

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)

Методи обробки звуку з використанням ефекту реверберації  
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МІМ-20-1  
Древальський Р.В.  
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Медіаінженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Шейко С.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Карташов В.М.  
(прізвище, ініціали)

2021 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

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Медіаінженерія

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Древальському Руслану Владиславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи обробки звуку з використанням ефекту реверберації.

затверджена наказом по університету від " 08 " 11 2021 р. № 1676 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 08.12.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз процесів реверберації звуку в приміщеннях і їх впливу на сприйняття звукової картини. Виконати теоретичне обґрунтування методів штучної реверберації. Дослідити алгоритми формування ранніх і пізніх відбиттів. Оцінити вплив їх налаштувань на часові характеристики ревербераційного відгуку і реалістичність сприйняття ефекту реверберації. Виконати дослідження конволюційного методу реверберації. Визначити оптимальні параметри імпульсного збудження приміщення. Провести обробку реального мовного сигналу диктора конволюційним методом.

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

Вступ

1. Аналіз процесів реверберації і їх впливу на сприйняття звукової картини.

2. теоретичне обґрунтування методів штучної реверберації.

3. Експериментальне дослідження конволюційного методу штучної реверберації.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Просторова обробка звуку.
2. Постановка задачі.
3. Характеристики ревербераційного відгуку.
4. Формування ранніх відбиттів.
5. Формування пізніх відбиттів.
6. Оцінка впливу на звучання.
7. Вплив параметрів реверберації на звучання.
8. Алгоритм конволюційної реверберації.
9. Запис імпульсної характеристики.
10. Дослідження імпульсного збуджуючого впливу.
11. Акустичні сигнали збудження.
12. Експеримент з запису імпульсних характеристик.
13. Конволюційна обробка голосу.
14. Висновки.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	02.11.21–10.11.21	
2	Теоретичне обґрунтування методу	11.11.21–17.11.21	
3	Дослідження програмних методів	18.11.21–24.11.21	
4	Дослідження імпульсного впливу	25.11.21–1.12.21	
5	Дослідження конволюційного методу	02.12.21–8.12.21	
6	Обробка результатів досліджень	25.11.21–8.12.21	
7	Графічна частина роботи	25.11.21–06.12.21	
8	Перевірка керівником	06.12.21–07.12.21	
9	Перевірка на академічний плагіат	06.12.21	
10	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	07.12.21–08.12.21	

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 08.11.2021 р. \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник роботи (проекту) \_\_\_\_\_

(підпис)

проф. Шейко С.О.

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 75 сторінок, 34 рисунка, 1 таблиця, 31 джерело.

АКУСТИЧНА ОБРОБКА, ІМПУЛЬСНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМІЩЕННЯ, РЕВЕРБЕРАЦІЯ, ПІЗНІ ВІДБИТТЯ, РАННІ ВІДБИТТЯ, ЧАС РЕВЕРБЕРАЦІЇ, MATLAB

Об'єкт дослідження – процес обробки звукових сигналів для задачі створення ефекту штучної реверберації.

Мета роботи є дослідження алгоритмів та складових частин ревербераційної обробки звуку, оцінка впливу цієї обробки на формування ревербераційного відгуку та реалістичність звучання.

Методи дослідження – модельний експеримент, натурний експеримент, статистична обробка експериментальних даних.

Проведено аналіз процесів реверберації звуку в приміщеннях і їх впливу на сприйняття звукової картини. Виконано теоретичне обґрунтування методів штучної реверберації. Досліджені алгоритми формування ранніх і пізніх відбиттів. Оцінено вплив їх налаштувань на часові характеристики ревербераційного відгуку і реалістичність сприйняття ефекту реверберації. Виконано дослідження конволюційного методу реверберації. Визначені оптимальні параметри імпульсного збудження приміщення. Отримано набір імпульсних характеристик різних приміщень. Проведено обробку реального мовного сигналу диктора конволюційним методом.

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка к квалификационной работе: 75 страниц, 34 рисунка, 1 таблица, 31 источник.

### АКУСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОМЕЩЕНИЯ, РЕВЕРБЕРАЦИЯ, ПОЗДНИЕ ОТРАЖЕНИЯ, РАННИЕ ОТРАЖЕНИЯ, ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ, MATLAB

Объект исследования – процесс обработки звуковых сигналов для задачи сотворения эффекта искусственной реверберации.

Целью работы является исследование алгоритмов и составных частей реверберационной обработки звука, оценка влияния этой обработки на формирование реверберационного отклика и реалистичность звучания.

Способы исследования – модельный эксперимент, натурный эксперимент, статистическая обработка экспериментальных данных.

Проведен анализ процессов реверберации звука в помещениях и их влияние на восприятие звуковой картины. Выполнено теоретическое обоснование методов искусственной реверберации. Исследованы алгоритмы формирования ранних и поздних отражений. Оценено влияние их настроек на временные характеристики реверберационного отклика и реалистичность восприятия эффекта реверберации. Выполнены исследования конволюционного метода реверберации. Определены оптимальные параметры импульсного возбуждения помещения. Получен набор импульсных характеристик разных помещений. Произведена обработка реального речевого сигнала диктора конволюционным методом.

## ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 75 pages, 34 figures, 1 table, 31 sources.

ACOUSTIC TREATMENT, PULSE CHARACTERISTICS OF THE PREMISES, REVERBERATION, LATE REFLECTIONS, EARLY REFLECTIONS, REVERBATION TIME, MATLAB

The object of study – the process of processing audio signals for the task of creating the effect of artificial reverberation.

The aim of the work is to study the algorithms and components of reverberation sound processing, to assess the impact of this processing on the formation of reverberation response and realistic sound.

Research methods – model experiment, field experiment, statistical processing of experimental data.

The analysis of processes of reverberation of sound in rooms and their influence on perception of a sound picture is carried out. Theoretical substantiation of artificial reverberation methods is performed. Algorithms for the formation of early and late reflections are studied. The influence of their settings on the temporal characteristics of the reverberation response and the realism of the perception of the reverberation effect is estimated. The study of the convolutional method of reverberation is performed. The optimal parameters of pulse excitation of the room are determined. A set of impulse characteristics of different rooms is obtained. The real speech signal of the speaker was processed by the convolution method.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	9
Вступ.....	10
<b>1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ РЕВЕРБЕРАЦІЇ ЗВУКУ В ПРИМІЩЕННЯХ І ЇХ ВПЛИВУ НА СПРИЙНЯТТЯ ЗВУКОВОЇ КАРТИНИ.....</b>	<b>12</b>
1.1 Історія розвитку поняття про реверберацію.....	12
1.2 Характеристики звукових звиль.....	14
1.3 Поширення звукових хвиль в приміщеннях.....	17
1.4 Загальна фізика процесу поширення звуку в приміщенні.....	18
1.5 Статистична теорія реверберації.....	21
1.6 Ефективна (еквівалентна) реверберація.....	29
1.7 Хвильова теорія реверберації.....	32
1.8 Висновки по розділу 1.....	34
<b>2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОЇ РЕВЕРБЕРАЦІЇ.....</b>	<b>36</b>
2.1 Звуковий ефект «ехо».....	36
2.2 Звуковий ефект – реверберація.....	38
2.3 Алгоритми реверберації.....	43
2.4 Конволюційний алгоритм реверберації.....	44
2.5 Висновки по розділу 2.....	50
<b>3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНВОЛЮЦІЙНОГО МЕТОДУ ШТУЧНОЇ РЕВЕРБЕРАЦІЇ.....</b>	<b>52</b>
3.1 Постановка задачі.....	52
3.2 Розробка методики запису імпульсної характеристики.....	54
3.3 Дослідження сигналів імпульсного збуджуючого впливу.....	56
3.4 Експериментальний запис імпульсних характеристик.....	61
3.5 Конволюційна обробка дикторського голосу.....	64
3.6 Висновки по розділу 3.....	65

Висновки.....	67
Перелік посилань.....	72
Додаток А. Графічний матеріал.....	76
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	91

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Система озвучування – сукупність засобів і апаратів, за допомогою яких забезпечується належний розподіл звукової енергії, випромінюваної гучномовними пристроями.

Розподілена система – при якій гучномовці розподілені по всій зоні розташування слухачів, і кожен забезпечує чутність на певній ділянці цієї зони.

Нерівномірність озвучування – різниця між максимальним і мінімальним рівнями поля для прямого звуку.

Акустичне відношення – відношення щільності енергії відбитих звукових хвиль до щільності енергії прямого звуку.

Час реверберації – час загасання звуку в приміщенні.

Чіткість голосу – ступінь, з якою мова може бути зрозуміла (розшифрована) слухачами.

AI (articulation Index) – індекс артикуляції.

% ALcons (percentage Articulation Loss of Consonants) – відсоток артикуляційних втрат приголосних.

STI (speech transmission index) – індекс передачі мови.

RASTI (rapid speech transmission index) – швидкий індекс передачі мови.

SII (speech intelligibility index) – індекс розбірливості мови.

RT – час реверберації.

Direct SPL – рівень звукового тиску прямого звуку.

D / R – відношення прямого звуку до відбитого.

C50 – коефіцієнт чіткості мови.

## ВСТУП

Реверберація – це процес поступового зменшення інтенсивності звуку при його багаторазових відбиттях. Іноді під реверберацією розуміється імітація цього ефекту з допомогою ревербераторів.

Ехосигнал є відбитою від перешкоди звуковою хвилею. Явище реверберації полягає у суперпозиції різних ехосигналів від джерела звуку. Ефект реверберації можна спостерігати у закритих приміщеннях після вимкнення джерела звуку. Художньо-естетичне враження, створюване реверберацією, залежить від контексту звукового твору та визначається у вищих відділах головного мозку. Зазвичай надмірна тривалість реверберації призводить до неприємної гучності, «порожнечі» приміщення, а недостатня — різкого уривчастого звучання, позбавленого музичної «соковитості». Штучно створювана реверберація в певних межах сприяє покращенню якості звучання, створюючи відчуття приємного резонансу приміщення.

При записі мови, співу, музики, а також створення різних шумових ефектів використання штучної реверберації є складовою загальної обробки аудіосигналу. Такий вид обробки визначається як технічними умовами проведення запису, і художньо-естетичними завданнями. Реверберацію використовують для покращення та підкреслення художньої виразності мови, співу, звучання окремих музичних інструментів. Так, наприклад, при записі музичних програм у приміщенні з незадовільною акустикою або малого для даного складу виконавців обсягу зазвичай не вдається отримати необхідне співвідношення між гучністю та чіткістю звучання. У цьому випадку застосування штучної реверберації дозволяє досягти покращення якості звучання музичної програми. Аналогічно, реверберація допомагає створити необхідне акустичне забарвлення голосу або інструменту при записі вокаліста або соло інструменту, коли він «тоне» в звучанні супроводжуючого ансамблю.

За допомогою реверберації можна створити ефект наближення та видалення джерела звуку. І тому поступово змінюють рівень реверберації, створюючи ілюзію зміни акустичного ставлення, отже, і враження зміни звукового плану. При озвучуванні відео або звуковому оформленні презентації нерідко виникає потреба підкреслити акустичну обстановку того чи іншого місця дії. Для цього використовують ефект реверберації.

Ефект реверберації може нести як характер зовнішнього оформлення, а й використовуватися як посилення драматичного впливу. Відомо, наприклад, яка дія робить шепіт, записаний з більшим часом реверберації. Необхідно також пам'ятати, що на тлі музики, записаної з реверберацією, спостерігається більш чітка розбірливість мови, ніж при накладенні музику, записану без реверберації. Проте слід уникати надмірного збільшення реверберації, оскільки це може позначитися чіткості звучання.

В кваліфікаційній роботі досліджуються основні види програмної ревербераційної обробки сигналів, оцінюється вплив параметрів ревербераторів на реалістичність звучання. Крім того досліджуються можливості і особливості застосування перспективного конволюційного методу реверберації, який поєднує програмну обробку з попередніми апаратними вимірюваннями.

Об'єкт дослідження – процес обробки звукових сигналів для задачі створення ефекту штучної реверберації.

Мета роботи є дослідження алгоритмів та складових частин ревербераційної обробки звуку, оцінка впливу цієї обробки на формування ревербераційного відгуку та реалістичність звучання.

Методи дослідження – модельний експеримент, натурний експеримент, статистична обробка експериментальних даних.

# 1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ РЕВЕРБЕРАЦІЇ ЗВУКУ В ПРИМІЩЕННЯХ І ЇХ ВПЛИВУ НА СПРИЙНЯТТЯ ЗВУКОВОЇ КАРТИНИ

## 1.1 Історія розвитку поняття про реверберацію

Витоки архітектурної (будівельної) акустики сягають глибокої давнини. Акустичні задачі у ті часи ставилися і вирішувалися у зв'язку з будівництвом гігантських спочатку культових, а згодом та інших громадських споруд – залів для зборів та видовищ.

Зодчі Ассирії, Вавилону, Стародавнього Єгипту в V-II тисячоліттях до н.е. будували храми, що мали не тільки виразну архітектуру, але й вражаючу акустику. Їм, мабуть, вже були відомі закони поширення та відбиття звукових хвиль. Користуючись ними, вони досягали акустичних ефектів, що вражали уяву тих, хто молився.

Інші, хоча й такі ж сильні почуття збуджувало мистецтво Давньої Греції (VII-IV ст. до н.е.) – однієї з вершин світової цивілізації. Давнім грецьким храмам та іншим громадським спорудам властива пропорційність частин, вона визначила їх високі акустичні якості. Раціональність прийнятих давніми греками акустичних рішень згодом була підтверджена наукою нашого часу.

Традиції грецьких архітекторів були продовжені їх римськими послідовниками у VII-I ст. до нашої ери. Римські театри на відкритому повітрі були подібні до грецьких, хоча на відміну від них будувалися не тільки на природних схилах, але і на горизонтальних ділянках. Типовим прикладом такого театру служить амфітеатр Флавія – Колізей на 56 тис. глядачів, збудований у 80-90 рр. н. е.

В наш час потрібне встановлення систем звукопідсилення навіть у залах місткістю 200...300 осіб. Тому здаються фантастичними свідчення істориків про місткість давніх грецьких та римських театрів, що обслуговуються природною звучністю голосів акторів. Так, театр Помпея

містив 17800 людей, театр Марцелла у Римі – 20 тис. людей. Якщо навіть ці дані сильно перебільшені (за сучасними оцінками, названі театри вміщували відповідно 5 та 7 тис. осіб), то здається дивом, що у цих гігантських театрах досягали задовільної звучності на місцях для слухачів. Відомо, що в маски акторів, що зображують різні емоції дійових осіб, було вбудовано рупори, що спрямовували звук у бік глядачів.

У XVIII та на початку XIX ст. увагу стали приділяти спорудженню концертних та театральних залів. Розвивалося синтетичне музичне мистецтво – опера. Розумним вибором геометричної форми, розмірів, продуманим розміщенням звукопоглинальних матеріалів у цих залах створювали добрі умови для слухачів та виконавців – співаків, музикантів.

Ейрінг, Хант, Беранек, Кнудсен, Майер, Ватсон створили значний теоретичний фундамент сучасної акустики приміщень. Помітний внесок у архітектурну акустику зробили вчені: І.І. Андрєєв, І.Г. Дрейзен, О.М. Качерович, С.Я. Ліфшиц, А.В. Рабінович, С.М. Ржевкін, М.А. Чобітків, В.В. Фурдуєв та інші.

У XIX ст. з не цілком чітких уявлень античного світу стали точні знання. Ейлер, Лагранж, Фур'є, Стокс, Юнг, Гельмгольц, Дж. Стретт (останній найвідоміший під ім'ям лорда Релея) створили акустику як науку. Наприкінці 19 та на початку 20 ст. У. Себін (Wallis Sabine) виконав експерименти, що започаткували теорію архітектурної акустики, виявив кількісні зв'язки між геометричними параметрами приміщень та їх акустичними характеристиками. Його роботи було продовжено іншими.

Себін розглядав акустичні процеси у приміщенні після виключення джерела звуку як запізнення багаторазово відбитих хвиль та його поступове ослаблення внаслідок поглинання енергії хвиль перешкодами. Вихідною причиною цього є енергія, повідомлена приміщенню джерелом звуку.

Теорія У. Себіна, попри великі практичні успіхи, викликала серйозну критику. У 1929 р. Шустер (K. Schuster) і Ветцман (E. Waetzmann) визнали трактування статистичної теорії незадовільним. Після припинення дії

джерела звуку процес загасання відбувається не під впливом вимушених коливань, а як результат загасання власних (резонансних) коливань, збуджених джерелом звуку, та з частотами, що визначаються формою та розмірами приміщення. Така теорія, названа хвильовою, була фундаментально розвинена Болтом, Морзом, Дрейзенем, Фурдуєвим та іншими. Слід зазначити, що Дж. Стретт (лорд Релей), посилаючись на математичне рішення, дане Дюамелем, вважав за можливе аналізувати акустику приміщень з позицій хвильової теорії.

До початку ХХ ст., тобто до робіт У. Себіна, головну увагу в акустиці приміщень приділяли аналізу напрямків шляхів поширення потоків звукової енергії в приміщенні – прямого і відбитого від перешкод, тобто розгляду геометричної (променевої) картини. Геометрична теорія – найдавніша. Вона успішно застосовується і в наш час, особливо під час проектування залів великої місткості. Геометрична теорія набула розвитку на роботах І.Г. Дрейзена, О.М. Качеровича, Л. Контюрі, С.Я. Ліфшиця, Є. Скучика та інших.

Нині немає єдиної теорії, що пояснює всі акустичні процеси у приміщеннях і що дозволяє з єдиних позицій вирішувати конкретні завдання оптимізації у приміщеннях різного призначення. До того ж ці завдання пов'язані з психофізіологією та естетичною оцінкою звучання слухачами, зі смаками музикантів та акторів. Такі завдання мають особливий характер.

Розглянемо основні положення та практичне застосування трьох існуючих теорій реверберації – статистичної, хвильової, геометричної.

## 1.2 Характеристики звукових хвиль

*Звуком* називають малі механічні коливання в різних тілах – газоподібних, рідких або твердих. Частотами звукових хвиль умовно вважають діапазон від 20 Гц до 20 кГц. Діапазон нижче 20 Гц називається інфразвуковим, а діапазон вище 20 кГц – ультразвуковим [1-5].

Весь простір, в якому розповсюджуються звукові хвилі, називається *звуковим полем*. Звукове поле має подовжній характер, тобто сили, які створюють пружні деформації в середовищі при розповсюдженні звуку є перпендикулярними до фронту хвилі [1,2,4].

Звукове поле характеризують звуковим тиском ( $p$ ).

*Звуковим тиском*  $p$  називають різницю між миттєвим значенням тиску  $p_t$  в збудженому середовищі (в певній точці), і середнім тиском  $p_0$  при відсутності звуку [1-2,5]:

$$p = p_t - p_0. \quad (1.1)$$

Звуковий тиск є величиною скалярною. В області стиску звуковий тиск більше нуля, в області розрідження – менше нуля. Одиниця вимірювання звукового тиску – паскаль [Па]. Один паскаль майже в  $10^5$  раз менше за нормальний атмосферний тиск ( $p_H = 101325$  Па).

Енергія звукової хвилі виражається інтенсивністю ( $I$ ). Інтенсивність (або сила) звукової хвилі – це середня кількість звукової енергії, яка проходить за певний час через певну площу, перпендикулярну до напрямку поширення звукових хвиль. Тобто, по суті, це потужність, яка переноситься звуковою хвилею крізь одиничну площу. Інтенсивність звукової хвилі виражається через звуковий тиск за наступною формулою [1-5]:

$$I = \frac{p_{\text{эфф.}}^2}{\rho_0 c}, \quad (1.2)$$

де  $\rho_0$  – щільність повітря в нормальному стані ( $1,3$  кг/м<sup>3</sup>);

$c$  – швидкість поширення звуку ( $340$  м/с в нормальних умовах).

Інтенсивність звуку вимірюється в  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , що є аналогом щільності потоку потужності електромагнітних хвиль.

Звуковий тиск і інтенсивність звуку часто визначають в логарифмічних одиницях (в дБ) за наступними формулами:

$$N_p = 20 \lg\left(\frac{P}{P_0}\right), \quad N_I = 20 \lg\left(\frac{I}{I_0}\right), \quad (1.3)$$

де  $N_p$  – рівень звукового тиску (SPL – Sound Pressure Level);

$N_I$  – рівень інтенсивності звуку (PWL – Power Level).

За рівень відліку 0 дБ SPL приймають звуковий тиск, який відповідає порогу чутності людини, тобто  $2 \cdot 10^{-5}$  Па. Пороговий рівень інтенсивності звуку для 0 дБ PWL відповідає значенню  $10^{-12}$   $\text{Вт}/\text{м}^2$  [1-3].

Якщо робити порівняння з реальними звуками, рівень розкатів грому оцінюють приблизно в 120 дБ, шум літака або музика на концерті мають рівень 110 дБ, шум залізничного составу поряд – близько 100 дБ, звуки галасливої вулиці – 80 дБ, розмова в кімнаті має рівень звукового тиску 50...60 дБ, а шепіт в кімнаті – 20...30 дБ [2-4].

Найчастіше рівень звукового тиску вимірюють або розраховують в певних частотних смугах. Найчастіше поширенні октавні (або третьоктавні) смуги з постійною відносною шириною смуги. Середньгеометричні (або як прийнято простіше говорити – середні) частоти таких смуг регламентовані відповідними стандартами.

Найпоширеніший ряд середніх частот для таких октавних смуг має такі значення: 63,5; 125; 250; 500; 1000 ... Гц; для третьоктавних смуг: ... 63,5; 100; 125; 200; 250; 400; 500; 800; 1000 Гц. Крім зазначених вузьких частотних діапазонів використовується і широкосмугова корекція. Форма кривої корекції позначається буквами А, В, С. Криві корекції суворо регламентовані і визначаються характеристиками сприйняття звуку людиною [3].

### 1.3 Поширення звукових хвиль в приміщеннях

Прямий звук, випромінюваний джерелом (рис.1.1), потрапляє на поверхню, зазнає такі перетворення:

- частково відбивається від перешкоди,
- частково поглинається матеріалом перешкоди, переходячи при цьому в теплову енергію,
- частково проходить крізь матеріал перешкоди в сусідній простір.

Зазначені процеси описуються законами геометричної акустики. Енергія відбитої звукової хвилі визначається коефіцієнтом відбиття звуку, енергія поглинутого звуку – коефіцієнтом поглинання, а енергія що пройшла крізь поверхню – визначається коефіцієнтом звукопровідності. Відповідні процеси показані на рис.1.1.

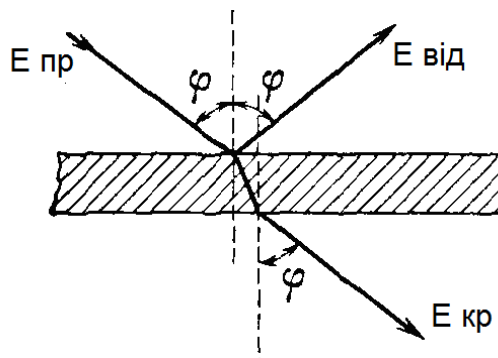


Рисунок 1.1 – Процеси відбиття і заломлення звуку

( $E_{пр}$  – енергія прямої звукової хвилі;  $E_{від}$  – енергія відбитого звуку;

$E_{кр}$  – енергія звукової хвилі, що пройшла крізь поверхню)

Коефіцієнт поглинання звукової хвилі дорівнює відношенню звукової енергії  $E_{погл}$ , поглиненої матеріалом перешкоди, до всієї енергії звуку  $E_{пр}$ , яка потрапляє на перешкоду [2]:

$$\alpha = \frac{E_{погл}}{E_{пр}}. \quad (1.4)$$

Значення коефіцієнтів поглинання звуку є довідковими величинами. Вони визначаються в дифузному (розсіяному) звуці з рівноймовірнісним поширенням хвиль в усіх напрямках. Коефіцієнти поглинання визначають в октавних (інколи – в третьоктавних) смугах частот, з використанням, як найчастіше, діапазону 125...4000 Гц.

#### 1.4 Загальна фізика процесу поширення звуку в приміщенні

*Природна реверберація* – це ефект плавно загасаючого післязвучання, яке спостерігається після того, як звук різко перервався. Такий ефект виникає через відбиття звукових хвиль від будь-яких перешкод, що заважають їхньому поширенню.

Найбільш сильно реверберація проявляється у закритих приміщеннях. Вона виникає також у тунелях, на стадіонах, у гірських ущелинах печерах та інших місцях. В результаті слухач сприймає як прямий звук, так і звуки одноразово чи багаторазово відбиті. Якщо джерело продовжує випромінювати звукові коливання, то звукова картина в приміщенні є *сукупністю прямого звуку і багаторазових загасаючих відбиттів*. Природна реверберація у концертному залі робить музику живою, яскравою, надає звучанню об'ємного характеру, посилює ефект локалізації джерел звуку у просторі.

У закритому приміщенні слухач сприймає як прямий, так відбиті звуки. На рис. 1.2 показано, який шлях проходять звуки з одним, двома та трьома відбиття від стін. Вони поділяються на ранні та пізні залежно від часу їхньої затримки.

Часова структура ревербераційного процесу вигляді відгуку приміщення на імпульсний звуковий вплив наведено на рис. 1.3. На початковій стадії вона дискретна, згодом інтервал між відбиттями швидко зменшується і наближується до нуля, проте відбиття зливаються в безперервний звук.

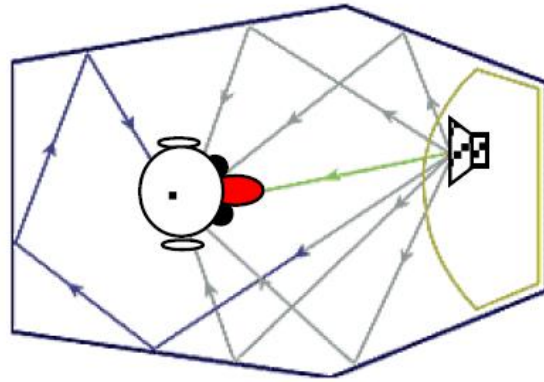


Рисунок 1.2 – Геометричне представлення процесу відбиття звуків в приміщенні

*Ранні (первинні) відбиття* – зазнають одного відбиття від стін, підлоги або стелі. При цьому звукова хвиля не тільки відбивається, а й втрачає частину своєї енергії через поглинання звуку покриттями поверхонь, що відбивають. Тому інтенсивність ранніх відбиттів природно менше інтенсивності прямого сигналу. Часові інтервали між ранніми відбиттями визначаються різницею довжин шляхів, якими вони долинають до слухача. Поки інтервали між відбиттями менші за 100 мс (це час зберігання звукового образу в пам'яті людини) відбиті звуки сприймаються як єдине ціле.

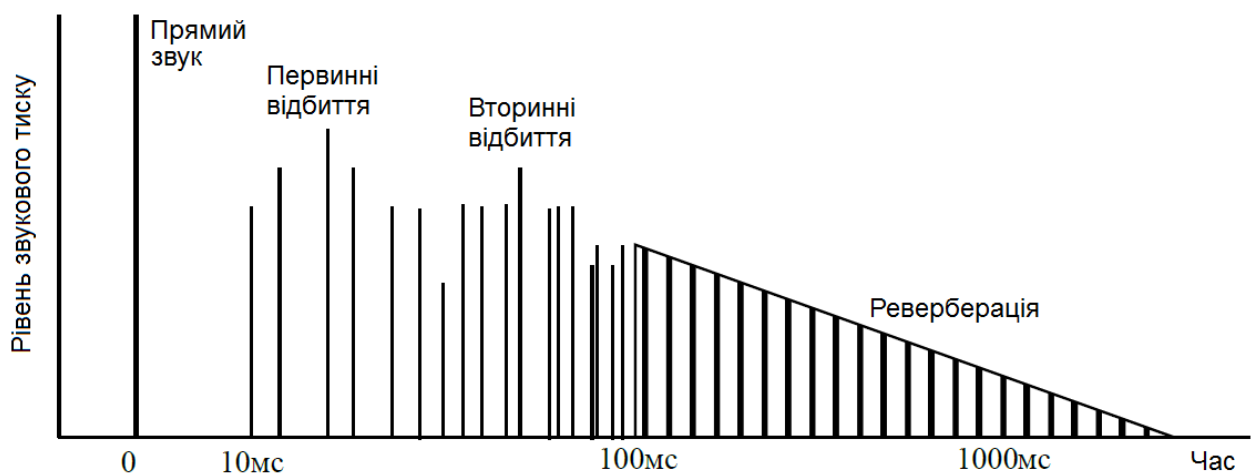


Рисунок 1.3 – Процес реверберації звуку як функція часу

До *ранніх відбиттів* відносяться і *вторинні відбиття*, для яких інтервал між часом їх приходу до слухача та прямим звуком не перевищує 100 мс.

*Вторинні та наступні (пізні) відбиття* – це звукові хвилі, які доходять до слухача після двох і більше відбиттів із затримкою за часом понад 100 мс. Звуки з невеликою кількістю повторних відбиттів сприймаються як ехо. Зі збільшенням кількості багаторазових відображень їх інтенсивність та часовий інтервал між ними зменшуються, відбиття перестають сприйматися як окремі звуки, вони зливаються в один суцільний поступово згасаючий звук.

Внаслідок реверберації змінюється акустичний частотний діапазон звуку. Високі частоти послаблюються швидше, ніж низькі, ось чому тембр відбитого звуку м'якший і заглушений в порівнянні з прямим звуком. Величина згасання високих частот залежить від відстані, що долається звуковою хвилею, та властивостей матеріалу поверхонь, що відбивають. Цей суцільний звук з інтенсивністю, що експоненційно зменшується, і є власне реверберація. Часто його називають ревербераційний хвіст.

Чим більша кількість відбиттів і менше часові інтервали між ними, тим вище щільність (дифузність) звуків у цьому хвості.

*Дифузність звуку* створює відчуття об'єму приміщення. Для її збільшення необхідно, щоб у створенні реверберації брало участь якомога більше відбиттів сигналів від поверхонь, що відбивають. Тому в хороших залах не застосовують простих плоских стін – для покращення дифузності одержуваного звукового поля їх завжди роблять зламаними, щоб якнайбільше збільшити кількість відбиттів.

*Прямий сигнал* несе інформацію лише про розташування джерела звуку праворуч або ліворуч від слухача. Якоїсь іншої просторової інформації в ньому не міститься.

*Ранні відбиття* несуть у собі інформацію про місце розташування виконавця та розміри приміщення. Саме дані відбиття вносять найбільший внесок у просторове відчуття акустики залу.

Завершальна ділянка ревербераційного процесу визначає так звану "гулкість" звучання, властиву порожньому приміщенню. Звук реверберації в

аудиторії згасає згодом через втрату енергії від поглинаючого матеріалу елементів відбиття кімнати.

Чим більший коефіцієнт відбиття кімнати, тим довше відбувається загасання, і про кімнату говорять "жива".

При більшому поглинанні кімнати звук згасає швидко, і кімната характеризується як "мертва".

### 1.5 Статистична теорія реверберації

У статистичній теорії акустичні процеси у приміщенні розглядаються як поступовий спад енергії багаторазово відбитих перешкодами приміщення хвиль. Цей спад відбувається після припинення дії джерела звуку. Ідеалізуючи, вважають цей процес у першому наближенні безперервним. Тоді його можна зобразити в лінійному масштабі експонентою (рис.1.4, а), а напівлогарифмічному масштабі – прямою (рис 1.4, б).

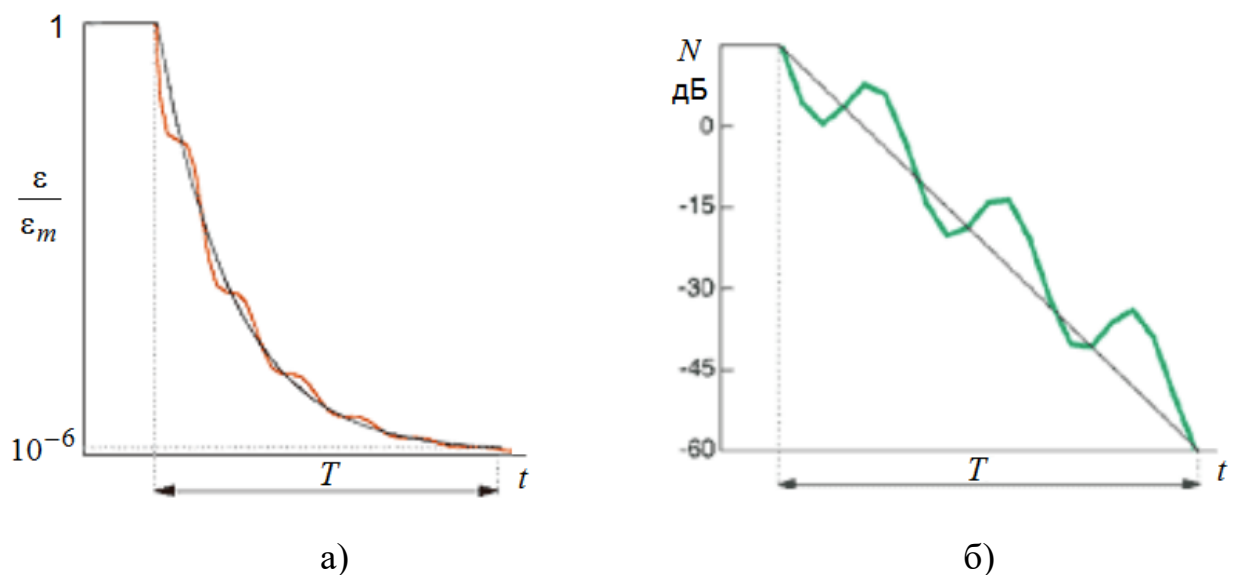


Рисунок 1.4 – Процес спадання акустичної енергії в приміщенні (а – логарифмічний масштаб, б – напівлогарифмічний масштаб)

Передумовою такого розгляду є виконання двох умов: всі напрями руху хвиль рівноймовірні, а щільність звукової енергії

$$\varepsilon = \frac{E}{V}, \quad (1.5)$$

у кожній точці простору приміщення з об'ємом  $V$  однакова.

Перш ніж аналізувати процес спаду звукової енергії в приміщенні, розглянемо, чому в архітектурній акустиці більша увага приділяється не стаціонарному процесу (процесу коливань, що встановилися), а перехідному (нестаціонарному). Останній починається після припинення дії джерела звуку, що полягає у поступовому спаді звучання внаслідок втрат звукової енергії і називається відлунням, або реверберацією.

Реверберація істотно впливає якість і мовного, і музичного звучання.

*Надмірна тривалість реверберації* призводить до того, що нові звуки звучать на фоні попередніх загасаючих складів. Розбірливість мови в цілому погіршується.

*При короткому ехо* розбірливість мови цілком задовільна, але своєрідна "безживність", "стерильність" такого звучання сприймається так само, як нестача, особливо при художньому читанні.

Ще більше значення має процес ехо при прослуховуванні музики. Кожна музична фраза є послідовністю звукових імпульсів. Затягнутий відгук порушує естетичність сприйняття музики тим сильніше, чим швидше темп виконання, тому що звуки "набігають" один на одного. Навпаки, за дуже короткого відгуку або його відсутності (при виконанні на відкритому повітрі) музика звучить сухо. Втрачається злитість звучання. Лише при деякому, цілком визначеному для кожного стилю виконання часу ехо утворюється необхідна зв'язність звучання, що створює найкращий естетичний результат.

Розглянемо процеси, які у приміщенні при звучанні джерела  $D$  (рис. 1.5). Першим в точку прийому  $Pr$ , де знаходяться вуха слухача або мікрофон, приходять шляхом 1 прямиий звук, потім по шляху 2 звуки, відбиті від найближчих до джерела поверхонь, далі звуки по шляху 3, відбиті від віддалених поверхонь.

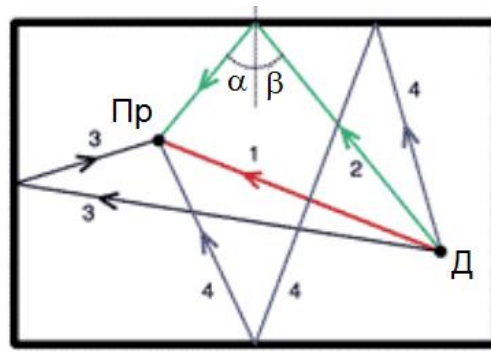


Рисунок 1.5 – Формування прямого і відбитих сигналів

Пізніше приходять звуки, що зазнали дворазових відбиттів на шляху 4, і т. д. Кількість відображень в одиницю часу зростає пропорційно другого ступеня часу. Приміщення поступово заповнюється звуковою енергією. Після припинення звучання джерела починається процес відлуння. У тій же послідовності, як і на початку звучання, спочатку в точку прийому приходять порівняно рідкісні початкові відображення. Далі щільність запізнюваних імпульсів збільшується, а енергія поступово спадає (рис. 1.6).

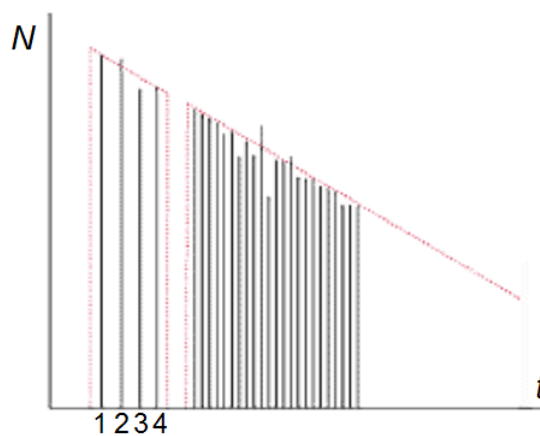


Рисунок 1.6 – Структура ранніх відбиттів ревербераційного відгуку

Статистична теорія займається саме цією, другою частиною відгуку з щільністю імпульсів, яка з часом підвищується, а їх енергія зменшується. Прямий звук і початкові порівняно рідкісні відбиття статистичною теорією не беруться до уваги.

Метод, запропонований У. Себіном, заснований на моделі ідеального приміщення, в якому звукове поле після припинення дії звукового сигналу

може бути розраховане на основі статистичного розгляду процесу загасання звуку. У цьому випадку передбачається, що амплітуди і фази відбитих звукових хвиль розподілені хаотично, тобто у хвильовому русі немає переважаючих напрямів потоків і симетрії у розподілі амплітуд.

Прийняте припущення дозволяє вважати, що середні значення звукової енергії з різних напрямків однакові, тобто звукове поле ізотропне, і середня за часом щільність звукової енергії у будь-якій точці приміщення теж однакова. Таке звукове поле називають дифузним. Його розгляд дав можливість знехтувати явищами інтерференції та застосувати під час розрахунків енергетичне підсумовування.

Такий підхід подібний до використовуваної в кінетичній теорії газів і заснований на математичній теорії ймовірностей. Л. Бреховських показав, що в приміщеннях, лінійні розміри яких великі в порівнянні з довжиною хвилі, виходять досить задовільні результати.

Методами математичної статистики у дифузному полі визначають середню довжину пробігу звукового променя між двома відбиттями. Для приміщення у формі прямокутного паралелепіпеда з лінійними розмірами, близькими до "золотого перетину"

$$l : w : h = 2 : 1,4 : 1, \quad (1.6)$$

де  $l$  – довжина,  $w$  – ширина,  $h$  – висота,

статистично визначена середня довжина вільного пробігу звукового променя

$$l_{\text{сер}} = \frac{4V}{S}, \quad (1.7)$$

де  $V$  – об'єм приміщення,

$S$  – загальна площа всіх обмежуючих поверхонь (підлоги, стелі, стін).

Згодом було встановлено, що отримана залежність зберігається і для поміщень, лінійні розміри яких відхиляються від "золотого перетину", і для поміщень більш складної форми.

За тривалість процесу реверберації – час реверберації – було прийнято вважати проміжок, за який щільність звукової енергії зменшується у  $10^6$  разів, звуковий тиск у  $10^3$ , а рівень звукового тиску на 60 дБ.

Прямої пояснень мотивів вибору спаду рівня на 60 дБ немає. Спробуємо знайти розумні причини. Фортіссімо оркестру відповідають рівню звукового тиску 90-100 дБ, а піаніссімо – 35-40 дБ. Тоді середні рівні становитимуть 63-70 дБ і прийнятий за визначенням (спад на 60 дБ) час реверберації приблизно відповідатиме тривалості спаду середніх рівнів до порога чутності. Можливо, ця обставина і спричинила вибір такого визначення часу реверберації.

Зрозуміло, все це справедливо без акустичних перешкод. При шумах, наприклад, з рівнями 30-40 дБ, що характерно і для житлової кімнати, і для концертного залу, значна частина відгуку маскуватиметься шумами, і чутний відгук триватиме менше половини часу реверберації.

*Розрахункові співвідношення.* Для експериментального визначення часу реверберації  $U$ . Себін користувався найпростішими пристроями: органними трубами як джерелом звуку та секундоміром. Він виявив, що час реверберації  $T$  прямо пропорційний об'єму приміщення  $V$  і обернено пропорційний добутку середнього коефіцієнта поглинання  $\alpha_{\text{сер}}$  та площі всіх перешкод  $S$ :

$$T = \frac{kV}{\alpha_{\text{сер}}S}. \quad (1.8)$$

Середній коефіцієнт звукопоглинання:

$$\alpha_{\text{сер}} = (\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots) / S = \sum_i \alpha_i S_i / \sum_i S_i, \quad (1.9)$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнти поглинання різних матеріалів;

$S$  – загальна площа перешкод.

З виразу (1.9) можна зробити висновок, що середній коефіцієнт поглинання відповідає єдиному матеріалу, яким можна було б покрити всі поверхні перешкод приміщення зі збереженням загального звукопоглинання  $A = \alpha_{\text{сер}}S$ . Одиницею поглинання вважають  $1 \text{ м}^2$  відкритого отвору, що повністю поглинає всю падаючу на нього енергію (без урахування дифракції). Цю одиницю називають Себін (Сб).

Надалі було виявлено, що значення  $k$  в формулі (1.8) є різним для приміщень різної форми. Виміряні значення  $k$  наведені в табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнту корекції для різни приміщень

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

З наведених прикладів видно, що форма приміщення впливає значення часу реверберації, хоча з структури самої формули  $U$ . Себіна це впливає. Справа в тому, що від співвідношення лінійних розмірів залежить середня довжина пробігу між двома відбиттями  $l_{\text{сер}}$ , а значить, і залежить час реверберації  $T$ .

Теоретичний висновок формули Себіна заснований на припущенні про дифузний, рівномірний розподіл звукової енергії по простору приміщення та про безперервне поглинання енергії перешкодами в процесі реверберації.

Це припущення дає порівняно невелике відхилення розрахованої величини  $T$  від вимірної, якщо середній коефіцієнт поглинання малий, тому кількість відображень виходить досить великим, щоб знехтувати дискретністю цього процесу.

Насправді звукова енергія поглинається перешкодами не безперервно, а стрибками, у міру досягнення хвилею тієї чи іншої поверхні. Тому цілком рівномірного заповнення енергією всього обсягу приміщення не буде.

Точніші дослідження реверберації було проведено 1929 р. Шустером і Ветцманом, а 1930 р. – Карлом Ейрінгом. Формула Ейрінга має вигляд:

$$T = \frac{1}{6 - \sum S_i \ln(1 - \alpha_i)} V, \quad (1.10)$$

Розклавши вираз  $\ln(1 - \alpha_i)$  в ряд і залишивши в ньому через невелику величину тільки перший член, виявимо, що при невеликих значеннях  $\alpha$  формула Ейрінга переходить у формулу Себіна. Справді,

$$\ln(1 - \alpha) = -\alpha - \frac{1}{2}\alpha^2 - \frac{1}{3}\alpha^3 \dots \approx -\alpha. \quad (1.11)$$

Формули Себіна і Ейрінга можуть бути застосовані, якщо звукопоглинаючі матеріали розподілені по поглинаючих поверхнях досить рівномірно, щоб можна було користуватися поняттям середнього коефіцієнта поглинання.

При виводі формули Себіна і Ейрінга прийняті деякі припущення, які рідко обговорюються в літературі з акустики. Формула Себіна отримана в припущенні, що хвилі падають на перешкоди під будь-якими кутами, а при виведенні формули Ейрінга прийнято, що хвилі падають на перешкоди під кутами, близькими до нормалі. Тому, строго кажучи, у формулу Себіна слід було б підставляти значення коефіцієнта поглинання, визначені в дифузному полі, в ревербераційній камері, а в формулу Ейрінга – значення коефіцієнта поглинання, виміряні в пласкому полі, при нормальному падінні, тобто у трубі.

При дуже нерівномірному розподілі загального поглинання результат, обчислений за формулою Ейрінга, може бути далеким від виміряного. Міллінгтон (Millington) пояснив причину цієї розбіжності. Ейрінг вважав, що кількість відбиттів від різних поверхонь із площами  $S_1, S_2, \dots$  однакова. Насправді ймовірність числа відбиттів від цієї поверхні тим більше, чим більше сама поверхня. На підставі цих міркувань Міллінгтон вивів іншу формулу для розрахунку часу реверберації:

$$T = -\frac{1}{6} \frac{V}{S \ln(1 - \alpha_{\text{сер}})}. \quad (1.12)$$

Недолік формули Міллінгтона полягає в наступному: обчислене значення часу реверберації виходить рівним нулю, якщо хоча б один елемент перешкоди, має  $\alpha_{\text{сер}}=1$ . Втім, парадоксального результату легко уникнути, прийнявши, що жоден коефіцієнт поглинання не дорівнює одиниці.

*Визначення коефіцієнта поглинання.* Коефіцієнти поглинання матеріалів визначають вимірюваннями "гучної" (ревербераційної) камери. Позначимо об'єм камери через  $V$ , а її час реверберації через  $T_0$ . Після внесення до камери досліджуваного матеріалу з площею  $S_M$  час реверберації зменшується до  $T_M$ . Тоді:

$$\alpha = \frac{1}{6} \frac{V}{S_M} \left( \frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_0} \right). \quad (1.13)$$

Практика показала, що для приміщень з невеликим  $\alpha_{\text{сер}}$  (театральні та концертні зали, навчальні аудиторії тощо) всі три формули дають однаково задовільний результат. Для приміщень із середніми коефіцієнтами загасання (наприклад, студії) ближчі до виміряних значення часу реверберації, розраховані за формулою Ейрінга. Якщо матеріали мають дуже різні  $\alpha_i$ , а самі матеріали розподілені по поверхнях нерівномірно, ближчими до

виміряних виходять значення  $T$ , розраховані за формулою Міллінгтона. Використовуючи названі формули, необхідно прийняти ті  $\alpha$ , які були розраховані за допомогою цих формул при обробці експериментального матеріалу, отриманого в звукомірній камері.

Якщо площа досліджуваного предмета (наприклад, столу, крісла тощо) не може бути виражена певним числом, знаходять поглинання предмета

$$A = \frac{V}{6} \left( \frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_0} \right). \quad (1.14)$$

Отже, за допомогою вищенаведених формул Себіна та Ейрінга вирішують обернену задачу: визначають  $\alpha$  або  $A$  за виміряним часом реверберації.

### 1.6 Ефективна (еквівалентна) реверберація

Для більш точної оцінки акустичних процесів у приміщенні необхідно враховувати енергію і дифузного та прямого звуку (рис.1.7). На невеликих відстанях від джерела переважає енергія прямого звуку, великі відстані – енергія дифузного звуку, оскільки перша зменшується обернено пропорційно квадрату відстані, а друга приблизно постійна. Відношення густин цих двох енергій називають акустичним відношенням:

$$R = \frac{\varepsilon_{\text{диф}}}{\varepsilon_{\text{пр}}}. \quad (1.15)$$

На відстані  $r_1$  обидві складові однакові ( $R=1$ ). На відстані більше  $r_1$  переважання дифузної енергії проявляється на слух як підвищена “гучність” приміщення. Чисельне значення  $r_1$  пов'язане з об'ємом приміщення  $V$  та часом реверберації  $T$  емпірично:

$$r_1 = 0,06\sqrt{V/T} . \quad (1.16)$$

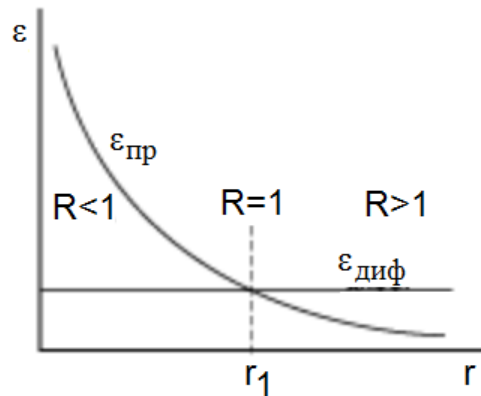


Рисунок 1.7 – Графік впливу енергії дифузного та прямого звуку при оцінці акустичних процесів

На відстані більше  $r_1$  характер звучання визначається головним чином енергією дифузного звуку. Для визначення часу реверберації у цій області використовують раніше наведені формули. На близьких відстанях спад рівня має інший, складніший характер, представлений на рис. 1.8 "ступінчастою" лінією А-В-Е.

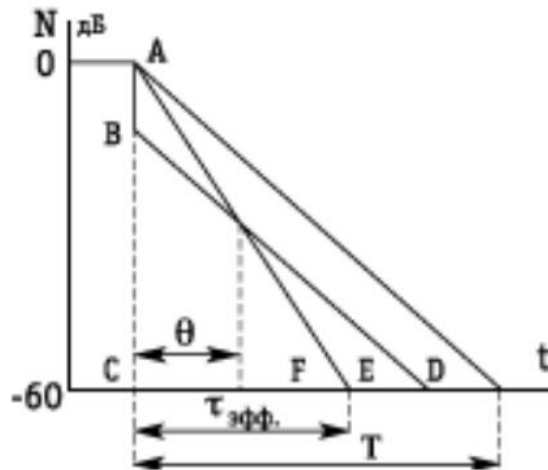


Рисунок 1.8 – Відмінність між часом реверберації  $T$  та часом ефективною реверберації  $T_{\text{эф}}$

Ефективна реверберація, що відчувається, у цьому випадку буде меншою, ніж розрахована за раніше наведеними формулами. Порівнюючи

два процеси спаду рівнів – зі "сходиною" і без "сходинок", можна виявити, що визначальним для рівності двох відчуттів тривалості процесів є така обставина. Два процеси відлуння створюють однакове враження тривалості процесів, якщо через проміжок часу  $0,1...0,3$  с графіки обох процесів проходять через одну точку, що відповідає якомусь значенню рівня. Час ефективної реверберації  $T_{\text{еф}} < T$  визначають на основі рівності площ двох трикутників В-С-Е та А-С-Ф. Воно характеризується часом, протягом якого рівень зменшився б на 60 дБ від початкового рівня 0 дБ за умови спаду рівня без "сходинок", і залежить від співвідношення енергій дифузного та прямого звуку, чисельно вираженого акустичним відношенням  $R$  і коефіцієнтом спрямованості мікрофона  $\Omega$  (якщо в якості приймача звуку виступає мікрофон). Для розрахунку часу ефективної реверберації було запропоновано формулу

$$T_{\text{еф}} = \frac{1,2T}{1,2 + \lg \frac{\Omega + R}{R}} \quad (1.17)$$

Змінюючи відстань між джерелом звуку та використовуючи мікрофони з різними діаграмами спрямованості, можна в широких межах регулювати час ефективної реверберації. Тим самим підбирають ефект реверберації відповідно до змісту переданих сцен або жанру музичних творів.

*Слухове відчуття реверберації.* Не вся тривалість процесу реверберації відчувається нашим слухом. Постійна часу слуху  $\tau$ , що характеризує інерційні властивості слуху і відповідає спаду слухового відчуття в раз (зменшення рівня гучності на 8,7 дБ), становить за різними даними 0,125-0,15 с (за деякими відомостями навіть 0,165 с). Це відповідає спаду рівня інтенсивності 60 дБ, тобто часу стандартної реверберації 0,86-1,05 с. Отже, процес реверберації при  $T < 0,86$  з мало помітний на слух через його маскування власним процесом спаду слухового відчуття. Ще більше маскується акустичними перешкодами (шумами) приміщення. Тому

тривалість чутної частини відлуння становить менше половини часу реверберації та реверберація при  $T < 0,86$  з мало відчувається нашою свідомістю. Для відчуття повноти музики час реверберації має бути значно більшим за 0,86 с. Як відомо, цей оптимум становить різні музичні звучання від 1 до 1,7 с.

### 1.7 Хвильова теорія реверберації

В хвильовій теорії відлуння є загасаючим коливанням повітряного об'єму з частотами, що залежать від розмірів та форми приміщення. Отже, суттю реверберації є не багаторазові відбиття, а поступово загасаючі власні коливання об'ємного резонатора, які залежать від зовнішніх впливів.

Можна спрощено вважати, що хвильова теорія ґрунтується на аналізі дії об'ємних електромагнітних резонаторів. Дюамель вивів вираз для власного періоду  $1/f_0$  об'ємного резонатора у формі прямокутного паралелепіпеда, в якому довжина хвилі

$$\lambda = \frac{c_0}{f_0} = 2 \sqrt{\left(\frac{p}{l}\right)^2 + \left(\frac{q}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2}, \quad (1.18)$$

або

$$f_0 = \frac{c_0}{\lambda} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{l}\right)^2 + \left(\frac{q}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2}, \quad (1.19)$$

де  $l, b, h$  – лінійні розміри,

$p, q, n$  – будь-які цілі числа.

Залежно від значень коефіцієнтів  $p, q, n$  прийнята наступна класифікація типів стоячих хвиль:

- осьові, коли два з трьох коефіцієнтів дорівнюють нулю,
- дотичні, коли один із коефіцієнтів дорівнює нулю,

– косі, коли жоден з коефіцієнтів не дорівнює нулю.

З хвильової теорії випливає, що приміщення простої правильної геометричної форми менш задовольняють умові дифузності поля, ніж приміщення складної геометричної форми з непаралельними стінами, косо поставленими площинами або опуклими поверхнями, заглиблення у вигляді кесонів. Зрозуміло, лінійні розміри цих поверхонь повинні бути співмірні з довжиною хвилі або бути більшими за неї.

На рис.1.9 показано спектр власних частот приміщення, які відповідають цілим значенням  $p, q, n$ .

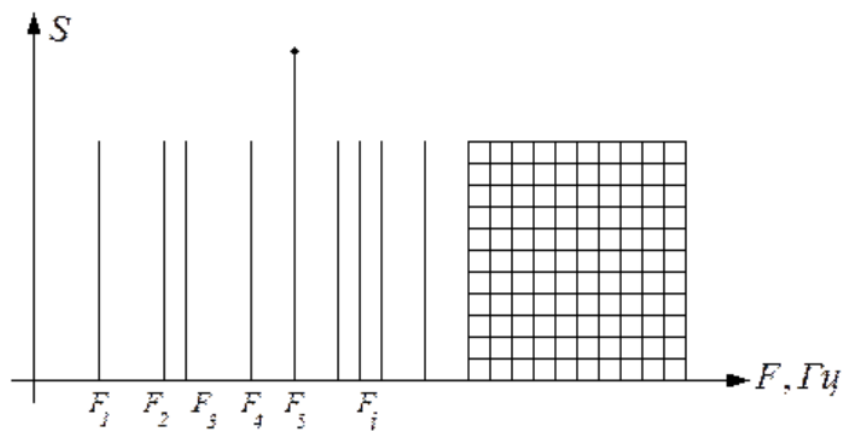


Рисунок 1.9 – Спектр власних частот приміщення

З рис.1.9 видно, що на нижніх частотах резонанси йдуть через значні проміжки і повинні привести до помітної зміни спектра відгуку порівняно зі спектром вихідного звучання, отже, зміни тембру відгуку.

У тій області частот, де резонансні частоти розташовані рідко, відповідні частотні складові у спектрі мовних та музичних сигналів майже не зустрічаються. Реальне значення могли б мати, наприклад, 13 і 14 частоти, але інтенсивність резонансних коливань таких великих номерів невелика, тому помітної зміни тембру відлуння не станеться. Зі збільшенням частоти щільність резонансних частот швидко зростає. Так, в області 500 Гц на 1 Гц смуги частот доведеться приблизно 10 резонансних частот. У зв'язку з цим у приміщеннях великого об'єму, як є концертні та театральні зали, погіршення звучання не відбувається.

Інше становище складається у приміщеннях невеликого об'єму, наприклад у мовних (дикторських) студіях та житлових кімнатах. Відомі скарги дикторів, що їхній голос у мовних студіях звучить зовсім незвично, неприємно, відчувається "бубніння". Пояснюється це тим, що у приміщеннях невеликого об'єму основна резонансна частота потрапляє до області добре чутних звуків. Для боротьби з цим неприємним явищем доводиться або значно зменшувати час реверберації шляхом використання в студії матеріалів, що ефективно поглинають, або обмежувати смугу пропускання електричного тракту нижче 250-300 Гц. "Бубніння" властиве і багатьом житловим кімнатам. Усунути цей недолік майже неможливо, тому що немає дешевих матеріалів, які ефективно поглинають звукову енергію в області 100 Гц і нижче.

Особливо виражені резонанси в приміщеннях з лінійними розмірами, що збігаються. У цьому випадку збігаються резонансні частоти, зумовлені хвилями стоячих у різних площинах. Найгіршим в акустичному відношенні є приміщення кубічної форми, найкращим – приміщення, пропорції якого наближаються до "золотого перетину". Висновок, зроблений акустиками давнини, знайшло підтвердження у висновках хвильової теорії.

## 1.8 Висновки по розділу 1

При визначенні напрямку та відстані до джерела звуку використовуються такі фактори: амплітуда, час, тембр, а також відбиття найближчих поверхонь або реверберація.

Амплітуда є найбільш яким і найлегше імітованим параметром: чим гучніший звук, тим ближче його джерело; чим гучніший звук у лівому вусі, тим лівіше знаходиться його джерело. У сучасному звукозаписі ці фактори використовуються найчастіше – ми збільшуємо гучність звуку, щоб вивести його на передній план (наблизити) і змінюємо панораму (тобто збільшуємо

гучність в одному каналі стерео пари та зменшуємо в іншому), щоб перемістити його вліво чи вправо.

Параметр часу також досить зрозумілий – звук джерела, розташованого ліворуч, досягає лівого вуха на кілька мікросекунд раніше, ніж правого. Однак, за дуже малого часу затримки цей параметр практично неможливо імітувати на записі. Набагато важливіший час відбиттів.

Зміна тембру в залежності від відстані відбувається таким чином: низькі частоти поширюються на більш далекі відстані, так що звуки, що лунають здалеку, містять менше високих частот. Вплив тембру на напрямок складніше: поки звук доходить від одного вуха до іншого тембр змінюється кістками черепа і вушними раковинами. Спроба імітації цього ефекту називається *head-related transfer function (HRTF)*. Вона заснована на суб'єктивному сприйнятті багатьох людей, оскільки цей процес ще недостатньо досліджений і не може бути точно описаний.

Якщо звук звучить у приміщенні, то майже завжди, крім самого звуку, ми чуємо і численні його відбиття (виняток становлять безехові камери). Найважливішими у своїй є звані ранні відображення (*Early Reflections*) – окремі повторення звуку, які у перебігу перших 50 мс після прямого звуку. У звичайній прямокутній кімнаті буває від шести (підлога, стеля та чотири стіни) до десяти ранніх відбиттів, перш ніж відбиття починають приходити настільки часто, що зливаються в єдину реверберацію.

Дана кваліфікаційна робота виконана 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 [26-29] присвячені дослідженню систем озвучення приміщень. Отже, дослідження в даній роботі відповідають традиційному напрямку наукових робіт колективу кафедри МІРЕС.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОЇ РЕВЕРБЕРАЦІЇ

### 2.1 Звуковий ефект «ехо»

Природне ехо – це ефект періодичного повторення звуків з плавним їх згасанням, яке спостерігається після припинення звуку. Особливо яскраво воно проявляється, коли звук короткий. Відлуння виникає у тунелях, на стадіонах, у гірських ущелинах печерах та інших місцях через відбиття звукових хвиль від будь-яких перешкод, що заважають їх поширенню, але тільки у разі запізнення відбиття на час більше ніж 50 мс. Цей час дорівнює постійній часу слуху людини. Поки запізнення відбитих сигналів менше цього часу вони сприймаються як єдиний звук, луна не виникає.

Якщо швидкість загасання відбитих звуків велика, виникає одноразове ехо, якщо вона мала, то виникає багаторазове ехо (рис.2.1).

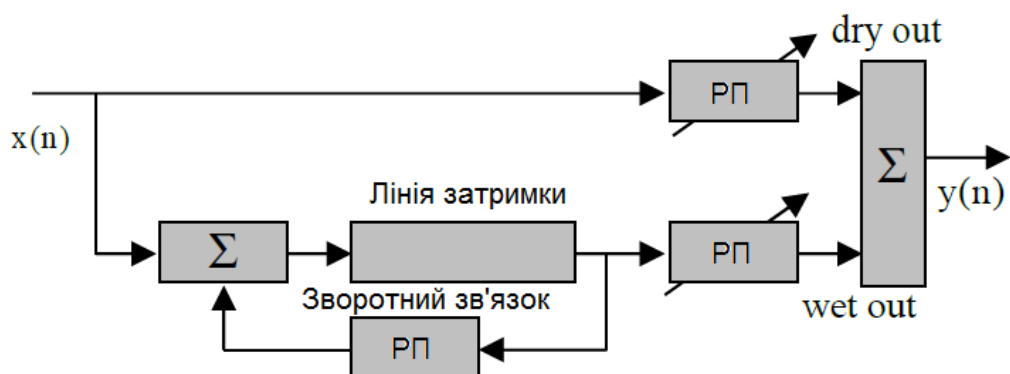


Рисунок 2.1 – Схема формування звукового ефекту «ехо»

Ефекти цифрової затримки належать до ефектів, які входять в "джентльменський набір" будь-якого гітариста, оскільки вони можуть створювати безліч різних типів ехо і підходять майже всім музичним стилям.

Схема на рис. 2.1 пояснює принцип формування звукового ефекту. В цій схемі на вхід подається звуковий сигнал і далі він поділяється на два канали. В кожному каналі можна регулювати рівень з допомогою регулятора підсилення (РП). Канал, в якому проводиться затримка сигналу, має назву wet out (вологий вихід). Канал, в якому сигнал проходить без змін у плагінах

називається dry out (сухий вихід). У цій схемі суматор передає на вихід як прямий сигнал, так і запізнений.

У цій схемі для створення одноразового відлуння зворотний зв'язок вимикається, і запізнений сигнал виникає через час затримки, що визначається цифровою лінією затримки. Зворотний зв'язок створює нескінченну кількість повторів звуку, що слідує з інтервалом, що дорівнює часу затримки.

Регулятор у колі зворотного зв'язку визначає час згасання цих повторів. Якщо, наприклад, коефіцієнт передачі РП дорівнює -6 дБ, то кожен наступний повторення звуку буде на 6 дБ нижче попереднього, і 10-й повтор матиме рівень -60 дБ. Такий штучний сигнал на слух сприймається як багаторазове відлуння (рис.2.2).

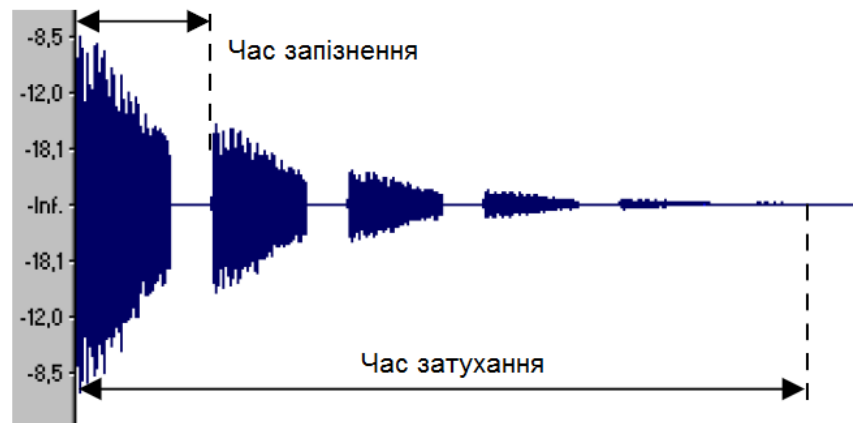


Рисунок 2.2 – Сигнал ефекту "ехо"

Ефект «ехо» формується при часі затримки від 150 мс до 1 с або більше, хоча найчастіше застосовують значення діапазону 300...600 мс. Число повторів має бути досить велике, тому час згасання може бути до 5...10 с.

Ефект «ехо» може бути як монофонічними, так і стереофонічними. В останньому випадку на кожному каналі потрібно встановлювати власне значення часу затримки, що дає ще один метод одержання цікавих ритмічних ефектів.

Одним з варіантів ефекту ехо є відомий у музиці ефект "сліпбек" (slapback). Він створюється з часом затримки 100...132 мс. Цей ефект створює враження, що звук відбивається від розташованої поблизу поверхні. Це класичний різновид ефекту затримки часів раннього рок-н-ролу та рокабілі.

## 2.2 Звуковий ефект – реверберація

Пристрої, що імітують природну реверберацію, називаються ревербераторами. Ефект штучної реверберації полягає у наданні звучання об'ємності, характерної для великої зали, де кожен звук породжує відповідний, повільно згасаючий відгук. Звуки музичних інструментів стають соковитими, об'ємними з багатим на тембровий склад. Голоси співаків набувають наспівності, недоліки, властиві їм стають малопомітними.

Реверберація широко застосовується у випадках, коли необхідно "прикрасити", збагатити звучання сольного інструменту чи голосу, а також струнної, духової груп чи інших голосів оркестру за винятком лише ритм-секції.

Реверберацію використовують для покращення та підкреслення художньої виразності мови, співу, звучання окремих музичних інструментів. Ефект штучної реверберації розширює діапазон гучності звуку ударних інструментів, що приємніше сприйняття, ніж звичайний нудний звук.

Штучна реверберація може створюватися за допомогою цілого ряду технічних засобів.

Вважається, що для реверберації, що гарно звучить, перші ранні відбиття повинні приходити через 15...20 мс після прямого звуку, а сумарна потужність ранніх відбиттів (в діапазоні 15 ... 50 мс) повинна становити приблизно -6 дБ від потужності прямого сигналу. На сприйняття реверберації найбільше впливає згасання реверберації від максимального значення рівня – 15 дБ.

*Ревербераційна камера.* Це приміщення з перешкодами, що добре відбивають звук об'ємом від 120 до 300 м<sup>3</sup>. Масивні стіни підлога та стеля камери мають різні кути. нахилу. За допомогою такої камери формується реверберація найближча до природної (рис.2.3).

Гучномовець та мікрофон встановлюються так, щоб між ними була максимальна відстань, і на мікрофон потрапляли переважно багаторазові відбиття. Сигнал з мікрофона змішується з вихідним сигналом, що подається на гучномовець. Недоліки ревербераційної камери – громіздкість та висока вартість. Найбільший час реверберації сягає 5...7 с.



Рисунок 2.3 – Ревербераційна камера

*Листовий ревербератор.* У такому ревербераторі використовується металевий лист розміром 1x2 м, що підвішується на пружинах, що виконують роль демпферів (рис. 2.4).

До листа перпендикулярно його площині жорстко кріпиться рухома котушка електро-механічного перетворювача, схожого по конструкції на гучномовець.

Для знімання вібрацій листа використовується механіко-електричний датчик будь-якого типу (п'єзоелектричний або резистивний), сигнал якого подається на підсилювач.



Рисунок 2.4 – Листовий ревербератор

Ефект реверберації виникає завдяки відбиттю згинальних коливань від границь металевого листа. Шляхом зміни натягу пружин встановлюється характер реверберації.

*Пружинний ревербератор.* Цей ревербератор подібний до листового, тільки в ньому замість металевих листів використовується довгий сталевий дріт, звитий в спіраль.

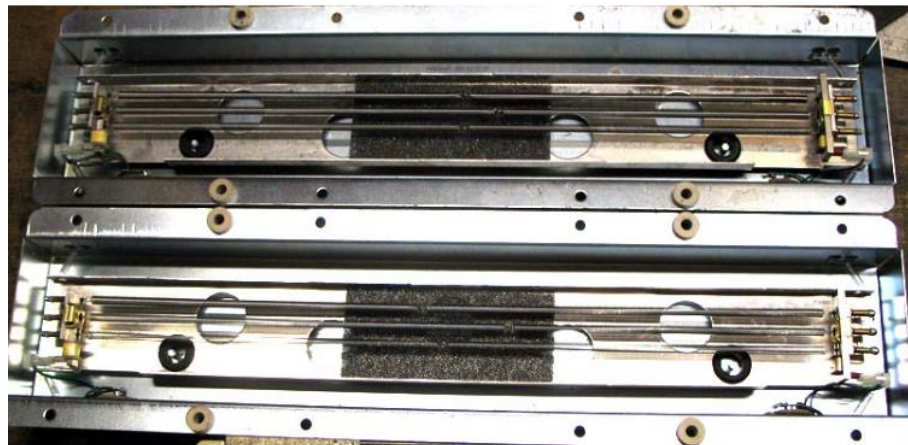


Рисунок 2.5 – Пружинний ревербератор

На її одному кінці кріпиться електромеханічний перетворювач, що створює крутильні коливання. На іншому кінці – механіко-електричний

датчик, чутливий до крутильних коливань. На відміну від листового ревербератора, процес носить одномірний характер та реверберація дуже далека від натуральної. Такі ревербератори часто інтегруються в підсилювач і досі використовуються в гітарних процесорах.

Незважаючи на недосконалість, пружинні та листові ревербератори залишили свій слід у звукозаписі, сформували певну естетику звучання, і досі їх звукімітується майже всіма цифровими ревербераторами.

*Аналоговий електронний ревербератор.* Це аналогова лінія затримки на основі магнітофона з наскрізним каналом та кількома головками відтворення (рис.2.6).



Рисунок 2.6 – Аналоговий електронний ревербератор

Число головок може бути від 2 до 24, воно визначає число відбиттів, а відстань між головками – часовий інтервал між ними. Сигнал із виходів усіх головок відтворення через суматор подається на вхід підсилювача запису. Фактично це багатовідвідна лінія затримки, що формує ряд затухаючих повторів. Регулюючи рівень кожного повтору та швидкість руху стрічки, можна було змінювати характер реверберації.

*Цифровий ревербератор.* Це цифрова лінії затримки зі зворотним зв'язком та з відводами, які імітують загасаючі відбиття звуку із встановленою часовою затримкою. Для формування вихідний сигнал лінії через суматор знову подається на вхід із загасанням менше одиниці та

підсумовується із вхідним сигналом. Тому кожне наступне повторення сигналу має більше загасання, ніж попереднє. Від величини цього згасання залежить кількість повторень сигналу із заданою затримкою.

Незважаючи на те, що в паспортах на пристрої вказано сотні видів реверберації, число основних типів алгоритмів у кожному приладі невелика, трохи більше 5...10. А от кількість варіантів звучання, тобто користувацьких фабричних пресетів – сотні.

До основних алгоритмів цифрових ревербераторів належать такі:

- Hall – імітується акустика концертного залу. Глибока реверберація з великим часом завмирання, суб'єктивно вона відокремлює джерело звуку від слухача;

- Room – реверберація невеликої кімнати. Вона підходить для акустичних інструментів у камерній атмосфері;

- Live – імітується жива атмосфера, вважається, що вона більше підходить для солюючих інструментів;

- Plate – імітується реверберація пласкої металевої пластини. Це використовується для вокалу та ударних інструментів;

- Spring – імітується пружинний ревербератор;

- Chamber – імітується ревербераційна камера;

- Gate – імітується реверберація із зрізом фінальної фази демпфування.

Це надає динамічного характеру звуку і використовується з ударними інструментами, особливо з барабанами.

Reverse – імітується художня реверберація з інверсною обвідною, тобто спочатку вона поступово збільшується і потім різко обривається. Такий ефект може бути отриманий інвертування звуку редактором, при використанні звичайної реверберації та інверсної версії. І тут реверберація починається до вихідного звуку. Цей особливий ефект іноді використовують для вокалу.

До найважливіших параметрів сучасних цифрових ревербераторів відносять наступні.

Reverb Time (Decay time) – час реверберації. Це час згасання звуку приблизно на 60 дБ. Звук реверберації в аудиторії згасає згодом через втрату енергії від поглинаючого матеріалу елементів покриття кімнати. Чим більший коефіцієнт відбиття кімнати, тим довше відбувається загасання, і про кімнату говорять жива.

При більшому поглинанні кімнати звук згасає швидко, і кімната характеризується як "мертва".

Reverb Delay – затримка реверберації. Це інтервал між ранніми відображеннями та ревербераційним хвостом.

Pre Delay – початковий час затримки. Це інтервал між прямим звуком та першим раннім відбиттям, його величина може бути від 0 до 100 мс. Цей параметр пов'язаний з імітацією віртуальних розмірів кімнати, де знаходиться слухач. Чим менше його значення, тим паче невеликі розміри кімнати.

Density of early (primary) reflections – щільність ранніх відбиттів. Цей параметр характеризує геометрію кімнати, що імітується. Чим менші інтервали між відбиттями, тим менші розміри кімнати.

Early Reflection Level – рівень ранніх відбиттів. Цей параметр пов'язаний з властивостями матеріалів покриттів кімнати.

Balance (Dry/Wet) – баланс (прямий звук/звук із реверберацією). Цей параметр визначає відношення прямого звуку та звуку з реверберацією.

Diffusion of reverberation – дифузність реверберації. Коли цей параметр низький, ефект реверберації стає дискретним і звук сприймається як ехо.

### 2.3 Алгоритми реверберації

Головним призначенням ревербераторів є імітація об'ємного звуку шляхом моделювання акустичних умов поширення звуку в різних умовах – концертний зал, житлова кімната, заглушена камера, ліс чи чисте поле. Ідеї побудови алгоритмів реверберації можна просто описати тільки стосовно

поширенню звуку у звичайній кімнаті, в якій всього 6 відбиваючих поверхонь. У цих алгоритмах враховуються коефіцієнти відбиття поверхонь, ранні та пізні відбиття.

На рис.2.7, а показані первинні та вторинні відбиття звуку лише від двох стін. На цьому ж рисунку (рис.2.7, б) наведено алгоритм реверберації, який відповідає цим умовам.

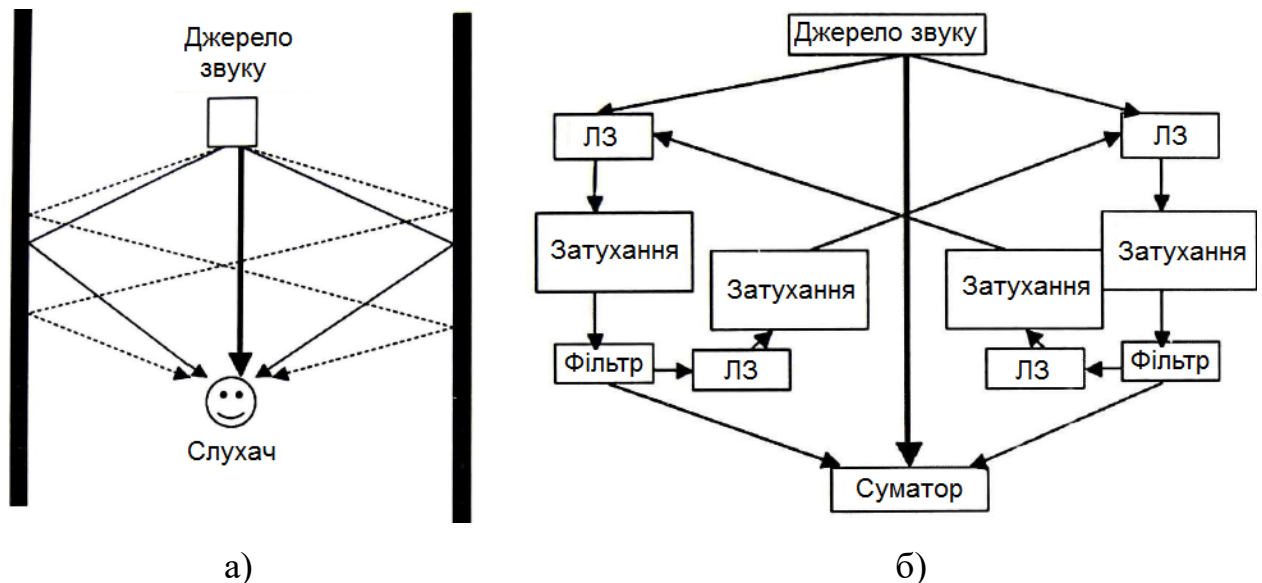


Рисунок 2.7 – Алгоритм реверберації при відбитті від двох перешкод

В цьому алгоритмі реверберація моделюється лініями затримки (ЛЗ), величина якої залежить від розмірів кімнати, коефіцієнтом відбиття стін (затухання) та фільтром, що враховує залежність коефіцієнта поглинання покриття стін від частоти. Вторинні відбиття враховуються шляхом запровадження ліній зворотного зв'язку. При обліку первинних та вторинних відбиттів від усіх 6 поверхонь алгоритм реверберації дуже ускладнюється (рис.2.8.). Насправді все ще складніше, і треба враховувати, що відстань від стіни до стіни залежить від кута падіння звукової хвилі. Ці алгоритми не враховують, що звук, що поширюється у залі, відбивається не тільки від стін, але також і від крісел, підлоги та інших поверхонь, які породжують потоки додаткових звукових хвиль. Крім того, кожна поверхня має властивість

поглинання, внаслідок чого відбитий від цієї поверхні сигнал може мати трохи відмінний спектр.

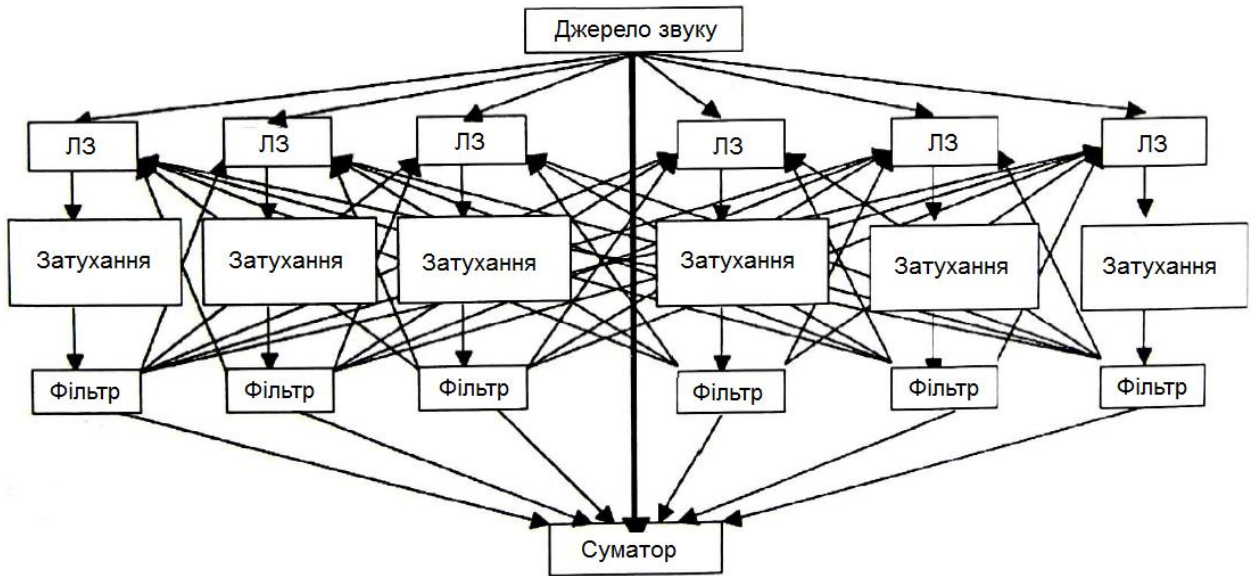


Рисунок 2.8 – Алгоритм реверберації при відбитті від шести перешкод

За цієї причини для створення реалістичної реверберації користуються значно більше складними алгоритмами.

Базовою основою імітації пізніх відбиттів у цифрових ревербераторах є гребінчастий і всепропускаючий фільтри. У першому використовується лише зворотний зв'язок, а в другому – прямий і зворотний зв'язок. Їхні структурні схеми наведені на рис.2.9.

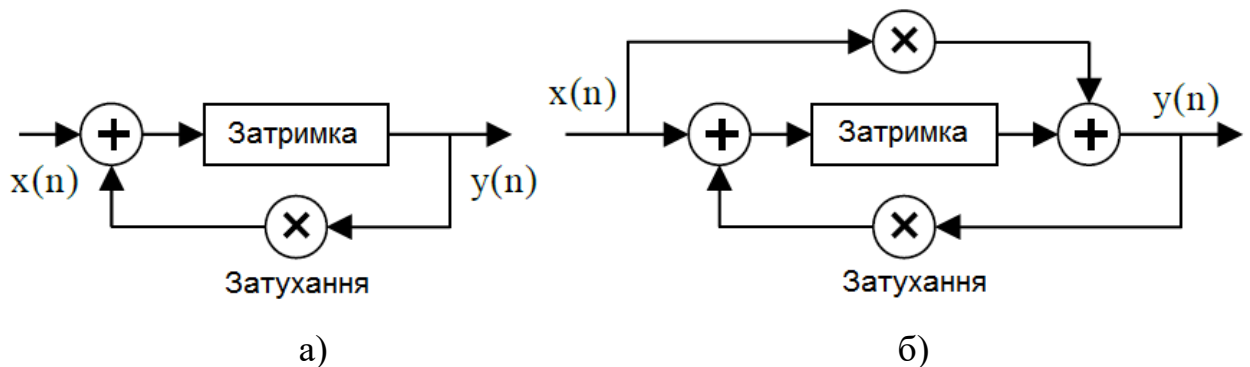


Рисунок 2.9 – Гребінчастий (а) і всепропускний (б) фільтри

Передатна функція гребінчастого фільтра

$$H(z) = \frac{z^{-M}}{1 - g \cdot z^{-M}}, \quad (2.1)$$

передатна функція всепропускового фільтра

$$H(z) = \frac{z^{-M} - g}{1 - g \cdot z^{-M}}, \quad (2.2)$$

де  $M$  – довжина лінії затримки,

$g$  – коефіцієнт передачі.

Імпульсний та частотний відгук цих фільтрів представлені на рис.2.10.

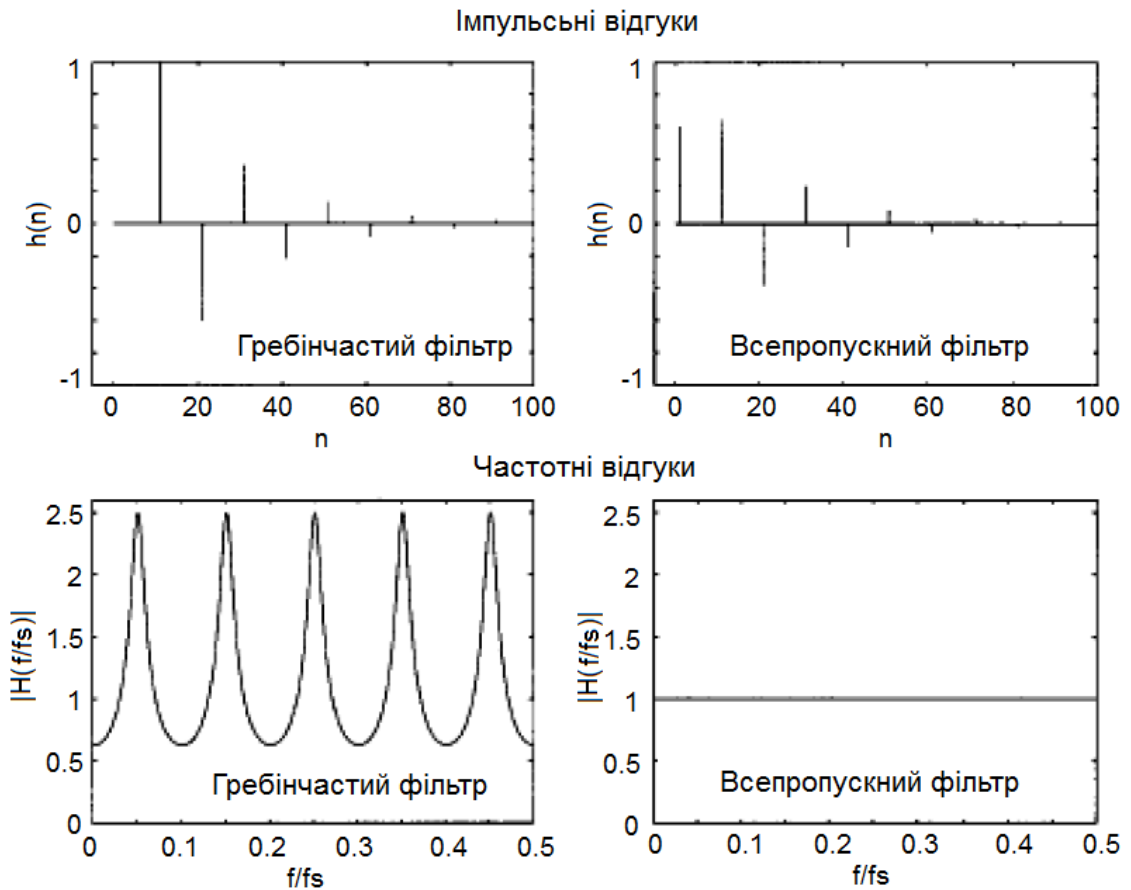


Рисунок 2.10 – Імпульсні та частотні відгуки гребінчастого фільтра та всепропускового фільтра

Ранні відбиття мають вирішальне значення для відчуття сприйняття простору, зокрема, ефект об'єму кімнати. Найчастіше для їхньої імітації використовується алгоритм Герзона, наведений на рис.2.11.

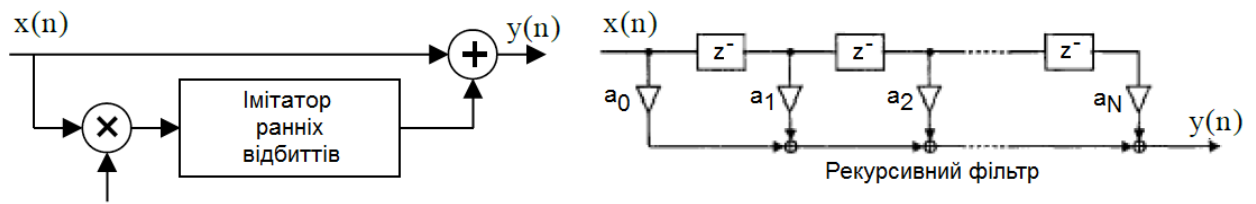


Рисунок 2.11 – Імітація ранніх відбиттів

У цій схемі звуковий сигнал множиться на коефіцієнт зважування і подається на блок, що імітує ранні відбиття, далі вони сумуються зі звуковим сигналом. Як імітатор відбиттів зазвичай використовується рекурсивний фільтр із затримкою  $M$  вибірок (рис. 2.11). Сигнали на відводах зважуються зі своїми коефіцієнтами згасання  $g_i$ .

Алгоритми пізньої реверберації були запропоновані Шродером та Моорем на основі застосування ліній затримок із зворотним зв'язком, у яких імпульсний відгук має експонентний закон загасання. На рис.2.12 наведено схему формування реверберації Моора.

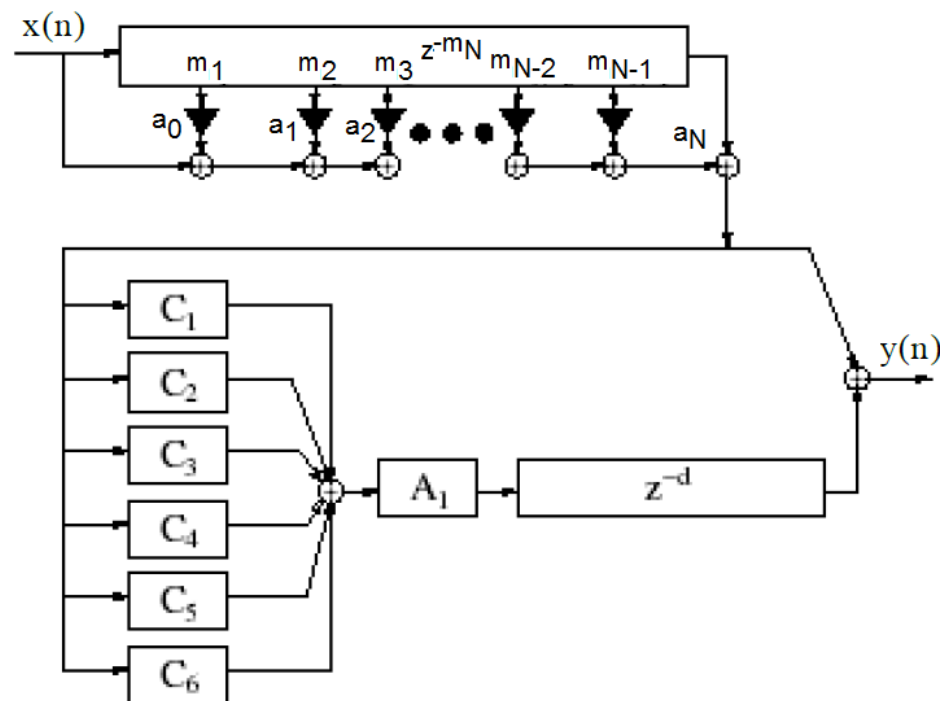


Рисунок 2.12 – Схема цифрового ревербератора Моора

У цій схемі ранні відбиття імітуються за допомогою багатовідвідної лінії затримки на основі КІХ-фільтра. Усі вихідні сигнали зважуються відповідно до коефіцієнтів затухання  $g_i$  і підсумовуються. Значення цих коефіцієнтів розраховуються за формулою

$$g_i = 10^{-3} \frac{m_i}{T_d f_s}, \quad (2.3)$$

де  $m_i$  – час затримки, що задається числом вибірок,

$f_s$  – частота дискретизації,

$T_d$  – час реверберації.

Для імітації пізніх відбиттів використовуються 6 паралельно з'єднаних гребінчастих фільтрів зі зворотним зв'язком, виходи яких сумуються. У колі зворотного зв'язку кожного з них включений ФНЧ 1 порядку, який імітує ефект затухання інтенсивності відбиттів на верхніх частотах. Сумарний сигнал із цих фільтрів подається на вихід через часову затримку на основі всепропускного фільтра. Ця затримка імітує запізнення пізніх відбиттів відносно ранніх відбиттів на 6 мс. Коефіцієнт  $A_1=0,7$  створює необхідний рівень пізніх відбиттів.

#### 2.4 Конволюційний алгоритм реверберації

Під час імітації віртуальної кімнати моделюються її акустичні характеристики. Здебільшого така імітація проводиться у режимі постобробки. В математичному плані така обробка відповідає згортку звукового сигналу  $x(t)$  імпульсним відгуком кімнати  $h(t)$ . Імпульсний відгук між двома точками в кімнаті наведено на рис.2.13. Він складається із прямого сигналу, ранніх відбиттів (від стін) та пізньої реверберації.

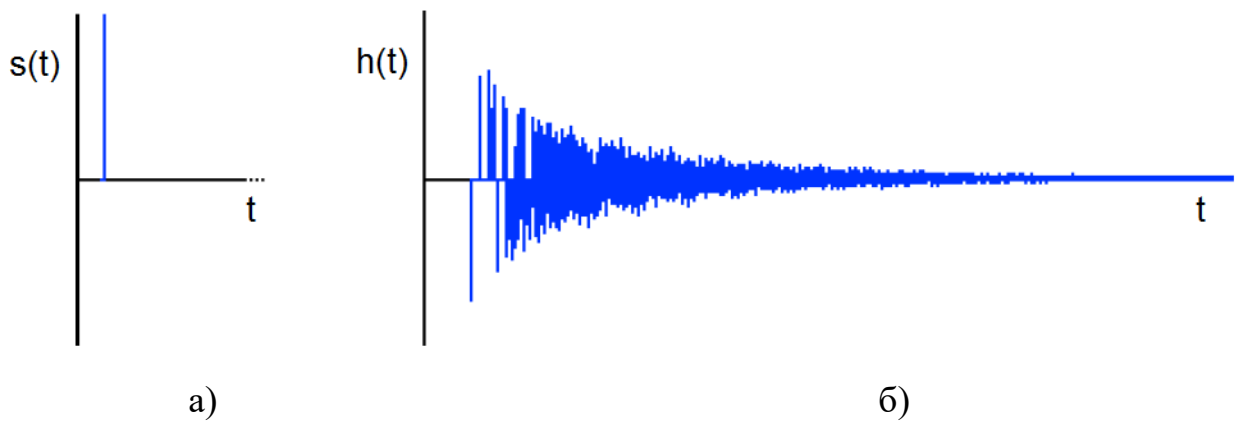


Рисунок 2.13 – Імпульсний вплив (а) та відгук (б) приміщення

Ранні відбиття поступово зменшуються з часом та переходять у випадковий сигнал з експоненційним загасанням, що називається реверберацією.

Такий спосіб створення штучної реверберації називається конволюційною реверберацією. Імпульсний відгук  $h(t)$  цифрової лінійної системи показує реакцію системи на найпростіший вхідний сигнал – одиничний імпульс. Знаючи цей відгук, можна обчислити відгук  $y(n)$  у цифровій формі на довільний вхідний сигнал  $x(n)$  за допомогою операції згортки.

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N+M-2} x(n-k)h(n), \quad (2.4)$$

де  $M$  і  $N$  – число відліків функцій, що перемножуються.

Іншими словами, знаючи ревербераційний відгук кімнати на клацання одиничного імпульсу, можна обчислити реверберацію будь-якого складного сигналу.

Реалізація такої обчислювальної процедури стикається з двома проблемами. При частоті дискретизації 44100 Гц для виконання операції згортки з імітації ранніх відбиттів, що запізняються на час до 100 мс, потрібно 4410 елементний фільтр. Для імітації пізніх відбиттів, тривалість

яких досягає 2 с, потрібно 88200 елементний фільтр для кожного звукового каналу. Технічно це не можна реалізувати.

Довжина імпульсних відгуків приміщень залежить від часу реверберації. На сприйняття реверберації найбільше впливає загасання реверберації від максимального значення рівня -15 дБ. Можна вважати, що загасання нижче рівня -60 дБ мало впливає на сприйняття. Довжина імпульсів відгуку приміщень до них згасання рівня -60 дБ може обчислюватися кількома секундами, тобто довжина імпульсного відгуку  $M$  може становити десятки і навіть сотні тисяч цифрових відліків.

Якщо тривалість звукового сигналу становить  $N$  вибірок, а довжина імпульсу відгуку –  $M$  вибірок, то необхідно за цей час зробити  $M+N$  операцій множення та складання. При тривалості музичного уривка 1 хв. та тривалості імпульсного відгуку 3 секунди – потрібно за цей час виконати близько 350 трильйонів операцій складання та множення. Тому пряме обчислення згортки в реальному часі за наведеною вище формулою неможливо на сучасних персональних комп'ютерах через занадто високу обчислювальну складність.

Однак обчислювати згортку можна за допомогою швидкого перетворення Фур'є, яке зменшує кількість множень на відлік.

## 2.5 Висновки по розділу 2

При імітації природної реверберації велике значення для її сприйняття мають часові характеристики сформованого ревербераційного відгуку.

Ранні відбиття мають вирішальне значення для відчуття сприйняття простору, зокрема, ефект об'єму кімнати. Для того, щоби ефект реверберації гарно звучав, перші ранні відбиття повинні приходити через 15...20 мс після прямого звуку, а сумарна потужність ранніх відбиттів (в діапазоні 15...50 мс) повинна становити приблизно -6 дБ від потужності прямого сигналу. На сприйняття реверберації найбільше впливає згасання реверберації від максимального значення рівня – 15 дБ.

Для імітації ранніх відбиттів доцільно використовувати алгоритм Герзона. У цьому алгоритмі як імітатор відбиттів використовується рекурсивний фільтр із затримкою  $M$  вибірок. Сигнали на відводах зважуються зі своїми коефіцієнтами затухання  $g_i$ , які можуть враховувати і частотну характеристику відбиттів.

В якості алгоритму пізньої реверберації доцільно використати алгоритм Моора на основі застосування ліній затримок із зворотним зв'язком, у яких імпульсний відгук має експонентний закон загасання.

Для максимально природної реверберації слід очікувати, що конволюційний (або згортковий) алгоритм дасть найбільш натуральні результати. Він використовує математичну операцію згортки, попередньо записаний аудіосемпл імпульсної характеристики моделюваного простору і звук, який повинен бути відображений, для створення ефекту. Запис імпульсної характеристики спочатку зберігається у системі цифрової обробки сигналів. Потім він згортається з вхідним звуковим сигналом для обробки. Обчислювати згортку доцільно з використанням швидкого перетворення Фур'є, яке зменшує кількість множень на відлік.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНВОЛЮЦІЙНОГО МЕТОДУ ШТУЧНОЇ РЕВЕРБЕРАЦІЇ

#### 3.1 Постановка задачі

В розділі 2 показано, що конволюційний метод створення штучної реверберації потенційно може надати набагато природніше звучання, ніж повністю програмні методи. Це дає можливість створити у слухача найбільш реалістичніші відчуття занурення джерела звуку в потрібні акустичні обставини.

Загальна схема отримання конволюційної реверберації показана на рис.3.1.

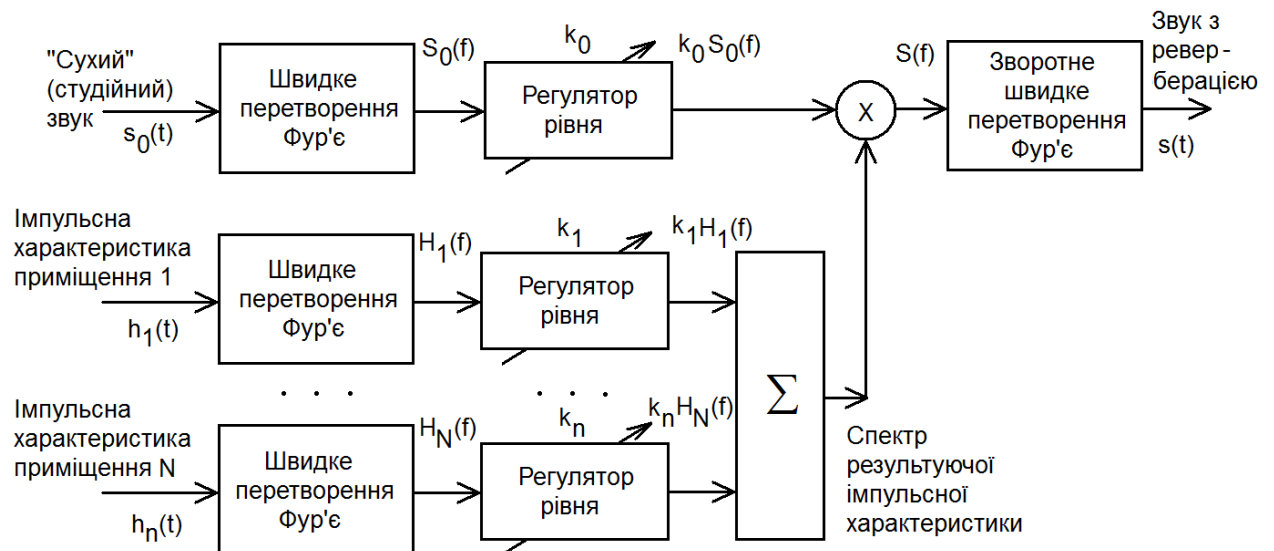


Рисунок 3.1 – Схема отримання конволюційної реверберації

На вхід схеми подається "сухий" студійний сигнал  $s_0(t)$  без реверберації. Одночасно на інші входи надходять сигнали імпульсних характеристик  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$ , ...,  $h_n(t)$ , отримані в різних точках приміщення. Використання декількох імпульсних характеристик дасть можливість використовувати кожен з них з певним ваговим коефіцієнтом, переміщуючи уявне положення місця прослуховування відносно джерела звуку, отримуючи тим самим потрібний звуковий план.

В розділі 2 показано, що пряме обчислення операції згортки вхідного сигналу з імпульсною характеристикою має велику обчислювальну складність. Тому найбільш доцільно використовувати для таких цілей швидке перетворення Фур'є (ШПФ).

В результаті ШПФ отримуємо комплексний спектр "сухого" студійного звуку  $S_0(f)$  і комплексні спектри відгуку приміщення  $H_1(f)$ ,  $H_2(f)$ , ...,  $H_N(f)$  в точках вимірювання  $1, 2, \dots, N$ :

$$S_0(f) = \sum_{t=0}^{T-1} s_0(t) \exp\left[-\frac{2j\pi}{T} ft\right] = \sum_{t=0}^{T-1} s_0(t) [\cos(2\pi ft/T) - j \sin(2\pi ft/T)], \quad (3.1)$$

$$H_1(f) = \sum_{t=0}^{T-1} h_1(t) \exp\left[-\frac{2j\pi}{T} ft\right] = \sum_{t=0}^{T-1} h_1(t) [\cos(2\pi ft/T) - j \sin(2\pi ft/T)],$$

$$H_2(f) = \sum_{t=0}^{T-1} h_2(t) \exp\left[-\frac{2j\pi}{T} ft\right] = \sum_{t=0}^{T-1} h_2(t) [\cos(2\pi ft/T) - j \sin(2\pi ft/T)], \quad (3.2)$$

....

$$H_N(f) = \sum_{t=0}^{T-1} h_N(t) \exp\left[-\frac{2j\pi}{T} ft\right] = \sum_{t=0}^{T-1} h_N(t) [\cos(2\pi ft/T) - j \sin(2\pi ft/T)],$$

де  $f$  – дискретна частота (відносно частоти дискретизації);

$t$  – дискретний час (номер вибірки в реалізації);

$T$  – тривалість реалізації (кількість вибірок в реалізації).

Після додавання спектрів відгуку приміщення  $H_1(f)$ ,  $H_2(f)$ , ...,  $H_N(f)$  з різними коефіцієнтами  $k_1, k_2, \dots, k_n$  отримуємо спектр результуючої імпульсної характеристики  $H(f)$ :

$$H(f) = \sum_{i=1}^N k_i H_i(f). \quad (3.3)$$

При цьому відбувається "переміщення" уявного положення місця прослуховування відносно джерела звуку і отримується потрібний звуковий план. Регулятор рівня з коефіцієнтом  $k_0$  регулює кількість "сухого" необробленого сигналу, приближуючи чи віддаляючи джерело звуку від слухача. На виході перемножувача отримуємо спектр сигналу з реверберацією:

$$S(f) = k_0 S_0(f) \cdot H(f). \quad (3.4)$$

Після зворотного перетворення Фур'є отримаємо часову реалізацію обробленого сигналу з реверберацією:

$$s(t) = \frac{1}{T} \sum_{f=0}^{N-1} S(f) \exp\left[\frac{2j\pi}{T} ft\right] = \frac{1}{T} \sum_{f=0}^{N-1} S(f) [\cos(2\pi ft/T) + j \sin(2\pi ft/T)]. \quad (3.5)$$

Як показало теоретичне обґрунтування в розділі 2, ця схема дає можливість отримати звучання, найбільш приближене до того, що можна отримати при звукозаписі в так званих "польових умовах" або в знімальному павільйоні. При цьому немає необхідності вивозити акторів або артистів озвучення безпосередньо на місце зйомки, щоби отримати потрібне звучання.

### 3.2 Розробка методики запису імпульсної характеристики

Згідно розробленої структурної схеми обробки (рис.3.1) технологія запису сигналів імпульсних характеристик приміщень повинна включати такі етапи: генерування або формування імпульсного сигналу збудження, а також запис імпульсних характеристик приміщення за допомогою системи розподілених мікрофонів (рис.3.2).

Виміряні імпульсні характеристика приміщення повинні мати в своєму складі мінімум прямої складової звуку і максимум дифузної складової. Це

дасть при обробці більше можливостей для режисера з точки зору налаштування звукового плану. Тому що рівень прямого звуку завжди можна буде відрегулювати за допомогою "сухого" регулятора.

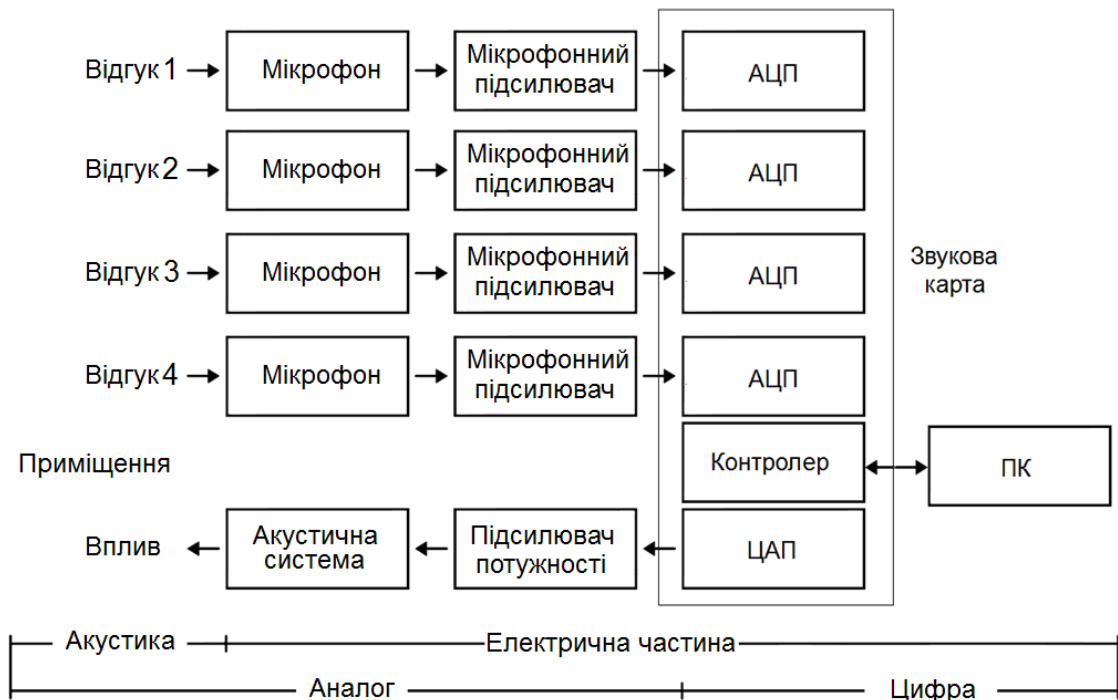


Рисунок 3.2 – Структурна схема запису імпульсних відгуків приміщення

Схема містить персональний комп'ютер ПК, зовнішню звукову карту, збуджуючий сигнал підсилюється і випромінюється акустичною системою, а відгуки приймаються чотирма мікрофонами.

Слід зазначити, що при вимірюванні характеристик приміщення з метою визначення часу реверберації (наприклад, в концертному залі) рекомендується застосовувати ненаправлені (ізотропні) акустичні системи та мікрофони. В нашому випадку стоїть інша задача – отримати імпульсні характеристики в максимально дифузному звуковому полі. Тобто рівень прямого звуку потрібно мінімізувати. Цього можна досягнути застосуванням направлених мікрофонів, наприклад, з кардіоїдною діаграмою спрямованості і спрямувати їх своїм мінімумом на акустичну систему. По-друге, можна поряд з акустичною системою розташувати поглинаючий акустичний екран, зменшивши тим самим потрапляння прямого звуку в мікрофони. Описаний

варіант взаємного розташування мікрофонів (М), акустичної системи (АС) та акустичного екрану (АЕ) показано на рис.3.3.

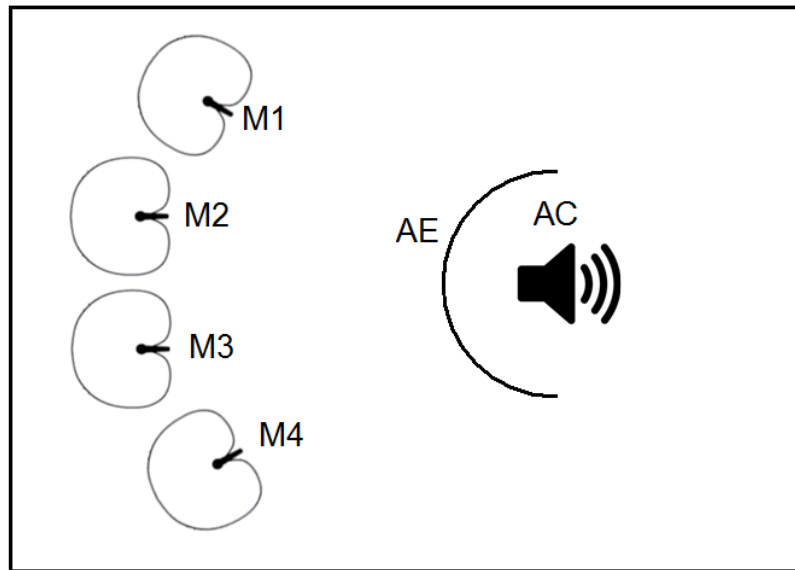


Рисунок 3.3 – Варіант взаємного розташування мікрофонів (М), акустичної системи (АС) та акустичного екрану (АЕ)

Проведемо дослідження сигналу збудження для запису імпульсної характеристики.

### 3.3 Дослідження сигналів імпульсного збуджуючого впливу

Були досліджені декілька варіантів імпульсного збуджуючого впливу з різними законами розподілу миттєвих значень  $a(t)$  і різної тривалості  $\tau$ .

Сигнал імпульсного впливу синтезований в MATLAB. Текст програми для досліджень наведено нижче.

```
clear all
close all

Fs=44100; %Частота дискретизації
T=1; %Тривалість сигналу

s=zeros(1,Fs*T);

N=100; %Кількість вибірок, відмінних від 0

for t=1:N
    s(t)=randn(1,1)-0.5;
end
```

```

n=1:200;
sound(s, Fs*T) %Програвання звуку

recorder = audiorecorder(44100,16,1,-1) %Запис відгуку

recordblocking(recorder, T);
h = getaudiodata(recorder);

plot(n,s(n)) %Графік електричного сигналу збудження
figure

plot(n,h(n)) %Графік акустичного сигналу збудження

N=abs(fft(h)); %Спектр акустичного сигналу збудження

f=1:Fs/2;
figure
plot(f,N(f)) %Графік спектра акустичного сигналу збудження

```

Щоб отримати правильні результати експерименту, його треба проводити в умовах заглушеної кімнати. У цьому разі власна акустика приміщення не вплине на результат вимірювань. В кваліфікаційній роботі дослідження проводилися в умовах знімального павільйону телецентру ХНУРЕ, яка має гарну шумоізоляцію і звукопоглинання:

- рівень шуму в студії (виміряно шумоміром ВШВ-003): 16 дБ,
- час стандартної реверберації: 0,17 с.

Запис звуків імпульсного сигналу збудження проводився на студійний мікрофон Superlux HO-8 с наступними параметрам:

- тип – конденсаторний (електретний);
- застосування – інструментально-вокальний;
- діапазон робочих частот – від 40 Гц до 18 кГц;
- спрямованість – гіперкардіоїдний;
- чутливість –34 дБВ/Па;
- динамічний діапазон – 109 дБ;
- максимальний звуковий тиск (по насиченню) – 136 дБ.

Як слідує з параметрів, застосування мікрофона Superlux HO-8 зведе до мінімуму вплив на результати експерименту. Гіперкардіоїдна спрямованість зменшує рівень відбитих сигналів, а значить, і вплив студійного приміщення. Крім цього, конденсаторні (і електретні) мікрофони, на відміну від

мікрофонів динамічного типу, мають ширший діапазон робочих частот, що зменшує вплив імпульсної характеристики самого мікрофона на запис звуку сигналу збудження. Висока стійкість до перевантаження знижує ймовірність кліпінгу під час експерименту. З цієї ж причини мікрофон застосовується разом з поп-фільтром.

Відстань від акустичної системи до мікрофона підбиралась, з одного боку якомога ближче, щоби зменшити еквівалентну реверберацію, а з іншого – далі, щоби не допустити кліпінгу звуком більше 136 дБ.

Запис проводився на зовнішній аудіоінтерфейс Steinberg UR22. Він має низький рівень шуму у порівнянні з вбудованою в ПК:

- динамічний діапазон 105 дБ;
- коефіцієнт нелінійних спотворень + шум -87 дБ.

Параметри оцифровки звуку імпульсного збудження:

- частота дискретизації – 44100 Гц;
- число біт квантування – 16 біт.

Структурна схема експерименту показана на рис.3.4.



Рисунок 3.4 – Структурна схема експериментального дослідження імпульсних сигналів збудження

В якості імпульсних сигналів збудження використовувалися псевдовипадкові сигнали з нормальним або рівномірним розподілом вірогідності миттєвих значень і нульовим середнім. Приклад

випробувального сигналу з нормальним розподілом показано на рис.3.5, а, приклад сигналу з рівномірним розподілом показано на рис.3.5, б.

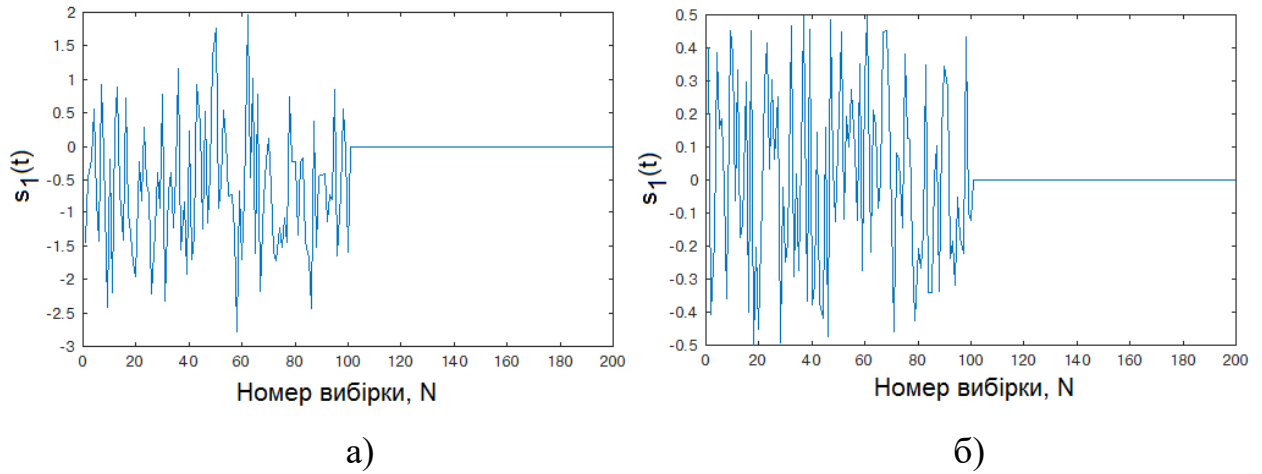


Рисунок 3.5 – Приклад випробувального сигналу з нормальним розподілом (а) і рівномірним розподілом (б)

Тривалість реалізацій можна розрахувати по формулі:

$$\tau = N \cdot f_s, \quad (3.6)$$

де  $N$  – кількість вибірок, відмінних від нуля,

$f_s$  – частота дискретизації.

На рис. 3.6 показані приклади акустичного сигналу звукового монітору, записаного на мікрофон.

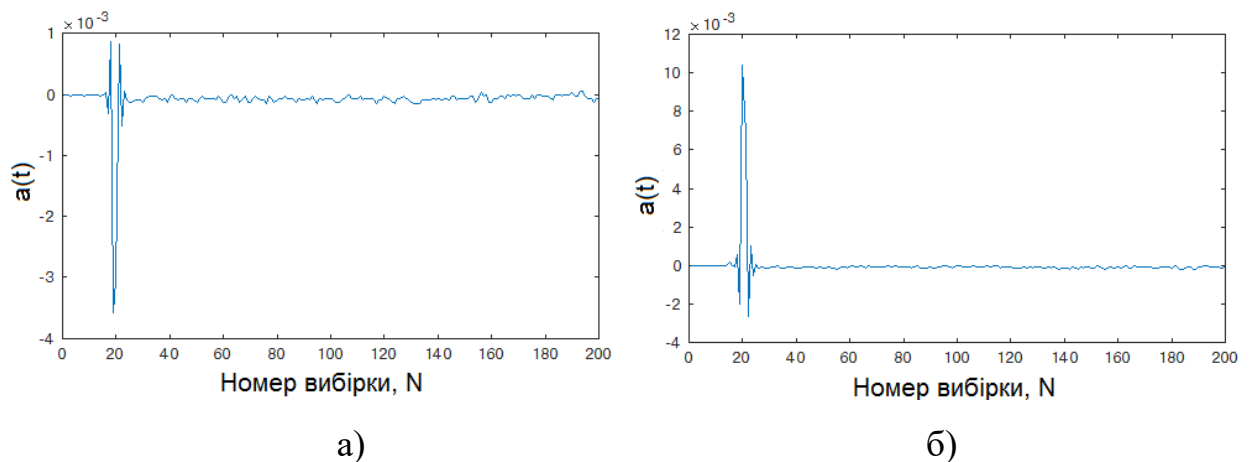


Рисунок 3.6 – Приклади акустичного сигналу звукового монітору, записаного на мікрофон (а – нормальний розподіл, б – рівномірний розподіл)

Як показали дослідження, для акустичної системи потрібна певна тривалість випробувального сигналу, щоби "розкачати" дифузори гучномовців.

Проведена оцінка залежності максимальної амплітуди акустичного сигналу збудження від тривалості випробувального сигналу, який подається на акустичну систему. Ці графіки показані на рис.3.7.

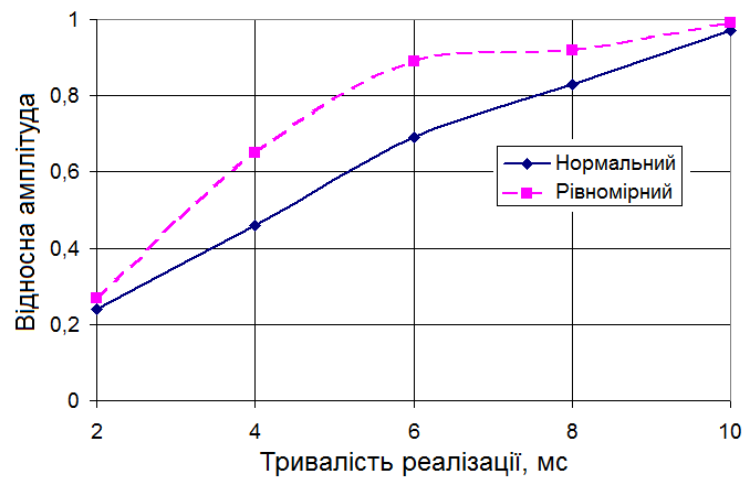


Рисунок 3.7 – Графіки залежності максимальної амплітуди акустичного сигналу збудження від тривалості випробувального сигналу

Як впливає з результатів дослідження, "розкачати" дифузори гучномовців тестовим сигналом з нормальним розподілом можна при меншій його тривалості. Це можна пояснити тим, що сусідні відліки сигналу з рівномірним розподілом частіше мають більший розкид, ніж у сигналу з нормальним розподілом.

Акустичний сигнал досягає 90% від максимуму при мінімальній тривалості сигналу з рівномірним розподілом 6 мс, і при мінімальній тривалості сигналу з нормальним розподілом 9 мс. Обидві тривалості значно менше тих, що очікуються від часу реверберації реальних приміщень, тому такі сигнали підходять для запису імпульсних характеристик.

### 3.4 Експериментальний запис імпульсних характеристик

Експериментальний запис імпульсних характеристик приміщень був проведений в умовах двокімнатної квартири в Харкові. Запис проводився в таких приміщеннях (рис. 3.8):

- зал (вітальня, рис. 3.8, а);
- спальна кімната (рис. 3.8, б);
- кухня (рис. 3.8, в);
- ванна кімната (рис. 3.8, г).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.8 – Умови для запису імпульсних характеристик

Для запису імпульсних характеристики були використані два мікрофони Superlux HO-8 та двохходовий зовнішній аудіоінтерфейс Steinberg

UR22. Взаємна орієнтація мікрофонів та акустичної системи була аналогічною тій, що показана на рис. 3.3.

Отримані імпульсні характеристики показані на рис. 3.9 і рис.3.10.

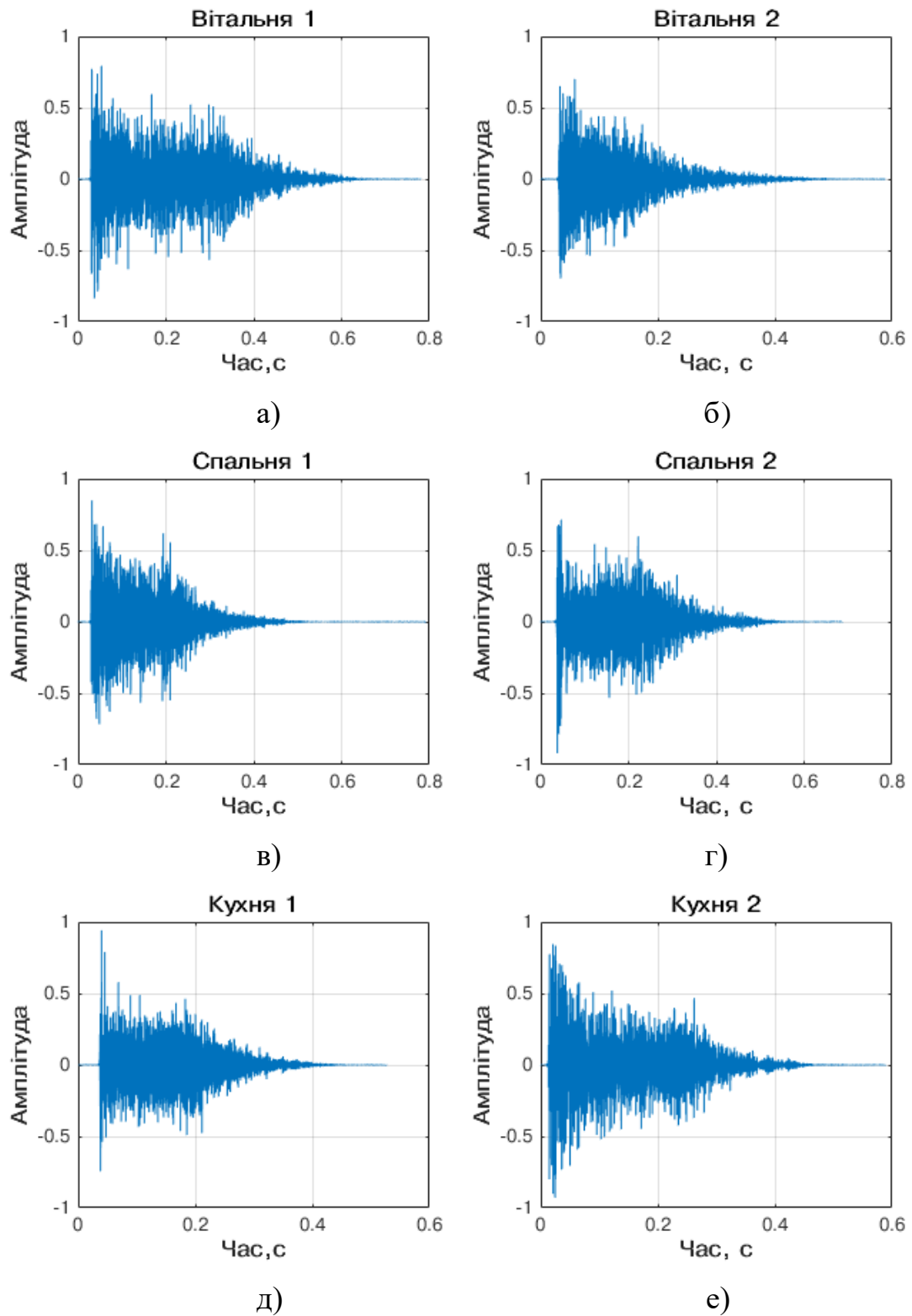


Рисунок 3.9 – Вимірні реалізації імпульсних характеристик приміщень вітальні (а,б), спальні (в,г) і кухні (д,е)

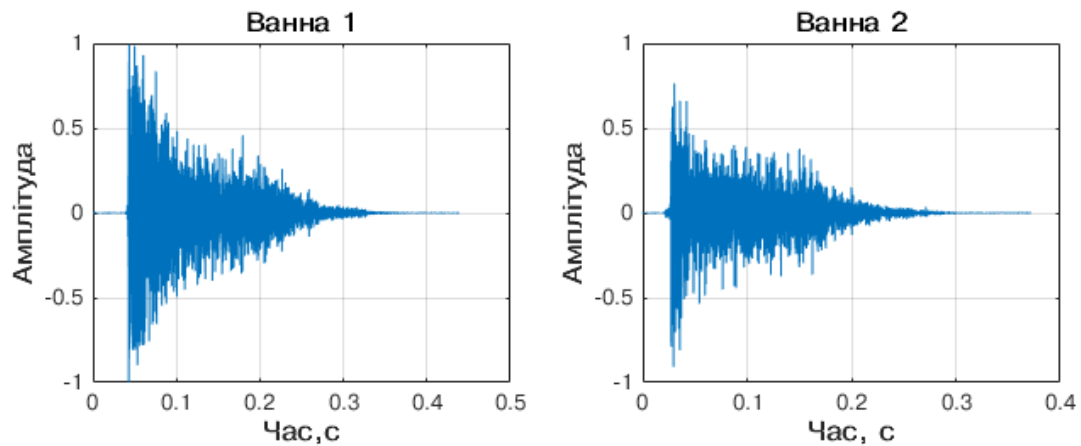


Рисунок 3.10 – Виміряні реалізації імпульсних характеристик приміщення ванної кімнати

З аналізу отриманих імпульсних характеристик можна зробити певні висновки.

1. Помітно, що час реверберації для приміщень різної площі та об'єму суттєво відрізняється. Найдовший імпульсний відгук у вітальні, найкоротший – у ванній кімнаті.

2. Для різних точок розташування мікрофонів відносно джерела звуку час реверберації може виходити різним. Ця різниця іноді сягає до 15...20%.

3. Крім зміни часу реверберації дуже помітно змінюється часова структура відбиттів, причому такі зміни можуть торкатися не тільки початкової фази ранніх відбиттів, але й більш пізнього часу – 0,2...0,4 с. Очевидно, цей факт дуже впливатиме на сприйняття звукової картини слухачем.

4. В процесі вимірювань помітним був вплив шуму, тому час реверберацій по рівню -60 дБ важко оцінити. Проте, є можливість оцінки по рівню -30 дБ з подальшим подвоєнням отриманого значення.

### 3.5 Конволюційна обробка дикторського голосу

В кваліфікаційній роботі проведено експеримент з конволюційної обробки дикторського голосу. Обробка проведена в MATLAB, текст програми наведено нижче.

```

clear all

[h, Fs]=audioread('C:\wav\Кухня1.wav');
[s0, Fs]=audioread('C:\wav\Голос.wav');

n1=size(h,1);
n2=size(s0,1);

H=fft(h,n2);
S0=fft(s0);
S=H.*S0;
s=ifft(S);
s=real(s);
s=s/max(s); s0=s0/max(s0);
sound(s, Fs)

N1=1:size(h,1); N2=1:size(s0,1);

subplot(1,2,1), plot(N2/Fs,s0(N2))
grid on
xlabel('Час,с','FontSize',12,'FontWeight','bold')
ylabel('Амплітуда','FontSize',12,'FontWeight','bold')
title('До обробки','FontSize',12,'FontWeight','bold')

subplot(1,2,2), plot(N2/Fs,s(N2))

grid on
xlabel('Час, с','FontSize',12,'FontWeight','bold')
ylabel('Амплітуда','FontSize',12,'FontWeight','bold')
title('Після обробки (ванна)','FontSize',12,'FontWeight','bold')

audiowrite('C:\wav\Обр-Кухня1.wav',s, Fs)

```

На рис. 3.11 та рис. 3.12 показані приклади сигналів до та після ревербераційної конволюційної обробки. В якості оригінального сигналу був використаний студійний звукозапис з низькими шумами та малою реверберацією.

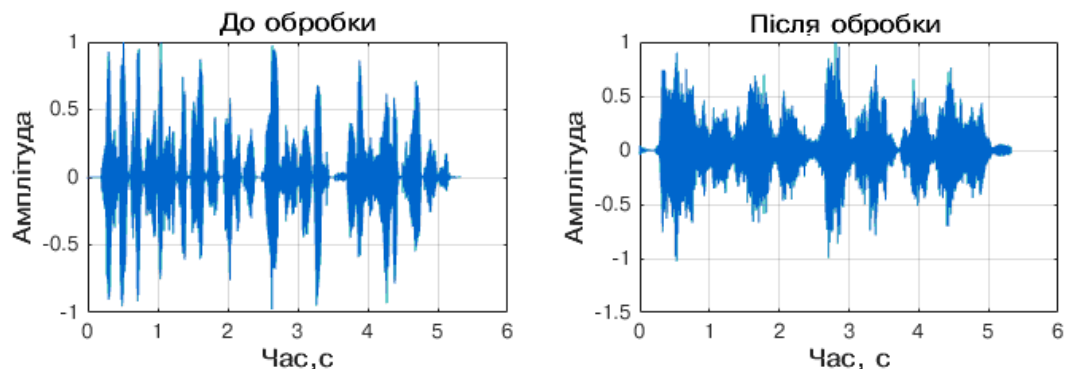


Рисунок 3.11 – Приклади сигналів до та після ревербераційної конволюційної обробки для приміщення залу

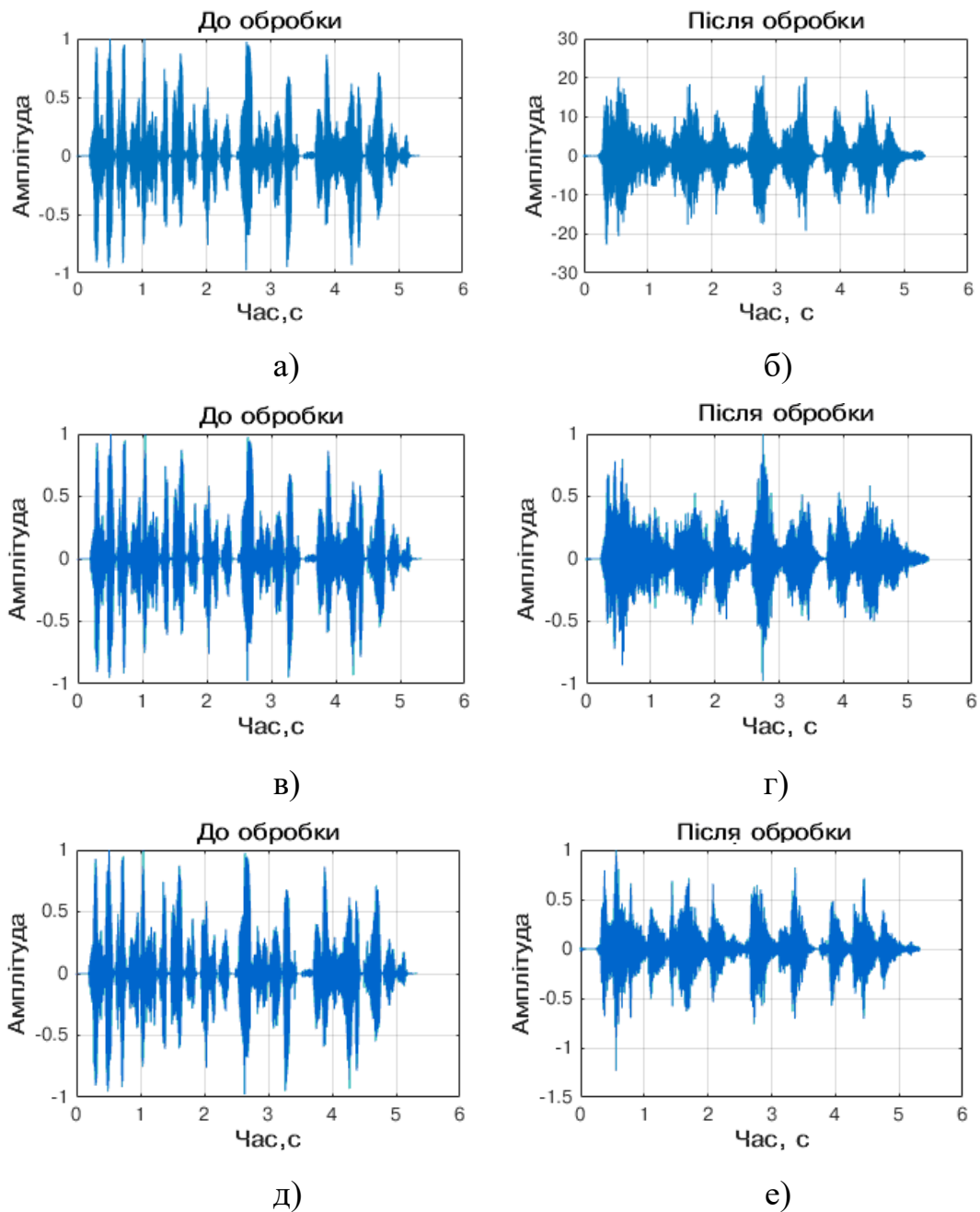


Рисунок 3.12 – Приклади сигналів до (а, в, д) та після ревербераційної конволюційної обробки для приміщень спальні (б), кухні (г) та ванної (е)

### 3.6 Висновки по розділу 3

Аналізуючи часову структуру отриманих сигналів, можна відмітити наступне. По-перше відмінність часу реверберації помітна по різному заповненню пауз між словами. Найбільша заповненість відбитими сигналами для приміщення вітальні, найменша – для ванної кімнати.

Конволюційна обробка сигналів з різними імпульсними характеристиками суттєво змінює обвідну сигналу, зокрема розподіл гучності по словам та складам.

Отримані в результаті звукові сигнали відповідають дальньому звуковому плану та мають характерні частотні фарби, по яким можна легко впізнати приміщення. Так звук для ванної кімнати і кухні вийшов дзвінким, для спальні і вітальні більш приглушеним на верхніх частотах, що відповідає наявності м'яких поглинаючих покриттів.

Отримати більш близький звуковий план можна, змішуючи оброблений звук з оригінальним "сухим" в потрібній пропорції. Для переміщення уявного джерела звуку по кімнаті можна міксувати між собою імпульсні характеристики одного приміщення, записані різними мікрофонами.

## ВИСНОВКИ

В сучасній медіаіндустрії при створенні звуку дуже важливу роль відіграє просторова обробка. Вона дуже важлива як у будь-якому музичному міксі, так і в кіно, або в комп'ютерній грі. Вона здатна зробити звучання більшим, ніж воно є, або створити відчуття, що джерело було записане у якомусь конкретному приміщенні, коли насправді це не так. За допомогою штучної реверберації можна трохи відсунути звук «назад» (глибше в сцену), для створення декількох звукових планів, або ж надати об'єму звучанню.

Сьогодні до програмних та апаратних засобів штучної реверберації висуваються високі вимоги з точки зору природності звучання. У слухача повинно складатися повне враження знаходження в одному приміщенні з джерелом звуку

В кваліфікаційній роботі досліджуються основні види програмної ревербераційної обробки сигналів, оцінюється вплив параметрів ревербераторів на реалістичність звучання. Крім того досліджуються можливості і особливості застосування перспективного конволюційного методу реверберації, який поєднує програмну обробку з попередніми апаратними вимірюваннями.

В результаті теоретичного аналізу показано, що велике значення для реалістичності звучання має не тільки сам час ревербераційного відгуку, але перш за все його тонка часова структура. Ревербераційний процес складається з прямого звуку, ранніх відбиттів, які несуть інформацію про найближчі до джерела предмети. Потім, коли відбиття в приміщенні ростуть в геометричній прогресії, вони зливаються в єдиний ревербераційний хвіст.

Точне, в деталях, відтворення ревербераційного відгуку і є запорукою реалістичності звучання. При моделюванні відбитих хвиль також треба враховувати частотну характеристику коефіцієнта поглинання покриттів приміщення, які роблять звук або дзвінким (якщо покриття тверді), або м'яким (якщо покриття м'які).

Проаналізовано структурні схеми, за якими можна отримати сигнали ранніх відбиттів. Складність таких схем залежить від кількості поверхонь, по яким моделюються відбиття. Схеми включають в себе лінії затримки, фільтри, регулятори затухання. Шляхом підбору цих параметрів можна сформувати потрібну часову і частотну структуру ранніх відбиттів. Цей метод називається алгоритмом Герзона.

В якості методу для пізньої реверберації найчастіше використовується алгоритм Моора. Для імітації пізніх відбиттів тут використовуються 6 паралельно з'єднаних гребінчастих фільтрів зі зворотним зв'язком. У колі зворотного зв'язку включений ФНЧ, який імітує ефект затухання інтенсивності на верхніх частотах. Сумарний сигнал із цих фільтрів подається на вихід через часову затримку. Вона імітує запізнення пізніх відбиттів відносно ранніх відбиттів на 5...10 мс. Коефіцієнт  $A_1=0,7$  створює необхідний рівень пізніх відбиттів.

Досліджено вплив зазначених параметрів на часові характеристики створюваного ревербераційного відгуку і на загальне сприйняття реверберованого звуку. В дослідженні брали участь 6 студентів, яким програвався в навушники голос диктора, записаний у телевізійній студії ХНУРЕ, оброблений при різних налаштуваннях ревербератора. Студенти оцінювали реалістичність оброблених звуків по 5-бальній шкалі. Зрозуміло, що таке дослідження не може претендувати на виняткову репрезентативність. Однак, в результаті отримані наступні висновки.

Ранні відбиття мають вирішальне значення для відчуття сприйняття простору, зокрема, ефект об'єму кімнати. Для того, щоби ефект реверберації гарно звучав, перші ранні відбиття повинні приходити через 15...20 мс після прямого звуку, а сумарна потужність ранніх відбиттів (в діапазоні 15...50 мс) повинна становити приблизно -6 дБ від потужності прямого сигналу. На сприйняття реверберації найбільше впливає згасання реверберації від максимального значення рівня – 15 дБ.

Велика кількість налаштувань значно ускладнює роботу з програмним ревербератором. Для музики реалістичність звучання не має такого значення, як для кіно, тому що в музичному треку реверберований сигнал звучить в міксі.

В роботі досліджено перспективний для кіноіндустрії метод отримання природного звучання реверберації – конволюційний (або згортковий метод). Він полягає у попередньому записі імпульсної характеристики реального приміщення, і в подальшому обчисленні згортки цієї імпульсної характеристики з "сухим" сигналом без реверберації.

Розроблено структурну схему конволюційного ревербератора. На вхід подається "сухий" студійний сигнал. Одночасно на інші входи надходять сигнали імпульсних характеристик, отримані в різних точках приміщення. Декілька імпульсних характеристик дають можливість зважувати кожен з них з певним коефіцієнтом, переміщуючи уявне положення місця прослуховування відносно джерела звуку, отримуючи тим самим потрібний звуковий план. Регулятор рівня необробленого сигналу приближує чи віддаляє джерело від слухача.

Оцінки показали, що пряме обчислення згортки має велику обчислювальну складність. Тому доцільно використовувати для таких цілей швидке перетворення Фур'є (ШПФ). Згортка в часовій області еквівалентна перемноженню спектрів.

Розроблено методику запису імпульсної характеристики. Вона включає етапи генерування імпульсного сигналу збудження, а також запис імпульсних характеристик приміщення за допомогою системи розподілених мікрофонів. Виміряні імпульсні характеристики повинні мати мінімум прямої складової звуку і максимум дифузної складової. Це дасть більше можливостей режисеру для налаштування звукового плану. Бо рівень прямого звуку завжди можна відрегулювати при обробці. Зазначена вимога досягається відвертанням одне від одного спрямованої акустичної системи і

мікрофонів, можна поряд з акустичною системою розташувати поглинаючий акустичний екран.

Були досліджені декілька варіантів імпульсного збуджуючого впливу з різними законами розподілу миттєвих значень і різної тривалості. Дослідження проведені в умовах Телецентру ХНУРЕ. В якості імпульсних сигналів збудження використовувалися псевдовипадкові сигнали з нормальним або рівномірним розподілом вірогідності миттєвих значень і нульовим середнім. Як показали дослідження, для акустичної системи потрібна певна тривалість випробувального сигналу, щоби "розкачати" дифузори гучномовців. Проведена оцінка залежності амплітуди акустичного сигналу від тривалості випробувального сигналу.

"Розкачати" дифузори гучномовців тестовим сигналом з нормальним розподілом можна при меншій його тривалості. Це можна пояснити тим, що сусідні відліки сигналу з рівномірним розподілом частіше мають більший розкид, ніж у сигналу з нормальним розподілом.

Акустичний сигнал досягає 90% від максимуму при мінімальній тривалості сигналу з рівномірним розподілом 6 мс, і при мінімальній тривалості сигналу з нормальним розподілом 9 мс. Обидві тривалості значно менше тих, що очікуються від часу реверберації реальних приміщень, тому такі сигнали підходять для запису імпульсних характеристик.

Експериментальний запис імпульсних характеристик проведений в умовах двокімнатної квартири в Харкові. Запис проводився в приміщеннях вітальні, спальної кімнати, кухні і ванної. Для запису були використані два мікрофони Superlux HO-8 та двохходовий зовнішній аудіоінтерфейс Steinberg UR22.

З аналізу отриманих імпульсних характеристик можна зробити Такі висновки. Для різних точок розташування мікрофонів відносно джерела звуку час реверберації може виходити різним. Ця різниця іноді сягає до 15...20%. Крім зміни часу реверберації дуже помітно змінюється часова структура відбиттів, причому такі зміни можуть торкатися не тільки

початкової фазі ранніх відбиттів, але й більш пізнього часу – 0,2...0,4 с. Очевидно, цей факт дуже впливатиме на сприйняття звукової картини слухачем.

Проведено експеримент з конволюційної обробки дикторського голосу. Обробка проведена в MATLAB. В якості оригінального сигналу був використаний студійний звукозапис диктору з низькими шумами та малою реверберацією.

Аналізуючи часову структуру отриманих сигналів, можна відмітити наступне. По-перше відмінність часу реверберації помітна по різному заповненню пауз між словами. Найбільша заповненість відбитими сигналами для приміщення вітальні, найменша – для ванної кімнати.

Конволюційна обробка сигналів з різними імпульсними характеристиками суттєво змінює обвідну сигналу, зокрема розподіл гучності по словам та складам.

Отримані в результаті звукові сигнали відповідають дальньому звуковому плану та мають характерні частотні фарби, по яким можна легко впізнати приміщення. Так звук для ванної кімнати і кухні вийшов дзвінким, для спальні і вітальні більш приглушеним на верхніх частотах, що відповідає наявності м'яких поглинаючих покриттів.

Отримати більш близький звуковий план можна, змішуючи оброблений звук з оригінальним "сухим" в потрібній пропорції. Для переміщення уявного джерела звуку по кімнаті можна міксувати між собою імпульсні характеристики одного приміщення, записані різними мікрофонами.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Радиовещание и электроакустика / [С.И. Алябьев, А.В. Выходец, Р. Гермер и др.]; под ред. Ю.А. Ковалгина. – Москва: Радио и связь, 2000. – 792 с.: ил.
2. Алдошина И.А. Электроакустика и звуковое вещание / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов. – Москва: Радио и связь, 2007. – 872 с.
3. Сапожков М.А. Электроакустика / М.А. Сапожков. – Москва: Связь, 1978. – 272 с.: ил.
4. Акустика: Справочник/ А.П.Ефимов, А.В.Никонов, М.А. Сапожков, В.И. Шоров; ред. М.А. Сапожкова. – 2 изд. перераб. и доп. – Москва: Радио и связь, 1986. – 336 с.: ил.
5. Кнудсен Верн Оливер. Архитектурная акустика: пер. с англ. под ред. Е.А. Копиловича, Л.Д. Брызжева. – Изд. 4-е. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. – 520 с.
6. Зрительные залы. Метод измерения времени реверберации / ГОСТ 24146-89. Дата введения 1990-01-01.
7. Петелин Р.Ю. Музыкальный компьютер. Секреты мастерства / Р.Ю. Петелин Ю.В. Петелин. – Изд. 2-е. – СПб.: БВХ-Петербург; Арлит, 2004. – 688 с.
8. Цифровая звукозапись. Под редакцией Дж. Мааса и М. Веркамена. Пер. с англ. – М.: Мир, 2004. – 352 с.
9. Радзишевский А. Основы аналогового и цифрового звука. Из-во дом «Вильямс», М, СПб, Киев, 2006, – 281.
10. Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшин, М.Н.Поляк. Цифровая обработка сигналов. Справочник. – М. Радио и связь, 1985. – 322 с.
11. Звуковое вещание. Справочник. Под ред. Ю.А.Ковалгина. М. Радио и связь, 1993. – 463 с.

12. Ковалгин Ю.А., Вологдин Э.И. Цифровое кодирование звуковых сигналов. – СПб.: КОРОНА –принт, 2004. – 240 с.

13. Mark Kahrs, Karlheinz Brandenburg. Application of Digital Signal Processing to Audio and Acoustic. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, London, Moscow. 2002. – pp. 538.

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., Korytsev 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. Буйницький Д.В. Апаратно-программний комплекс для дослідження акустических пристроїв // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 92-93.

23. Ашихмин В.О. Исследование системы коррекции звука с учётом характеристик помещения // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 96-97.

24. Тушев В.О. Исследование влияния фазовых искажений аудиоаппаратуры на качество звучания // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 84-85.

25. Чернов К.А. Исследование акустических характеристик студии звукозаписи // 23-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». – Харків, 16–18 квітня 2019 р. – с. 94-95.

26. Ашихмін В.О. Адаптивні методи подавлення акустичного зворотного зв'язку: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 69 с.

27. Буйницький Д.В. Дослідження методів компенсації ревербераційних завад: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 67 с.

28. Шевченко П.Д. Система вимірювання та аналізу акустичних характеристик приміщень: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 68 с.

29. Лісовий Р.О. Комплексне дослідження акустичних характеристик студійного приміщення: атестаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра. – Х.: ХНУРЕ. – 2019 р. – 81 с.

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

31. Методичні вказівки з виконання атестаційної магістерської роботи за спеціальністю 8.05090102 «Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення». Освітньо-кваліфікаційний рівень – магістр / Упоряд. В.М. Карташов, В.А. Тихонов, І.В. Савченко – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 68 с.