

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ**  
**СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ**

**КАФЕДРА АКУСТИКИ ТА АКУСТОЕЛЕКТРОНІКИ**

«На правах рукопису»

«До захисту допущено»

УДК 681.884

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Дідковський В.С.

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Магістерська дисертація**

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності (спеціалізації) 171 «Електроніка»

на тему: Мультифункціональний зал з адаптивною акустикою

Виконав : студент 2 курсу, групи ДГ-81мп

Касянчик Юрій Олександрович

(підпис)

Керівник:

к.т.н. доцент Богданов О.В.

(підпис)

Консультант

— \_\_\_\_\_

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доц. каф. ЗТіРІ к.т.н. Попович П. В.

\_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

Кафедра акустики та акустoeлектроніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) 171. «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Дідковський В.С.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Касянчику Юрію Олександровичу

1. Тема дисертації: Мультифункціональний зал з адаптивною акустикою.  
науковий керівник дисертації: к.т.н. доцент Богданов О.В. , затверджені наказом по університету від «01» вересня 2019 р. №3859-С.
2. Строк подання студентом дисертації: 10.12.19.
3. Об'єкт дослідження: система синтезу звукового поля в мультифункціональному залі.
4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Проектування акустичних систем в мультифункціональному залі. Вихідні данні обираються залежно від поставленої задачі і оптимальних, рекомендованих умов і розмірів приміщення
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Провести огляд літературних інформаційних джерел та виявити проблеми та недоліки данної системи.

Реалізувати її для заданого залу та спроектувати змінну акустику. Провести моделювання і зробити висновок і рекомендації.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: комплект презентацій в Power Point.

7. Консультанти розділів дисертації\*

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
|        |                                           |                |                  |

8. Дата видачі завдання: 1 вересня 2019 року.

#### Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)                                                        | Строк виконання етапів проекту (роботи) | Примітка |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------|
| 1     | Збір та вивчення джерел інформації для написання дипломної роботи; складання бібліографії наукових джерел | 05.09.2019 - 15.09.2019                 |          |
| 2     | Складання плану магістерської дисертації                                                                  | 16.09.19 - 20.09.19                     |          |
| 3     | Підготовка та написання першого розділу                                                                   | 21.09.19 - 10.10.19                     |          |
| 4     | Підготовка та написання другого розділу                                                                   | 11.10.19 - 15.10.19                     |          |
| 5     | Підготовка та написання третього розділу                                                                  | 16.10.19 - 26.10.19                     |          |

---

\* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

|   |                                            |                     |  |
|---|--------------------------------------------|---------------------|--|
| 6 | Підготовка та написання четвертого розділу | 27.10.19 - 14.11.19 |  |
| 7 | Написання анотації, вступу та висновків    | 15.11.19 – 26.11.19 |  |
| 8 | Здача оформленої роботи на кафедру         | 27.11.19 – 10.12.19 |  |

Студент \_\_\_\_\_

Ю.О. Касянчик

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_

О.В.Богданов

## АНОТАЦІЯ

Дипломна робота містить основну частину на 75 аркушах, 63 ілюстрацій.

Метою роботи є аналіз існуючої літератури, засвоєння теоретичних знань і реалізація їх на проектованому прикладі. А саме система адаптивної акустики в поєднанні з системою Wave Field Synthesis(WFS) в мультифункціональному залі. Головною функцією якого є відтворення різних програм, від мовних і музичних до відтворення звуку за стандартом Dolby. Після підбору всіх вхідних даних, розмірів приміщення і вибору акустичної системи проведено аналіз в програмному пакеті Matlab з використанням змодельованих графіків і масивів даних. По всій роботі, з врахуванням всіх результатів зроблені висновки.

Ключові слова: *мультифункціональний зал, адаптивна акустика, WFS, Dolby, акустичне поле.*

## ANNOTATION

The thesis contains the main part of 75 sheets, 63 illustrations.

The purpose of the work is to analyze the existing literature, assimilate theoretical knowledge and implement it on a projected example. Namely, the system of adaptive acoustics in combination with the Wave Field Synthesis (WFS) in the multifunctional room. The main function of which is the playback of various programs, from speech and music to Dolby sound. After selecting all of the input data, the size of the premises and the choice of the speaker system, the analysis was performed in the Matlab software package using simulated graphs and arrays. Throughout the work, all the conclusions are drawn.

Keywords: multifunctional hall, adaptive acoustics, WFS, Dolby, acoustic field.

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                           | 8  |
| 1. Особливості акустики приміщень .....                                              | 10 |
| 1.1. Методика розрахунку акустичних характеристик приміщення .....                   | 10 |
| 1.1.1. Статистична теорія .....                                                      | 10 |
| 1.1.2. Хвильова теорія.....                                                          | 11 |
| 1.1.3. Геометрична теорія.....                                                       | 12 |
| 1.1.4. Висновок .....                                                                | 13 |
| 1.2. Оптимальний час реверберації .....                                              | 15 |
| 1.3. Приклади мультифункціональних залів .....                                       | 18 |
| 1.4 Адаптивна акустика .....                                                         | 20 |
| 1.5 Практична частина.....                                                           | 23 |
| 1.5.1 Вхідні данні .....                                                             | 23 |
| 1.5.2. Розрахунок загального звукопоглинання та стандартного часу реверберації ..... | 24 |
| 1.5.3. Побудова площадок перших відбиттів .....                                      | 27 |
| 1.5.4. Розрахунок часової послідовності відбиттів.....                               | 30 |
| 2. Озвучення.....                                                                    | 44 |
| 2.1 Вимоги до систем звукопідсилення і озвучення .....                               | 44 |
| 2.2 Особливості розрахунку мультифункціональних залів.....                           | 47 |
| 2.3 Сучасні рішення для мультифункціональних залів .....                             | 48 |
| 2.4. Часові затримки для гучномовців .....                                           | 50 |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5 Wave Field Synthesis (WFS) - система хвильового синтезу просторового звуковідтворення ..... | 51 |
| 2.6 Вибір системи звукоозвучення для мультифункціонального залу.....                            | 54 |
| 3. Моделювання.....                                                                             | 56 |
| 3.1 Моделювання поля за принципом WFS .....                                                     | 56 |
| 3.2 Моделювання поля за принципом DOLBY .....                                                   | 64 |
| 4.СТАРТАП .....                                                                                 | 67 |
| 4.1 Ідея стартапу.....                                                                          | 67 |
| 4.2 Фінансові розрахунки.....                                                                   | 68 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                   | 72 |
| Список літератури.....                                                                          | 74 |

## Вступ

Добігає кінця 2019 рік, за останні десятиліття світ змінився докорінно. Ці зміни звичано, стосуються не тільки технологічного аспекту, але саме технології допомагають нам рухатися вперед, постійно вдосконалюючись. Якщо раніше для проведення концерту було потрібне велике приміщення яке, наприклад, було «заточене» під конкретну концертну програму, і то акустична складова часто залишала бажати кращого – то зараз вузькопрофільні приміщення попросту не є рентабельні. Адже з розвитком технологій і удосконаленням їх мобільності, кожне приміщення за день, і за допомогою інженерів-монтажників може перетворитися на простір для іншого цільового призначення. І попит на такі приміщення звичайно є! Але є одне «але». Акустика в таких приміщеннях повинна бути також адаптивною і відповідати всім заданим критеріям, тому цьому питанню слід приділити левову частку часу при проектуванні багатofункціональних залів.

Конференції, офіційні зустрічі, презентації вимагають чіткості і прозорості мови спікера. Музичні програми, корпоративи зі св'ятковою шоу-програмою вимагають хорошого просторового враження і рівномірності звукового поля по всій площі звукової зони. Великі зали багатоцільового призначення сприяють підвищенню емоційного впливу художньої програми, яка сприймається спільно всіма слухачами. Важливо лише з самого початку вирішити, чи призначений зал в основному для прослуховування мови або в ньому передбачається слухати музику. Висока якість звучання музики слід, як правило, забезпечувати виключно архітектурно-акустичними засобами. Пояснюється це тим, що за допомогою системи звукопідсилення, тобто електроакустичними засобами, легше й дешевше забезпечити хорошу розбірливість мови в надмірно гулкому приміщенні, ніж додати «просторовість» в приміщенні, призначеному для мови і має порівняно невеликий час реверберації, для того, щоб звучання музики набуло необхідної цілісності і повноти. Однією з додаткових проблем стає збільшення часу

реверберації в разі використання залу для музичних програм. І та, і інша задачі - забезпечення розбірливості мови в великих приміщеннях і підвищення просторового звучання в залах з невеликим часом реверберації - успішно вирішуються сьогодні за допомогою проектуванням адаптивної акустики і систем озвучення і підсилення. До однієї з систем озвучення, і можливо найбільш цікавою і найперспективнішою є **WFS(Wave Field Synthesis)**. Теоретичні основи системи були покладені ще у 1690 Х. Гюйгенсом, а в 1988 вона була реалізована професором А. Бертхаутом із Дельфтського Університету. Практична реалізація такої системи полягає в наступному: за допомогою розподіленої системи мікрофонів записується звукове поле первинного джерела, отримані сигнали обробляються в відповідному процесорному пристрої і подаються на систему гучномовців, за допомогою якої відтворюється звукове поле первинного джерела у вторинному приміщенні. При цьому слухачі можуть розташовуватися і переміщатися в будь-яку точку приміщення зі збереженням стабільного положення джерел, що є одним з головних переваг системи. Новим поштовхом до розвитку просторових звукових систем синтезу хвильового поля (WFS) послужило включення цієї тематики в європейський міждисциплінарний проект CARROUSO. Метою цього проекту, розпочатого в 2001 р, була розробка нових технологій, які забезпечували б передачу тривимірного звукового поля з реального або віртуального простору в інший простір з високою якістю звуку. Пропонована система може знайти собі досить багато застосувань, в кінотеатрах, концертних залах і театрах, де вона може забезпечити високу якість просторового звуку на великій площі слухацьких місць; при створенні систем віртуальної реальності, дозволяючи поєднати зоровий образ зі слуховим в будь-якій точці простору; в системах телеконференц-систем, де, створюючи фокусовані джерела в заданій точці, можна концентрувати увагу учасників. [11] Саме цьому, а також вирішенню проблем що виникають при проектуванні і буде присвячена ця дипломна робота.

# **1. Особливості акустики приміщень**

## **1.1. Методика розрахунку акустичних характеристик приміщення**

Звичайно, для того щоб правильно спроектувати приміщення, обрати матеріали і відповідні акустичні системи, потрібно розумітися на теоріях поширення звуку в просторі.

### **1.1.1. Статистична теорія**

Статистична теорія розроблена протягом XX століття в працях У. Себіна і Ф. Ейрінгом, а також їх послідовників. У ній оперують необмеженим числом відображень, що відбуваються під час руху хвиль по безлічі шляхів, але нехтують прямим шляхом. Введено статистичні параметри: середня статистична довжина пробігу між двома відбитками і середня статистична затримка сигналу на цьому шляху. Підсумовуючи ці затримки в час, за який щільність звукової енергії зменшиться в  $10^6$  разів, визначають найважливіший числовий акустичний параметр приміщення - час реверберації  $T$ .

Отримані розрахункові значення часу реверберації тим ближче до істинного, ніж повільніше спадає звукова енергія, тобто чим менше коефіцієнт поглинання і чим ближче співвідношення розмірів приміщення до «золотого перетину».

Величезним досягненням статистичної теорії стала можливість чисельно визначити час реверберації. Однак слід завжди критично ставитися до одержуваних результатів і не довіряти їм сліпо.

Всі статистичні формули мають загальний недолік: якщо число відображень мале, то середня статистична оцінка часу реверберації неможлива. Так в приміщенні розміром  $12 \times 9 \times 6$  м (об'єм 650 м<sup>3</sup>) середня статистична довжина вільного пробігу між двома відбитками дорівнює 5,5 м.

Нехай  $T = 1$  с, при цьому корисним чутним є лише частина цього часу, наприклад 0,4 с. За цей час звук пробігає 130 м і число відображень складе 23, що не надто багато.

Для залу розміром  $40 \times 30 \times 15$  м (об'єм 18000 м<sup>3</sup>) довжина пробігу складе 16 м, і кількість відображень складе 8. Ясно, що при цьому серйозна статистична оцінка часу реверберації неможлива.

Тому у великих залах, особливо сильно заглушених, для оцінки акустичного якості важливіше вивчати розподіл в часі приходу прямих хвиль і початкових відображень.

Висновки статистичної теорії незастосовні і для оцінки невеликих приміщень, лінійні розміри яких порівнянні з довжиною хвилі (або менше її) і з великим коефіцієнтом поглинання.

Також, у висновках статистичної теорії не враховується енергія прямих хвиль. Тому результати розрахунків тим точніше, ніж більш віддалена точка спостереження від точки, в якій розташоване джерело звуку.

### **1.1.2. Хвильова теорія**

У хвильовій теорії, розробленої Морзе, Болтом, Дрейzenом і іншими, приміщення розглядається як об'ємний резонатор з безліччю власних (резонансних) частот. Акустичні процеси в ньому розглядаються як збудження власних коливань, їх встановлення і поступовий спад після виключення джерела збудження.

Для приміщень невеликого об'єму щільність резонансних частот, особливо на нижніх частотах, невелика, інтервали між ними складають кілька герц і навіть більше. Тому спектр відбиття в таких приміщеннях помітно відрізняється від спектра збудливого сигналу. Зі збільшенням об'єму приміщення і з ростом частоти спектр власних частот швидко ущільнюється і практично стає суцільним, а не дискретним.

З позицій хвильової теорії пояснюють різні акустичні недоліки приміщень: помітна зміна тембру звуку в невеликих приміщеннях, неприємне підкреслення деяких частотних складових, явище «порхающего эха», незадовільне звучання в приміщеннях, пропорції якого сильно відрізняються від «золотого перетину», - кубічної форми або сильно витягнутого в одному напрямку, з увігнутими поверхнями і т. д.

Мабуть, на основі хвильової теорії можна визначити час реверберації на кожній з резонансних частот приміщення, якщо відомі добротність приміщення-резонатора або коефіцієнти поглинання матеріалів на цих частотах, хоча в існуючій літературі таких розрахункових формул немає.

### **1.1.3. Геометрична теорія**

Геометрична (променева) теорія акустичних процесів в приміщеннях заснована на законах геометричної оптики. Рух звукових хвиль розглядають подібно до руху світлових променів. Відповідно до законів геометричної оптики при відображенні від дзеркальних поверхонь кут відображення  $\beta$  дорівнює куту падіння  $\alpha$ , і падаючі і відбиті промені лежать в одній площині. Це справедливо, якщо розміри поверхонь, що відбивають набагато більші довжини хвилі, а розміри нерівностей поверхонь набагато менші довжини хвилі. Характер відображення залежить від форми поверхні, що відбиває. При відбиванні від плоскої поверхні (рис.1.1, а) виникає уявне джерело  $I$ , місце якого відчувається на слух подібно до того, як око бачить уявне джерело світла в дзеркалі. Відбиття від увігнутої поверхні (рис.1.1,б) призводить до фокусуванні променів в точці  $I$ . Опуклі поверхні (колони, люстри) розсіюють звук (рис.1.1. в).

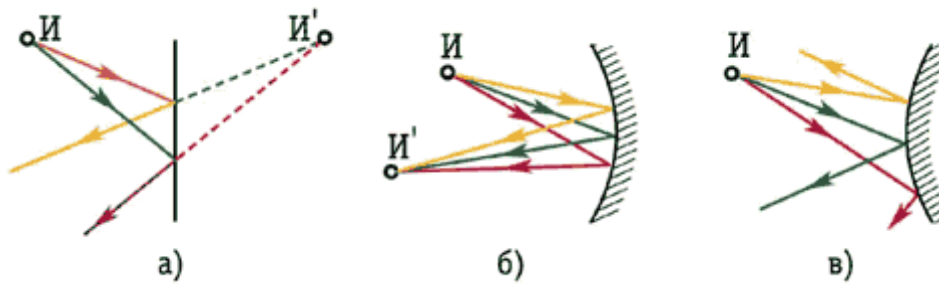


Рис. 1.1 Характер відбиття променів

Важливим для слухового сприйняття є запізнювання відбитих звукових хвиль. Звук, що випромінює джерело, доходить до перешкоди (наприклад, стіни) і відбивається від неї.

Процес багаторазово повторюється з втратою при кожному відбитті частини енергії. На місця слухачів (або в точку розташування мікрофона) перші запізнілі імпульси, як правило, приходять після відображення від стелі і стін залу (студії). [7]

#### 1.1.4. Висновок

Три розглянуті теорії з різних сторін пояснюють акустичні процеси, що відбуваються в приміщеннях. З них тільки одна - статистична - дозволяє визначити чисельно важливу величину, що характеризує акустичні властивості приміщення - час реверберації. Слід лише свідомо, критично ставитися до одержуваної числової оцінкою, розуміти, що в більшості випадків, особливо при розгляді великих приміщень, вона носить орієнтовний характер.

За сучасними поглядами прийнято розділяти процес відлуння, реверберації на дві частини: початкові, порівняно рідкісні запізнілі імпульси, і більш щільна в часі послідовність імпульсів. Першу частину відбиттів звуку оцінюють з позицій геометричної (променевої) теорії, другу - з позицій статистичної теорії.

Геометрична теорія більш застосовна до аналізу акустичних процесів в приміщеннях великих розмірів - концертних і театральних залах, великих студіях. Оптимальні розміри залу (студії) визначають на основі аналізу початкових відображень. При проектуванні великих приміщень розрахунок часу реверберації може дати результат, значно відрізняється від реального, і головне - ця величина не дозволяє повністю оцінити акустичне якість приміщення. У такій оцінці головну роль відіграють початкові відображення. Правильне тимчасове співвідношення початкових відображень забезпечує високу якість звучання навіть тоді, коли час реверберації відрізняється від оптимального.

Статистична і хвильова теорії особливо застосовні до приміщень порівняно малих розмірів, наприклад до студій звукового мовлення і аудиторіям різного призначення. Результати цих теорій як би доповнюють один одного. Перша дає можливість оцінити час реверберації, друга - розрахувати спектр власних (резонансних) частот, скорегувати розміри приміщення так, щоб спектр власних частот в області нижніх частот був більш рівномірним.

## 1.2.Оптимальний час реверберації

Оптимальним часом реверберації називають такий стандартний час реверберації, при якому звучання даної музичної передачі в даному приміщенні буде найкращим або при якому розбірливість мови буде найбільшою. Так як розбірливість мови зменшується при збільшенні часу реверберації, то, мовні студії повинні виконуватися з невеликим часом реверберації. Зазвичай для дикторських студій рекомендується час реверберації 0,4 с. Для музичних студій великої площі рекомендується вибирати час реверберації набагато більшим, до 2 ... 2,2 с.

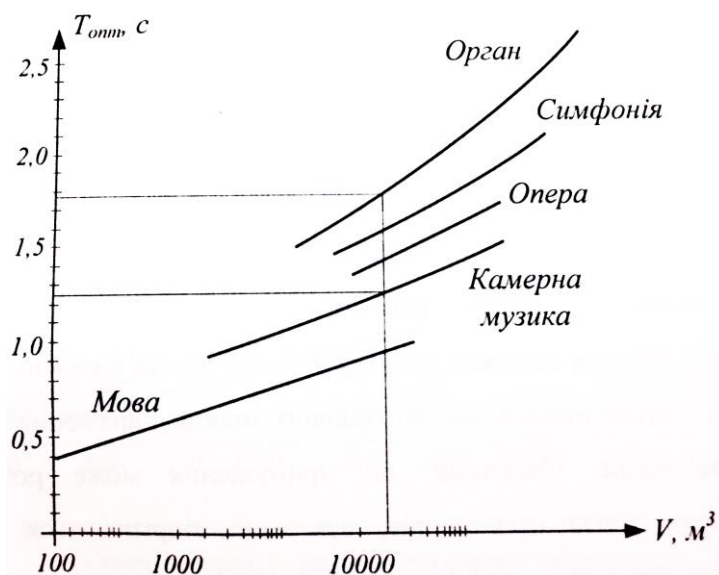


Рис.1.2 Оптимальний час реверберації

На рис.1.2 приводиться графік оптимальних значень часу реверберації на частоті 500 Гц в залежності від об'єму приміщення. Оптимум реверберації для музичних приміщень (концертні зали, оперні театри) займають, як видно з графіка, досить широку смугу значень при заданому об'ємі приміщення. Природно, що різноманіття стилів вносить деяку невизначеність в задачу, розв'язувану проектувальником в тих випадках, коли зал призначається для прослуховування музики різного характеру. В таких випадках доводиться вибирати компромісне рішення. В певній мірі такі компроміси

виправдовуються тим що людське вухо не помічає відхилень від оптимуму порядку  $\pm 10\%$ .

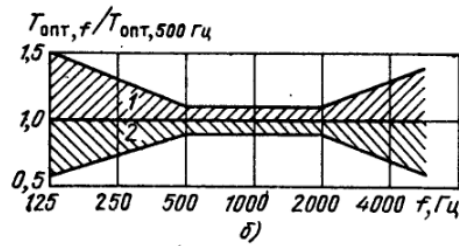


Рис. 1.3. Допустиме відхилення оптимального часу реверберації

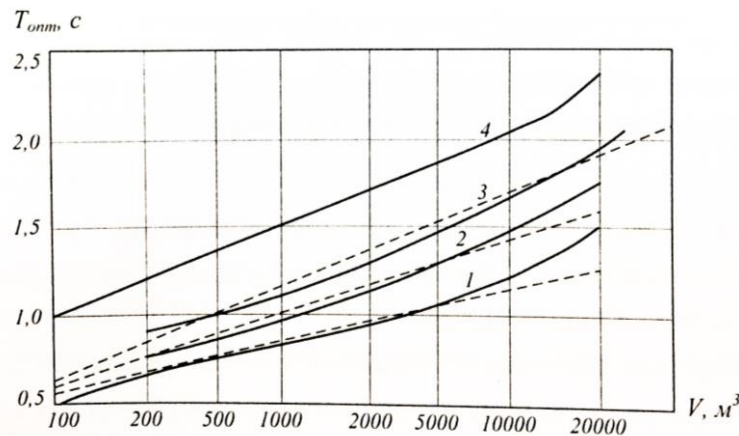


Рис. 1.4 Залежність оптимального часу реверберації від об'єму на частоті 500Гц

1 – мовні передачі; 2 – малі музичні форми і оперні театри; 3 – концертні зали(симфонічна музика); 4 – органна музика

Якщо в приміщенні будуть виконуватися різні програми, то вибирають або середнє значення реверберації для всіх видів програм, або таке значення, яке відповідає найбільш важливою або найчастішою програмі. Наприклад, для клубу, який в основному використовується для доповідей і лекцій, оптимальний час реверберації має бути близьким до мовного; в концертному залі, використовуваному в основному для музичних передач, час реверберації вибирається близьким до часу музичних передач і т.п.

Акустичні розрахунки приміщення починають з визначення об'єму приміщення і оптимального часу реверберації. Потім підраховують наявний фонд поглинання на всіх середніх октавних частотах від 125 до 4 000 Гц .

Потім підбирають додаткові поглинають матеріали так, щоб час реверберації на всіх розрахункових частотах вкладалося в задані межі рис. 1.2, б з точністю до  $\pm 10\%$ . [10]

### 1.3. Приклади мультифункціональних залів

Для того щоб правильно спроектувати акустику в мультифункціональних залах потрібно не лише розібратися в фізиці поширення звуку а й ознайомитися з уже реалізованими, реальними залами. Це може ще на ранньому етапі проекту знайти його недоліки і допоможе їх виправити.

Зал преміум-класу **Regent Hill** (Київ) володіє чудовою акустикою для проведення концертних заходів та конференцій. Розміри: 18x26x8(м)



Фото 1. Regent Hill

Інженерами були розроблені унікальні стінові панелі, що володіють широкосмуговим поглинанням. Також, на перекриття напилу акустичне наплення. Зал має прекрасну розбірливість мови ( $STI = 0,79$ ) і оптимальним часом реверберації для концертних програм ( $RT = 1$  сек).

Концертний зал **Event-Hall** (Воронеж) являє собою багатофункціональний зал-трансформер. Залежно від конфігурації, можливе проведення різних заходів. Володіє хорошою акустикою і обладнаний сучасним устаткуванням.

Розміри: 30x80x15(м)

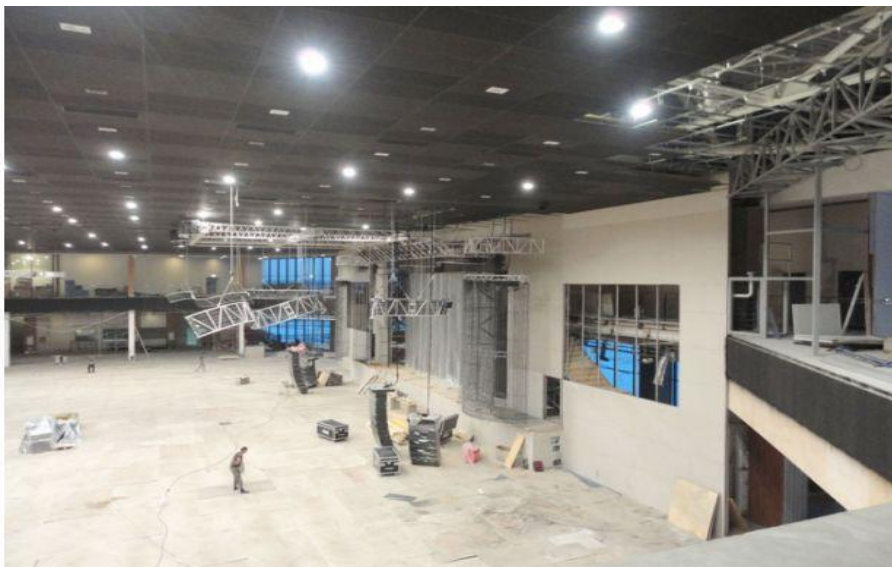


Фото 2. Event-Hall

**Парковий** Київський міжнародний конференц-центр – це сучасний і унікальний комплекс, що поєднує в собі інновації, стиль та репутацію івент-майданчика столиці для різних видів заходів: виставки, конференції, конгреси, круглі столи, форуми, презентації, семінари, концерти та приватні заходи. Розміри: 30х26х6(м)



Фото 3. Парковий

Всі конференц-зони обладнані професійним сучасним мультимедійним обладнанням і рухомими перегородками, що дозволяють трансформувати будь-який простір у необхідні розміри. [12]

## 1.4 Адаптивна акустика

Перші досліді по акустичній варіабельності приміщень проводилися за допомогою великих вертикальних щитів, встановлених для зручності переміщення на маленькі колеса. На цих щитах, як правило, одна сторона відбиваюча, а інша – звукопоглинаюча. Результати цих дослідів були досить успішними і ця ідея одержала подальший розвиток.

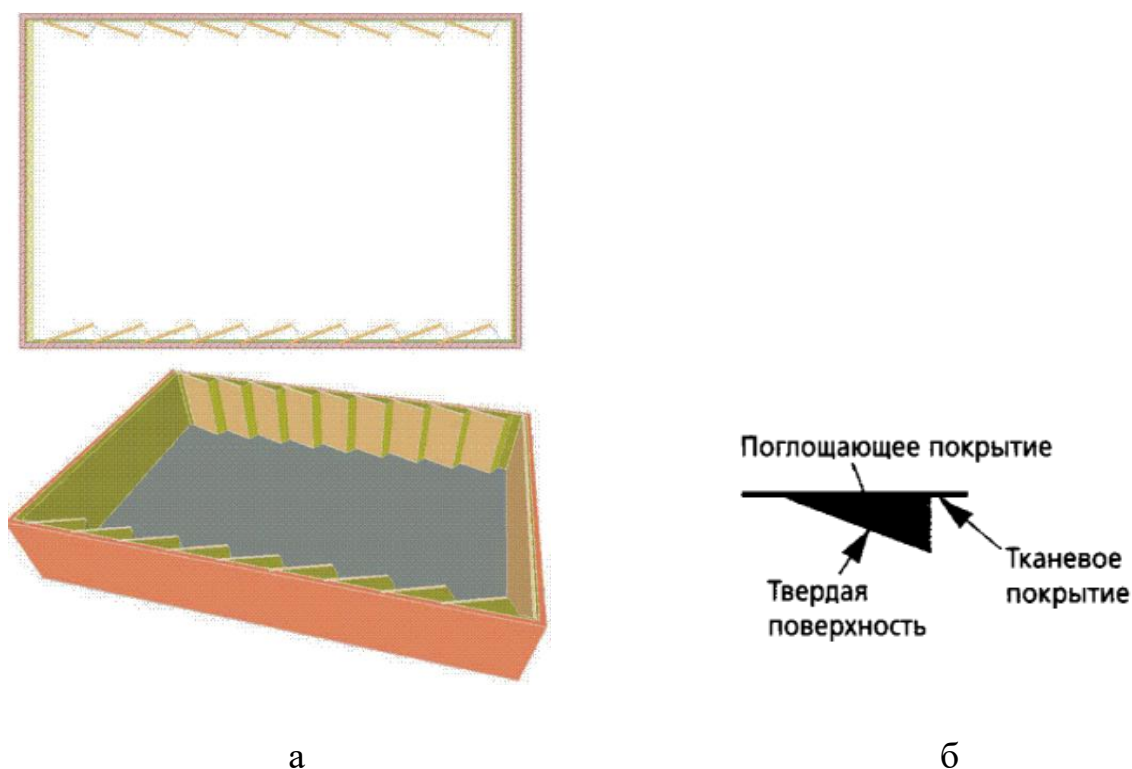


Рис. 1.5. Варіант планування приміщення зі змінною акустикою

а) загальний вид б) деталь бокової стіни

На рисунку 1.5 показаний один з таких варіантів, якій можна застосувати навіть у відносно невеликих приміщеннях. Стіни великої довжини в такому приміщенні виконуються у вигляді «пилки», одна сторона «зубів» якої є звукопоглинаючою, а інша – відбиваючою звук або дифузною. Акустичне оформлення іншої пари стін також неоднакове. Так, стіна, до якої звернена звукопоглинаюча частина «зубів» бічних стін, робиться звуковбирною, найчастіше із застосуванням низькочастотних пасток. А от протилежна їй стіна є відбиваючою або дифузною.

Крім того, приміщення зі змінною акустикою вже по визначенню повинні «тягти» на всеїдність, а не ставити звукоінженерів і музикантів перед фактом серйозних акустичних обмежень. Тому згодом почали з'являтися великі приміщення з високими стелями, що мають рухомі стіни та/або стелю, які дозволяють змінювати співвідношення між поглинаючими, розсіюючими та відбиваючими поверхнями, спрямованими всередину кімнати. При необхідності рухливі панелі стель можна було піднімати або опускати, змінюючи, таким чином, характер відбиттів – з відбиттів пізнього типу на відбиття раннього типу (і навпаки).

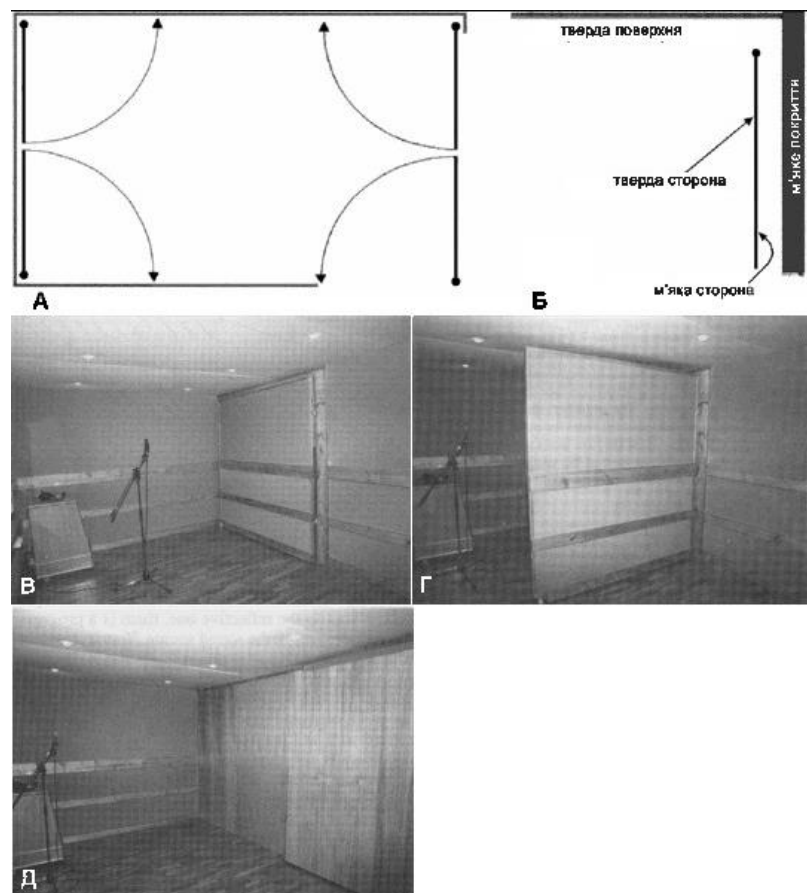


Рис. 1.6. Варіант приміщення зі змінною акустикою. Тон-зала Sonobox Studios, Мадрид, Іспанія. Дизайн Філіпа Ньюелла. А) План приміщення з рухомими акустичними панелями; Б) Деталь системи панелей на шарнірах (завісах); В) Зачинений стан панелі; Г) Напіввідкритий стан панелі (можна побачити опорне колесо в нижньому лівому куті панелі); Д) Панель у відкритому стані

Найбільш простий тип приміщень із поворотними панелями зображений на Рис. 1.6 і він, безумовно, є кроком вперед у порівнянні з перерахованими вище варіантами. Застосовують його, як правило, в приміщеннях відносно невеликих розмірів. Поворотні панелі встановлюються на шарніри або масивні петлі, які в свою чергу закріплюються на бічних стінах приміщення або в його кутах. Одна сторона панелей робиться м'якою та звукопоглинаючою, а інша – твердою й відбиваючою звук. Саме цю конструкцію я буду використовувати при проектуванні мультифункціональної зали. Місце розташування таких поворотних панелей буде визначатися пізніше, при розрахунку площадок відбиттів, алже саме воний найбільше впливають на акустику слухацької зони при порівнянно невеликих розмірах. І відповідно мінімальних затратах на їх проектування і монтаж.[9]

## 1.5 Практична частина

### 1.5.1 Вхідні данні

Приміщення являє собою мультифункціональний зал. Зі змонтованим подіумом 30х1(м) і кулісами.

Всі розрахунки ведуться в програмному пакеті **Matlab**

Загальні розміри 30×45×7,5(м)

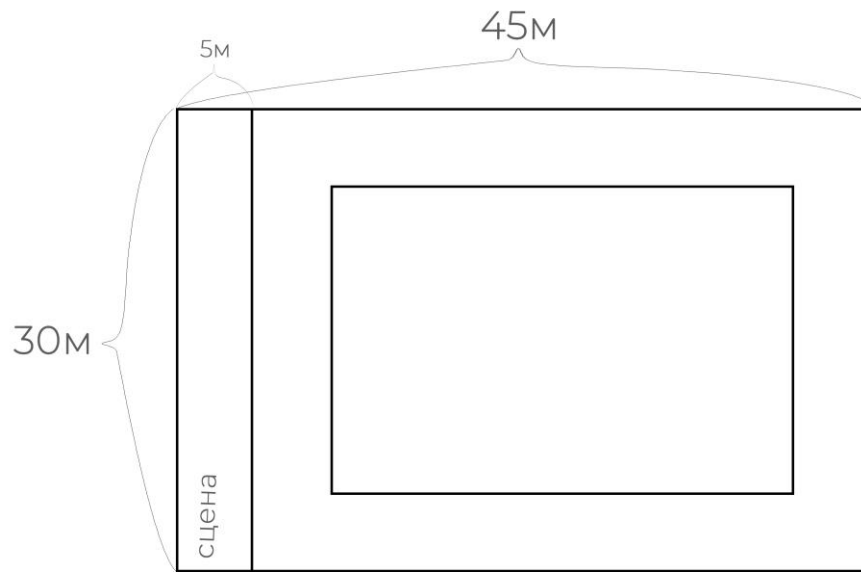


Рис. 1.7 Схема зали. Вид зверху

$$V = 30 \times 45 \times 7,5 = 10125 (m^3)$$

$$S_{\text{підл.}} = 1200 (m^2)$$

$$S_{\text{стел.}} = 1350 (m^2)$$

$$S_{\text{куліси.}} = 195 (m^2)$$

$$S_{\text{под.}} = 180 (m^2)$$

$$S_{\text{стін}} = 900 (m^2)$$

### 1.5.2. Розрахунок загального звукопоглинання та стандартного часу реверберації

Розрахуємо реальний фонд звукопоглинання в приміщенні, до якого входять всі поверхні, предмети і матеріали, що є у приміщенні, включаючи облицювання стін, стелі та підлоги. Загальний фонд звукопоглинання:

$$A = \sum_{i=1}^N \alpha_i S_i + \sum_{k=1}^M \alpha_k S_k$$

де  $\alpha_i$ - коефіцієнт звукопоглинання 1 м<sup>2</sup> поверхні;  $\alpha_k$ - коефіцієнт звукопоглинання одної конструктивної одиниці;  $S_i$ - площа поверхні;  $S_k$ - кількість об'єктів.

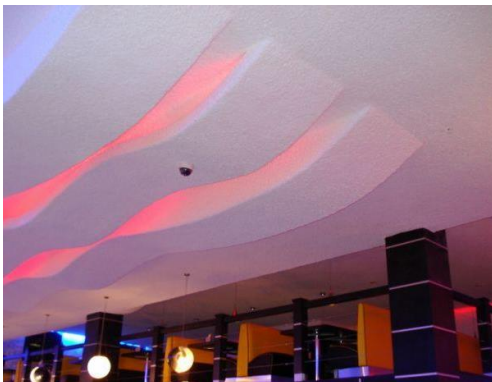
В якості матеріалів для облицівки всіх відбиваючих поверхонь обираємо:

Стіни: **Напилююче покриття Sonaspray FC.**

Стеля: **Підвісна стеля Ecophon Master Ds.**

Підлога: **Шерстяний ковер.**

Подіум: **Ковролін**



а



б

Фото 4. а) Напилююче покриття Sonaspray FC. б) Підвісна стеля Ecophon Master Ds.

| Назва поглинача          | Площа<br>або<br>кількість | Коефіцієнт звукопоглинання  |              |             |              |             |             |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|                          |                           | Фонд поглинання на частотах |              |             |              |             |             |
|                          |                           | 125                         | 250          | 500         | 1000         | 2000        | 4000        |
| Основний фонд поглинання |                           |                             |              |             |              |             |             |
| Підвісна стеля           | 1350 м <sup>2</sup>       | 0,4                         | 0,3          | 0,3         | 0,25         | 0,2         | 0,1         |
|                          |                           | <b>540</b>                  | <b>405</b>   | <b>405</b>  | <b>337,5</b> | <b>270</b>  | <b>135</b>  |
| Подіум                   | 180 м <sup>2</sup>        | 0,02                        | 0,05         | 0,07        | 0,11         | 0,29        | 0,48        |
|                          |                           | <b>3,6</b>                  | <b>9</b>     | <b>12,6</b> | <b>19,8</b>  | <b>52,2</b> | <b>86,4</b> |
| Підлога                  | 1200 м <sup>2</sup>       | 0,08                        | 0,08         | 0,2         | 0,26         | 0,27        | 0,37        |
|                          |                           | <b>96</b>                   | <b>96</b>    | <b>240</b>  | <b>312</b>   | <b>324</b>  | <b>444</b>  |
| Стіни                    | 900 м <sup>2</sup>        | 0,08                        | 0,16         | 0,46        | 0,87         | 1,07        | 1,12        |
|                          |                           | <b>72</b>                   | <b>144</b>   | <b>414</b>  | <b>783</b>   | <b>963</b>  | <b>1008</b> |
| Сцена                    | 195 м <sup>2</sup>        | 0,2                         | 0,3          | 0,3         | 0,3          | 0,3         | 0,3         |
|                          |                           | <b>39</b>                   | <b>58,5</b>  | <b>58,5</b> | <b>58,5</b>  | <b>58,5</b> | <b>58,5</b> |
| Загалом                  | 3825 м <sup>2</sup>       | <b>750,6</b>                | <b>712,5</b> | <b>1130</b> | <b>1510</b>  | <b>1667</b> | <b>1731</b> |

Таблиця 1.1. Фонд поглинання в приміщенні

Розрахуємо оптимальний час реверберації за формулою:

$$T = \frac{0,164V}{-S_{\Sigma} \ln \left( 1 - \frac{A_0}{S_{\Sigma}} \right)}$$

Занесемо отримані дані до таблиці

| Частота, Гц            | 125         | 250         | 500         | 1000        | 2000        | 4000        |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Час<br>Реверберації, с |             |             |             |             |             |             |
| Час реверберації       | <b>1,98</b> | <b>2,35</b> | <b>1,15</b> | <b>0,88</b> | <b>0,75</b> | <b>0,73</b> |

Таблиця 1.2. Час реверберації при різних конфігураціях стін

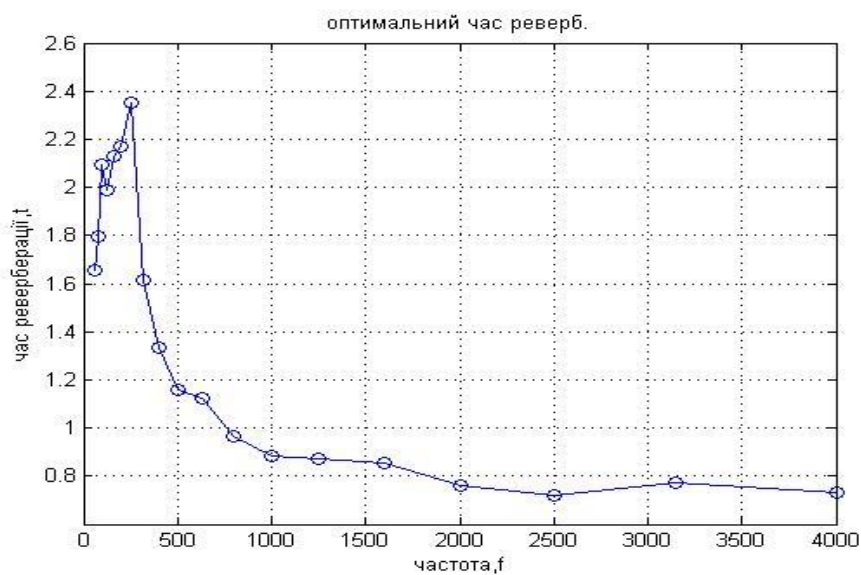


Рис. 1.8. Оптимальний час реверберації

Бачимо що оптимальний час реверберації відповідає значенням наведеним на графіку(Рис 1.8) для об'єму заданого приміщення. Він підходить як для мовних програм, так і для музикальних. Цього результату і потрібно було досягнути. Якщо отриманий час реверберації не задовільняє прийняті норми, то його можна змінювати регулюючи звукопоглинання відбиваючих поверхонь, а саме, змінюючи облицювальні матеріали.

### 1.5.3. Побудова площадок перших відбиттів

При побудові площадок відбиттів звука застосовують методи геометричної акустики, в основі яких лежать такі поняття, як звуковий промінь, відбивання звуку, траєкторія розповсюдження. Як і в оптиці, в геометричній акустиці розповсюдження звуку приймається прямолінійним і використовується закон дзеркального відбивання. При побудові траєкторій променів використовується поняття уявного джерела звуку [5]

Площадки відбиттів будуються для того щоб знайти час приходження відбиттів від оточуючих поверхонь до слухача і їх інтенсивність, що безпосередньо впливає на акустичне сприйняття музики і мови.

Всі моделі розроблені в програмному пакеті **AUTOCAD**

Для побудови площадок потрібно знати місце розташування джерел звуку і слухача або контрольної точки. Тому забігаючи наперед в розділ Озвучення, повідомлю що буде використано горизонтальний масив з **9 ВЧ гучномовців**, **5 СЧ гучномовців** які розташовані над подіумом на висоті 4м і віднесені від фронтальної стіни на 5м, **2 НЧ гучномовця**, а також так звані **Surround гучномовці** вздовж двох бічних стін, в кількості **18 шт.(по 9 на стіну)** на висоті 4м від підлоги. Подіум висотою 1м. Слухацька зона має розміри 20х30(м.) і має висоту 1.5м від підлоги

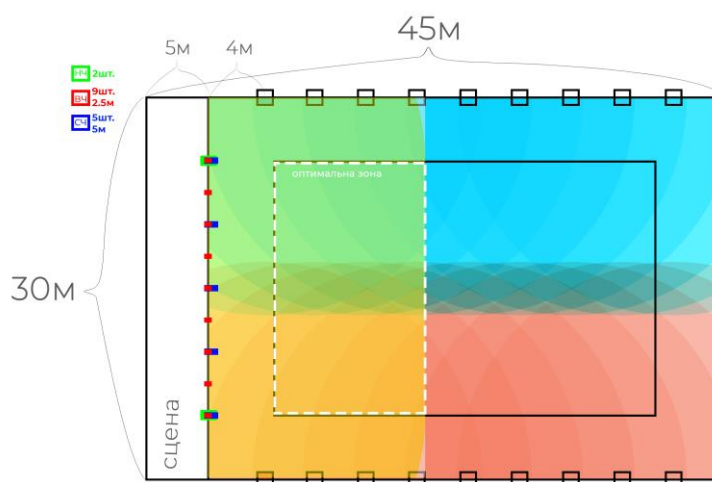


Рис. 1.9

Схема розташування гучномовців

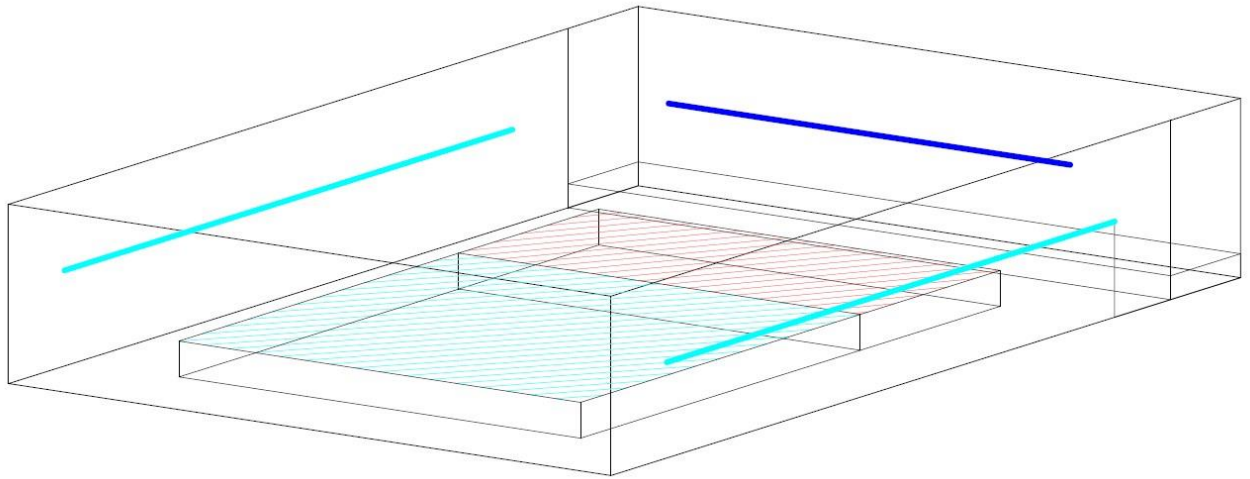


Рис. 1.10 Трьохвимірний модель досліджуваного приміщення (вид ззаду під кутом)

**Темно синім** кольором виділений фронтальний масив гучномовців.

**Блакитним** виділені Surround гучномовці вздовж бічних стін.

Штриховані області позначають слухацькі місця. **Червона** штриховка показує оптимальну зону для звукового сприйняття. Саме для неї і побудовані площадки відбиттів.

Для зручності площадки будемо відображати для однієї зі бічних стін, але розрахунки проводити для всіх.

Оптимальна слухацька зона обрана ґрунтуючись на прямому ході звуку від гучномовців. Він не має перевищувати значення 50 мс., або бути максимально наближеним до цього значення. На Рис1.9 ці зони показані відповідними кольорами відповідно до гучномовців. І на площині що найбільше співпадає з цими зонами, обрана оптимальна слухацька зона.

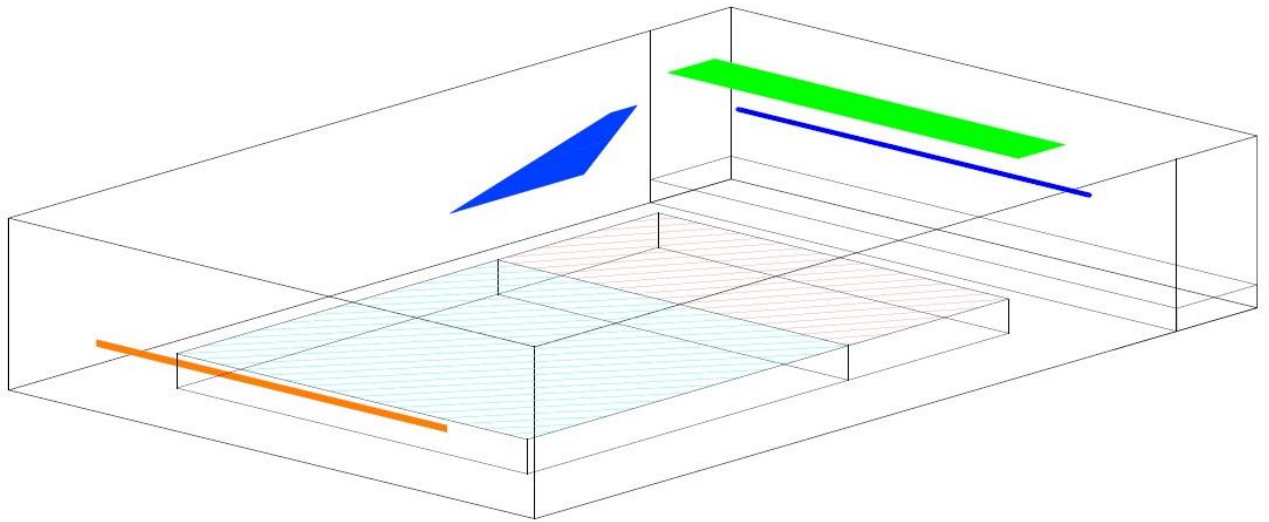


Рис. 1.11 Площадки перших відбиттів від стін(синій), стелі(зелений), і задньої стіни(оранжевий) для фронтальних гучномовців.

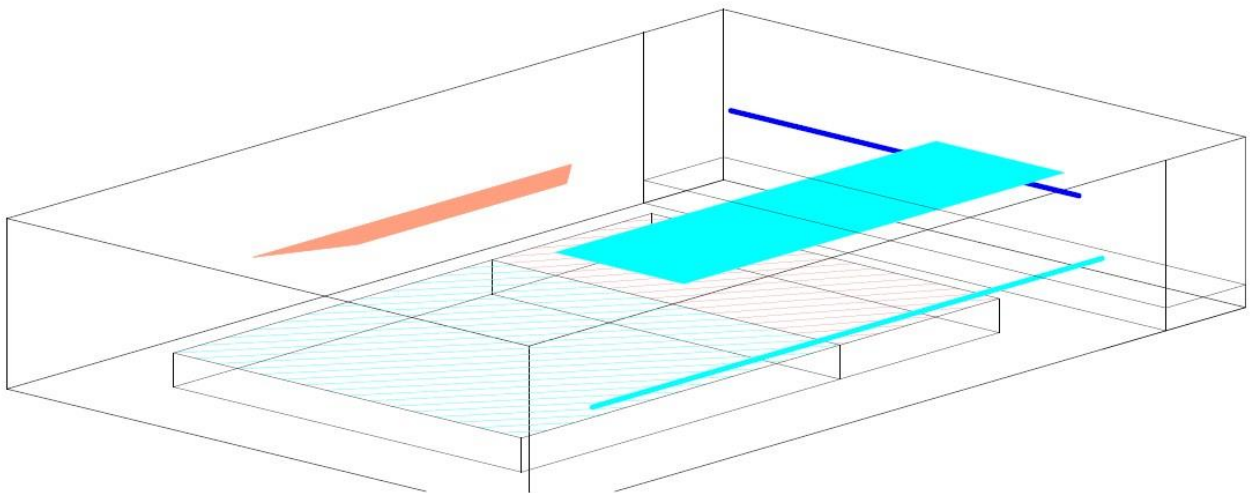


Рис.1.11 Площадки перших відбиттів для Surround гучномовців. Від стелі(блакитний), від протилежної стіни(оранжевий)

### 1.5.4. Розрахунок часової послідовності відбиттів

Практична цінність побудови картини реверберації короткого імпульсу полягає в тому, що ми отримуємо уявлення, які ділянки обмежуючих поверхонь впливають на хід процесу реверберації: на початковому інтервалі часу реверберації, прилеглому до моменту надходження прямого сигналу, і на наступних, більш віддалених часових інтервалах. Таке уявлення про роль тих чи інших ділянок обмежуючих поверхонь дозволяє більш доцільно розташувати поглинаючі матеріали.

Про доцільність заглушення площадок, формуючих відбиття, близькі до прямого сигналу (перші відбиття), можна судити на підставі таких міркувань. Якщо перші відбиття надходять відразу за прямим сигналом, то на слух вони практично зливаються з ним і підсилюють його гучність, не зменшуючи чіткості звучання музики і артикуляції мовлення. Навпаки, якщо перші відбиття слідує за прямим сигналом зі значним запізненням, то вони сприймаються як луна, або значно погіршують артикуляцію і чіткість. [5].

Для розрахунку відбиттів за часом і інтенсивністю обрано 3 контрольні точки в межах оптимальної зони.

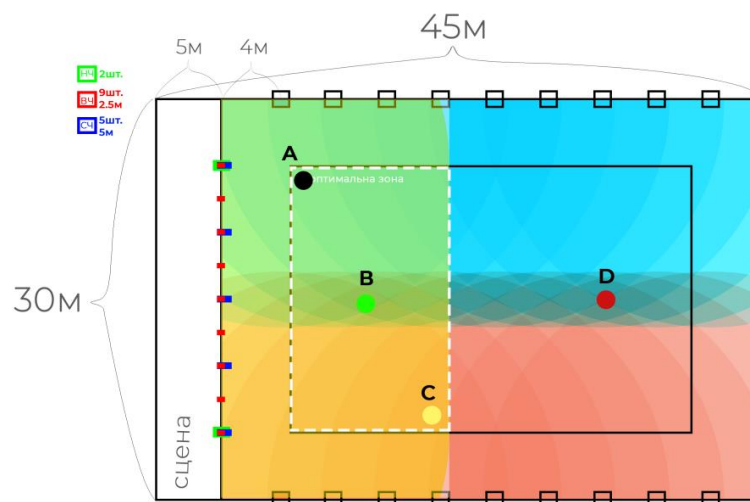


Рис. 1.12 Обрані контрольні точки для досліджень часу перевідбиттів

## Точка А (фронтальні гучномовці)

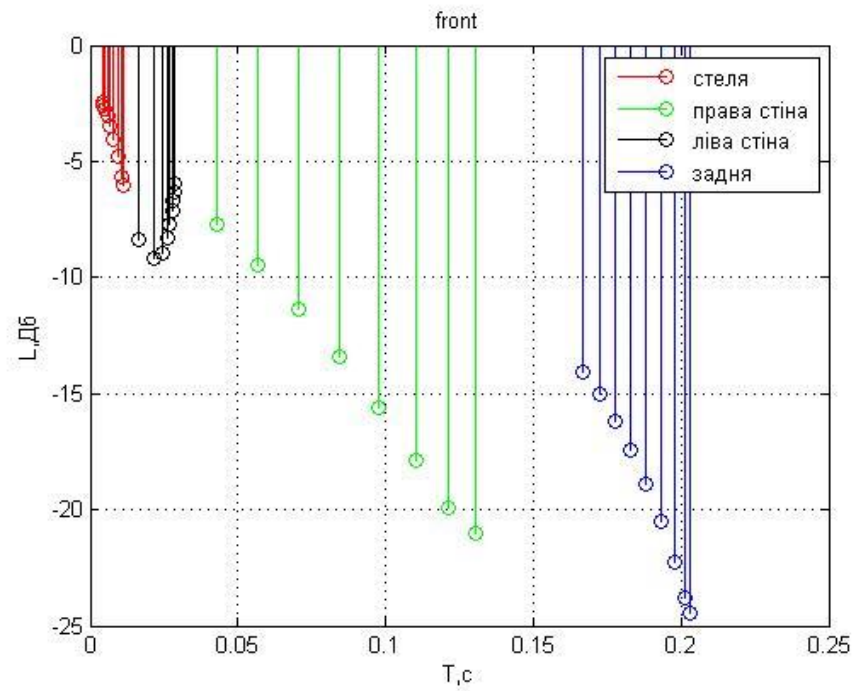
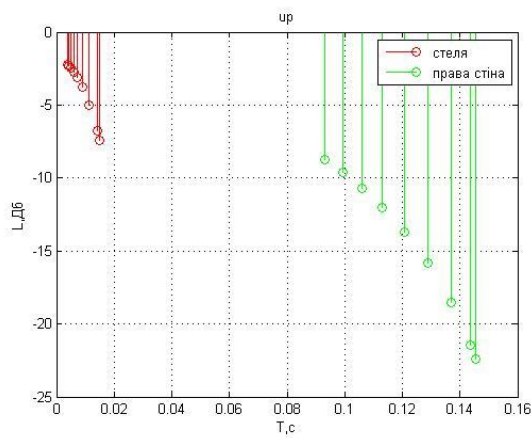
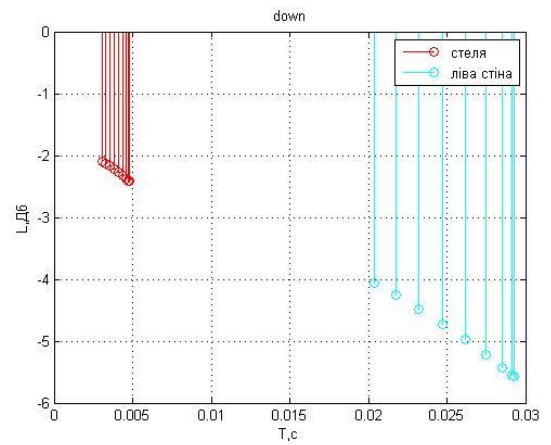


Рис. 1.13 Відбиття від стін і стелі для слухача в точці А.

## Surround гучномовці:



а



б

Рис. 1.14 Відбиття від стелі і протилежної стіни для Surround гучномовців а) лівий від фронтальної стіни масив гучномовців. б) правий від фронтальної стіни масив гучномовців

## Точка В (фронтальні гучномовці)

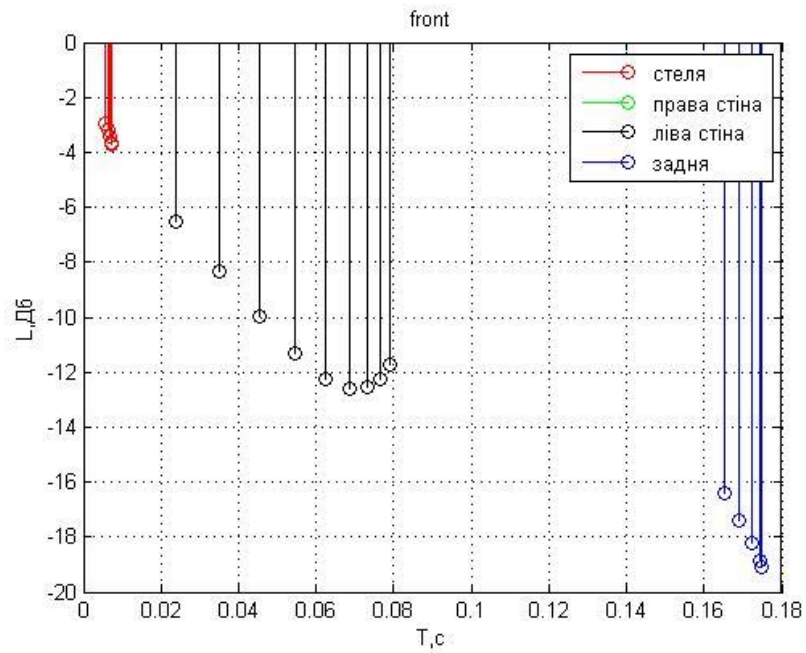


Рис. 1.15 Відбиття від стін і стелі для слухача в точці В.

## Surround гучномовці:

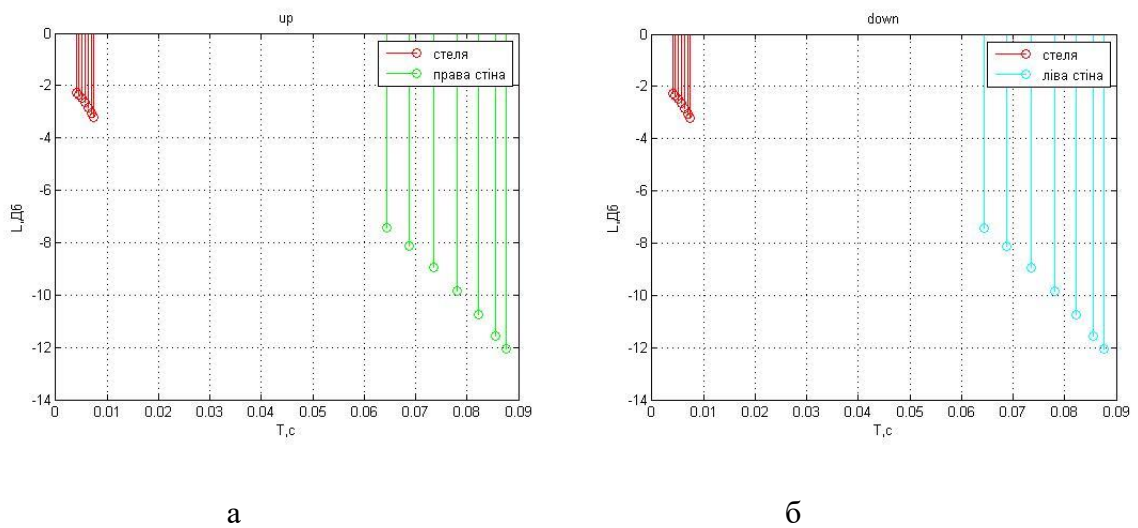


Рис. 1.16 Відбиття від стелі і протилежної стіни для Surround гучномовців а) лівий від фронтальної стіни масив гучномовців. б) правий від фронтальної стіни масив гучномовців

## Точка С (фронтальні гучномовці)

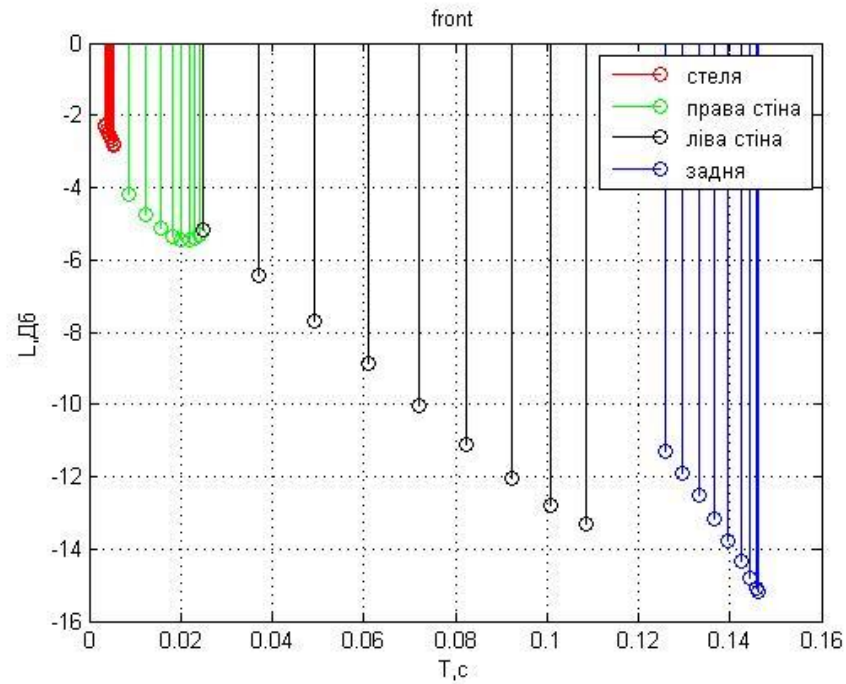


Рис. 1.17 Відбиття від стін і стелі для слухача в точці С.

## Surround гучномовці:

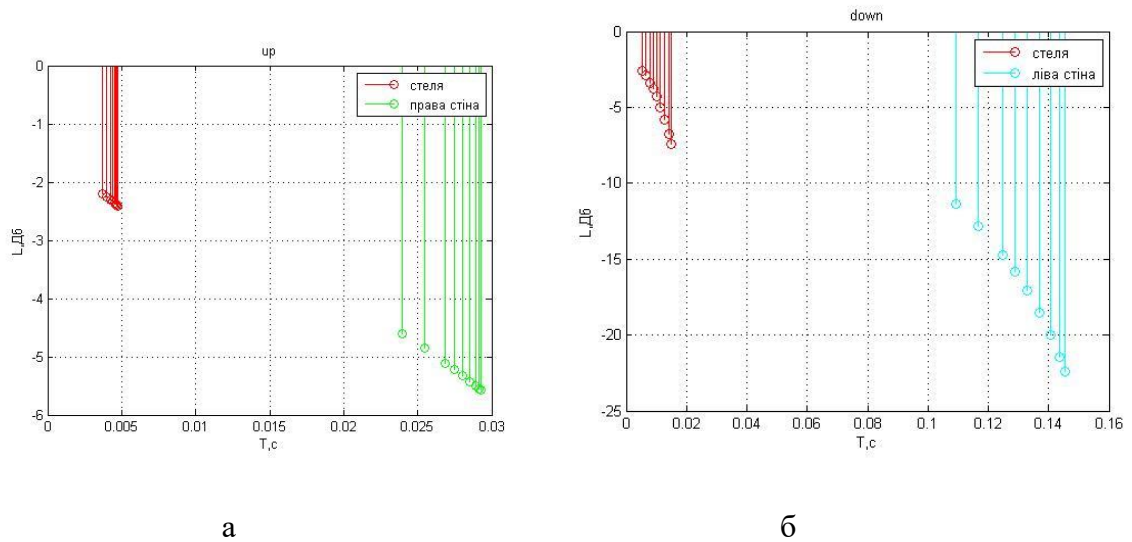


Рис. 1.18 Відбиття від стелі і протилежної стіни для Surround гучномовців а) лівий від фронтальної стіни масив гучномовців. б) правий від фронтальної стіни масив гучномовців

## Точка D (фронтальні гучномовці)

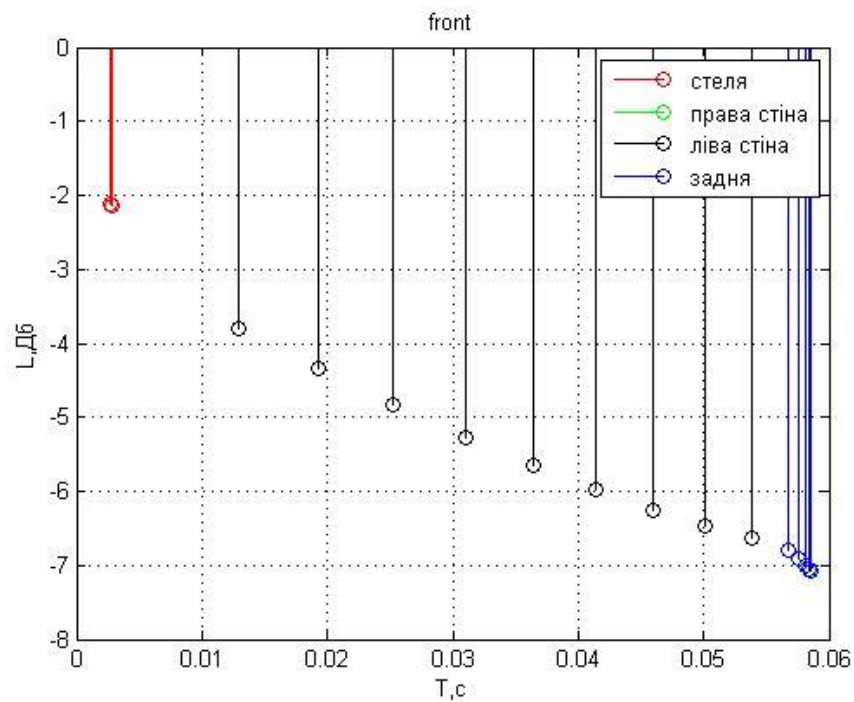
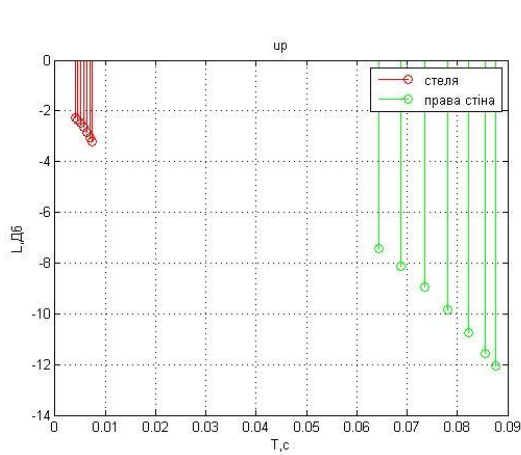
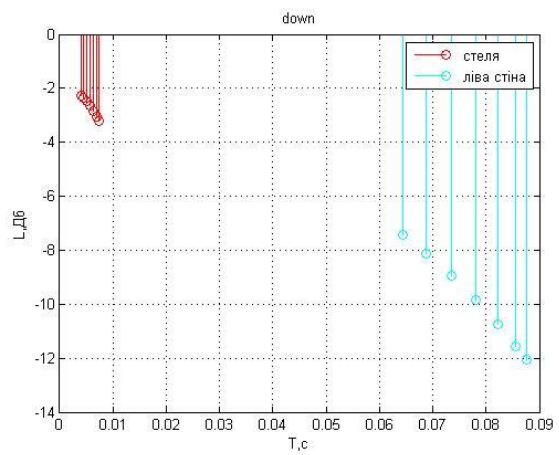


Рис. 1.19 Відбиття від стін і стелі для слухача в точці D.

## Surround гучномовці:



а



б

Рис. 1.20 Відбиття від стелі і протилежної стіни для Surround гучномовців а) лівий від фронтальної стіни масив гучномовців. б) правий від фронтальної стіни масив гучномовців

Проаналізувавши отримані графіки можна з впевненістю сказати що зал потребує акустичних апгрейдів. Адже в результаті використання масивів гучномовців які розташовані майже по всьому периметру залу, утворюється багато відбиттів. Вони негативно вплинуть на акустику, томо що більшість приходять до слухача пізніше 50мс. і майже не втрачають свою інтенсивність. Картина не є задовільною як для точок в оптимальній зоні, так і для інших точок за її межами. Можна залишити без корекції відбиття від стелі, адже вони хоч майже і не втрачають свою інтенсивність, проте приходять з дуже маленькою затримкою, що тільки підсилить прямий звук і надасть йому об'ємності. Так як площадки відбиттів визначались тільки для оптимальної зони, то при зміні їх поглинання і взагалі будь яких операцій, це майже не вплине на акустику останніх рядів(точка D) .

В вирішенні цього питання нам допоможуть вже визначені площадки відбиттів. Знайшовши їх положення і площу, підбираємо відповідний звукопоглинаючий матеріал і монтуємо його в ці місця.

Задня стіна:

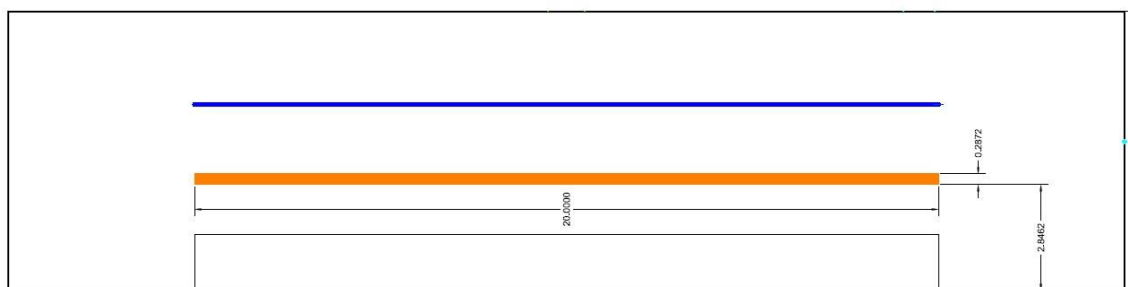


Рис. 1.21 Площадка відбиттів на задній стіні

$$S_{\text{зад.}} = 5,6 \text{ (} m^2 \text{)}$$

Стіни(ліва права):



Рис. 1.22 Площинки відбиттів на бічних стінах

$S_{\text{біч.}} = 17,94 \text{ (м}^2\text{)}$  - для фронтальних гучномовців

$S_{\text{біч.}} = 23,26 \text{ (м}^2\text{)}$  - для Surround гучномовців.

Площа порахована для обох стін.

Можемо спостерігати що площинки відбиттів не перетинаються з місцями для монтажу Surround гучномовців, тому особливих труднощів при монтажі звукопоглинаючих поверхонь, не має виникнути.

Як уже згадувалося раніше конструкція для зміни акустики в приміщенні буде являти собою панелі на шарнірах. Внутрішні сторони панелей будуть складатися зі звукопоглинаючого матеріалу а зовнішні з іншого, менш поглинаючого.

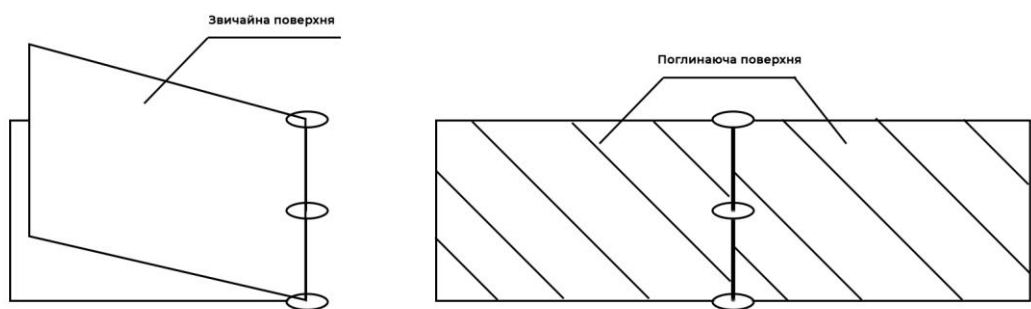


Рис. 1.23 Панелі для змінної акустики. а) закрита конфігурація(лицева сторона є відбиваючою) б) відкрита конфігурація(панель відкрилась, тим самим закрила сусідній простір і зробила його звукопоглинаючим)

В якості звукопоглинаючого матеріалу обрано – **Акустичні панелі SoundBoard SuperFine.**[12]

| Частота | $\alpha_s$ | Частота | $\alpha_s$ |
|---------|------------|---------|------------|
| 125     | 0,37       | 1000    | 0,79       |
| 250     | 0,91       | 2000    | 0,80       |
| 500     | 1,02       | 4000    | 0,85       |

Таблиця 1.3. Кофіцієнт поглинання SoundBoard SuperFine.

Тепер повторимо моделювання в Matlab, але тепер уже з врахуванням корекції площадок відбиття.

## Точка А (фронтальні гучномовці)

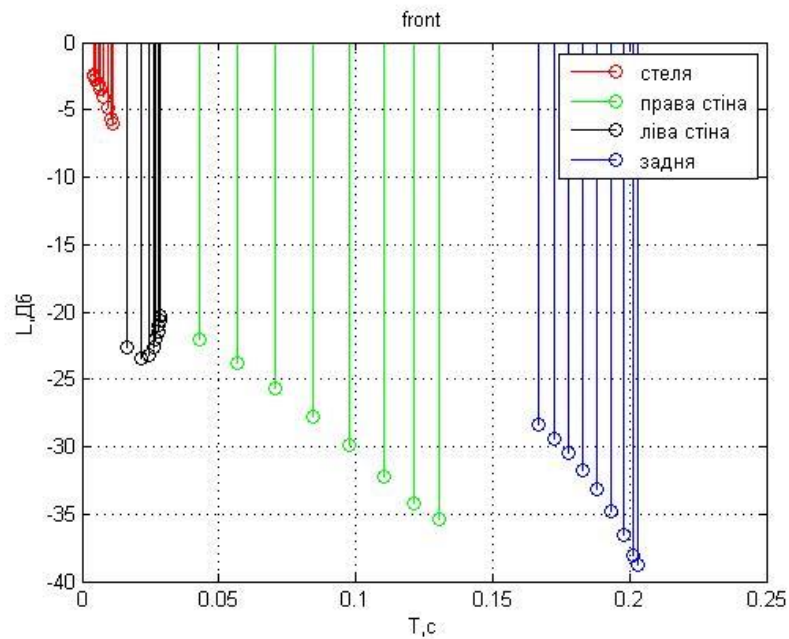
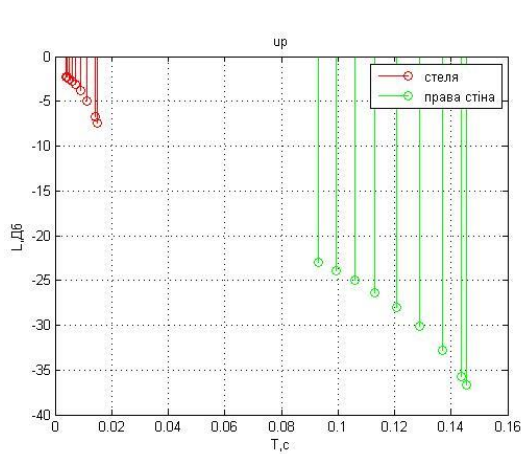
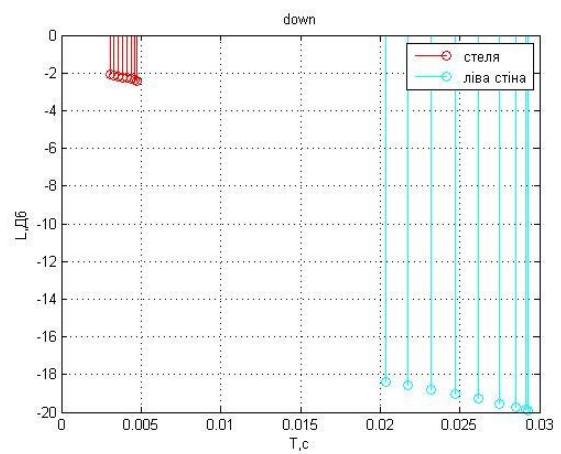


Рис. 1.24 Відбиття від стін і стелі для слухача в точці А.

## Surround гучномовці:



а



б

Рис. 1.25 Відбиття від стелі і протилежної стіни для Surround гучномовців а) лівий від фронтальної стіни масив гучномовців. б) правий від фронтальної стіни масив гучномовців

## Точка В (фронтальні гучномовці)

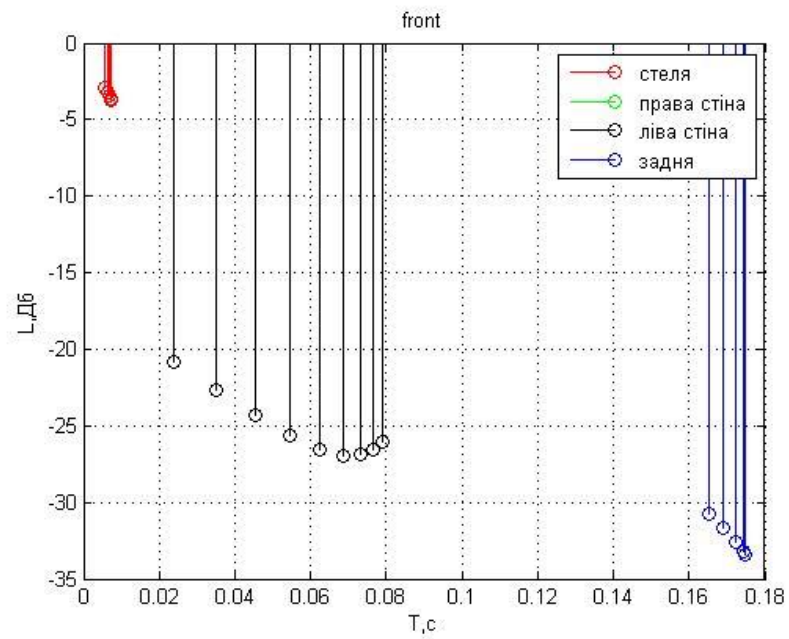


Рис. 1.26 Відбиття від стін і стелі для слухача в точці В.

## Surround гучномовці:

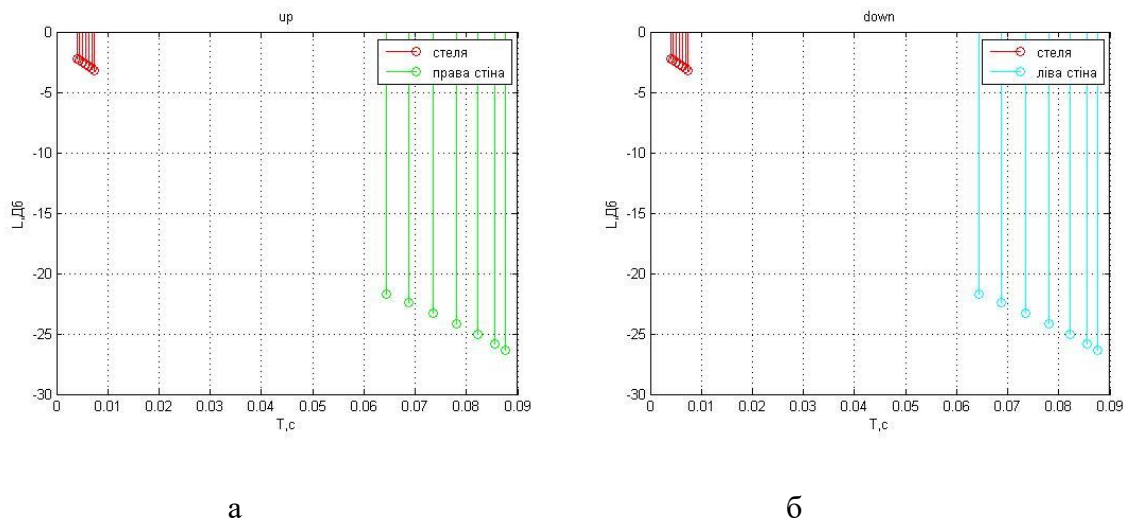


Рис. 1.27 Відбиття від стелі і протилежної стіни для Surround гучномовців а) лівий від фронтальної стіни масив гучномовців. б) правий від фронтальної стіни масив гучномовців

### Точка С (фронтальні гучномовці)

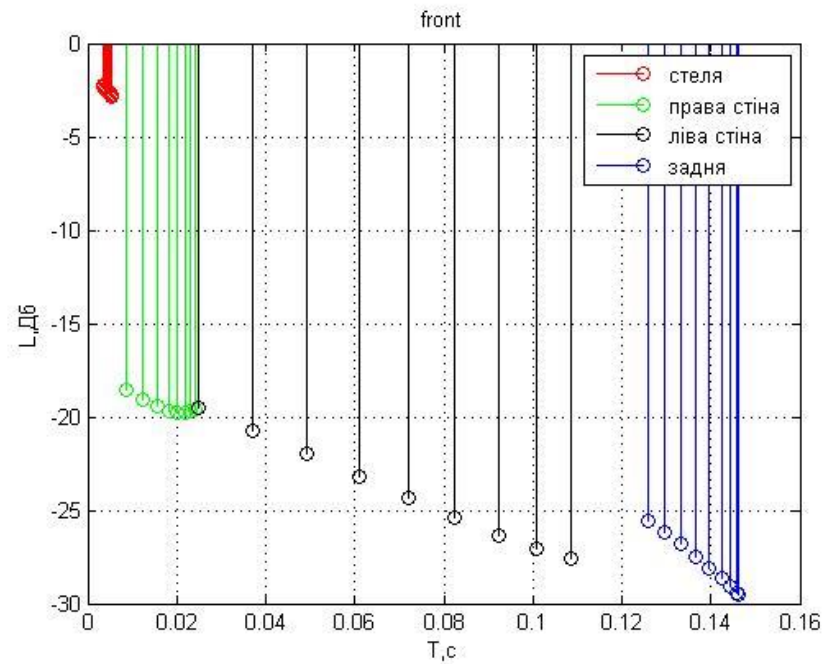
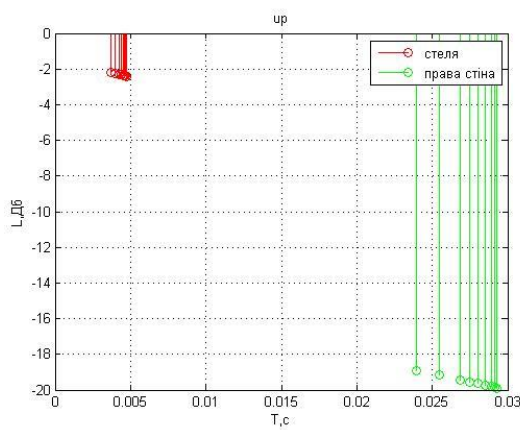
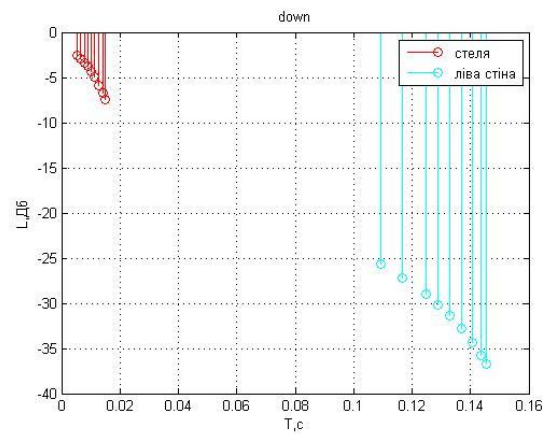


Рис. 1.28 Відбиття від стін і стелі для слухача в точці С.

### Surround гучномовці:



а



б

Рис. 1.29 Відбиття від стелі і протилежної стіни для Surround гучномовців а) лівий від фронтальної стіни масив гучномовців. б) правий від фронтальної стіни масив гучномовців

## Точка D (фронтальні гучномовці)

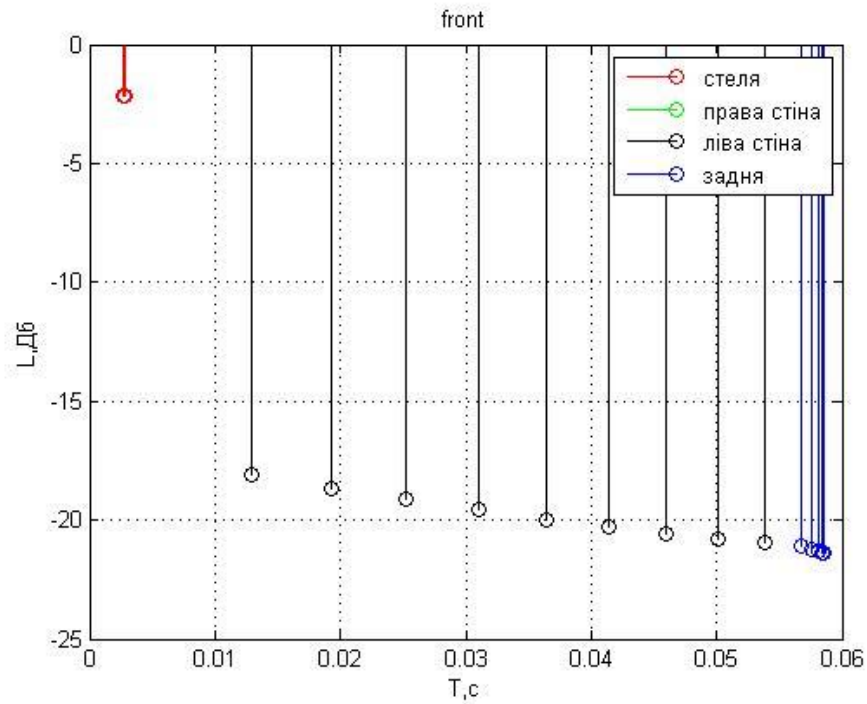
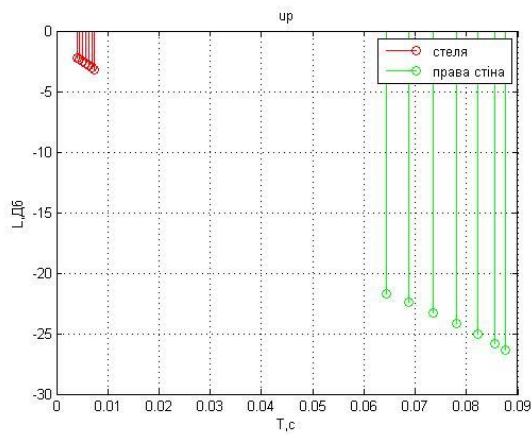
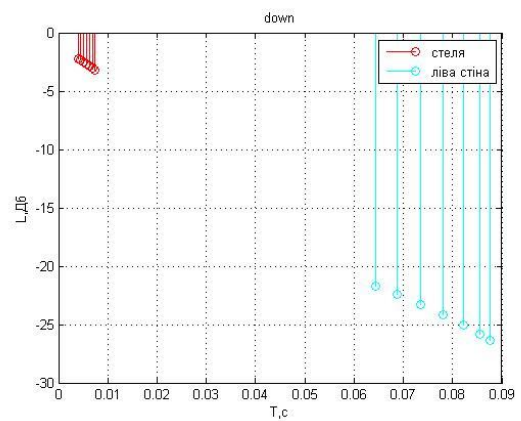


Рис. 1.30 Відбиття від стін і стелі для слухача в точці D.

## Surround гучномовці:



а

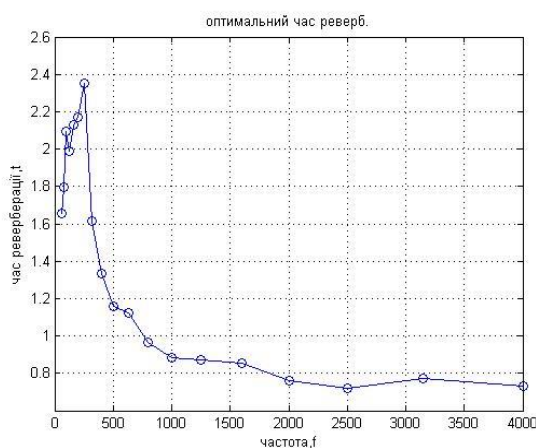


б

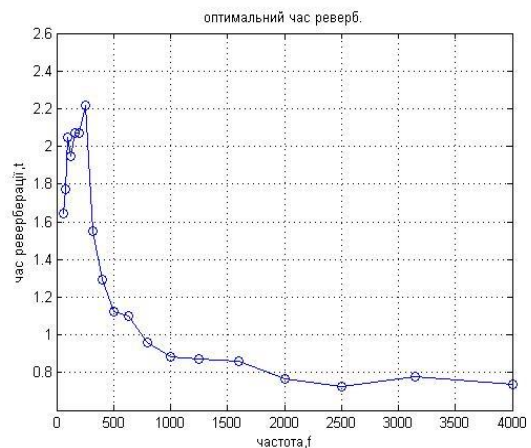
Рис. 1.31 Відбиття від стелі і протилежної стіни для Surround гучномовців а) лівий від фронтальної стіни масив гучномовців. б) правий від фронтальної стіни масив гучномовців

Після корекції площадок відбиттів ми отримали просто кардинальні зміни. Всі небажані запізнені відбиття які приходили пізніше 50мс після основного імпульсу втратили свою інтенсивність більше ніж на 20дБ, тобто вони не будуть відчутні для глядачів. А корисні відбиття від стелі залишилися без змін. Отже резюмуючи, можна впевнено сказати, що використання таких поверхонь і конструкцій для площадок відбиттів є доцільним рішенням для данної ситуації. Проте, тут варто не перебільшити зі звукопоглинальними поверхнями адже можна отримати так званий «сухий» звук.

Варто також відмітити зміни в часі реверберації приміщення. Воно майже не зазнає змін, тобто залишиться в оптимальній зоні. Адже площа змінених площадок відносно до загальної площі відбиттів, дуже маленька і майже не впливає на загальну картину реверберації.



а



б

Рис. 1.32 Зміни в часі реверберації. а) без корекції площадок відбиттів б) з корекцією

На частоті 500Гц реверберація була **1,15с.** а стала **1,12с.** Тобто за допомогою незначних дій з площадками відбиттів ми отримали можливість керувати просторовим враженням, чіткістю і прозорістю звуку в приміщенні не змінюючи час реверберації, який є оптимальний для данного типу приміщень. Але це не значить що його не можна змінювати. Якщо цього

вимагає програма, наприклад для концерту з використанням симфонічної музики, час реверберації можна збільшити за допомогою спеціальних пристроїв, а так як зал володіє великою кількістю гучномовців по периметру, ревербератори зможуть ефективно працювати і вносити потрібні зміни.

## 2. Озвучення

### 2.1 Вимоги до систем звукопідсилення і озвучення

Для правильного підбору звукового обладнання і в частості акустичних систем слід задовольняти вимоги для того чи іншого типу приміщення. Наведемо вимоги, для систем звукопідсилення і озвучення. При передачі мови визначальним є забезпечення необхідної розбірливості мови в усіх точках приміщення, навіть у найвіддаленіших від основного джерела звуку. Необхідно, щоб тракт забезпечував відповідні превиищення спектральних рівнів мови над спектральним рівнем перешкод і шумів, а це залежить як від загального рівня мови на місцях слухачів, так і від частотної характеристики апаратури. Для музичних передач першою вимогою є створення відповідного рівня на місцях слухачів. У табл. 2.1 приведені .рекомендовані номінальні рівні звукового поля.[6]

| Назначение установки                                                                            | Номинальный уровень | Неравномерность озвучения | Максимальное акустическое отношение |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Воспроизведение музыки и театральных эффектов                                                   | 100                 | 6                         | 8—10                                |
| Воспроизведение музыкальных программ; подусиление солистов                                      | 94—96               | 6                         | 8—10                                |
| Воспроизведение развлекательных музыкальных программ (танцы); музыки и речи в шумных помещениях | 94—96               | 8                         | 4—6                                 |
| Усиление речи при низких уровнях шумов                                                          | 80—86               | 6                         | 4—6                                 |
| Создание музыкального фона                                                                      | 60—70               | 8                         | 8—10                                |

Таблиця 2.1 Рекомендовані рівні звукового поля і його нерівномірність.

Другою вимогою для будь-яких трактів передачі є оптимальність звучання і відсутність різних дефектів звучання в формі луни, бубніння через резонанси окремих невеликих об'ємів , різкої зміни часу реверберації через резонанси в поглинаючих матеріалах, різкого підвищення рівня в окремих точках приміщення через фокусування енергії, створюваної куполами і іншими концентраторами енергії. Всі ці дефекти впливають на розбірливість мови в окремих точках приміщення і знижують якість звучання будь-яких

передач. Тому по можливості вони повинні бути усунуті, а час реверберацій і акустичне відношення повинні бути наближені до оптимальних для даного приміщення значенням.

Третьою вимогою до систем звукопідсилення і озвучення є досягнення максимальної рівномірності звукового поля, тобто, по можливості мінімальні зміни рівнів звучання від точки до точки. Нерівномірність озвучення складається з двох частин: нерівномірності середніх значень рівня і інтерференційної нерівномірності, що створюється в разі застосування декількох гучномовців. Поки друга частина не враховується через складності розрахунку. Нерівномірність по середнім значенням призводить до того, що якщо в найвіддаленіших точках приміщення забезпечено необхідний рівень, то в ряді точок він може виявитися завищеними. Наслідком цього є непотрібна перевантаження слуху; зайві витрати потужності; неприємне відчуття. Тому в приміщеннях не допускається нерівномірність озвучення більше 6 дБ. Взагалі ж завжди, коли це не суперечить вимогам економічності техніки обслуговування, прагнуть до зниження нерівномірності озвучення.

Існує наступна класифікація систем озвучення приміщень: зосереджені, зональні, розподілені.

Зосередженні системи відрізняються тим, що мають один чи декілька гучномовців розташованих достатньо близько один від одного (відстань між крайніми гучномовцями повинно бути менше відстані до найближчих слухачів). В зосереджених системах напрямок поширення звуку легко може співпадати з напрямком прихода візуального відчуття. Тобто виконати співпадіння слухового і візуального образів.

В зональних системах озвучення гучномовці розташовуються на таких відстанях один від одного, що рівень звука в кожній з точок знаходження слухача створюється в основному одним, найблищим гучномовцем.

Розподілені системи являють собою групу гучномовців, розміщених на невеликих відстанях так, що в кожній точці приміщення сумарний рівень звуку складається з всіх чи більшої частини гучномовців. Вони можуть являти собою лінійну групу, наприклад, розташовані по якійсь лінії.

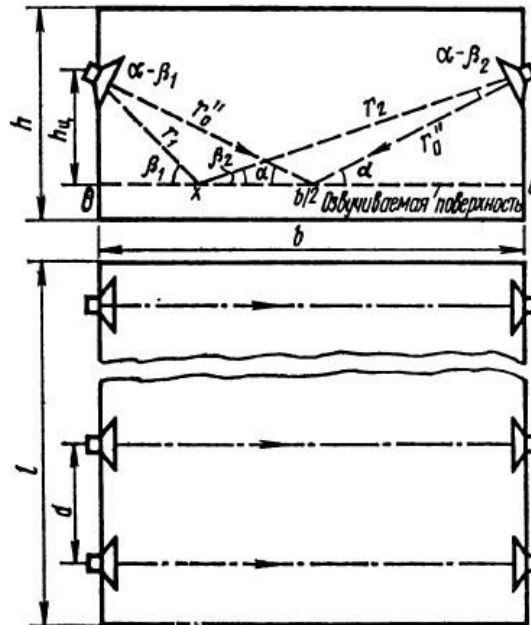


Рис. 2.1 Розподілена система

У розподілених системах слуховий і візуальний образи, як правило, не збігаються. Винятком є одиночна цепочка, що розташовується на передній стіні, навіть якщо ця стіна доволіно широка. До розподілених систем також відносяться крісельні системи озвучення, коли на спинках кожного з крісел укріплені індивідуальні гучномовці. Саме розподілена система використовується для озвучки мультифункціонального залу.[6]

## 2.2 Особливості розрахунку мультифункціональних залів

До найбільш поширених багатоцільовим приміщень відносяться концертні зали, клубні приміщення і т.п. У них наряду зі звукопідсиленням мови потрібно посилювати музичні сольні номери, підсилювати оркестри і т. п. В таких приміщеннях необхідно здійснювати акустичні умови для передачі як мовних, так і музичних програм. Можуть бути два варіанти: в першому виходять з того, щоб розбірливість мови забезпечувала її повну зрозумілість, у другому виходять з компромісу - акустичні умови створюють проміжні між оптимальними для мови і музики. Виняток можуть скласти оперні театри і зали, призначені тільки для музичних програм, в них умови повинні бути оптимальними для музичних передач. Відповідно до цього вибирають оптимальну реверберацію та акустичне відношення. Так як для мовних передач максимальний рівень в багато-цільових приміщеннях потрібно менший, ніж для музичних, то при виборі гучномовців орієнтуються на рівні, необхідні для музичних передань, а розрахунок розбірливості мови проводять для раціонального індексу тракту. Так, для програвання музики і театральних ефектів потрібно рівень до 100 дБ, подусілення солістів і невеликих оркестрів - 94-96 дБ, той же рівень потрібно для танцювальної музики.[6]

## 2.3 Сучасні рішення для мультифункціональних залів

Як відомо найретельніше і найтехнологічніше до питання озвучення приміщень підходять проектувальники кінозалів. Адже відмінне звукове поле в поєднанні з насиченим відеорядом - це те за що люди готові відвідувати кінозали і платити при цьому немалі гроші. У всіх сучасних кінозалах використовується система Dolby Atmos, і вона відмінно справляється зі своїми задачами. Тому буду мати сміливість взяти за прототип цю систему для аскутики мультифункціонального залу. Це дозволить додати до функцій залу, ще й використання його як кінозалу і взагалі покращить акустику приміщення[4].

Що до системи Dolby. Dolby Atmos це технологія нового покоління, розроблена Dolby Laboratories, призначена для формування навколишнього звуку. Ця технологія являє собою якісно новий етап у розвитку навколишнього звуку, як з точки зору його записи, так і прослуховування. Dolby Atmos передбачати не поканально запис звукової доріжки, а розміщення звукових образів в просторі відповідно до задуму звукорежисера. При відтворенні такої доріжки процесор Dolby Atmos в режимі реального часу, з огляду на те, скільки акустичних систем використовується в системі, відтворює записану навколишню звукову картину. Таким чином, якість звучання буде найкращим незалежно від того, чи є в кінотеатрі 64 колонки, або їх менше, тобто конкретний склад кожної системи не буде впливати на кінцевий результат. Всього в системі Dolby Atmos передбачається 10 каналів, сконфігуровані як 9.1 (традиційні 7.1, до яких додані 2 стельових), і вона складається з колонок лівого, центрального, правого, лівого бокового, лівого тилового, правого бокового, правого тилового, лівого стельового, правого стельового і сабвуферного LFE. Звукорежисер може визначити до 118 об'єктів, які не прив'язані до конкретної АС або каналу, а мають певне положення в навколишньому звуковому просторі. При відтворенні такої доріжки процесор Dolby Atmos визначає, де знаходяться ці об'єкти, і формує їх образи за допомогою всіх (або декількох з) наявних колонок. І,

найважливіше, в кінотеатрах Dolby Atmos для кожного гучномовця передбачений окремий канал посилення, що гарантує панорамування звуку з максимальною точністю. В рамках технології в студії створюється саундтрек у вигляді «набору конструктора» зі звуковими образами і метаданими. У свою чергу обладнання на об'єкті налаштовується фахівцями бренду таким чином, щоб при розпакуванні доріжки домогтися оптимальної якості звуку для конкретної, часом унікальної конфігурації. Зрозуміло, сам зал проектується, будується і оснащується за певними канонами.[2]



Фото 5. Реалізація системи Dolby Atmos

## 2.4. Часові затримки для гучномовців

В залежності від необхідності і поставлених вимог відбиття можуть випромінюватися в приміщення за допомогою гучномовців. Оскільки слухацькі місця розподілені по всьому приміщенню і тим не менше слухачі повинні завжди локалізувати джерело сигналу в області сцени, остільки необхідно запроваджувати затримку першого відображення (псевдопрямий звук), відповідну реальному часу пробігу звуку. Перше відбиття не повинно приходити раніше сигналу від первинного джерела. Слідом за першим відображенням повинні випромінюватися сигнали затримані на більший час. Регулюванням рівнів перших відображень можна добитися бажаної прозорості або чіткості звучання. Слідом за першими випромінюються наступні дискретні відображення і, нарешті, ревербераційний сигнал. Останній обирається так, щоб його введення створювало ілюзію обсягу заданої величини. Час затримки ревербераційного сигналу може бути наближено розраховане за формулою, запропонованою Кремером:

$$t_v = 2\sqrt{V / m^3}$$

Зі сказаного випливає, що вихідний сигнал перш, ніж він надійде до слухача, багаторазово затримується, а при необхідності до нього домішується штучно створюваний ревербераційний сигнал.[4]

## 2.5 Wave Field Synthesis (WFS) - система хвильового синтезу просторового звуковідтворення

Системи синтезу звукового поля. Ідея методу Wave Field Synthesis (WFS) заснована на принципі Гюйгенса, який стверджує, що, коли точкове джерело створює навколо себе сферичну хвилю, фронт якої поширюється у вигляді сфери зростаючого радіуса, то хвильовий фронт, що проходить через будь-яку точку (P) простору можна представити як суму хвильових фронтів точкових джерел, які перебувають на поверхні сфери. Це пов'язане з тим, що звукова хвиля являє собою процес переносу енергії механічних коливань часток середовища, а хвильові фронти - це поверхні, що представляють положення часток, які перебувають в однаковій фазі коливань. Якщо кожен частку на фронті хвилі «замінити» точковим джерелом звуку, випромінюючим сферичну хвилю, то вони в сумі дадуть такий же хвильовий фронт, який створювало б у просторі первинне джерело. Стосовно до звукозапису це можна сформулювати в такий спосіб: якщо записати за допомогою мікрофонів розподіл звукового тиску та коливальної швидкості на всіх поверхнях, що оточують джерело звуку, а потім за допомогою гучномовців, розподілених по бічних поверхнях іншого аналогічного за формою приміщення, відтворити ці сигнали, то у вторинному приміщенні буде отримана структура звукового поля, повністю відповідна структурі первинного звукового поля (причому, відстань між гучномовцями повинна бути менше половини довжини хвилі найвищої звукової частоти у відтвореному сигналі). Розрахунок структури поля в довільній точці простору здійснюється за допомогою інтеграла Кірхгофа. Принцип побудови такої системи відтворення структури звукового поля у вторинному приміщенні, отриманої за допомогою системи розподілених на поверхні гучномовців. Цей принцип являє собою аналог оптичної голографії й тому називається іноді «поліфонія». Перевагою такої системи є, насамперед, здатність забезпечити локалізацію віртуальних джерел у всі зоні слухацьких місць, що знімає головні обмеження стереофонічних систем. При відповідній

процесорній обробці сигналів, які надходять на гучномовці у вторинному полі, можна сконструювати дуже реалістичну картину звукового поля, що змінюється, при переміщенні слухача усередині приміщення. Це істотно підвищує прозорість і розрізняюваність джерел звуку. Практична реалізація такої системи, однак, накладає певні обмеження на її можливості.

По-перше, кількість гучномовців не можна обрати нескінченно великою, дискретність розташування призводить до обмежень в частотному діапазоні, оскільки при підвищенні частоти різниця в часі між двома сигналами, які прибувають у дану точку поля від сусідніх гучномовців, створює значні похибки в результаті інтерференції (як показали експерименти, коректні результати вдається отримати при розташуванні гучномовців на відстані не більше 0,125 м). По-друге, гучномовці звичайно розташовуються у вигляді лінійки по стінах приміщення. Це призводить до того, що віртуальні джерела можуть бути локалізовані тільки усередині горизонтальної площини. По суті, відтворюється не сферична, а циліндрична хвиля.

По-третє, вторинне приміщення за рахунок своїх ревербераційних полів може вносити істотні похибки у відтворенні структуру синтезовано звукового поля, тому необхідні спеціальні алгоритми для процесорної обробки сигналу з метою мінімізації цього ефекту. Однак, незважаючи на всі ці обмеження, переваги, які вдається одержати за рахунок застосування такого методу просторового звуковідтворення, відкривають нові перспективи. Тому дослідженню можливостей системи WFS, методам запису та відтворення, а також суб'єктивній оцінці отриманих результатів приділяється дуже велика увага. Технологія запису вимагає використання системи мікрофонів, розподілених по поверхні в первинному звуковому полі, що дозволяє записати й потім відтворити у вторинному полі повну інформацію про просторові характеристики первинного середовища. Можливе використання мікрофонів типу Sound Field або кругових решіток мікрофонів. У тому випадку, коли немає можливості реалізувати такий запис повною системою мікрофонів, допускається запис із обмеженою кількістю

мікрофонів (наприклад, для 10 або, навіть, 4 різних напрямків), а для інших напрямків синтезувати ранні й пізні відбиття за допомогою пристроїв штучної реверберації. Ще однією перевагою технології WFS є здатність створювати мнимі віртуальні джерела в будь-якій площині усередині зони прослуховування, а також забезпечувати їх переміщення. Це еквівалентно створенню мнимих гучномовців у будь-якій точці простору, наприклад, як у системах Surround Sound. [11]

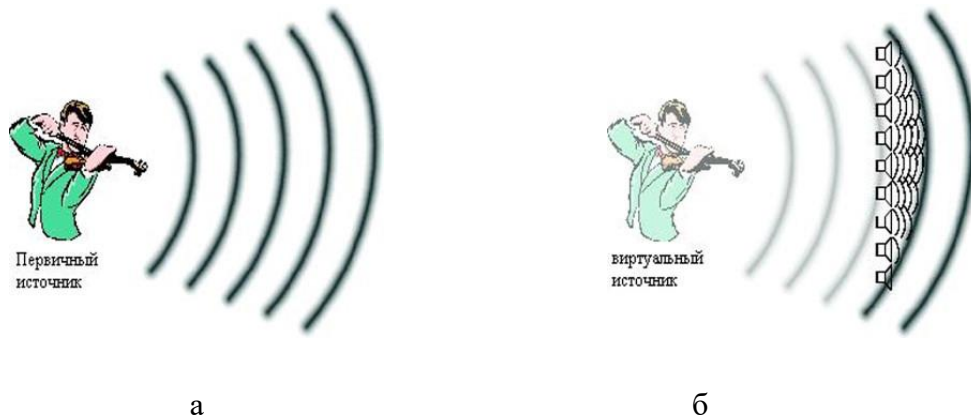


Рис. 2.2 Застосування принципу Гюйгенса для звукопередачі. а) звукове поле в первинному приміщенні б) створення віртуального джерела у вторинному приміщенні

## 2.6 Вибір системи звукоозвучення для мультифункціонального залу

Ознайомившись з теоретичними відомостями стосовно проектування систем озвучення можна обрати оптимальну систему для конкретного залу. Враховуючи його властивості і призначення. Для рівномірності звукового поля по всій слухацькій зоні використаємо **Surround гучномовці** вздовж двох бічних стін, **в кількості 18 шт.(по 9 на стіну)** на висоті 4м від підлоги.

Для реалізації створення WFS систему фронтальних гучномовців реалізуємо у вигляді **9 ВЧ гучномовців, 5 СЧ гучномовців** які розташовані над подіумом на висоті 4м і віднесені від фронтальної стіни на 5м, **2 НЧ гучномовця**

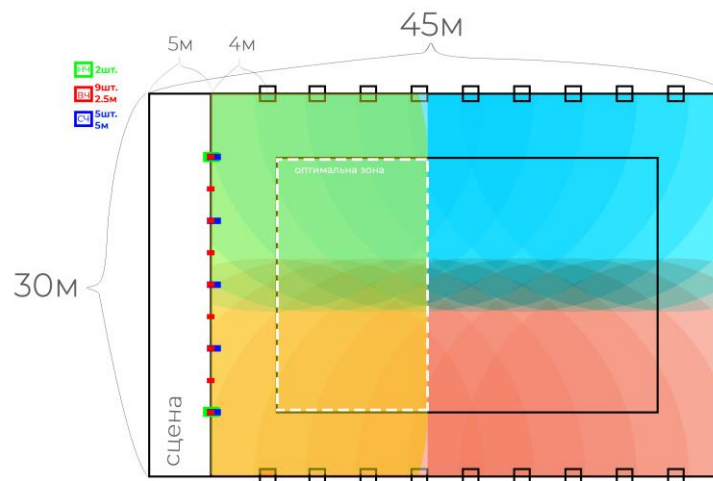


Рис. 2.3 Схема розташування гучномовців

При розрахунку відстані між фронтальними гучномовцями будемо враховувати довжину хвилі.

НЧ: 20-200  $f=170\text{Гц}$   $\lambda=2\text{м}$  відстань  $10\lambda$

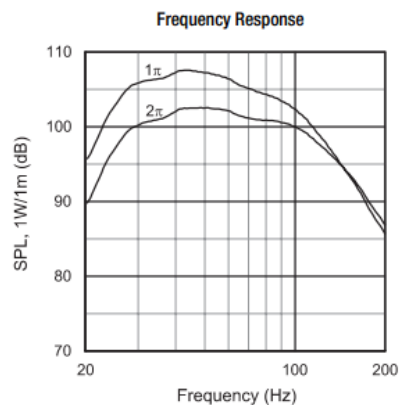
СЧ: 200-1000  $f=680\text{Гц}$   $\lambda=0.5\text{м}$  відстань  $10\lambda$

ВЧ: 1000<  $f=1360\text{Гц}$   $\lambda=0.25$  відстань  $10\lambda$

В якості **НЧ** гучномовців обрано: **JBL 4642A**



а



б

Рис.2.4 JBL 4642A а) зовнішній вигляд б) Рівень SPL

В якості **СЧ** і **ВЧ** гучномовців обрано: **JBL 5671SS**



а

### Specifications:

|                               |                                        |
|-------------------------------|----------------------------------------|
| Frequency Range (-10 dB):     | 40 Hz-16 kHz                           |
| Frequency Response (±3 dB):   | 50 Hz-12.5 kHz                         |
| Hor. Coverage Angle (-6 dB):  | 80°, averaged 300 Hz to 16 kHz         |
| Vert. Coverage Angle (-6 dB): | 50°, averaged 300 Hz to 16 kHz         |
| Directivity Factor (Q):       | 10.4                                   |
| Directivity Index (DI):       | 11                                     |
| Maximum peak output (1 m):    | LF: 130.8 dB, MF: 140 dB, HF: 136.8 dB |
| Recommended Crossover Freq.   | LF/MF: 320 Hz, MF/HF: 2.3 kHz          |

б

Рис. 2.5 JBL 5671SS а) зовнішній вигляд б) Основні характеристики

В якості **Surround** гучномовців обрано: **JBL 8320 [1]**



Рис. 2.6 JBL 8320

### 3. Моделювання

#### 3.1 Моделювання поля за принципом WFS

Процес WFS вже описаний вище. Для його реалізації потрібно визначити які потрібні часові затримки для гучномовців які будуть ніби «збуджуватися» при приходженні до них звукового імпульсу від центрального гучномовця, також потрібно врахувати те, на скільки згасне прямий імпульс, і з такою ж інтенсивністю випромінити наступні гучномовці.

Тепер застосуємо всі задані і обраховані в минулих розділах параметри для моделювання поля WFS.

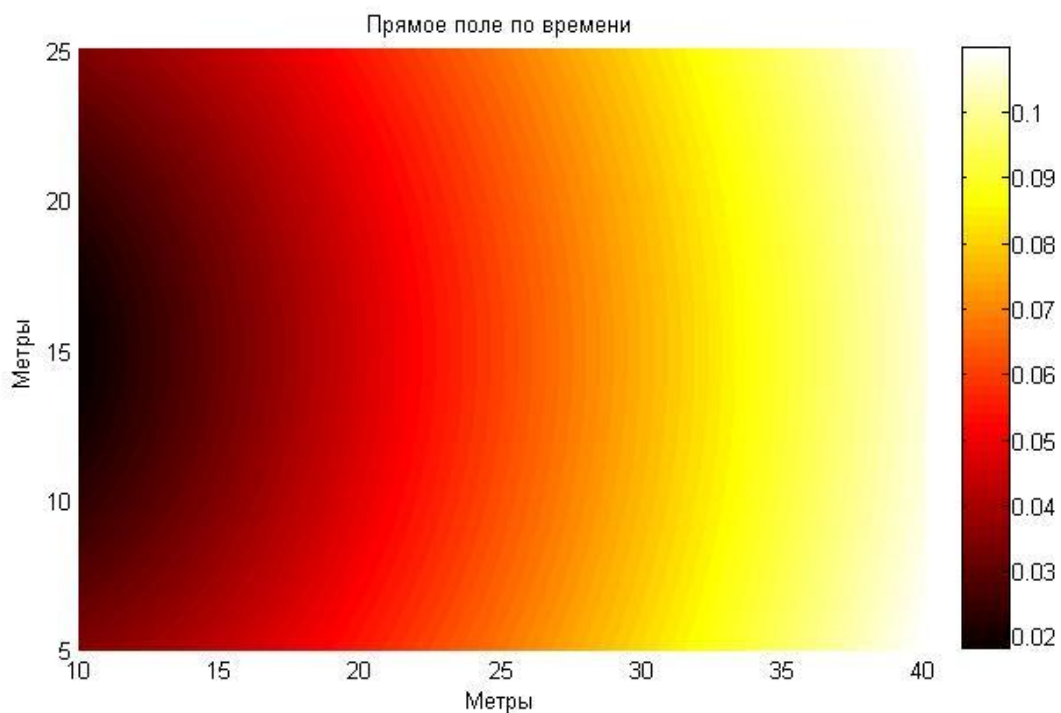


Рис. 3.1. Трьохмірний графік поширення фронту хвилі

Бачимо до через 100мс. хвиля досягає кінця слухацької зони. А що стосується оптимальної зони, то тут час в межах 50мс.

Одим із головних показників доцільності застосування так званої «бігучої хвилі» - є час приходження імпульсів від сусідніх гучномовців після «збудження» їх головним фронтом хвилі. Якщо затримки будуть

перевищувати, вже не раз згадані 50мс, то поле буде розмиватися і ми не отримаємо чіткого звукового сприйняття на глядацьких місцях.

Для аналізу оберемо все ті ж 3 точки:

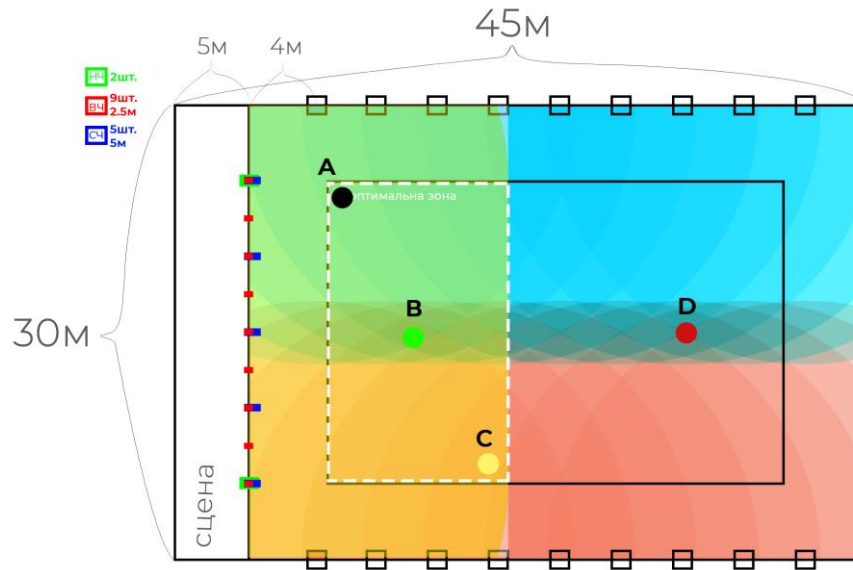


Рис.3.2 Обрані контрольні точки

Для точки А:

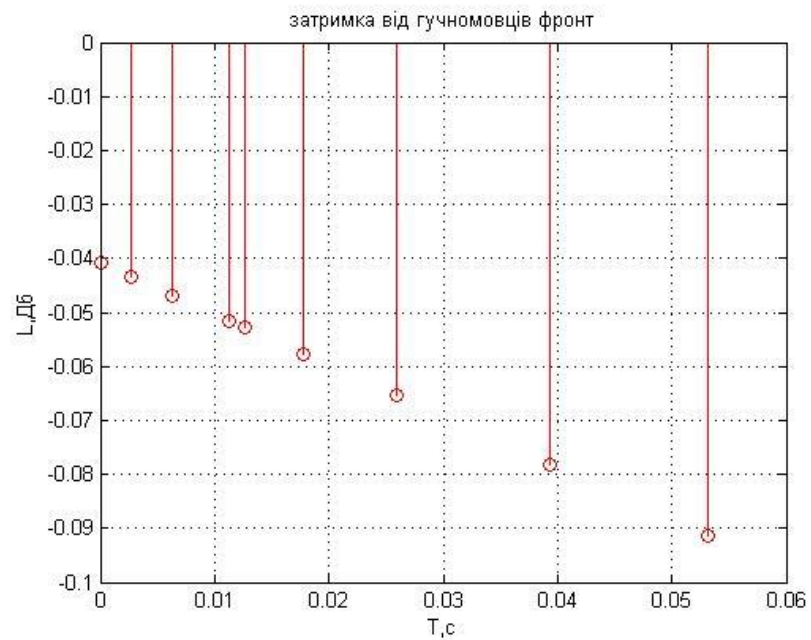


Рис.3.3. Затримки для точки А

Для точки В:

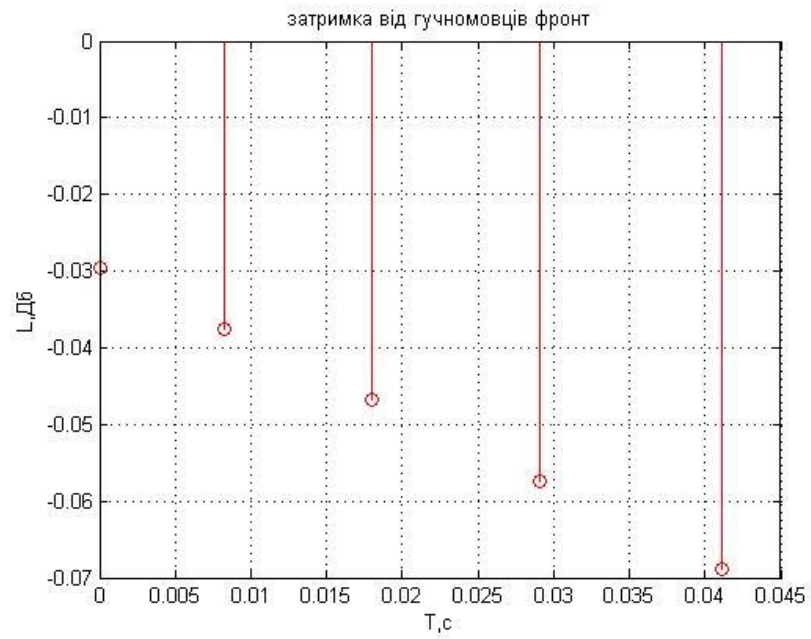


Рис.3.4. Затримки для точки В

Для точки С:

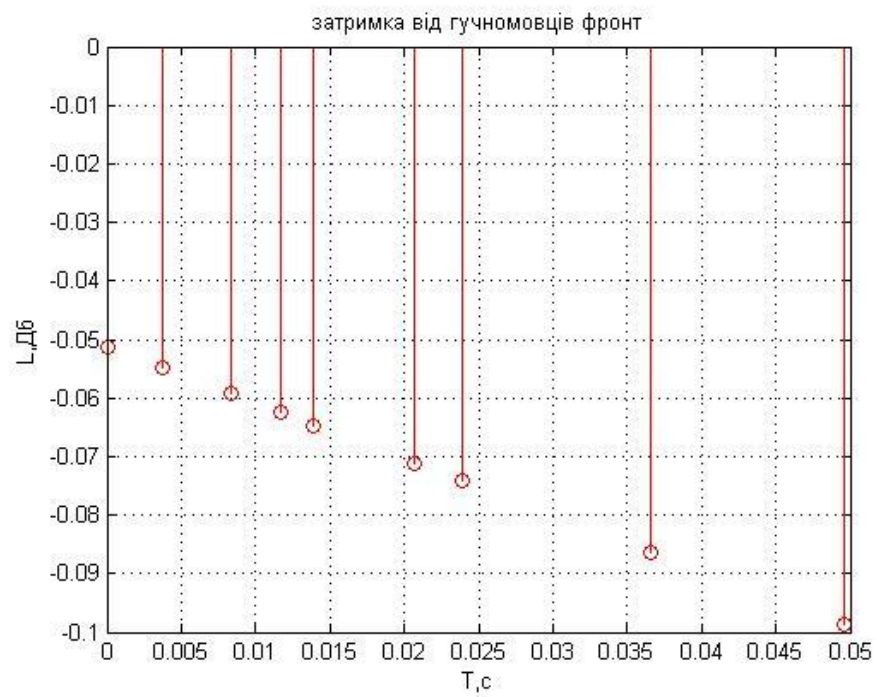


Рис.3.5. Затримки для точки С

Для точки D:

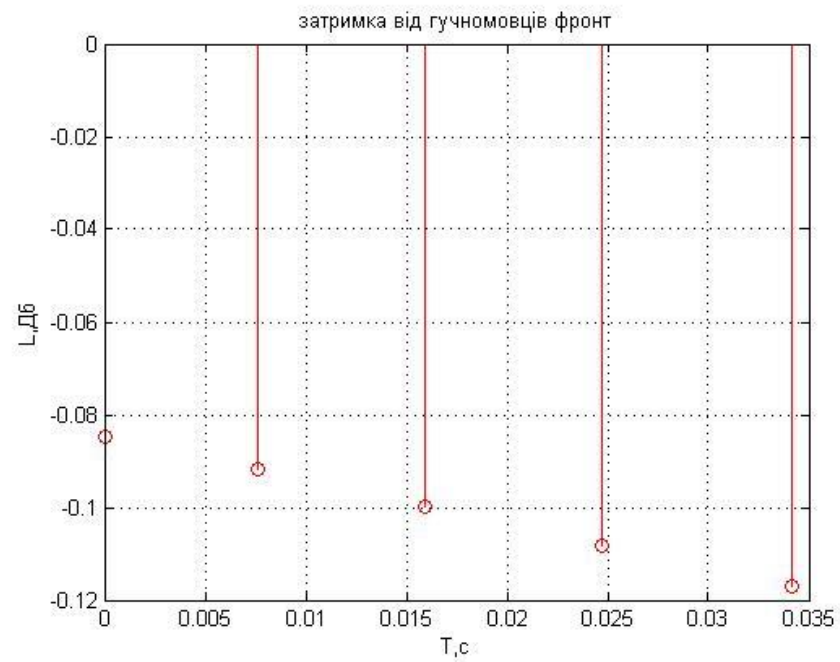
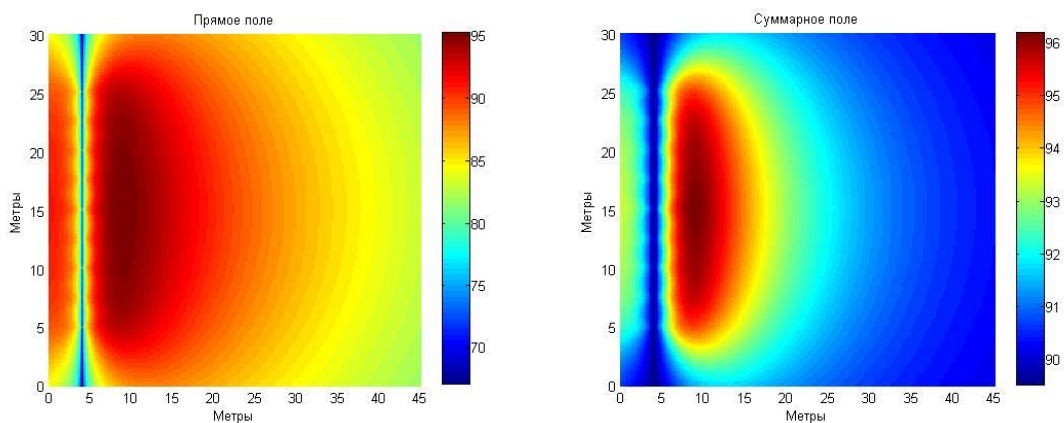


Рис.3.6 Затримки для точки D

Для усіх обраних точок затримки не несуть негативних наслідків, а тільки підсилюють основний сигнал.

Тепер дослідимо рівні звукового поля і його характеристик для WFS.

Моделювання на частоті 1000Гц.



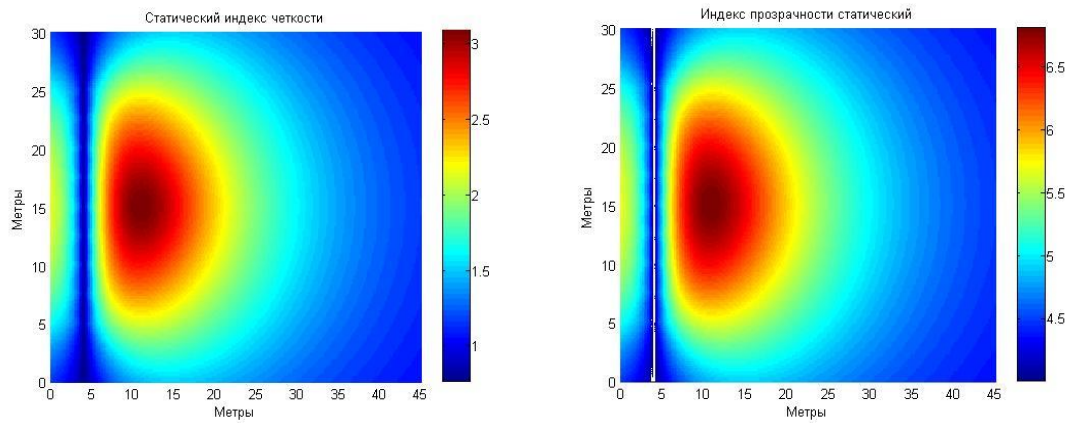


Рис. 3.7 Звукове поле на 1000Гц

А тепер ті самі графіки для одного центрального гучномовця без ввімкненої системи WFS.

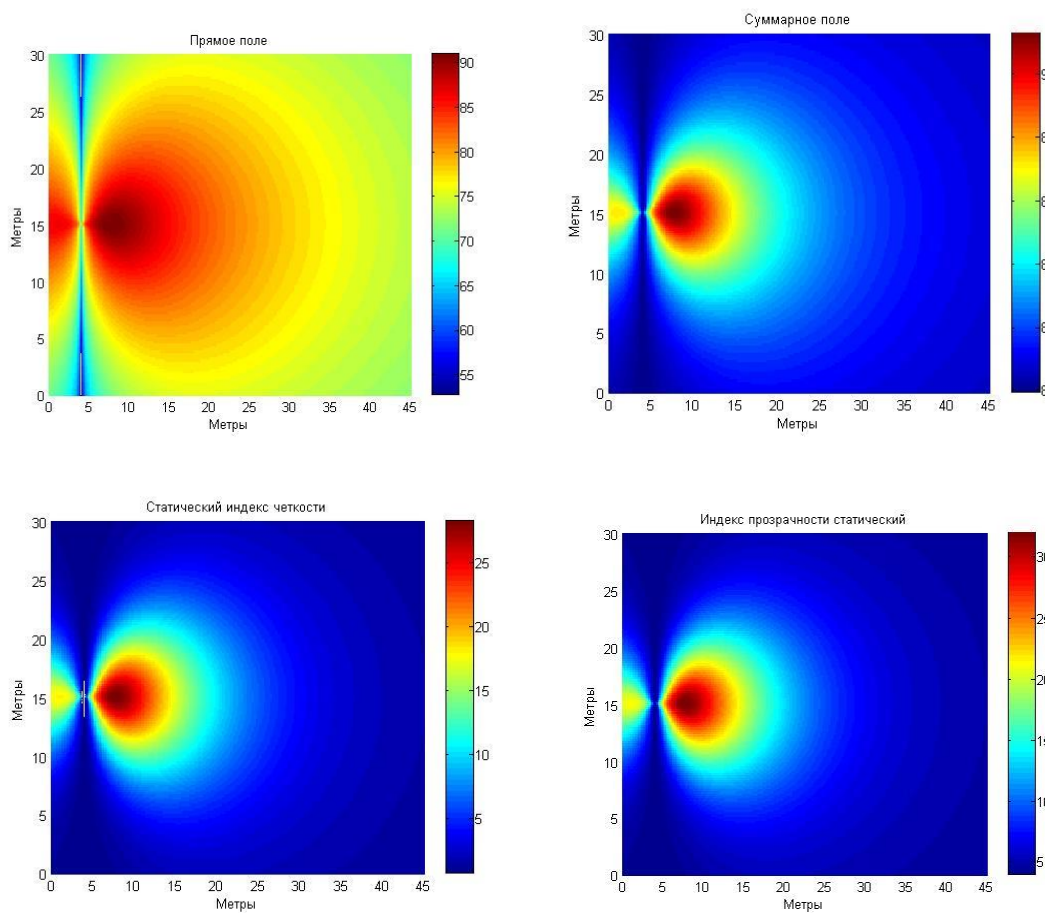


Рис. 3.8 Звукове поле на 1000Гц

Неозброєним оком помітно що при використанні WFS збільшується рівномірність акустичного поля в приміщенні, а також індекси чутливості і прозорості набувають нормальних значень. Тобто система підтвердила свою доцільність.

Наведемо графіки на інших частотах з використанням системи.

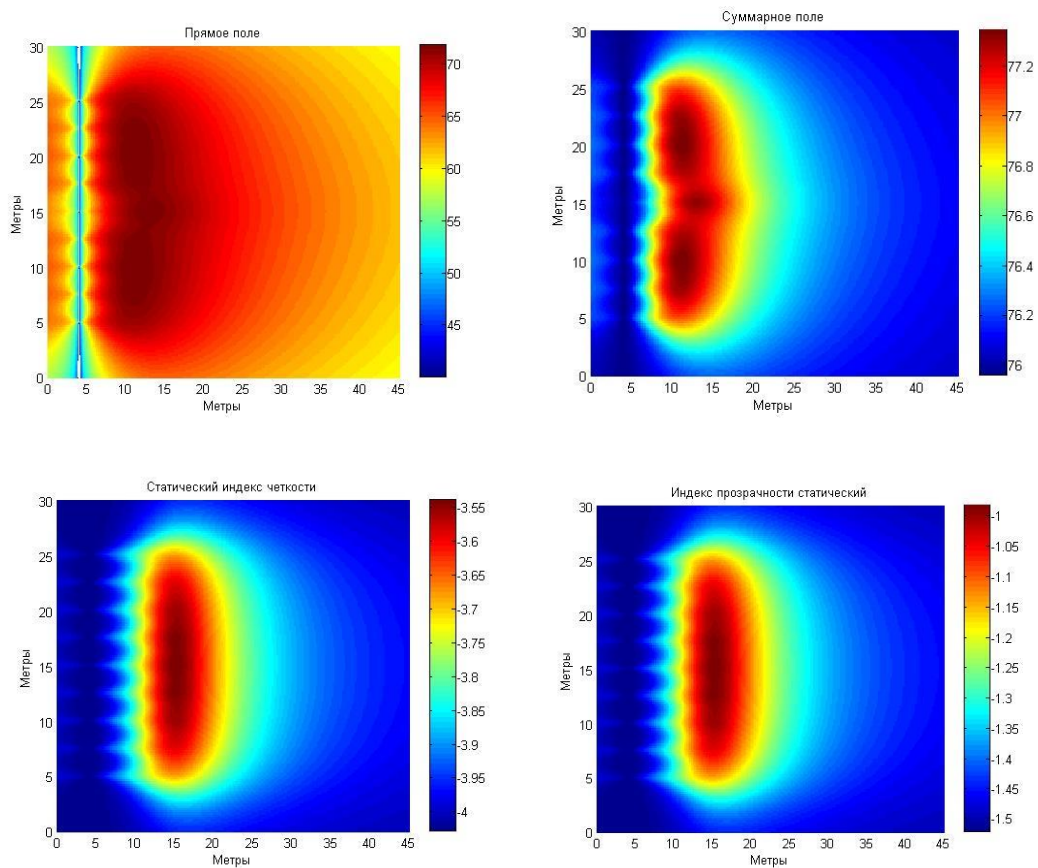


Рис. 3.9 Звукове поле на 200Гц

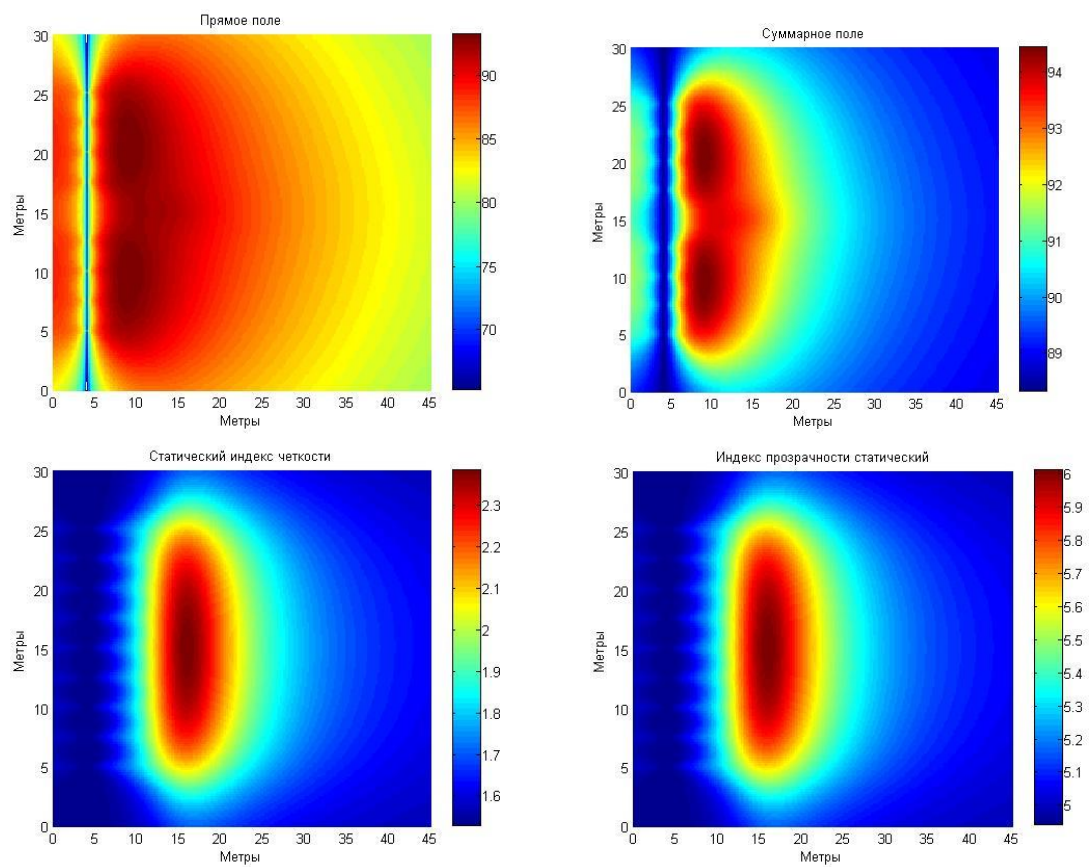


Рис. 3.10 Звуковое поле на 3150Гц

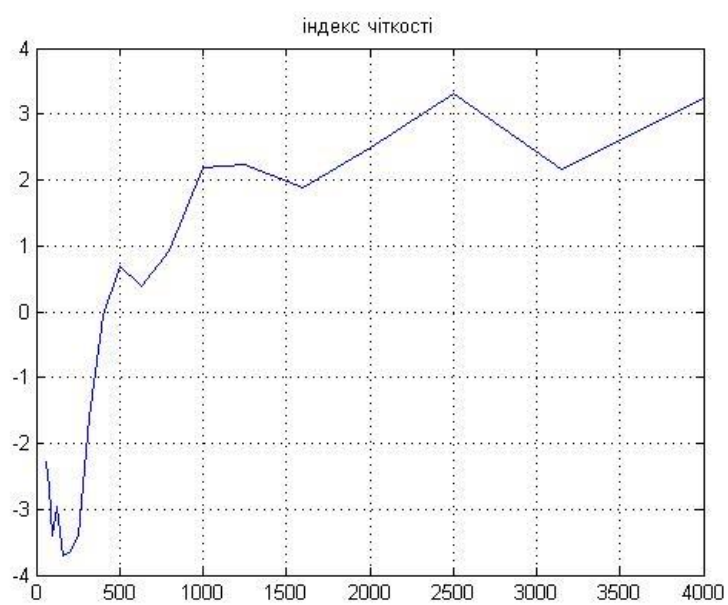


Рис. 3.11 Індекс чіткості

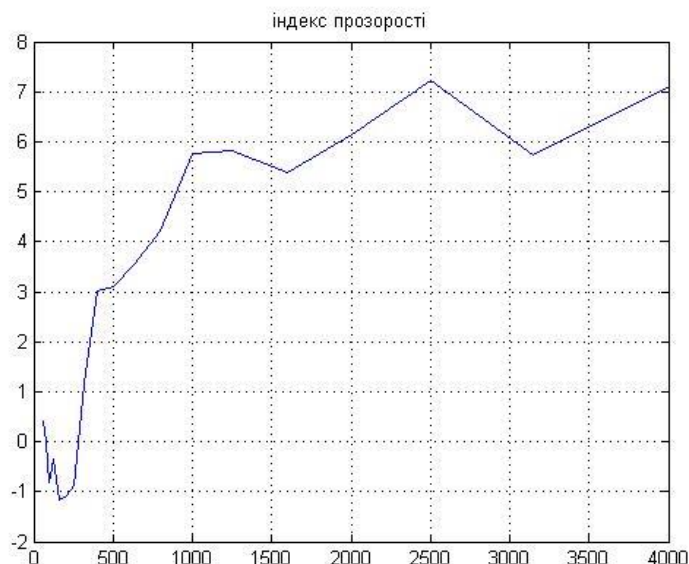


Рис. 3.12 Індекс прозорості

Висновки: Після побудови графіків сумарного поля, статичного ідекса прозорості і чіткості, вдалось переконатись в тому що система є ефективною і доцільною. Індекс прозорості знаходиться в оптимальному діапазоні і не перевищує значення 10дБ, адже таке перевищення погіршує сприйняття звукових сигналів для слухача, звуки стають «сухими». Це відбувається через те що енергія перших відбиттів звуку в 10 разів перевищує енергію відбиттів менших порядків. З цим можна боротися шляхом підбору площадок відбиттів. Рівень звуку задовольняє задані норми, і на частоті 1000Гц. коливається в діапазоні 91-95дБ. Нерівномірність поля за допомогою системи WFS також вдається оптимізувати до 4-5дБ.

## 3.2 Моделювання поля за принципом DOLBY

Для моделювання данної ситуації уявимо що зала використовується як кінозал і слухач знаходиться, наприклад, в епіцентрі масштабного вибуху, тобто всі гучномовці по периметру збуджуються одночасно.

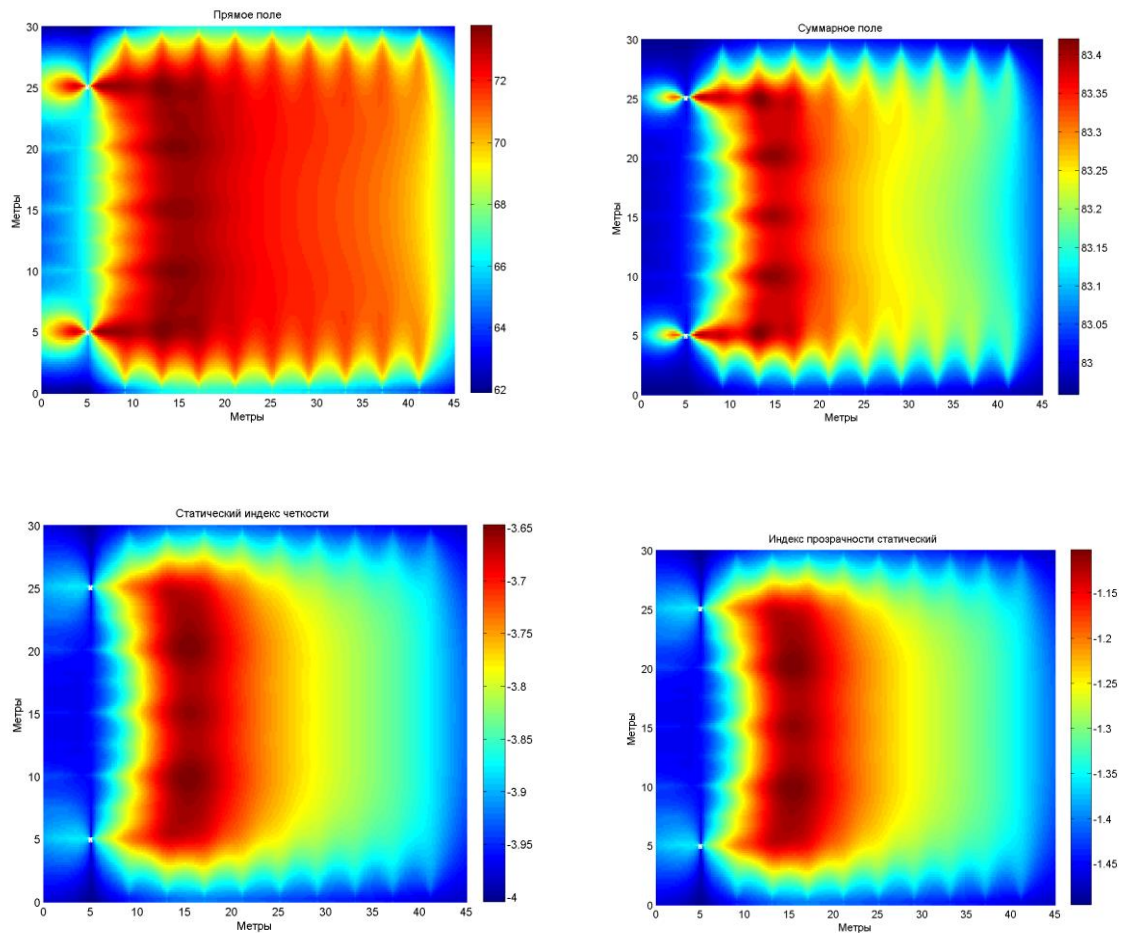
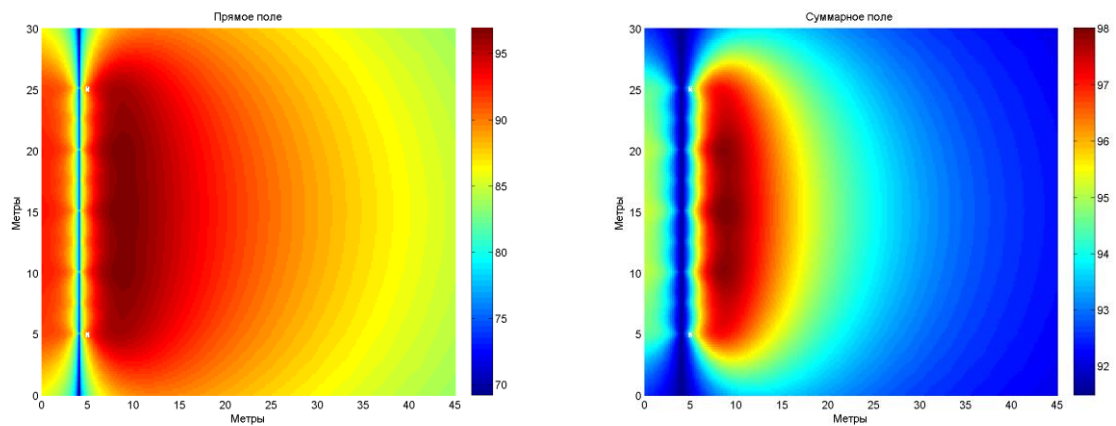


Рис. 3.13 Звукове поле на 200Гц



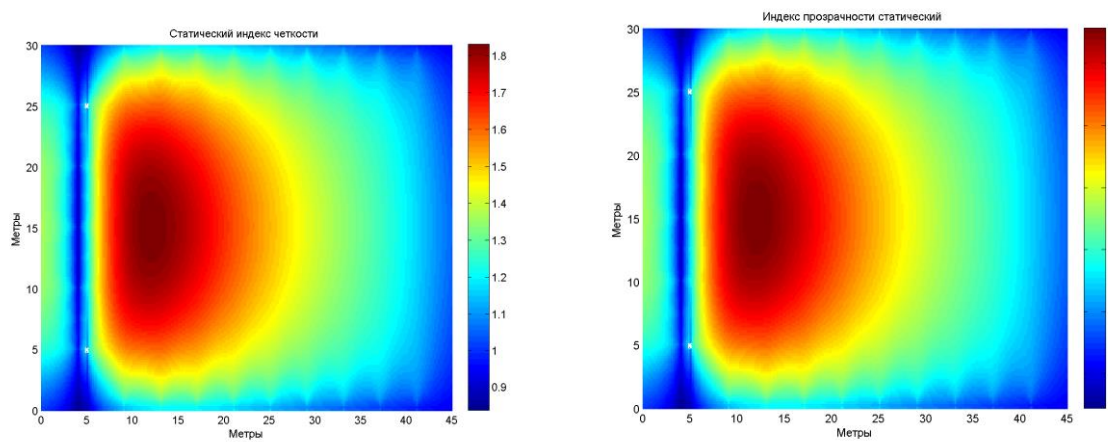


Рис. 3.14 Звуковое поле на 1000Гц

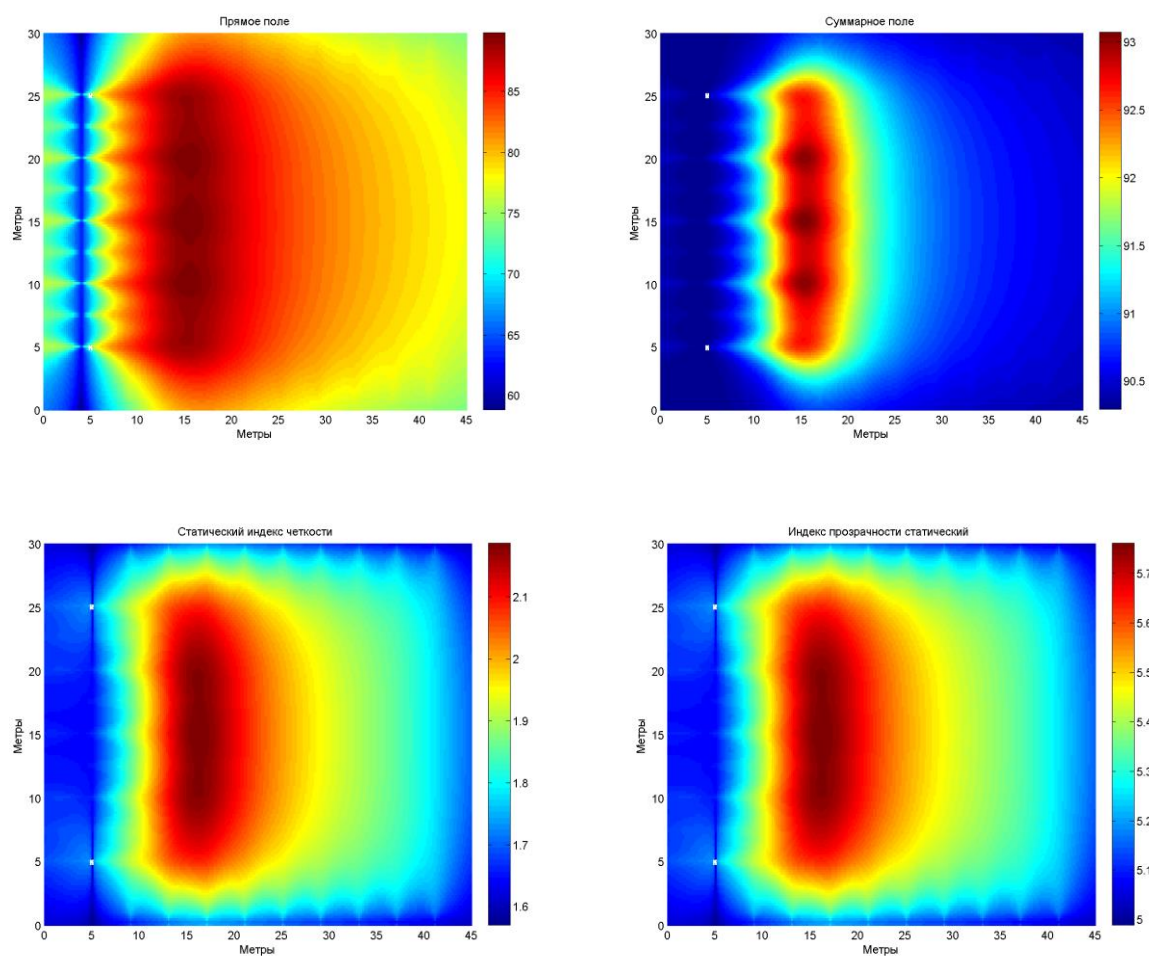


Рис. 3.15 Звуковое поле на 3150Гц

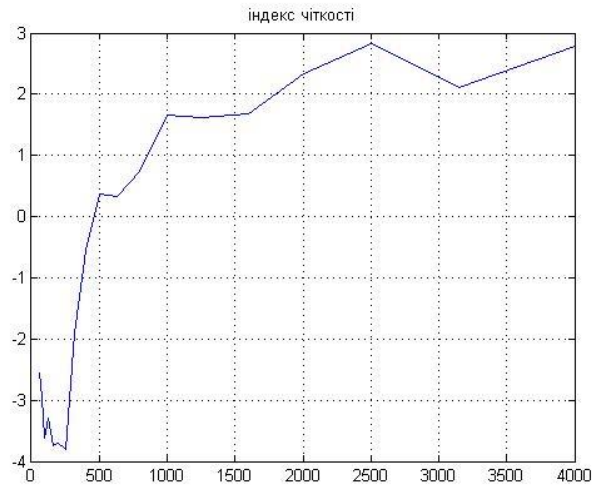


Рис. 3.16 Індекс чіткості

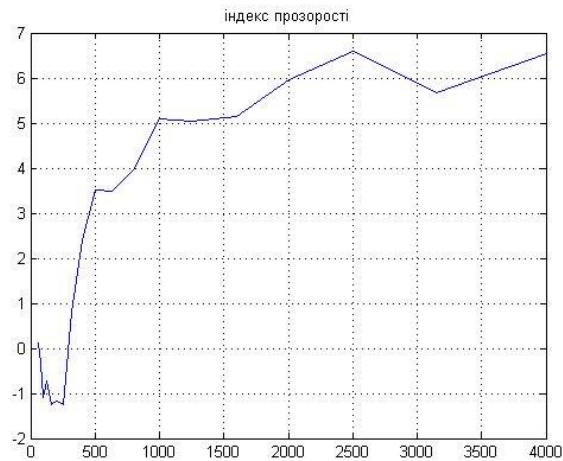


Рис. 3.17 Індекс прозорості

Висновки: При моделюванні озвучення в мультифункціональному залі з використанням системи Dolby були отримані досить якісні показники акустики. Нерівномірність поля є мінімальною і сягає 5-6дБ. навіть при найвищих значеннях SPL в 98-96дБ. А при оптимальному рівні, нерівномірність взагалі наближатиметься до 0, за рахунок surround гучномовців, які зрівнюються за рівнем SPL з фронтальними. Стосовно коефіцієнтів чіткості і прозорості також немає ніяких нарікань; на частоті 1000Гц коеф. чіткості знаходиться в діапазоні 1-1.8 а коеф. прозорості 4.4-5.2. Варто також відмітити їх майже дифузність на всій слухацькій зоні.

## 4.СТАРТАП

### 4.1 Ідея стартапу

Ця робота стала результатом знань, зібраних за 5 років на кафедрі акустики. А це дуже великий масив інформації. В ній зібрані всі основні ідеї, алгоритми і поради для проектування мультифункціональних залів і взагалі акустики приміщень. Головною метою роботи стало показати широкому загалу людей про те що акустика одночасно, складна і варіабельна, і теоретична і практична, а голоне – вона обов’язково повинна бути якісною. Складність полягає в тому що не існує двох приміщень з однаковою акустикою. Тому, при проектуванні кожного залу повинен бути індивідуальний підхід. Повинні продумуватися всі деталі і нюанси, проста пересічна людина не зможе відстроїти акустику правильно навіть у найпростішому приміщенні.

Продовженням цієї роботи може стати стартап. Стартап суть якого полягає у створенні професійної команди інженерів-акустиків, які зможуть реалізовувати ті речі про які шлося в цій роботі. А саме, професійне озвучення приміщень, створення проектів, різних акустичних конфігурацій. А допомагати їм у цьому буде те, що і є по суті головним продуктом цього стартапу – програма. Софт який отримавши від користувача всі необхідні вхідні данні спроектує акустичну складову будь якого приміщення найкращим чином, просто запропонує покращення або тільки проаналізує існуючу ситуацію та змодельює для приміщення акустичну систему WFS. На базі такої програми і створена ця дипломна робота. Декількасот рядків коду в Matlab на мою думку відмінно справляються зі своєю задачею. Цю програму можна перепесати на іншій мові програмування і додати туди користувацький інтерфейс, після чого запускати її на ринок.

## 4.2 Фінансові розрахунки

Таблиця 4.1. Витрати на стартап

| Найменування статей витрати і елементів ціни     | Витрати:      |                                        |
|--------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------|
|                                                  | Місячні, грн  | На розробку(оплачується один раз), грн |
| <b>Разом змінні витрати</b>                      | <b>6 000</b>  | <b>44 000</b>                          |
| 1. Залучення професіоналів для розробки продукту | 0             | 20000                                  |
| 2. Деталі та складові продукту                   | 0             | 0                                      |
| 3. Допоміжні матеріали                           | 2000          | 5000                                   |
| 4. Затрати на енергію                            | 1000          | 0                                      |
| 5. Розробка електронного каталогу                | 0             | 0                                      |
| 6. Придбати патент                               | 0             | 9 236                                  |
| 7. Реклама                                       | 2000          | 6000                                   |
| 8. Створення web-сторінки компанії               | 1000          | 3000                                   |
| <b>Разом постійні витрати</b>                    | <b>26 600</b> | <b>0</b>                               |
| 1.Амортизація                                    | 300           | 0                                      |
| 2.Комунальні послуги                             | 2 300         | 0                                      |
| 3.Оренда приміщення                              | 0             | 0                                      |
| 4. Заробітна плата працівникам                   | 10000         | 0                                      |
| <b>Собівартість(ЗВ+ПВ)</b>                       | <b>32 600</b> | <b>44 000</b>                          |
| <b>Повна</b>                                     | <b>76 600</b> |                                        |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| <b>собівартість</b>                 |            |
| Прибуток:                           |            |
| -при мінімальному рівні ціни +9%    | 6 894      |
| -при максимальному рівні ціни +25%  | 19 150     |
| Оптова ціна:                        |            |
| -при 9%                             | 92 615     |
| -при 25%                            | 104 262    |
| ПДВ(ставка 20%):                    | 18 550     |
| -при 9%                             | 20 840     |
| -при 25%                            |            |
| <b>Відпускна ціна підприємства:</b> | 111 165    |
| -при 9%                             | 125 102    |
| -при 25%                            |            |
| <b>Рентабельність продукції</b>     | <b>34%</b> |
|                                     | <b>65%</b> |

Таблиця 4.2. Розрахунок грошового потоку

| Рік  | Сума інвестицій (CI) | Прибуток (B) | Витрати(C) | $\frac{1}{(1+d)^t}$ | $B \cdot \frac{1}{(1+d)^t}$ | $C \cdot \frac{1}{(1+d)^t}$ | Грошовий потік (PV) |
|------|----------------------|--------------|------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 0    | 77 000               |              |            |                     |                             |                             |                     |
| 1    |                      | 653 555      | 384 873    | 0,847               | 548 520                     | 322 568                     | 225 952             |
| 2    |                      | 653 555      | 384 873    | 0,718               | 468 854                     | 275 712                     | 192 142             |
| 3    |                      | 653 555      | 384 873    | 0,608               | 391 845                     | 233 472                     | 158 373             |
| Сума |                      |              |            |                     | 1 409 219                   | 831 752                     | 577 467             |

1) Грошовий потік:  $PV = \sum_{t=1}^3 B \cdot \frac{1}{(1+d)^t} - \sum_{t=1}^3 C \cdot \frac{1}{(1+d)^t} = 577467$  грн

2) Дисконтний грошовий потік:

$$NPV = PV - CI = 577467 - 130936 = 446531 \text{ грн.}$$

$$3) BCR = \frac{\sum_{t=1}^3 \frac{B}{(1+d)^t}}{\sum_{t=1}^3 \frac{C}{(1+d)^t}} = 1.69$$

$$4) \text{Індекс прибутковості } PI = \sum_{t=1}^3 \frac{B-C}{(1+d)^t} / CI = 4.44$$

$$5) \text{Середня рентабельність інвестицій } P_C = \frac{BCR-1}{t} \cdot 100\% = 23\%$$

Таблиця 4.3. Фактори загроз

| №<br>п/<br>п | Фактор                                          | Зміст загрози                                                         | Можлива реакція компанії                                                                                                      |
|--------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | Повільний старт                                 | Нестача фінансової підтримки сповільнить вихід на ринок               | Кооперація з компаніями, які виробляють щось схоже. Залучення інвесторів шляхом поширення ідеї на виставках чи щось на кшталт |
|              | Конкуренти                                      | Аналоги все таки є, частина аудиторії довіряє конкуренту більше       | Або об'єднатись з такими компаніями, або запропонувати ринку кращі умови                                                      |
|              | Умови надання послуг не задовольняють споживача | Споживач хоче від компанії повну підтримку та обслуговування продукту | Створити гарячу лінію для споживачів та за певну ціну надавати повну підтримку продукції                                      |

Таблиця 4.4 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| Складові аналізу | Прямі конкуренти в галузі                  | Потенційні конкуренти                                                                                                     | Постачальники                                                                                                     | Клієнти                                                                                          | Товари-замінники                  |
|------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
|                  | Прямої конкурентів немає                   | Компанії, що обслуговують військових                                                                                      | Визначити фактори сили постачальників                                                                             | Визначити фактори сили споживачів                                                                | Фактор и загроз з боку замінників |
| Висновки         | На початковому етапі конкуренція відсутня. | Можуть вийти на ринок в будь-який момент, але їх захист специфічний, і не підійде в багатьох випадках під звичайні дрони. | Постачальники лише продаватимуть складові апаратури (друковані плати, датчики)<br><br>Умови вони не диктуватимуть | Бажання (умови) клієнтів будуть враховані. Захист проектуватиметься індивідуально під кожен дрон | Аналогі в немає                   |

За результатами аналізу можна зробити наступні висновки. Стартап має невелику собівартість завдяки тому що він являє собою програмний продукт який вже майже розроблений, потрібно тільки розробити інтерфейс користувача. Для цього потрібні послуги спеціаліста і веб-розробника. Попит на послуги продукту і консультації інженерів з'являться після правильної цільової рекламної кампанії.

## ВИСНОВКИ

Акустичне проектування приміщення – довгий та складний процес, що потребує багато експериментальних даних для правильного розрахунку. Під час проектування, мультифункціонального залу мають бути враховані різні нюанси, такі, як поглинання звуку у повітрі, геометрична форма приміщення, кількість слухачів. Одночасне задоволення всіх умов практично не можливе, через що потрібні величини наближують до умовно прийнятих границь. Але це також виконати не легко.

У даній роботі ми розглядали зал для відтворення музичної і мовної програм, а також в якості кінозалу. Обираючи якого часу реверберації потрібно досягнути, я опирався на мовну програму, адже саме для мовних програми він повинен бути найменший. А при необхідності його збільшення можна скористатися поворотними панелями з іншим матеріалом, менш звукопоглинаючим.

Аналізуючи отримані результати в другій частині можемо відмітити наступне, що обрана акустична система задовольняє необхідні вимоги до нерівномірності звукового поля, яка не перевищує 6 дБ. Оскільки розрахунки проводилися для максимального значення SPL, яке система забезпечує впродовж тривалого часу, зменшення електричної потужності, що підводиться до акустичної системи, забезпечить нижчий рівень звукового поля для більш комфортно поля.

Проте, головною метою було, дослідження і моделювання системи WFS. В теорії вона показала себе не погано, адже при достатньому рівні SPL, коефіцієнтів прозорості і чіткості ми отримали також локалізацію джерела звуку для слухача і створення так званої «бігучої хвилі». Мені не раз доводилось бувати на різних концертах і конференціях зі звичайною акустикою, і серед головних недостатків звичайної акустики є неспівпадіння слухового і зорового образу. Це те, чого ми точно не зустрінемо в WFS. Проте, при використанні залу в якості кінозалу більш ефективною буде

система Dolby з її панорамним розташуванням гучномовців. А для всіх інших програм де не потрібне надто велике SPL оптимальною буде WFS. Але і в неї існує чимало істотних проблем, основні з яких наступні:

необхідно (теоретично), щоб нескінченно велике число точкових випромінювачів покривало тривимірний простір, що практично не реалізовується. Якщо гучномовці кінцевих розмірів покривають тільки обмежену площину, то виникають ефекти усічення (truncation effect) і вище певної частоти, яка залежить від відстані між гучномовцями, з'являються спотворення (елайзінгові ефекти).

необхідно (для точного застосування інтеграла Релея для розрахунку звукового поля), щоб випромінювачі мали монопольні (кругові) або дипольні (вісімки) характеристики спрямованості, що в повному діапазоні відтворюваних частот реалізувати неможливо.

В даний час продовжуються дослідження по коректної передачі тривимірних звукових полів джерел. Для зменшення ефектів дифракції на краях (truncation effect) розроблені спеціальні вагові фільтри. Коректне відтворення звукових фронтів відбувається тільки до певної частоти (при відстані між гучномовцями 124 мм до частоти приблизно 1500 Гц), вище цієї частоти виникають спотворення. Для зменшення цих ефектів розроблені спеціальні масиви випромінювачів з близьким розташуванням акустичних центрів, створені плоскі акустичні панелі, введена спеціальна електрична корекція та ін. І, нарешті, були створені алгоритми, що дозволяють врахувати будь-які зміни характеристик спрямованості гучномовців з частотою. Таким чином, наявні проблеми успішно вирішуються, хоча роботи в цьому напрямку весь час тривають.

## Список літератури

1. <https://www.jblpro.com>. *Cinema Market*. [В Інтернеті] 2 11 2019 г. <https://www.jblpro.com/www/products/Cinema-Market/#.XezvM5MzbIU>.
2. <https://karma.digital/>. *Что такое Dolby Atmos и можно ли применить эту технологию в домашнем кинотеатре?* [В Інтернеті] 29 10 2019 г. <https://karma.digital/chto-takoe-dolby-atmos-i-mozhno-li-primenit-etu-tehnologiyu-v-domashnem-kinoteatre-0>.
3. **А.П.Ефимов, А.В.Никонов, М.А.Сапожков, В.И.Шоров.** *Акустика Справочник*. Москва : Радио и Связь, 1989.
4. **Арнет В., Райхард В.** *Основы техники звукоусиления*. Москва : Радио и Связь, 1984. стр. 312.
5. **Ю.О, Касянчик.** Розрахунок системи звукопідсилення студії звукозапису. Київ : б.н., 2019 г. стр. 43.
6. **М.А., Сапожков.** *Звукофикация помещений: проектирование и расчет*. Москва : Радио и Связь, 1979. стр. 143.
7. **Касянчик, Ю.О.** Проект системи адаптивної звукоізоляції малої студії звукозапису. Киев : б.н., 2018 г. стр. 64.
8. **Луньова С.А., Богданов О.В., Заєць В.П.** *Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи "Акустичний проект приміщення"*. Київ : Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", 2012. стр. 59.
9. **Ньюелл, Ф.** *Звукозапись: Акустика помещений*. Москва : [пер. з англ. А.Кравченко], 2004. стр. 197.
10. **Дідковський В.С., Луньова С.А., Богданов О.В.** *Архітектурна Акустика*. Київ : НТУУ КПІ ФЕЛ, 2012. стр. 381.

11. <http://prosound.ixbt.com>. *Wave Field Synthesis ( WFS ) – система волнового синтеза пространственного звуковоспроизведения*. [В Інтернеті] 13 11 2019 р. <http://prosound.ixbt.com/education/aldoshina-wfs.shtml>.
12. <http://ua-acoustics.com.ua>. [В Інтернеті] 30 05 2019 р. <http://ua-acoustics.com.ua/product/akusticheskij-porolon-piramida-cvet-svetlo-seryj/>.