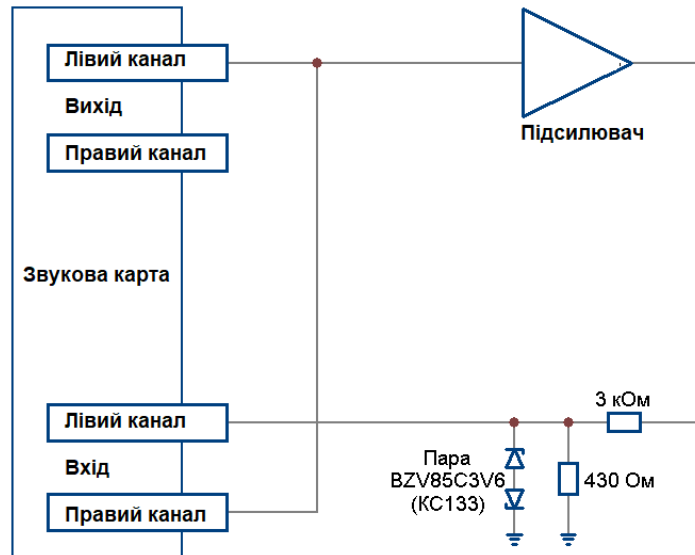


Рисунок 2.2 – Схема перевірки вимірювального тракту

Запускаємо Arta. Для цього в Windows меню "Пуск" необхідно вибрати Усі програми - Arta Software - Arta. Відкриється вікно, яке називається вікном імпульсної характеристики (Impulse Response).

Насамперед проводиться налаштування програми. Для цього переходимо в меню Setup – Audio devices (рис. 2.3).

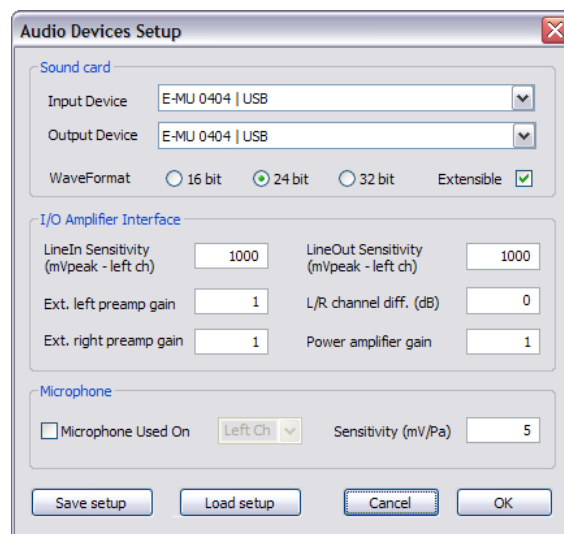


Рисунок 2.3 – Вікно налаштувань програми Arta

У полях Input Device і Output Device вказується звукова карта, що використовується. У полі WaveFormat вибирається розрядність цифрових даних, із якими працюватиме звукова карта. Розробники Arta Software рекомендують використовувати 24 або 32 bit, але тільки в тому випадку, якщо звукова карта, що використовується, є високоякісною. Мотивують це справедливо – далеко не всі звукові карти, призначені для роботи з розрядністю даних 24 bit, мають лінійність на рівні хоча б 16 bit.

Також можлива поява повідомлення про помилку під час запуску вимірювань, якщо звукова карта не підтримує вказану в полі WaveFormat розрядність. При виборі 24 чи 32 bit автоматично встановлюється галочка Extensible. Знімати її не потрібно, інакше під час запуску вимірювань програма видасть помилку. Всі інші поля призначені для роботи з вимірюваним комплексом, що калібрується, тому я їх пропускаю. Виконуємо установки та натискаємо ОК. Переходимо до меню Setup - Calibrate devices (рис. 2.4).

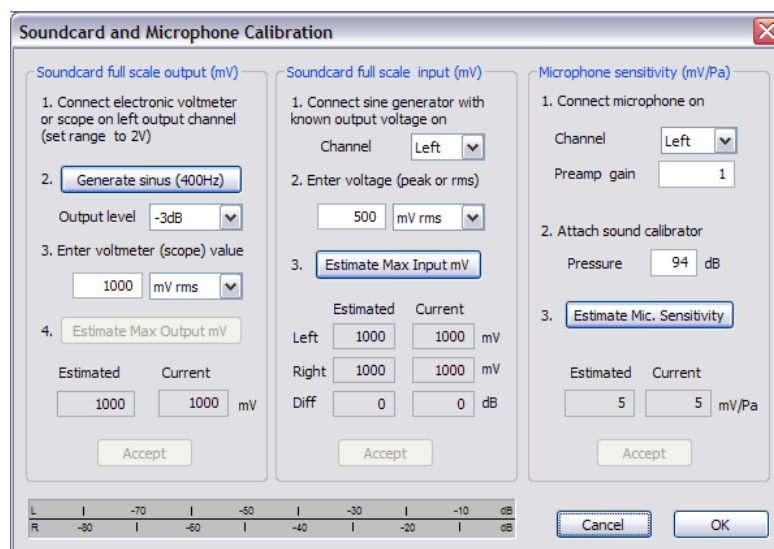


Рисунок 2.4 – Вікно калібрування

Це меню призначене для калібрування вимірювального комплексу. Нас цікавить лише розділ Soundcard full scale output (mV). Тут натискаємо кнопку Generate sinus (400 Hz) та встановлюємо на виході підсилювача необхідну для тесту напругу. Жодних критичних вимог до величини цієї напруги немає,

просто встановлюється не велика і не маленька величина. Я встановив на вольтметрі 0,707 В. Зауважимо, що в полі Output level встановлено значення -3 dB. Після встановлення натискаємо повторно кнопку (зараз з написом Stop Generator) і закриваємо вікно. Переходимо до меню Setup – Analysis parameters (рис. 2.5).

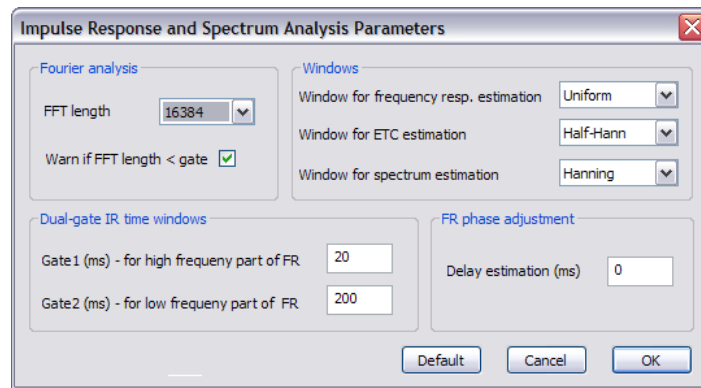


Рисунок 2.5 – Вікно аналізу параметрів

Тут усі установки нам підходять, крім FFT length. Це значення необхідно змінити на 16384. Саме таке, оскільки надалі при вимірюваннях я використовуватиму кількість семплів тестового сигналу - 16384. Коли потрібно змінити (при вимірюваннях залежності нелінійних спотворень від частоти), я про це згадаю. Взагалі бажано, щоб розмір FFT завжди збігався з кількістю семплів тестового сигналу. Переходимо в меню Record - Impulse response/Signal time record (рис. 2.6). Вибираємо вкладку Periodic Noise, якщо вона не вибрана.

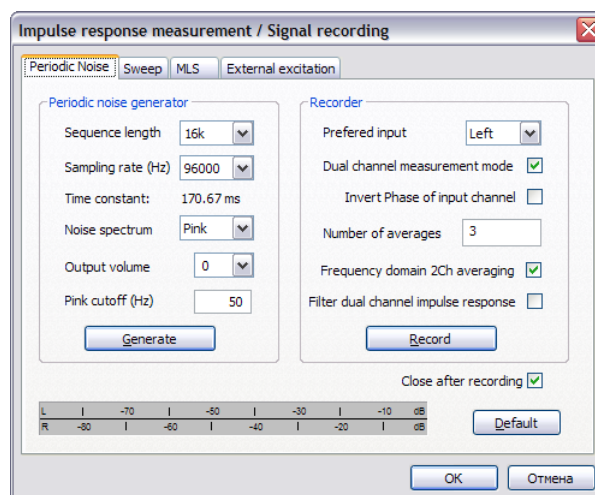


Рисунок 2.6 – Меню Record - Impulse response/Signal time record

Тут, у полі Sequence length (кількість семплів на період тестового сигналу), встановлюємо значення 16k (16384). При використанні частоти дискретизації 96 kHz період становить  $16384/96000 = 170.67$  ms, що в 3.4 рази більше значення, необхідного для вимірювання нижньої межі звукового діапазону — 20 Гц. Збільшувати період, отже як розширення смуги частот вниз, а й збільшення дозволу по частоті. При акустичних вимірюваннях платою за це виступає насичення вимірюного сигналу пізніми відображеннями приміщення.

На інших полях зараз не загострюватимемо увагу, повернемося до них пізніше, при безпосередньо акустичних вимірах. Поки робимо установку параметрів відповідно до зображення і натискаємо кнопку Generate. Внизу, на індикаторі рівня, з'являться рівні вхідних сигналів. За допомогою доступних регулювань чутливості встановлюємо значення в діапазоні -20-10 dB, після чого відключаємо генерацію повторним натисканням кнопки. Тепер натискаємо кнопку Record. Після завершення вимірювань вікно закриється автоматично.

Якщо все пройшло успішно, у вікні імпульсної характеристики має спостерігатись імпульсний відгук системи (рис. 2.7).

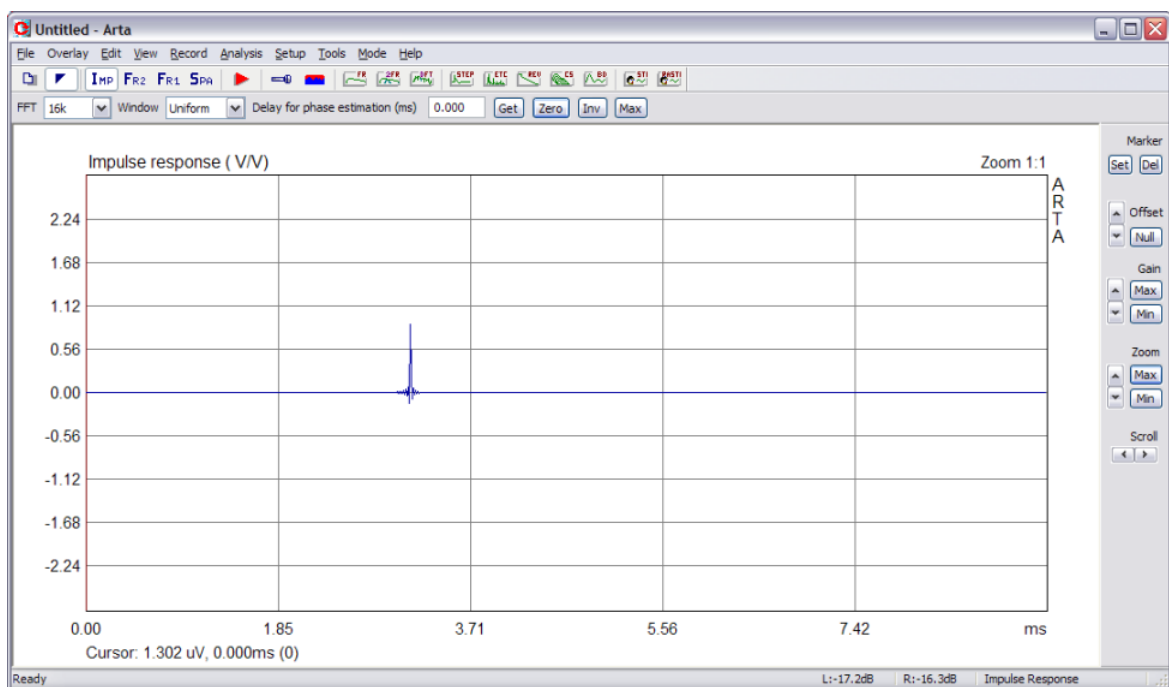


Рисунок 2.7 – Результати вимірювання імпульсного відгуку системи

Для роботи з вікном імпульсної характеристики Arta використовуються курсор і маркер. Курсор встановлюється лівою кнопкою миші та визначає початок тимчасового вікна. Маркер встановлюється та видаляється правою кнопкою миші та визначає кінець часового вікна. Тимчасова різниця між положеннями курсору та маркера – це вікно вимірювань (Gate).

З інформації, що знаходиться всередині цього вікна, проводиться розрахунок графіків АЧХ, ФЧХ, ГВЗ, кумулятивного спектра та графіка розпаду. Інші графіки відображають результати вимірювань на основі повного періоду тестового сигналу. Внизу вікна Impulse Response відображена позиція курсору, що відповідає 0 ms, 0 семплів.

У цьому випадку ця позиція і потрібна. Для обчислення фазової характеристики необхідно встановити значення затримки від курсору до максимуму імпульсу. За допомогою розташованих праворуч кнопок Gain, Zoom та Scroll встановлюємо вигляд імпульсу так, щоб були видно позиції семплів, після чого встановлюємо маркер у центр імпульсу та натискаємо на панелі інструментів кнопку Get. У полі Delay for phase estimation (ms) має з'явитися значення затримки (рис. 2.8).

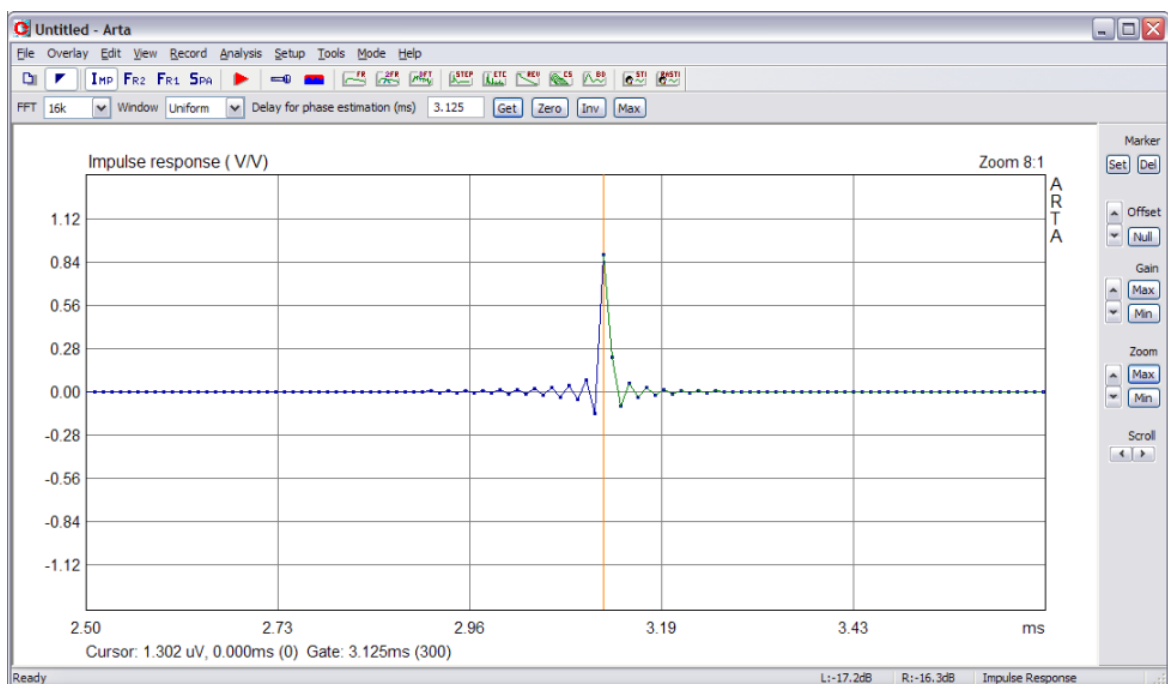


Рисунок 2.8 – Визначення фазової затримки

За допомогою кнопки Zoom робимо видимим все вікно вимірювань (170 ms) та встановлюємо маркер у самому його кінці. У мене довжина вікна вимірювання (Gate) відповідає 170.469 ms (16365 семплів). Тепер можна переглянути результати вимірів. Зараз нас цікавить лише лінійність АЧХ і ФЧХ, тому натискаємо на панелі інструментів кнопку з літерами FR (чи через меню вибираємо Analysis - Single-gated smoothed Frequency response/Spectrum). Відкриється вікно Smoothed frequency response (рис.2.9).

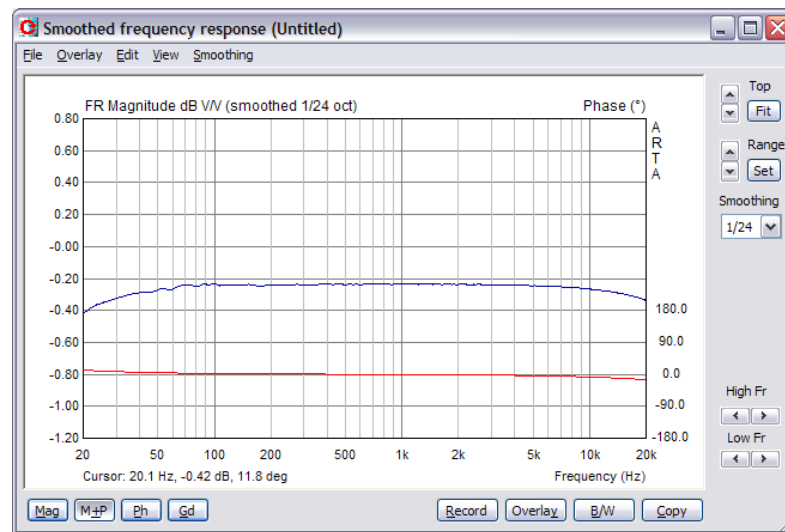


Рисунок 2.9 – Результати вимірювання частотних характеристик

Зліва внизу розташовані чотири кнопки – Mag, M+P, Ph та Gd. Кожна відповідає за відображення графіків відповідно АЧХ, АЧХ+ФЧХ, ФЧХ та ГВЗ. Справа на панелі, у полі Smoothing, можна вибрати згладжування графіка. Я використовую стандартно 1/24 октави, в окремих випадках - сильніше згладжування. Лівою кнопкою миші на графіку проводиться установка курсора, а правою – відкриваються характеристики графіка. Докладніше до цього, а також до інших можливостей, я повернуся пізніше. Зараз результат отримано, і можна бачити повну придатність вимірювального тракту для проведення вимірювань імпедансу і акустичних вимірювань. Поки є результат вимірювань, можна самостійно ознайомитись з меню програми та переглянути, як виглядають графіки для системи, ідеальної щодо динаміків. Наприклад, перехідна характеристика.

Програма не вміє надсилати на принтер результати вимірювань і не вміє експортувати їх у графічний формат, але дозволяє перенести до буфера обміну. Для цього в кожному вікні є кнопка Copy (або через меню Edit - Copy). Після її натискання відкриється вікно Copy to Clipboard (рис. 2.10).

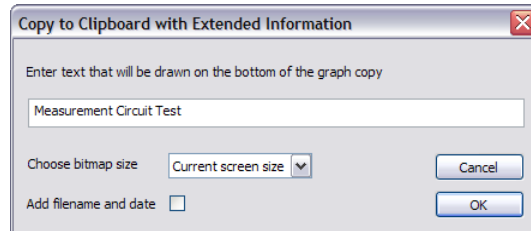


Рисунок 2.10 – Вікно Copy to Clipboard

У текстовому полі можна написати коментар до графіка, а поле Choose bitmap size вибрати зі списку розмір зображення. Галочка Add filename and date додає до графіка ім'я файлу імпульсної характеристики та поточну дату. Наприклад, результат показаний нижче (рис. 2.11).

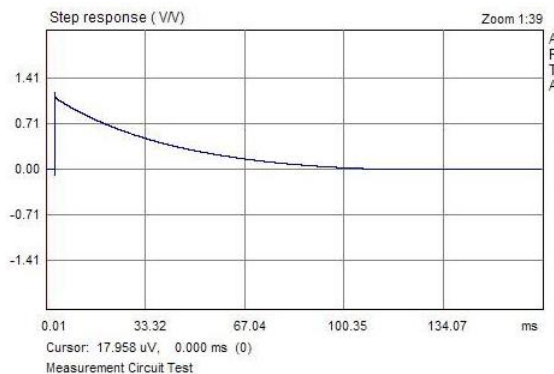


Рисунок 2.11 – Результати збереження імпульсної характеристики

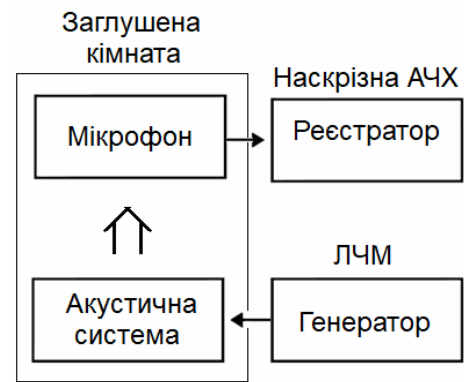
### 2.3 Перевірка характеристик акустичного тракту

Можна виміряти параметри вимірювальних акустичних пристроїв, розташувавши мікрофон безпосередньо біля акустичної системи (рис.2.12, а). Для уникнення впливу приміщення на результати перевірки краще розміщувати акустичні пристрої в заглушеній камері.

На рис.2.12 (б) наведена структурна схема для вимірювання та аналізу характеристик акустичного тракту.



а)



б)

Рисунок 2.12 – Перевірка характеристик акустичного тракту

Крім того, застосовані акустичні пристрої (мікрофони і акустичні системи) мають бути максимально всепрямованими.

#### 2.4 Загальна методика вимірювання

Структурна схема лабораторної установки для дослідження акустичних характеристик приміщень наведена на рис.2.13.

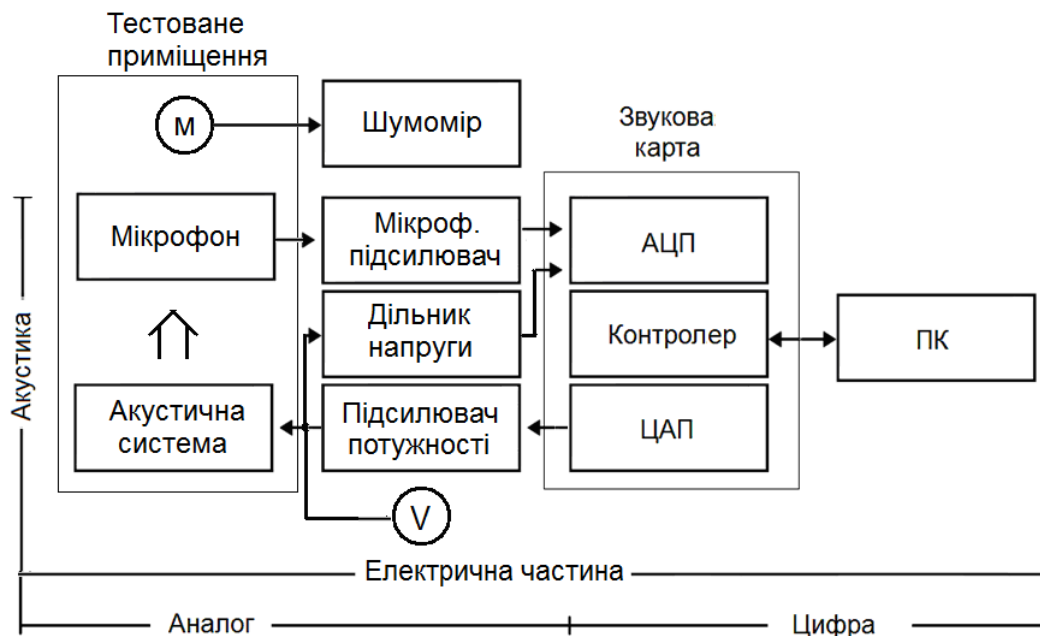


Рисунок 2.13 – Структурна схема лабораторної установки для дослідження акустичних характеристик приміщень

Основою лабораторної установки є персональний комп'ютер ПК із зовнішньою звуковою картою. Звукова карта під'єднується до ПК за допомогою кабеля USB. Вихід звукової карти підключений до підсилювача потужності, який в свою чергу підключений до акустичної системи (АС). До входу АС підключено вольтметр  $V$  для вимірювання діючого значення напруги звукових частот. Вольтметр потрібний для того, щоби встановити на вході АС номінальну напругу сигналу, до якої колонка зберігає нормовані в паспорті значення КНС, АЧХ, ФЧХ і т. ін.

## 2.5 Висновки по розділу 2

В розділі 2 розроблено методику вимірювань і структурну схему лабораторної установки для дослідження акустичних характеристик приміщень.

Основою лабораторної установки є персональний комп'ютер ПК із зовнішньою звуковою картою. Звукова карта під'єднується до ПК за допомогою кабеля USB. Вихід звукової карти підключений до підсилювача потужності, який в свою чергу підключений до акустичної системи (АС). До входу АС підключено вольтметр  $V$  для вимірювання діючого значення напруги звукових частот. Вольтметр потрібний для того, щоби встановити на вході АС номінальну напругу сигналу, до якої колонка зберігає нормовані в паспорті значення КНС, АЧХ, ФЧХ і т. ін.

Досліджено характеристики вимірювального тракту:

- АЧХ і ФЧХ звукової карти;
- АЧХ і ФЧХ мікрофону і акустичної системи.

Отримані характеристики потрібні для корекції параметрів вимірювальної лабораторної установки.

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИМІЩЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗРОБЛЕНОГО ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТУ

3.1 Розробка програми для дослідження акустичних характеристик приміщення за допомогою ЛЧМ-сигналу

За типом зростання частоти ЛЧМ розрізняють лінійний, експоненційний, гіперболічний і порядковий ЛЧМ сигнали.

З точки зору радіоелектронних систем, ЛЧМ сигнал, який змінюється в часі, може бути записаний у вигляді:

$$s(t) = A \sin(\theta(t)), \quad (3.1)$$

де  $A$  – незмінна амплітуда ЛЧМ сигналу,

$\theta(t)$  – повна фаза ЛЧМ сигналу в конкретний момент часу  $t$ .

За лінійного закону зміни частоти:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} = f_0 + kt, \quad (3.2)$$

де  $f_0$  – нижня частота діапазону сканування,

$k$  – швидкість сканування частоти, Гц/с.

Отже, миттєва частота сканується лінійно в часі, і  $f_0$  є початковою величиною частоти та визначає швидкість сканування:

$$k = B/T, \quad (3.3)$$

де  $B = f_2 - f_1$  – ширина смуги частот тестового сигналу,

$T$  – тривалість тестового сигналу.

Фаза сигналу має бути обчислена шляхом інтегрування виразу (3.2) за часом:

$$\theta(t) = 2\pi \int f(t) dt = 2\pi \int (f_0 + kt) dt = 2\pi \left( f_0 t + \frac{k}{2} t^2 + \varphi_0 \right), \quad (3.4)$$

де  $\varphi_0$  – початкова фаза звукового сигналу.

З використанням формул (3.1, 3.4), приймаючи початкову фазу звукового сигналу  $\varphi_0 = 0$ , запишемо:

$$s(t) = A \sin \left( 2\pi \left( f_0 t + \frac{(f_1 - f_0)}{2T} t^2 \right) \right). \quad (3.5)$$

У випадку цифрових сигналів:

$$s(n) = A \sin \left( 2\pi \left( f_0 n + \frac{(f_1 - f_0)}{2N} n^2 \right) / f_\partial \right), \quad (3.6)$$

де  $f_\partial$  – частота дискретизації звукового сигналу.

Скрипт в системі MATLAB для формування тестового ЛЧМ-сигналу з тривалістю  $T = 10$  с в діапазоні звукових частот від  $f_0 = 20$  Гц до  $f_1 = 20$  кГц наведено нижче.

```
clear all; close all

Fs = 48000; %частота дискретизації, Гц
T = 10; %тривалість, с
N = T*Fs; %кількість виборок
A = 0.5; %амплітуда
F0= 20; %початкова частота
F1= 20000; %кінцева частота
n=1:N; %номери відліків
t=n*T/N; %поточний час

s=A*sin(2*pi*((F0*n+((F1-F0)/(2*N))*n.^2)/Fs));
```

```

hh=figure
plot(t,s)
xlabel('Час, с','FontSize',14); ylabel('Амплітуда','FontSize',14);
title(['ЛЧМ']);
print(hh,['ЛЧМ'],'-dpng')

sound(s,Fs)

```

На рис. 3.1 показано хвильоформу тестового ЛЧМ сигналу на інтервалі часу 0 ... 0,25 мс.

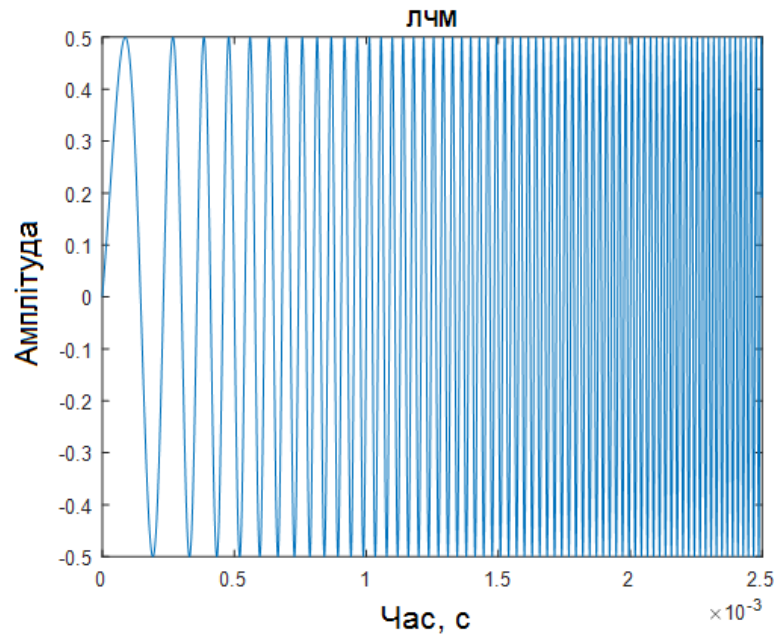


Рисунок 3.1 – Хвильоформа тестового ЛЧМ сигналу на інтервалі часу 0 ... 0,25 мс.

Експоненційний ЧМ сигнал називають також геометричним, так як частота змінюється в геометричному масштабі часу. Інакше кажучи, якщо два відліки в моменти  $t_1$  і  $t_2$  обрані на сигналі таким чином, що відстань між ними дорівнює різниці  $t_2 - t_1$ , то відношення відповідних частот  $f(t_2)/f(t_1)$  також буде константою.

В експоненційному ЧМ сигналі частота зростає по експоненті, як функція часу:

$$f(t) = f_0 k^t, \quad (3.7)$$

де  $f_0$  – це стартова частота за  $t = 0$ ,

$k$  – коефіцієнт швидкості сканування частоти.

На відміну від ЛЧМ сигналу, коли швидкість сканування постійна, у експоненційного швидкість збільшується за експоненційним законом.

Відповідна залежність повної фази сигналу від часу експоненційного ЧМ сигналу записується як інтеграл за частотою:

$$\theta(t) = 2\pi \int f(t) dt = 2\pi f_0 \int k^t dt = 2\pi f_0 \left( \frac{k^{t-1}}{\ln k} \right). \quad (3.8)$$

Відповідною функцією часу для експоненційного ЧМ сигналу синусоїдальної форми є функція фази в радіанах, що може бути записана у вигляді:

$$s(t) = A \sin \left[ 2\pi f_0 \left( \frac{k^{t-1}}{\ln k} \right) \right], \quad (3.9)$$

або для цифрових звукових сигналів:

$$s(n) = A \sin \left[ 2\pi f_0 \left( \frac{k^{n/N-1}}{\ln k} \right) / f_\Delta \right], \quad (3.10)$$

де  $f_\Delta$  – частота дискретизації.

Скрипт випробувальної програми в системі MATLAB для генерації ЧМ-сигналу при експоненційному скануванні тривалістю  $T = 10$  с в діапазоні звукових частот від  $f_0 = 20$  Гц до  $f_1 = 20$  кГц наведено нижче.

```
clear all; close all
```

```

Fs = 48000; %частота дискретизації, Гц
T = 10;     %тривалість, с
N = T*Fs;  %число виборок
A = 0.5;   %амплітуда
F0= 20;    %початкова частота
F1= 20000; %кінцева частота
n=1:N;     %номери відліків
t=n*T/N;   %поточний час
k=(F1/F0)^(1/T);

s=A*sin(2*pi*F0*((k.^(n/N)-1))/log(k)/Fs);

m=1:12000;
hh=figure
plot(t(m),s(m))
xlabel('Время, с','FontSize',14); ylabel('Амплитуда','FontSize',14);
title(['ЕЧМ']);
print(hh,['ЕЧМ'],'-dpng')

sound(s,Fs)

```

На рис. 3.2 показано хвильоформу сформованого експоненційного ЧМ сигналу на ділянці часу 0 ... 5 с.

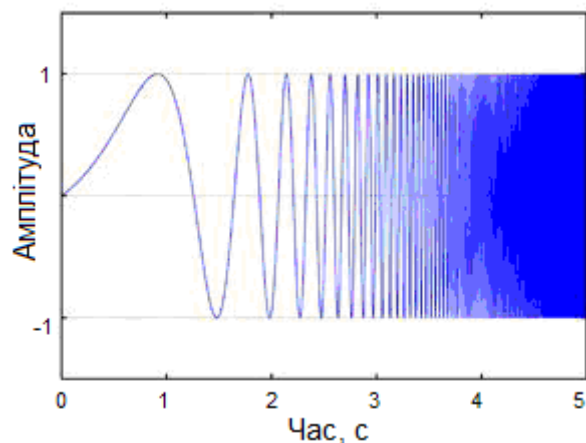


Рисунок 3.2 – Хвильоформа сформованого експоненційного ЧМ сигналу на ділянці часу 0 ... 5 с

3.2 Розробка програми для дослідження акустичних характеристик приміщення за допомогою сигналів MLS

Скорочення MLS означає «Maximum length sequence» – тобто послідовність максимальної довжини. Цю назву дані сигнали отримали як псевдовипадкові періодичні послідовності величин 1 і -1.

Ту ж саму назву носить і метод вимірювання імпульсної акустичної характеристики приміщення, що застосовує в якості збуджуючого сигналу MLS-послідовність. Цей сигнал є ефективним з точки зору обчислювальної складності. Період сигналу MLS дорівнює:

$$P = 2^N - 1, \quad (3.11)$$

де  $N$  – порядок формуючого полінома (кількість регістрів, які використовуються для формування MLS-послідовності).

MLS сигнал отримують за допомогою регістру зсуву (рис.3.3).

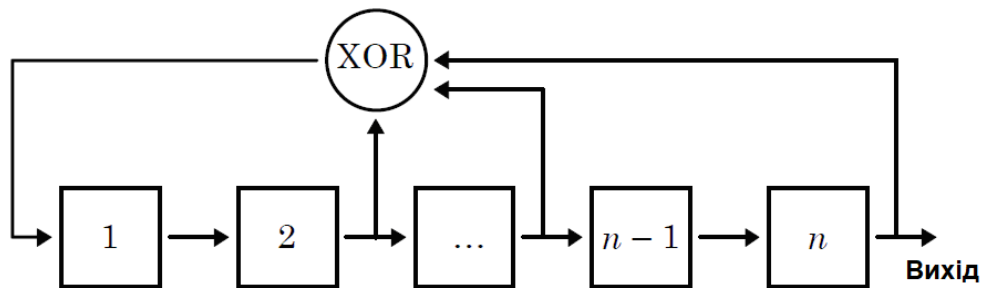


Рисунок 3.3 – Схема отримання сигналу MLS

Часова структура дискретного сигналу MLS показана на рис.3.4, а, а безперервного сигналу MLS – на рис.3.4, б відповідно.

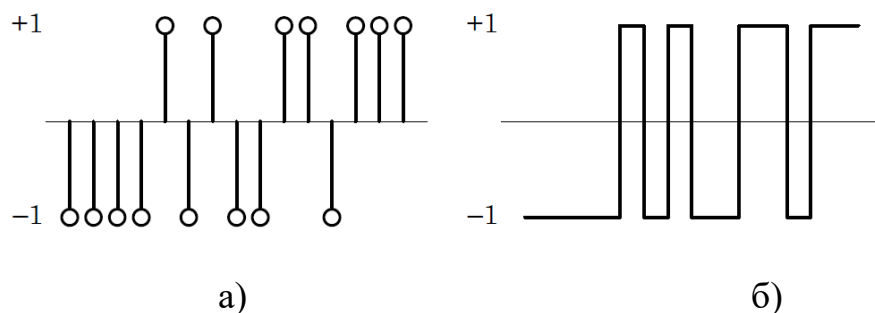


Рисунок 3.4 – Часова структура дискретного сигналу MLS (а) і безперервного сигналу MLS (б)

Кореляційною функції послідовності MLS є дельта-функція. Тобто, імпульсна характеристика досліджуваної системи може оцінюватися за

допомогою розрахунку взаємно-кореляційної функції між випромінюваним сигналом MLS і сигналом мікрофону:

$$r(nT_{\Delta}) = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^{P-n-1} s_{mls}(kT_{\Delta}) \cdot s_{np}((k+n)T_{\Delta}), \quad (3.12)$$

де  $T_{\Delta}$  – період дискретизації звукового сигналу.

На рис.3.5 наведено обчислені функції автокореляції послідовностей сигналів MLS при  $P=15$  (а) та  $P= 8191$  (б).

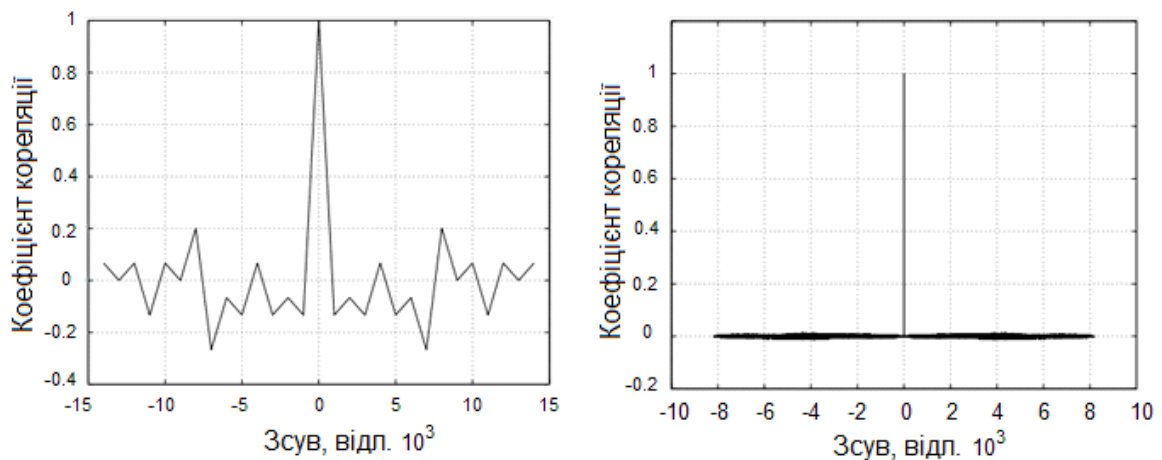


Рисунок 3.5 – функції автокореляції послідовностей сигналів MLS при  $P=15$  (а) та  $P= 8191$  (б)

Інформативним показником того, скільки в тестовому сигналі припадає енергії на одиницю часу, є значення пік-фактору. Це відношення пікової потужності тестового сигналу  $P_{\max}$  до його середньої потужності  $P_{cp}$ :

$$Q = \frac{P_{\max}}{P_{cp}}. \quad (3.13)$$

Для лабораторного макету з вимірювання акустичних характеристик приміщення пік-фактор має бути якнайближчим до 1. Так як амплітудне і середнє значення є рівними, то неможливо отримати величину енергії більше

за одиницю часу. Отже, можна сказати, що тестовий сигнал є максимально схожим з ідеальним імпульсом.

Створити тестовий сигнал MLS в пакеті MATLAB можна за допомогою підпрограми mls. Тестовий сигнал MLS має бути довшим за імпульсний відгук.

Скрипт для генерації тестового сигналу MLS в пакеті MATLAB представлений нижче.

```
clear all; close all

Fs = 48000; %частота дискретизації, Гц
T = 10; %тривалість, с
N = T*Fs; %число вибірок
A = 0.5; %амплітуда
F0= 20; %початкова частота
F1= 20000; %кінцева частота
n=1:N; %номери відліків
t=n*T/N; %поточний час

s=mls(N/2+1);

m=1:240;
hh=figure
plot(t(m),s(m))
xlabel('Время, с','FontSize',14); ylabel('Амплитуда','FontSize',14);
title(['MLS']);
print(hh,['MLS'],'-dpng')
sound(s,Fs)
```

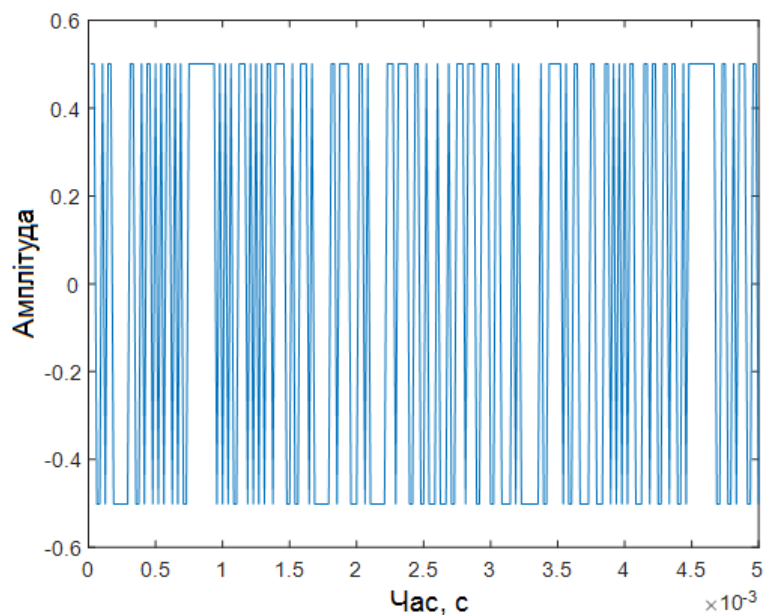


Рисунок 3.7 – Хвильоформа перших 5 мс тестового сигналу MLS

Для подальшого дослідження було отримано записи відгуків приміщення при різних комбінаціях акустичних систем і мікрофонів.

### 3.3 Запис акустичних відгуків досліджуваного приміщення

Скрипт для генерації тестових сигналів ЛЧМ та MLS і для запису акустичних відгуків досліджуваного приміщення в пакеті MATLAB представлений нижче.

```
clear all; close all
Fs = 48000; %частота дискретизації, Гц
T = 10;     %тривалість, с
N = T*Fs;  %число вибірок
A = 0.5;   %амплітуда
F0= 20;    %початкова частота
F1= 20000; %кінцева частота
n=1:N;     %номера відліків
t=n*T/N;   %поточний час
%s=A*sin(2*pi*((F0*n+((F1-F0)/(2*N))*n.^2)/Fs));
s=mls(N/2+1);
m=1:N;
hh=figure
plot(t(m),s(m))
xlabel('Час, с','FontSize',14); ylabel('Амплітуда','FontSize',14);
title(['MLS']);
print(hh,['MLS'],'-dpng')

sound(s,Fs)
recorder = audiorecorder(Fs,16,1);
recordblocking(recorder,T);
s1 = getaudiodata(recorder);

figure
plot(t(m),s1(m))
xlabel('Час, с','FontSize',14); ylabel('Амплітуда','FontSize',14);
title(['Відгук MLS']);
save s s; save s1 s1
```

На рис. 3.8 показано хвильову форму перших 0,5 с відгуку досліджуваного приміщення на тестовий сигнал MLS.

На рис. 3.9 показано хвильову форму повного відгуку досліджуваного приміщення на тестовий сигнал ЛЧМ.

Порівнюючи хвильоформи відгуків на рис.3.8 і рис.3.9, можна відмітити, що за зовнішнім виглядом хвильоформ відгуків на сигнал ЛЧМ відразу можна зробити висновок про нелінійність АЧХ. З хвильоформи відгуку на сигнал MLS подібних висновків зробити неможливо.

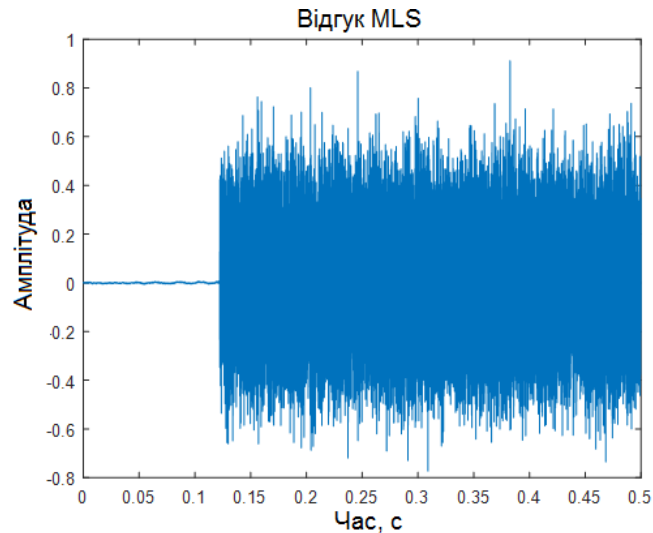


Рисунок 3.8 – Хвильоформа відгуку на тестовий сигнал MLS

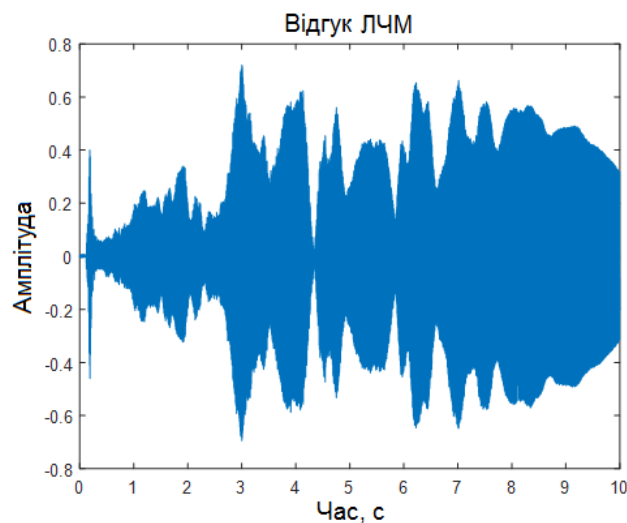


Рисунок 3.9 – Хвильоформа відгуку на тестовий сигнал ЛЧМ

### 3.4 Обчислення акустичних характеристик досліджуваного приміщення

Обчислення акустичних характеристик досліджуваного приміщення проведено шляхом застосування протизгортки відгуку приміщення із тестовим сигналом.

В роботі операція згортки відбувалася в спектральній області. Якщо тестовий сигнал  $s(t)$  є впливом, а прийнятий мікрофоном сигнал  $s_1(t)$  є відгуком приміщення, то на першому етапі було знайдено їх комплексні спектри:

$$\overset{FFT}{\dot{S}(f)} \leftrightarrow s(t); \quad \overset{FFT}{\dot{S}_1(f)} \leftrightarrow s_1(t), \quad (3.14)$$

де  $FFT$  – є операцією швидкого перетворення Фур'є.

Після цього обчислювалася комплексна частотна характеристика досліджуваного приміщення у вигляді добутку:

$$\dot{H}(f) = \dot{S}(f) \cdot \dot{S}_1^*(f), \quad (3.15)$$

де символ  $*$  позначає комплексне сполучене.

АЧХ досліджуваного приміщення визначалася у вигляді модуля комплексної частотної характеристики:

$$H(f) = |\dot{H}(f)|, \quad (3.14)$$

а ФЧХ досліджуваного приміщення – у вигляді аргумента комплексної частотної характеристики:

$$H(f) = \arg\{\dot{H}(f)\}. \quad (3.15)$$

Імпульсна характеристика досліджуваного приміщення визначалася у вигляді зворотного перетворення Фур'є від отриманої раніше комплексної частотної характеристики

$$h(t) \leftrightarrow \overset{FFT}{\dot{H}}(f). \quad (3.16)$$

Скрипт в пакеті MATLAB для обчислення імпульсної характеристики досліджуваного приміщення, а також його АЧХ і ФЧХ наведена нижче.

```

clear all; close all

load s;
load s1;

s1=s1';

Fs = 48000; %частота дискретизації, Гц
T = 10;     %тривалість, с
N = T*Fs;  %число вибірок
A = 0.5;   %амплітуда
F0= 20;    %початкова частота
F1= 20000; %кінцева частота
n=1:N;     %номера відліків
t=n*T/N;   %поточний час
f=n*Fs/(N);
S=fft(s);
S1=fft(s1);
S1=conj(S1);
H=S.*S1;
h=real(ifft(H));

m=1:180;
M=1:0.82*T*Fs/2;
figure
plot(t(m),h(m))
xlabel('Час, с','FontSize',14); ylabel('Амплітуда','FontSize',14);
title(['Імпульсний відгук по MLS']);
figure
plot(f(M),20*log((abs(H(M))/max(abs(H(M))))))
xlabel('Частота, Гц','FontSize',14); ylabel('Амплітуда','FontSize',14);
title(['АЧХ по MLS']);
figure
plot(f(M),((angle(H(M))))))
xlabel('Частота, Гц','FontSize',14); ylabel('Фаза','FontSize',14);
title(['ФЧХ по MLS']);

clear all; close all

load s;
load s1;

```

На рис.3.10 показано хвильоформу імпульсного відгуку досліджуваного приміщення на випробувальний сигнал MLS.

На рис.3.11 показано хвильоформу імпульсного відгуку досліджуваного приміщення на випробувальний сигнал ЛЧМ.

Порівнюючи хвильоформи на рис. 3.10 і рис.3.11, можна помітити їх візуальну схожість і той самий часовий масштаб перехідних процесів в досліджуваному приміщенні. Імпульсний відгук досліджуваного приміщення по тестовому сигналу MLS має трохи більший рівень бічних пелюстків.

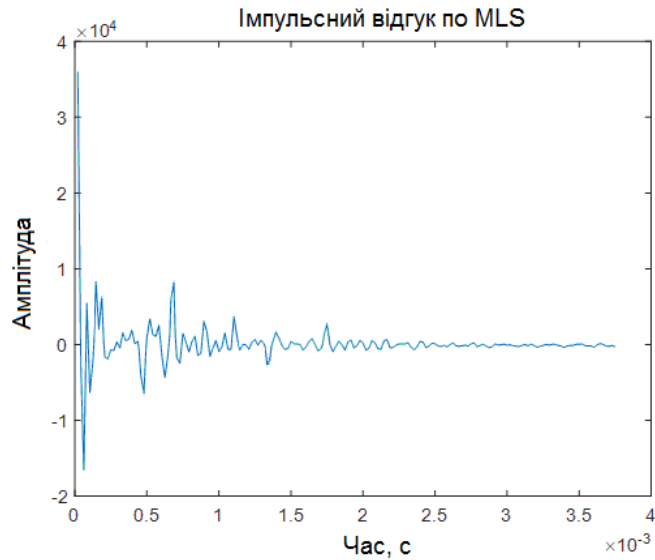


Рисунок 3.10 – Хвильоформа імпульсного відгуку досліджуваного приміщення на тестовий сигнал MLS

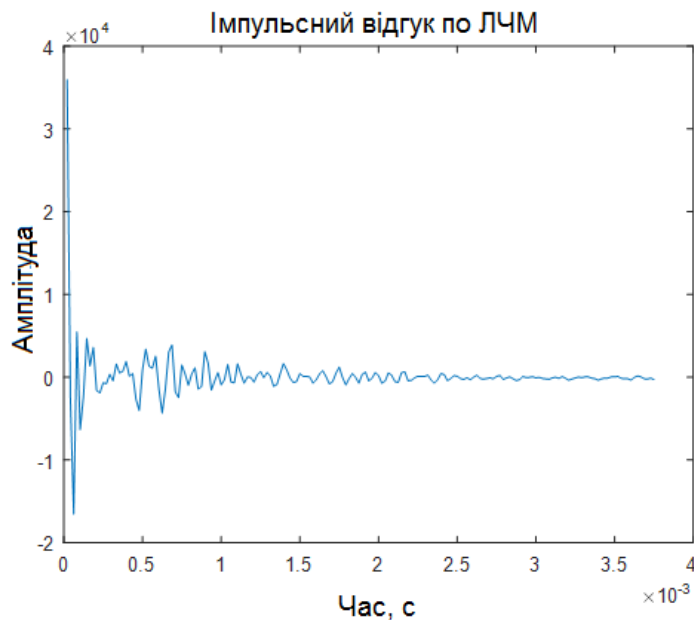


Рисунок 3.11 – Хвильоформа імпульсного відгуку досліджуваного приміщення на тестовий сигнал ЛЧМ

На рис.3.12 наведена АЧХ досліджуваного приміщення на тестовий сигнал ЛЧМ.

На рис.3.13 наведена АЧХ досліджуваного приміщення на тестовий сигнал MLS.

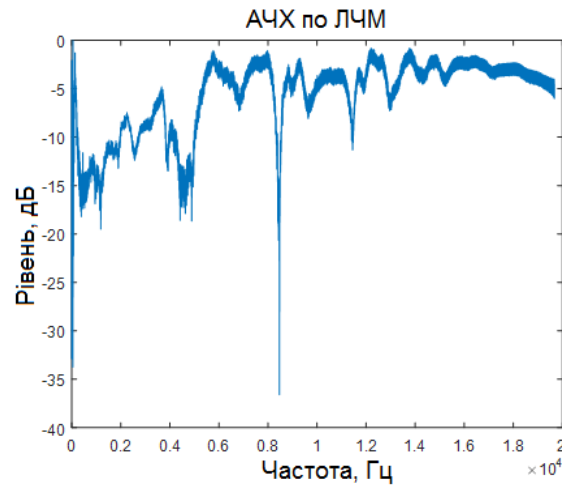


Рисунок 3.12 – АЧХ досліджуваного приміщення на тестовий сигнал ЛЧМ

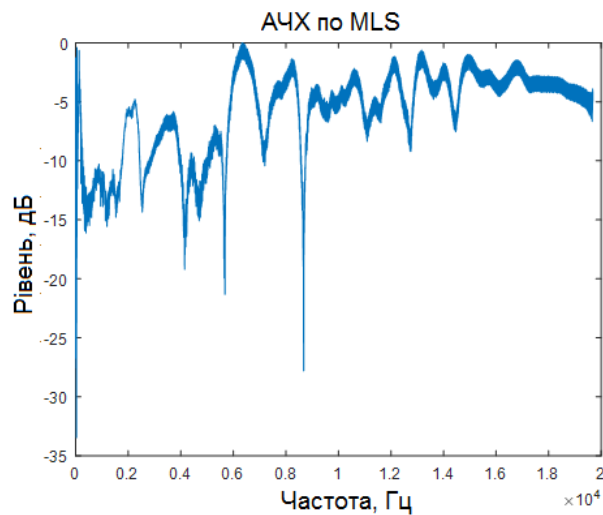


Рисунок 3.13 – АЧХ досліджуваного приміщення на тестовий сигнал MLS

Порівнюючи характеристики на рис. 3.12 і рис.3.13, можна відмітити однакове положення по вісі частот піків і провалів АЧХ. АЧХ по сигналу MLS має більш плавний вигляд.

На рис.3.14 наведена ФЧХ досліджуваного приміщення на тестовий сигнал ЛЧМ.

На рис.3.15 наведена ФЧХ досліджуваного приміщення на тестовий сигнал MLS.

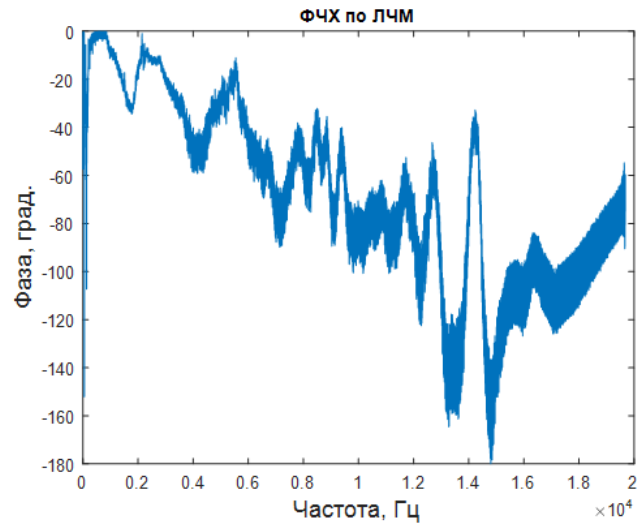


Рисунок 3.14 – ФЧХ досліджуваного приміщення на тестовий сигнал ЛЧМ

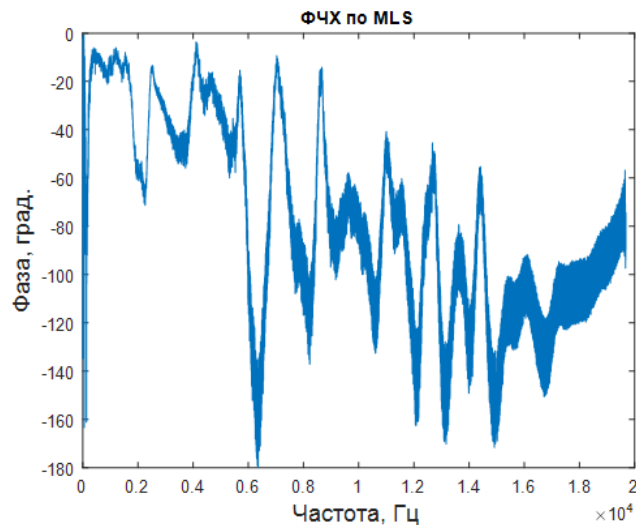


Рисунок 3.15 – ФЧХ досліджуваного приміщення на тестовий сигнал MLS

Порівнюючи характеристики на рис. 3.14 і рис.3.15, можна відмітити те ж саме положення на вісі частот змін ФЧХ. Тим не менш абсолютні величини фаз помітно відрізняються. Скоріш за все, це можна пояснити невиконанням умов стаціонарності під час проведення досліджень.

### 3.5 Висновки по розділу 3

Порівнюючи графіки імпульсних характеристик досліджуваного приміщення, можна помітити їх візуальну схожість і той самий часовий масштаб перехідних процесів в досліджуваному приміщенні. Імпульсний відгук досліджуваного приміщення по тестовому сигналу MLS має трохи більший рівень бічних пелюстків.

Порівнюючи графіки АЧХ, можна відмітити однакове положення по вісі частот піків і провалів АЧХ. АЧХ по сигналу MLS має більш плавний вигляд.

Порівнюючи графіки ФЧХ, можна відмітити те ж саме положення на вісі частот змін ФЧХ. Тим не менш абсолютні величини фаз помітно відрізняються. Скоріш за все, це можна пояснити невиконанням умов стаціонарності під час проведення досліджень.

## ВИСНОВКИ

Акустичні характеристики приміщення є складними функціями, що залежать від багатьох параметрів. Це не тільки об'єм приміщення, площа обмежуючих поверхонь, коефіцієнти звукопоглинання покриттів. Звучання визначається імпульсною характеристикою приміщення, яка залежить від взаємного розташування джерела звуку і приймача, їх орієнтації і розташування відносно перешкод і т.д.

Отже, дослідження акустичних характеристик приміщень є складною задачею, але одночасно представляє великий інтерес із навчальної, наукової і комерційної точок зору. При тому, коли йдеться про навчальні задачі, вимірювальна техніка не має бути дорогою, а дослідження мають відбуватися так, щоби можна було швидко змінювати алгоритми вимірювання, оброблення і представлення результатів вимірювань.

В кваліфікаційній роботі магітра розроблено концепцію лабораторного макету для вимірювання і аналізу акустичних параметрів приміщень з використанням доступних акустичних систем і мікрофонів на базі персонального комп'ютера зі звуковою картою і власним програмним забезпеченням в середовищі MATLAB. Експериментально досліджено можливості спроектованої системи ж вимірювання акустичного імпульсного відгуку приміщення, його АЧХ і ФЧХ.

В розділі 2 розроблено методика вимірювань і структурну схему лабораторної установки для дослідження акустичних характеристик приміщень.

Основою лабораторної установки є персональний комп'ютер ПК із зовнішньою звуковою картою. Звукова карта під'єднується до ПК за допомогою кабеля USB. Вихід звукової карти підключений до підсилювача потужності, який в свою чергу підключений до акустичної системи (АС). До входу АС підключено вольтметр V для вимірювання діючого значення напруги звукових частот. Вольтметр потрібний для того, щоби встановити на

вході АС номінальну напругу сигналу, до якої колонка зберігає нормовані в паспорті значення КНС, АЧХ, ФЧХ і т. ін.

Досліджено характеристики вимірювального тракту:

- АЧХ і ФЧХ звукової карти;
- АЧХ і ФЧХ мікрофону і акустичної системи.

Отримані характеристики потрібні для корекції параметрів вимірювальної лабораторної установки.

Порівнюючи графіки імпульсних характеристик досліджуваного приміщення, можна помітити їх візуальну схожість і той самий часовий масштаб перехідних процесів в досліджуваному приміщенні. Імпульсний відгук досліджуваного приміщення по тестовому сигналу MLS має трохи більший рівень бічних пелюстків.

Порівнюючи графіки АЧХ, можна відмітити однакове положення по вісі частот піків і провалів АЧХ. АЧХ по сигналу MLS має більш плавний вигляд.

Порівнюючи графіки ФЧХ, можна відмітити те ж саме положення на вісі частот змін ФЧХ. Тим не менш абсолютні величини фаз помітно відрізняються. Скоріш за все, це можна пояснити невиконанням умов стаціонарності під час проведення досліджень.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. F. Alton Everest, Ken Pohlmann. Master Handbook of Acoustics, Seventh Edition. McGraw Hill TAB, 2021. – 636 p.
2. Steven L. Garrett. Understanding Acoustics: An Experimentalist's View of Sound and Vibration (Graduate Texts in Physics) 2nd ed., 2020. – 462 p.
3. Electroacoustics. Merriam-Webster.com Dictionary, Merriam-Webster. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/electroacoustics> (дата звернення 11.12.2024).
4. Daniel M. Thompson. Understanding Audio. Berklee Press. 2018. – 484 p.
5. Schroeder R.M. New Method of Measuring Reverberation Time / JASA, 1964. – P.409-412.
6. M. Jeub. Blind Reverberation Time Estimation. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35740-blind-reverberation-time-estimation>.
7. David Griesinger Impulse Response Measurements Using All-Pass Deconvolution// 11th International Conference: Test & Measurement, 1992, с. 308-321.
8. Волощук Ю.І. Сигнали та процеси у радіотехніці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів, том 1. - Харків: «Компанія СМІТ», 2003. – 580 с.
9. Волощук Ю.І. Сигнали та процеси у радіотехніці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів, том 2. - Харків: «Компанія СМІТ», 2003. – 444 с.
10. Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer. Digital Signal Processing. Prentice-Hall, 1975. – 585 p.
11. Lawrence R. Rabiner and Ronald W. Schaffer. Introduction to Digital Speech Processing. – Publishers Inc., 2007. – 213 p.
12. Atul Puri, Tsuhan Chen. Multimedia Systems, Standards, and Networks (Signal Processing and Communications, Band 2). – Marcel Dekker Inc., 2000. – 636 p.

13. Digital Signal Processing for Multimedia Systems / Edited By Keshab K. Parhi, Takao Nishitani. – Boca Raton: CRC Press, 1999. – 880 p.
14. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин, С.А. Шейко, И.С. Селезнев. Экспериментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37.
15. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin, I. Selieznov. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. 4 p.
16. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Koryttsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles/ Telecommunications and Radio Engineering. – New York. – 2020. – Vol. 79, №9. – P.769-780.
17. V. Kartashov, V. Oleynikov , I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35-39.
18. V.M. Kartashov, G.I. Sidorov, S.A. Sheiko, M.M. Kolendovskaya, O.Yu. Sergienko. Principles of construction and assessment of technical characteristics of multi-frequency atmospheric sodar in the humidity measurement mode. Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 79. N.4. 2020. – pp. 323-333.
19. S. Sheiko. Study of the method for assessing atmospheric turbulence by the envelope of sodar signals // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2/5 (92). – April, 2018. – p. 33–40.
20. Сідоров Г.І., Шейко С.О., Шаповалов С.В., Полонська А.С., Дмитренко А.І. Акустичний метод вимірювання турбулентного стану

атмосферного прикордонного шару // Радиотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2018. – Вип. 192. – С. 46–50.

21. Valerii V. Semenets, V. M. Kartashov, V. I. Leonidov. Registration of refraction phenomenon in the problem of acoustic sounding of atmosphere in airports zone. Telecommunications and Radio Engineering. Volume 77, Issue 5, 2018. – P. 461-468.

22. Бабак К.В. Технічні аспекти створення електронної музичної композиції // 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – с. 57-58.

23. Свірідок М.С. Технічні аспекти створення музичної композиції // 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – с. 104-105.

24. Курдиш В.В. Алгоритм синхронізації звуку і відео в інтерв'ю // 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – с. 129-130.

25. Древальський Р.В. Дослідження методу корекції звуку для компенсації впливу приміщення /25-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2021. – с. 119-120.

26. Удовік Д.В. Дослідження методів зменшення еквівалентної реверберації в звукозаписі: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2022 р. – 65 с.

27. Тарусін В.Ю. Дослідження методів компенсації спотворень в звукових трактах: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2022 р. – 78 с.

28. Мезенцев І.О. Дослідження алгоритмів автоматизованої еквалізації звукозапису голосу: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2022 р. – 69 с.