

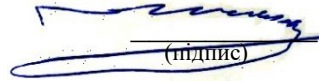
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки  
Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Сергій НАЙДА

  
(підпис)

“ 09” 06 2023р.

**Дипломна робота**  
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 171 – «Електроніка»  
(код і назва спеціальності)

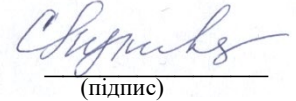
на тему: Методи оцінки акустичного стану приміщення

Виконала: студентка 4 курсу, групи ДГ-91  
(шифр групи)

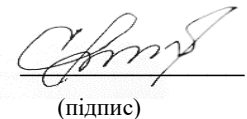
Гаврилко Валерія Олександрівна  
(прізвище, ім'я, по батькові)

  
(підпис)

Керівник: к.ф.-м.н., доцент, Луньова С.А.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Рецензент: к.ф.-м.н., директор ТОВ «Фонтек-С», Сенченко І.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 Гаврилко В.О.

  
(підпис)

Київ – 2023

## Завдання на дипломну роботу

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

Факультет електроніки

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 171 «Електроніка»

Освітньо-професійна програма «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Сергій, НАЙДА

«01» \_\_\_\_ 09 \_\_\_\_ 2022р.

### ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

**Гаврилко Валерії Олександрівні**

1. Тема роботи «Методи оцінки акустичного стану приміщення», керівник роботи Луньова Світлана Андріївна, к.м.-ф.н., доцент, затверджені наказом по університету від « 30 » травня 2023 р. № 2063-с
2. Термін подання студентом роботи: 11 травня 2023 року
3. Вихідні дані до роботи: Будівельні креслення глядацького залу Оперної студії НМАУ; виміряні значення часу реверберації залу; частотна характеристика оптимального часу реверберації залу за Кнудсеном та Ліфшицем; коефіцієнти звукопоглинання основних акустичних матеріалів і конструкцій.
4. Зміст роботи: пошук та аналіз літературних джерел за темою дипломної роботи; огляд теорій архітектурної акустики і частотних меж їх застосування; акустичний розрахунок приміщення за допомогою хвильової та статистичної теорій; висновки щодо результатів роботи, перелік літературних джерел.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): креслення приміщення; графіки стандартного та ефективного часу

реверберації, акустичного відношення на глядацьких місцях, побудова променевої картини в приміщенні.

#### 6. Консультанти розділів роботи\*

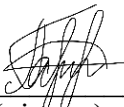
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

#### 7. Дата видачі завдання 17.04.2023

#### Календарний план

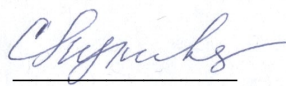
№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Узгодження плану з керівником.	17.04-18.04	виконано
	Збір джерел інформації для написання роботи.	18.04-20.04	виконано
	Підготовка та написання першого підрозділу, розділ I.	18.04-23.04	виконано
	Підготовка та написання другого підрозділу, розділ I.	24.04-30.04	виконано
	Підготовка та написання третього підрозділу, розділ I.	01.05-07.05	виконано
	Написання архітектурно-акустичних характеристик залу.	08.05-09.05	виконано
	Застосування хвильової теорії для акустичного розрахунку залу .	09.05-12.05	виконано
	Застосування статистичної теорії для акустичного розрахунку залу.	12.05-16.05	виконано
	Застосування геометричної теорії для акустичного розрахунку залу. Побудова променевої картини.	16.05-24.05	виконано
	Рекомендації, щодо зміни геометрії відбивальних поверхонь.	24.05-26.05	виконано
	Аналіз часової послідовності відбиттів.	26.05-30.05	виконано
	Оформлення роботи та написання висновків.	30.05-04.06	виконано

Студент

  
 \_\_\_\_\_  
 (підпис)

Валерія ГАВРИЛКО

Керівник

  
 \_\_\_\_\_  
 (підпис)

Світлана ЛУНЬОВА

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 87 с., 37 рис., 12 табл, 15 джерел.

Метою роботи є аналіз та порівняння трьох існуючих теорій, що використовуються для вимірювання акустики приміщень, а також визначення їх меж застосування та ефективності в різних умовах, для покращення якості акустичного середовища.

На прикладі Великого залу Київської консерваторії буде проведено дослідження якості акустичних характеристик, в результаті чого запропоновано рекомендації щодо їх покращення для створення комфортного та ефективного оточення звуку.

Ключові слова: хвильова теорія, статистична теорія, геометрична теорія, час реверберації, акустичне відношення, променева картина.

## ABSTRACT

Thesis: 86 p., 36 pic., 12 tabl, 15 sources.

The purpose of the work is to analyze and compare three existing theories used to measure the acoustics of rooms, as well as to determine their limits of application and effectiveness in different conditions, to improve the quality of the acoustic environment.

On the example of the Great Hall of the Kyiv Conservatory, a study of the quality of the acoustic characteristics will be conducted, as a result of which recommendations will be offered for their improvement in order to create a comfortable and effective sound environment.

Keywords: wave theory, statistical theory, geometric theory, reverberation time, acoustic ratio, ray pattern.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ I. ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ АРХІТЕКТУРНОЇ АКУСТИКИ.....	9
1.1 Хвильова теорія поширення звукових хвиль.....	9
1.2 Статистична теорія.....	16
1.3 Геометрична теорія поширення звукових хвиль .....	28
1.4 Межі застосування теорій. ....	33
Висновки до розділу .....	35
РОЗДІЛ II. ЗАСТОСУВАННЯ ХВИЛЬОВОЇ І СТАТИСТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ДЛЯ АКУСТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ ГЛЯДАЦЬКОГО ЗАЛУ ОПЕРНОЇ СТУДІЇ..	37
2.1 Архітектурно-акустичні характеристики залу.....	37
2.2 Розрахунок за хвильовою теорією.....	44
2.3 Розрахунок за статистичною теорією .....	48
2.3.1 Стандартний час реверберації .....	48
2.3.2 Акустичне відношення на глядацьких місцях .....	55
2.3.3 Еквівалентний час реверберації .....	58
Висновки до розділу .....	61
РОЗДІЛ III. ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТЕОРІЇ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ЗВУЧАННЯ В ГЛЯДАЦЬКОМУ ЗАЛІ.....	62
3.1 Побудова променевої картини в залі.....	62
3.2 Рекомендації щодо зміни геометрії відбивальних поверхонь .....	69
3.3 Аналіз часової послідовності відбиттів .....	75
Висновок до розділу.....	84
Висновки.....	85
ЛІТЕРАТУРА .....	86

## ВСТУП

У наш час існує нескінченна кількість розваг, що задовольняють смаки кожної людини. Однак і у 21 столітті жанри класичного мистецтва не втратили популярності. До них відносяться, звичайно, театр та опера, які сьогодні мирно співіснують поряд із кіно та виставками молодих художників. Багато людей регулярно відвідують п'єси та оперні концерти, щоб отримати задоволення від виду справжніх талантів, почути живу музику або поринути у світ історії.

Нині в Україні та світі можна знайти безліч театрів, побудованих виключно для музичних вистав. Деякі з них відрізняються дуже незвичайними спорудами зі спеціальною акустикою, яка дає слухачам можливість поринути в світ співу і відчутти дійство, що відбувається на сцені.

За словами П.І. Чайковського, "опера і саме тільки опера зближує вас з людьми, ріднить вашу музику зі справжньою публікою, робить вас надбанням не тільки окремих гуртків, але за сприятливих умов – всього народу".

27 жовтня 1863 р. з моменту відкриття Київського відділення Імператорського російського музичного товариства починається історія існування Національної музичної академії України ім. П.І.Чайковського.

В 1868 р. на його базі було започатковано Київську музичну школу, яка 3 листопада 1913 р. була перейменована в Київську консерваторію [1]. В роки Другої світової війни будівля зазнала руйнувань, але була відновлена в 1955-58 роках архітекторами Л.Б. Катком та Я.Л. Красним з добудовою концертного залу (Оперної студії). З проголошенням незалежності України, Консерваторія стала першим українським університетом мистецтв, який отримав статус національної академії [1]. Нині в Великому і Малому концертних залах НМАУ ім.П.І.Чайковського відбуваються концерти камерної музики, симфонічних

оркестрів, театральні оперні вистави та виступи солістів опери, а також інші види музичних програм.

Саме на прикладі Великого залу Київської консерваторії в роботі розглянуті основні положення та практичне застосування трьох теорій архітектурної акустики – статистичної, хвильової та геометричної. Оскільки не існує єдиної теорії, здатної пояснити всі акустичні процеси, що відбуваються у приміщеннях, доцільно з'ясувати межі застосування окремих теорій. Це дозволить з єдиних позицій вирішувати конкретні завдання оптимізації акустичних умов у приміщеннях різного призначення.

## РОЗДІЛ І.

### ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ АРХІТЕКТУРНОЇ АКУСТИКИ

#### 1.1 Хвильова теорія поширення звукових хвиль

Основні положення хвильової теорії розроблені Ф.Морзом, Р.Болтом, Й.Дрейзенем та іншими, хоча експериментальні дослідження акустики приміщень із урахуванням хвильової природи звуку проводилися задовго до цього [2]. Дж.В. Стретт першим висловив ідеї, які стали фундаментом даної теорії. Він описав математичний прийом, посилаючись на розв'язок хвильового рівняння тривимірного простору [3]. В.Кнудсен вперше експериментально виявив, що звуки реверберації мають не частоту джерела звуку [4], а частоти власних коливань приміщення.

В даній теорії можна виділити такі основні питання:

1. Взаємодія звукової хвилі з межами приміщення;
2. Стаціонарний звуковий режим у приміщенні;
3. Характер процесів устанавлення, зокрема реверберації.

Хвильова теорія розглядає приміщення як резонатор (аналогічно трубі музичного інструменту) із великою кількістю власних частот, а процеси, що відбуваються в ньому – як збудження.

Хвильова теорія акустики розглядає процеси поширення прямих і відбитих хвиль у приміщенні, враховуючи хвильову природу звуку. Можна очікувати на власні частоти і власну форму коливань об'єму повітря в кімнаті, оскільки він має певну масу та еластичність.

Якби приміщення складалось з двох жорстких відбивальних стінок і між ними було розміщене джерело звуку (рис.1.1), то в ньому виникали б стоячі хвилі на резонансних частотах. Це явище є результатом інтерференції падаючої хвилі і хвилі, яка відбивається від жорсткої стінки. При цьому біля відбивальних твердих стінок звуковий тиск завжди залишався б максимальним (коливальна швидкість часток повітря дорівнювала б нулю). В

певних точках приміщення існували б максимуми і мінімуми звукового тиску (це явище часто існує в реальних приміщеннях вздовж довгих стінок).

Якщо приміщення має прямокутну форму, то розрахунок його власних частот можна виконати за наступною формулою, отриманою Релеєм в 1868 році:

$$\omega_{nmq} = \pi c \sqrt{\left(\frac{n}{l}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2 + \left(\frac{q}{h}\right)^2}, \quad (1.1)$$

де  $l, b, h$  – розміри приміщення;

$n, m, q$  – цілі числа від 0 до  $\infty$  (для струни власні частоти  $\omega_n = \frac{n\pi c}{l}$ ).

Розв'язання задачі для приміщень з простою формою можна здійснити, використовуючи хвильову теорію. Однак, у реальних інженерних розрахунках цей підхід може бути нераціональним через його складність та часову затратність.

Звукове поле в тривимірному приміщенні може бути представлено як комбінація трьох типів стоячих хвиль, а саме [2]:

- аксіальних (осьових) хвиль, для яких два з трьох чисел  $n, m, q$  дорівнюють нулю. Наприклад, якщо  $m, q = 0$ , це аксіальні хвилі вздовж довжини приміщення; якщо  $n, q = 0$ , – вздовж ширини приміщення;  $n, m = 0$  – вздовж висоти приміщення (рис.1.1);
- тангенціальних (дотичних) хвиль, для яких одне з трьох чисел  $n, m, q$  дорівнює нулю. Наприклад, якщо  $n = 0$ , це тангенціальні хвилі, паралельні площині  $X, Y$  (рис.1.2);
- косих хвиль, для яких всі три числа  $n, m, q$  не дорівнюють нулю. Це стоячі хвилі між всіма поверхнями приміщення.

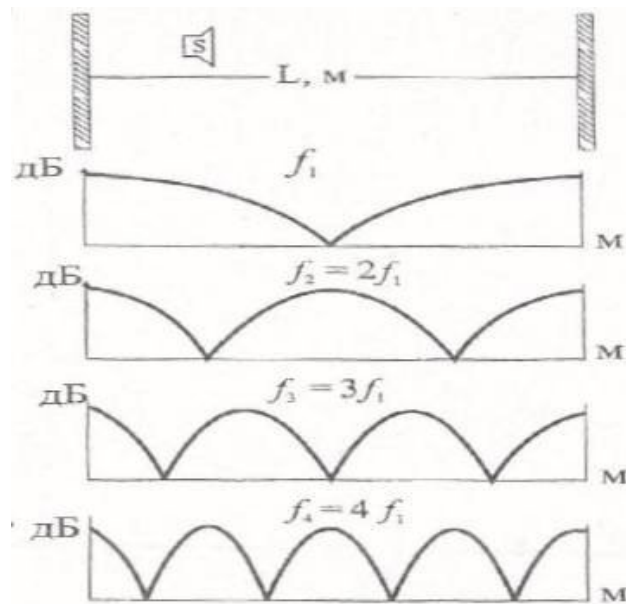


Рисунок 1.1 – Стоячі осьові хвилі в прямокутному приміщенні

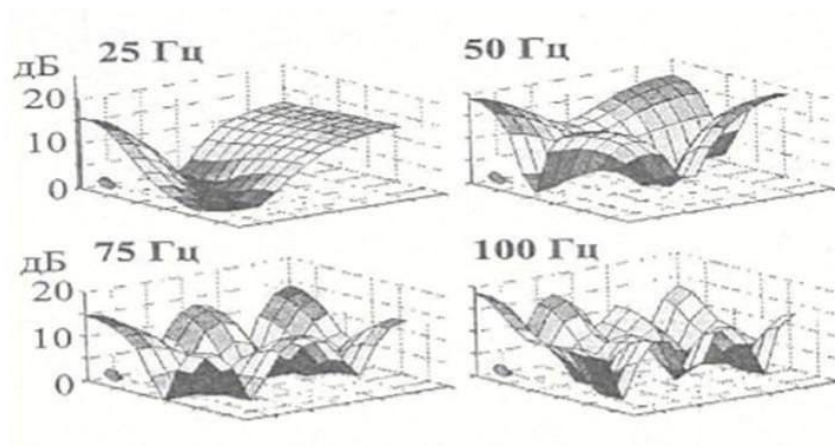


Рисунок 1.2 – Стоячі тангенціальні і косі хвилі в прямокутному приміщенні

На збудження аксіальних хвиль випромінена в замкненому просторі звукова енергія витрачається в розмірі 50%, тангенціальних – 25% і косих – 12%. Отже, якщо аксіальні хвилі мають рівень 0 дБ, тоді рівень тангенціальних хвиль буде становити -3 дБ, а косих -6 дБ.

Густина спектру власних частот приміщення є важливою характеристикою його акустичних властивостей, оскільки при збудженні

повітряного об'єму в приміщенні на його власних частотах відбувається підсилення відповідних частот в спектрі джерела за рахунок резонансів і відповідно, спотворюється тембр (з'являється небажана окраса звуку приміщенням).

Для визначення густини спектру, що вказує на кількість власних частот, що знаходяться всередині заданої смуги частот  $\Delta f$  (наприклад в третино-октавній смугі або смугі, завширшки 1 Гц), використовується наступний вираз:

$$\Delta N = \left[ (4\pi V) \left( \frac{f}{c} \right)^3 + \left( \frac{\pi S}{2} \right) \left( \frac{f}{c} \right)^2 + \left( \frac{P}{8} \right) \left( \frac{f}{c} \right) \right] \frac{\Delta f}{f}, \quad (1.2)$$

де  $P = 4(L + B + H)$  – сума довжини, ширини і висоти приміщення,  $f$  – центральна частота смуги  $\Delta f$ .

Виходячи з цього виразу, густина спектру зростає зі збільшенням об'єму приміщення і зі збільшенням частоти. Якщо побудувати залежність між власними частотами і частотою в смугі, шириною 1/3 октави, що примірно відповідає ширині критичних смуг слуху, то видно (рис.1.3), що при підвищенні частоти густина спектру різко зростає, тому АЧХ (огональна спектру) стає більш однорідною і приміщення робить значно менший внесок в змінення спектру (отже тембру) джерела.

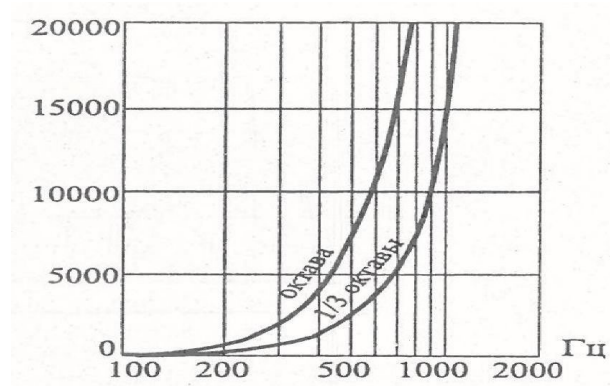


Рисунок 1.3 – Залежність власних частот від частоти в смузі шириною 1/3 октави

Низькочастотна область виявляється найбільш небезпечною, оскільки у великих приміщеннях дискретний спектр зосереджується в діапазоні частот 18-60 Гц, а цей діапазон є нижчим за звичайний, що притаманний для голосу і музичних інструментів.

Таблиця 1.1 – Частотний діапазон музичних інструментів і голосу

	Частота, Гц
Рояль, фортепіано	27-4200
Контрабас	40-300
Віолончель	65-880
Кларнет	140-1980
Скрипка	210-2800
Флейта	240-2300
Чоловічий голос	80-240
Жіночий голос	140-500

Малим приміщенням притаманна область дискретного спектру, яка знаходиться в музичному та мовленнєвому діапазоні, та суттєво впливає на звук. Це може бути однією з причин, чому прослуховування та запис музики у вказаних приміщеннях можуть бути не задовільними.

Об'єм повітря в приміщенні, як будь-яка розподілена механічна система при виключенні джерела, тобто спонукаючої сили, переходить в режим власних затухаючих коливань. В області низьких частот, коли в приміщеннях спостерігається дискретний спектр, затухання звуку відбувається на власних частотах приміщення, які не відповідають спектральному складу джерела звуку, що сприймається слухом як спотворення тембру. Причому, оскільки власні частоти приміщень розташовуються достатньо близько одна до одної, в процесі затухання можуть виникати биття.

Крім того, різна швидкість затухання мод коливань в приміщеннях викликає нерівномірне розподілення енергії під час реверберації. В результаті осьові хвилі, які рухаються паралельно до більш довгих стін, починають відігравати все більш значущу роль.

Всі ці обставини призводять до того, що малим приміщенням часто притаманна виражена дискретна власна частота та мод коливань, що може негативно впливати на акустичну якість приміщення.

Для подолання цих проблем в акустичному проектуванні застосовують наступні методи: підбір оптимальних пропорцій і форм приміщень; розташування акустичних розсіювачів, таких як колони, відбивачі тощо; підбирання звукопоглинальних матеріалів та їх розташування на поверхнях приміщень.

Для прямокутних приміщень вибір пропорцій є ключовим фактором. Кубічна форма є небажаною, оскільки вона спричиняє виродження або

співпадіння власних частот, в результаті чого деякі з них стають найбільш виразними по амплітуді, а це призводить до сильної окраси звуку. Вибором відповідних пропорцій можна досягти більш рівномірного розподілення частот в спектрі.

Ще в Древній Греції було відкрито пропорції, відомі як "золотий перетин". Ці пропорції визначають співвідношення між висотою, шириною і довжиною приміщення за певним законом:

$$\frac{L}{B} = \frac{B}{H} \quad \text{при умові } L = B + H, \quad (1.3)$$

де  $L$  – довжина;  $B$  – ширина;  $H$  – висота приміщення.

Якщо врахувати, що об'єм приміщення  $V = L \cdot B \cdot H$ , то знаходимо:

$$H = 0.623V$$

$$B = 3V$$

$$L = 1.623V$$

Саме ці пропорції використовувались архітекторами минулих віків при створенні концертних залів з найкращою акустикою.

В сучасних роботах наводяться наступні рекомендації для вибору допустимих пропорцій приміщення  $H:B:L$ :

$$1:1,14:1,39; \quad 1:1,28:1,54; \quad 1:1,6:2,33; \quad 1:1,62:2,62.$$

Для забезпечення більш рівномірного розподілення власних частот часто використовується непрямокутна форма приміщення [5].

Оптимізація форми приміщення, розміщення в ньому різних відбивальних поверхонь і звукопоглинальних матеріалів виконується методами комп'ютерного моделювання.

## 1.2 Статистична теорія

Визначення оптимальних умов чутності у великих закритих приміщеннях було актуальними ще у давні часи класичної епохи. Незважаючи на це, перші практичні результати з'явилися тільки вкінці XIX століття, коли Уоллес Себін провів експерименти і встановив один з найважливіших факторів, що впливає на акустичну якість приміщень. Ці успіхи визначили подальші напрямки розвитку архітектурної акустики на довгий час.

Коли в закритому приміщенні звучить мова, то кожен її склад, що є коротким звуковим імпульсом, доходить до слухача не тільки по прямій лінії, а й шляхом багаторазового відбиття. Кожен раз, коли звуковий імпульс відбивається від поверхні, що обмежує приміщення, деяка частка звукової енергії поглинається. Це призводить до того, що при послідовному відтворенні звуків, вухо слухача сприймає ряд імпульсів з поступово зменшуваною інтенсивністю. Часові інтервали між елементами цього ряду є достатньо малими порівняно з тривалістю імпульсу, тому це явище не має характеру відлуння. Не розрізняючи окремих затухаючих імпульсів, слухач сприймає кожен новий склад мови на фоні низки попередніх складів, які ще не встигли відзвучати на момент вимови наступного. Це може призвести до того, що мова стає нерозбірливою, а приміщення виявляється надто лунким.

Так само відбувається і в приміщеннях, призначених для слухання музики. Кожен ритмічний елемент музичного твору є послідовністю звукових

імпульсів, що піддаються послідовним відбиттям. У випадку довгого відлуння, фон, що формується шляхом суперпозиції послідовних імпульсів з поступовим згасанням, все більше впливає на сприйняття музики, особливо при високій швидкості темпу музичного твору. Музика є чудовим прикладом того, що надмірна тривалість відгуку або, навпаки, його недостатня тривалість можуть бути причиною акустичних дефектів приміщення. Якщо звук швидко загасає, що свідчить про високий рівень поглинання звуку, то музика може звучати "сухо" і втратити зв'язність звучання. Певною мірою це стосується і слухання мови; хоча при короткому відлунні розбірливість мови цілком задовільна.

З цих міркувань випливає, що основним фактором, який визначає акустичну якість приміщень, є тривалість відлуння або тривалість реверберації. Термін «реверберація» був запропонований У. Себіном.

Напочатку 1890-х років Себін експериментальним шляхом отримав рівняння, яке встановлює зв'язок між часом реверберації у приміщенні, його об'ємом та повним поглинанням (в Себінах). ( $T_{60}$  – аббревіатура для часу реверберації 60 дБ):

$$T_{60} = \frac{24 \ln 10^1}{c_{20}} \cdot \frac{V}{Sa} \approx 0.1611 \text{ sm}^{-1} \cdot \frac{V}{Sa0}, \quad (1.4)$$

де  $c_{20}$  – швидкість звуку в приміщенні (при 20 °С),  $V$  – об'єм приміщення в  $\text{м}^3$ ,  $S$  – загальна площа поверхні приміщення в  $\text{м}^2$ ,  $a$  – середній коефіцієнт поглинання поверхонь приміщення, а добуток  $Sa$  – загальне поглинання в Себінах.

Від частоти, що впливає на акустичні властивості простору, залежить загальне поглинання звуку в Себінах та час реверберації. Слід зазначити, що в

рівнянні реверберації Себіна не враховується форма приміщення та втрати звуку, що поширюється повітрям. Великі приміщення мають особливу важливість з точки зору поглинання звуку, оскільки менше звукової енергії поглинається на нижчих частотах, що є причиною подовження часу реверберації.

У своєму дослідженні Себін зазначив, що існує залежність часу реверберації від відбиття звуку від різних поверхонь, що присутні у залі. За умови, що відбиття звуку є когерентним - час реверберації буде більшим, оскільки звук довше згасає.

Час реверберації  $RT_{60}$  і об'єм  $V$  кімнати мають великий вплив на радіус лункості  $r_L$  (умовне рівняння) :

$$r_L \approx 0.057 \cdot \sqrt{\frac{V}{RT_{60}}} \quad (1.5)$$

де  $r_L$  вимірюється в метрах, об'єм  $V$  вимірюється в  $m^3$ , а час реверберації  $RT_{60}$  вимірюється в секундах [6, 7] .

Рівняння часу реверберації Ейрінга було запропоновано Карлом Ф. Ейрінгом з Bell Labs у 1930 році [8]. Це рівняння призначене для кращої оцінки часу реверберації в невеликих приміщеннях з відносно великою кількістю звукопоглинання, визначених Ейрінгом як «мертві» приміщення. Ці кімнати, як правило, мають менший час реверберації, ніж великі, більш лункі приміщення. Рівняння Ейрінга схоже за формою на рівняння Себіна, але включає модифікації для логарифмічного масштабування коефіцієнта поглинання. Одиниці та змінні в цьому рівнянні такі ж, як і в рівнянні Себіна. Час реверберації Ейрінга визначається рівнянням:

$$T_{60} \approx -0.161 \cdot \frac{V}{S \ln(1-a)} \quad (1.6)$$

Рівняння Ейрінга було виведене з фізичних принципів загасання звуку в приміщенні, на відміну від емпіричного підходу Себіна. Експериментальні результати, отримані Себіном, загалом узгоджуються з рівнянням Ейрінга, оскільки обидві формули стають ідентичними для дуже лунких приміщень, з якими працював Себін. Однак рівняння Ейрінга краще застосовувати для невеликих приміщень з великим поглинанням. Як наслідок, рівняння Ейрінга часто використовується для оцінки часу реверберації в контрольних кімнатах студії звукозапису або в інших критичних середовищах прослуховування з високим рівнем звукопоглинання. Рівняння Себіна має тенденцію завищувати час реверберації для невеликих приміщень із високим рівнем поглинання.

В реальних приміщеннях, де є джерело звуку, домінуючою на коротких відстанях від джерела звуку є енергія прямого звуку. При цьому, енергія зменшується зворотно пропорційно до квадрата відстані. Однак, на великих відстанях, переважною стає енергія відбитих звуків, і тоді можна вважати звукове поле дифузним.

Для того, щоб врахувати взаємодію між прямим і відбитим звуком у реальному приміщенні, було введено таке поняття, як "акустичне відношення". Це відношення визначається шляхом порівняння густини дифузної звукової енергії з густиною енергії прямого звуку.

Акустичне відношення описує рівень дифузності звукового поля в певній точці [6]:

$$N = \frac{W_d}{W_{пр}}, \quad (1.7)$$

де  $W_d$  та  $W_{пр}$  – це густина дифузної та прямої енергії відповідно.

$$W_n = \frac{P}{c_0 \cdot 4\pi r^2} \quad (1.8)$$

Дана формула може бути використана для визначення густини енергії прямого звуку від ненаправленого джерела звуку. В цій формулі:  $P$  – це акустична потужність ненаправленого джерела;  $r$  – відстань між джерелом та точкою спостереження. Інтенсивність звуку, що формується джерелом у нескінченному просторі можна виразити за допомогою формули:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (1.9)$$

Густина енергії, що залишилася в приміщенні після першого відбиття, коли енергія прямих хвиль вже не існує, може бути визначена як:

$$W_d = W_0(1 - \alpha) = \frac{4P}{c_0 \alpha S} (1 - \alpha) \quad (1.10)$$

Тоді отримуємо вираз, який описує акустичне відношення:

$$N = \frac{16\pi r^2}{S} \cdot \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (1.11)$$

Формулу можна представити в іншому вигляді, якщо крім залежності від відстані ввести залежності від часу реверберації в приміщенні та його об'єму:

$$N = 312 \frac{r^2 T}{V} \cdot (1 - \alpha_{\text{сеп}}) \quad (1.12)$$

На відстанях більших за радіус лункості є переважною енергія дифузного звуку, і для того, аби визначити час реверберації, можна застосовувати формули Себіна і Ейрінга.

На відстанні, що менша за радіус лункості менший, суб'єктивне відчуття реверберації також є меншим, ніж стандартний час реверберації, тому що слухач розміщений більшою мірою в зоні прямого звуку. Тому на основі суб'єктивних експертиз було виявлено еквівалентний час реверберації.

Зазвичай визначення акустичного відношення для приміщення проводиться на значущих місцях, де знаходяться слухачі.

Оптимальні значення акустичного відношення залежать від призначення приміщення: для передачі мови оптимальними є значення  $N$  в діапазоні 0.5-4, для музичних вистав – 2-8, для органної музики – 10-12.

Коли акустичне відношення є меншим оптимальних меж, то звук буде звучати сухо, а якщо значення вище - звук може бути забрудненим.

В залі працює джерело звуку, отже існує одночасно пряма і дифузна енергія.

Густину прямої енергії можна виразити через  $W_d$  та  $N$  за допомогою формули:

$$W_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{д}}}{N} \quad (1.13)$$

Формула для визначення повної густини енергії буде мати вигляд:

$$W = W_{\text{пр}} + W_{\text{д}} = W_{\text{д}} \left( \frac{1}{N} + 1 \right) = W_{\text{д}} \frac{N+1}{N} \quad (1.14)$$

Наступним кроком можна визначити рівень густини енергії:

$$L = 10 \lg \frac{W}{W_0} = 10 \lg \frac{W_{\text{д}}}{W_0} \cdot \frac{N+1}{N} = 10 \lg \frac{W_{\text{д}}}{W_0} + 10 \lg \frac{N+1}{N} \quad (1.15)$$

Величина  $10 \lg \frac{W_{\text{д}}}{W_0}$  - це рівень дифузної енергії:

$$L_{\text{д}} = 10 \lg \frac{W_{\text{д}}}{W_0} \quad (1.16)$$

За умови, коли загальний рівень енергії в приміщенні становить 60 дБ, рівень дифузної енергії можна визначити за формулою:

$$L_{\text{д}} = 60 - 10 \lg \frac{N+1}{N} \quad (1.17)$$

Після зупинки джерела звуку відбувається раптове зменшення енергії звуку на величину, яка обчислюється за формулою:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{N+1}{N} \quad (1.18)$$

Потім зменшення енергії звуку продовжується згідно з лінійним законом:

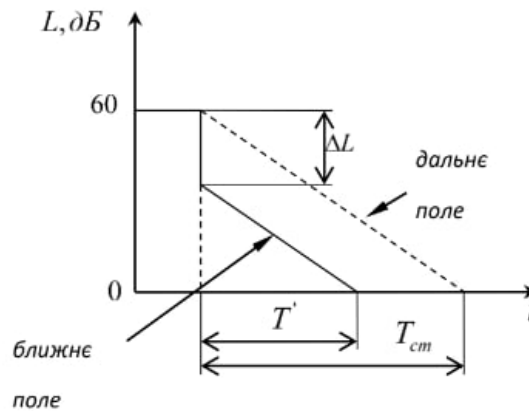


Рисунок 1.4 – Ілюстрація часу реверберації в ближньому і дальньому полі

Різкий спад звуку, який відбувається в ближньому полі, спричинений зникненням прямого звуку. Величина, яка визначає цей «стрибок» енергії  $\Delta L$ , збільшується зі зменшенням відстані до джерела звуку. Пунктирною лінією зображена пряма, яка відповідає зменшенню звуку в дальньому полі з плином часу, який є стандартним часом реверберації. В реальності, відчутний час реверберації є ще меншим.

З огляду на психологічні особливості слухового сприйняття можна стверджувати, що суб'єктивна оцінка тривалості реверберації може бути визначена за допомогою інтегрального закону, відомим як закон Ліфшиця. Цей закон встановлює залежність між інтегральним рівнем звуку та сприйняттям тривалості реверберації:

$$\tau = \int_0^{T'} L(t) dt \quad (1.19)$$

Отже, визначити ефективний час реверберації можна шляхом обчислення площі трикутників, що відповідають різним часам реверберації.

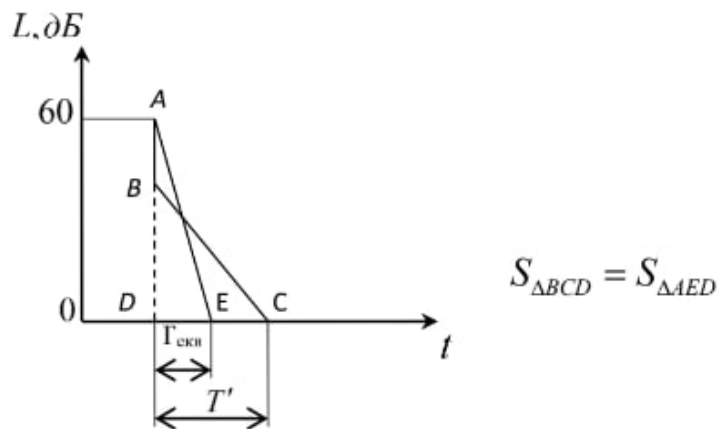


Рисунок 1.5 – Графічне знаходження еквівалентного часу реверберації

Слухач не може відчутти раптового зміщення рівня звуку, але сприймає середнє значення еквівалентного часу реверберації  $T_{\text{екв}}$ . Це значення є меншим, ніж час  $T'$ , який відповідає певному приміщенню при спаді звуку від рівня  $(60 - \Delta L)$ дБ.

Звукорежисер може легко і ефективно змінювати відчуття часу реверберації, використовуючи простий метод. Шляхом наближення мікрофону до виконавця або його віддалення можна варіювати еквівалентний час реверберації в значному діапазоні.

В довідниках наводяться наближені формули для розрахунку еквівалентного часу реверберації [7]:

$$\frac{1}{T_{\text{екв}}} = \frac{1}{T} + 1.2 \lg \frac{N+1}{N} \quad (1.20)$$

При великих  $N$ : ( $N > 3$ ), час еквівалентної реверберації буде дорівнювати часу стандартної реверберації [7]. При малих акустичних відношеннях, тобто ближче до джерела, еквівалентний час реверберації буде меншим за стандартний, що добре фіксується слуховими відчуттями.

Зв'язок між  $T_{\text{екв}}$  і  $T$  при різних значеннях акустичного відношення показана на рис.1.6.

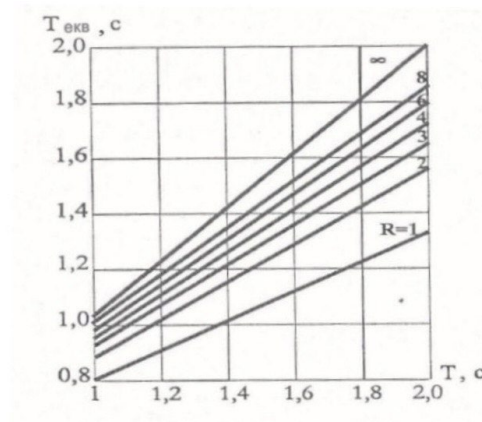


Рисунок 1.6 – Зміна часу реверберації в залежності від акустичного відношення

Ключем до оптимізації реверберації є розуміння сенсу часу реверберації [4, 9]. Час реверберації — це час в секундах, за який рівень ревербераційної звукової енергії зменшується на певну кількість децибел (60 дБ), або ж — необхідний час, через який ми перестаємо чути відлуння.

Тривалість і рівні відбитих сигналів, а також процес реверберації в приміщенні залежать від властивостей звукопоглинання та матеріалів усіх поверхонь в приміщенні, кількості людей та меблів у ньому. Оптимальним часом реверберації називається час, при якому звучання музики в заданому приміщенні буде найкращим, а звучання мови буде найбільш розбірливим. Він залежить від жанру програми, частоти та об'єму приміщення.

На рис.1.7 наведено експериментально встановлені значення оптимального часу реверберації для частот 500-1000 Гц, в залежності від призначення та об'єму залів.

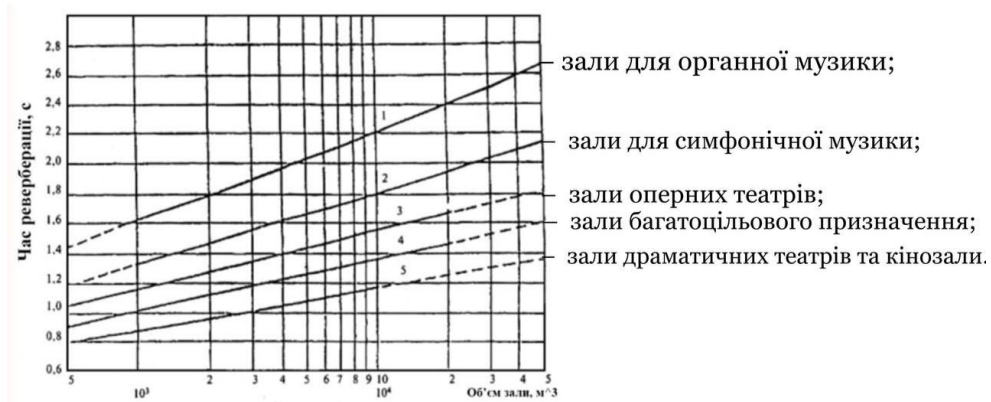


Рисунок 1.7 – Значення часу реверберації при частоті 500-1000 Гц для різних залів за призначенням і місткістю

Важливо, щоб час реверберації відповідав типу приміщення, оскільки передбачається, що несприятливі умови реверберації погіршують розуміння

мови. Якщо час реверберації є занадто великим, то від цього підвищується загальний рівень шуму та знижується розбірливість мови. Паузи між словами також стають менш виразними через відбитий звук. Слід зазначити, що і малий час реверберації є несприятливим, оскільки тоді відбувається приглушення мови разом із фоновим шумом, звучання стає більш «тонким» і уривчастим [10].

Для того, щоб досягти оптимального значення стандартного часу реверберації було проведено багато експериментальних і теоретичних досліджень видатними вченими, зокрема С.Я. Лівшицем. Він запропонував загальну формулу, за допомогою якої можна здійснити розрахунок оптимального часу реверберації:

$$T_{\text{опт}} = 0,41 \lg V, \quad (1.21)$$

де  $V$  – об'єм приміщення.

Дизайнери концертних залів роками враховували час реверберації. Використовуючи формулу часу реверберації, архітектори проектували концертні зали, в яких підвищується час реверберації настільки, щоб підсилити музику на сцені, не спотворюючи якості звуку в залі.

Отже, використовуючи статистичну теорію, ми робимо два допущення, інакше кажучи, приймаємо дві умови.

Перша умова полягає у застосуванні методу енергетичного додавання. Це означає, що у статистичній теорії акустики величина звукової енергії обчислюється як сума середніх значень енергій, що надходять в точку від усіх відбитих хвиль. Виходить, що інтерференційна картина ігнорується, оскільки до

уваги не береться фаза доданків і амплітуда. Ця методологія не підходить для тональних сигналів, однак для музики та мови є справедливою.

Друга умова полягає в дифузності поля, що означає, що в будь-яку точку поля одночасно приходять достатньо велика кількість відбиттів з рівномірно розподілених напрямів, забезпечуючи однакову густину звукової енергії в усіх точках поля.

Для цього в приміщенні повинні бути добре відбиваючі поверхні різних форм і розмірів. Прикладом є ревербераційна камера – приміщення з жорсткими непаралельними відбивальними стінами різних форм і розмірів, яке використовується для проведення вимірів.

Кількісною мірою оцінки дифузності звукового поля є індекс дифузності, максимальне значення якого дорівнює 1.

Для більшості залів середнє значення індексу дифузності складає 0,65 - 0,75. Зі збільшенням об'єму приміщення індекс дифузності зменшується. Збільшити його можна застосуванням різних за формою об'ємних звукопоглинаючих конструкцій.

### **1.3 Геометрична теорія поширення звукових хвиль**

Геометрична теорія – найдавніша теорія архітектурної акустики. Ще в Стародавній Греції було здійснено перші спроби пов'язати фізичний аналіз розповсюдження звуку з архітектурою. Прикладом тому є всесвітньовідомі театральні амфітеатри, які було створено для того, щоб посилити гучність мовлення акторів при виступі на сцені. Ще в 1 ст. до н.е. римський архітектор Вітрувій приділяв увагу питанням покращення чутності на театральних площадках.

До початку 21 століття велика увага була приділена проблемам форми і розміру приміщень. Основою аналізу стала побудова променевої картини в приміщенні і знаходження площадок переважного відбиття звуку на огорожувальних поверхнях.

Для того, щоб наочно побачити рівномірність розподілу звукової енергії в приміщенні, можна використовувати променевий ескіз. Цей метод полягає в нанесенні на план приміщення траєкторії падіння звукових променів, які відображають шляхи звуку, що багаторазово відбивається від граней паралелепіпеда. За допомогою розгорнутих зображень можна визначити різницю в часі приходу звукових променів від різних джерел звуку, що дає змогу визначити запізнення звукових променів відносно одне одного. Фронт і звукові промені використовуються в геометричній акустиці для визначення напрямку поширення звукової хвилі.

Геометричний метод дозволяє проаналізувати вплив форми приміщення на звукове поле та виявити недоліки, пов'язані з невдалим дизайном приміщення.

Будова променевої картини дає змогу виявити багато недоліків, що пов'язані з невдалою формою приміщення.

В основу геометричної (променевої) теорії акустичних процесів закладено аналогію з законами геометричної оптики [11]. У відповідності до цих законів, для дзеркальних поверхонь падаючий та відбитий промені знаходяться в одній і тій самій площині, а кут падіння рівний куту відбиття. Ці твердження є справедливими при умові, що розміри відбиваючих поверхонь набагато більші, а розміри нерівностей поверхонь набагато менші за довжини хвиль.

Те, як саме від поверхні відбувається відбиття звуку залежить від форми відбиваючих поверхонь. Розглянемо три випадки відбиття: від плоскої (рис.1.8, а), від увігнутої (рис.1.8, б) та від опуклої (рис.1.8, в) поверхонь.

У випадку відбиття від плоскої поверхні, відбиття розглядаються так, наче вони виходять з уявного джерела (т.Д'), яке є відображенням дійсного джерела. При відбитті від увігнутої поверхні відбувається фокусування звуку в точці (т.Д').

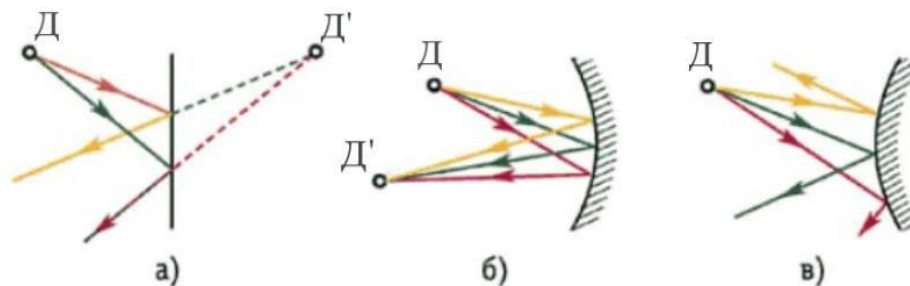


Рисунок 1.8 – Відбиття звукових променів від плоскої і криволінійних поверхонь

Звук, який випромінюється джерелом, доходячи до перешкоди, віддзеркалюється від неї і повертається до того місця, де виник. Даний процес повторюється багато разів, при цьому деяка частина енергії при кожному відбитті витрачається.

Відбиття від опуклих поверхонь призводить до розсіювання звуку [12]. Отже, прямий та відбитий звук досягають слухачів або точки розташування мікрофона з різними затримками.

Людина здатна інтегрувати слухові відчуття та об'єднувати їх у загальне враження завдяки інерційності свого слуху. Це стає можливим за умови, коли

звуки тривають не довше 48 мс. Це означає, що всі хвилі, які надходять до вуха протягом 48 мс після початкового звуку, вважаються корисним звуком, який посилює прямий сигнал. Затримка в 48 мс еквівалентна різниці часу, який потрібен звуку, щоб подолати відстань у 17 метрів. Згідно з експертними оцінками, звуки, що віддзеркалюються від перешкод протягом цього проміжку часу, необхідні та корисні для підвищення якості звучання. Вони не тільки підвищують сприйняття гучності на рівні 5-6 дБ, але й додають «жвавості», «пластичності» та «об'ємності» звуковому сигналу

Напрямок приходу початкових відбиттів має вирішальне значення для якості звучання. Коли всі ранні відбиття надходять з того ж напрямку, що і прямий сигнал, слухач практично не відчуває різниці в звучанні. Як результат, він отримує "плоский" звук, який не має просторової об'ємності. Це свідчить про низьку унікальність звучання, яку можна покращити за допомогою зміни напрямку початкових відбиттів. Що стосується напрямку, з якого надходять початкові відбиття, то він грає ключову роль у формуванні якості звучання. Якщо всі ранні відбиття, тобто сигнали, що запізнюються, будуть надходити до слухачів з одного напрямку, що й прямий звук, то майже не відчуватиметься різниця звучання в порівнянні з простим прямим звуком. Як наслідок, звук стає «плоским» та втрачає об'ємність. Навіть при отриманні всього лише трьох запізнених сигналів з різних напрямків, без наявності реверберації, можна досягти ефекту просторовості звуку. Воно може бути кращим або гіршим в залежності від порядку та напрямків запізнених звуків. Час затримки початкових відбиттів відносно прямого звуку та один одного є дуже важливим. Для досягнення найкращого звучання музики та мови, важливо забезпечити належне розташування запізнених сигналів. Зокрема, перше запізнення мовного сигналу має надходити до слухачів не пізніше, ніж через 10-15 мс після прямого звуку, а всі три мовні відбиття мають бути в інтервалі між 25-35 мс. Щодо музики, перше запізнення має надходити до слухача в інтервалі між 20-30 мс

після прямого сигналу, а всі три запізнені сигнали мають розташовуватися в інтервалі між 45-70 мс, щоб досягти кращої просторовості та прозорості звуку [12].

Щоб отримати якісний звук, важливо, щоб рівні початкових відбиттів були близькими один до одного та до рівня прямого сигналу. Додавання перших відбиттів до структури відлуння може покращити звучання, але важливо, щоб друга частина даного процесу починалася після всіх дискретних відбиттів. З іншого боку, якість звучання може бути погіршена, якщо процес реверберації буде доданий безпосередньо після прямого сигналу. Це може бути пов'язано з тим, що реверберація додає до звуку ефект віддаленості і ширшого звукового поля, а це може змінити баланс між прямим сигналом і відзвуком.

Якщо забезпечена оптимальна структура початкових відбиттів, то якість звуку буде задовільною, навіть якщо час реверберації відрізняється від прийнятого на 10-15%. Однак, щоб досягнути оптимального запізнення відбиттів відносно прямого звуку, необхідно дотримуватися мінімального об'єму приміщення, оскільки порушення цього правила може негативно вплинути на якість звучання. Під час планування приміщень недостатньо обирати розмір, враховуючи лише необхідну місткість, оскільки так завдання буде розглянуто лише з економічної точки зору. Оптимальна структура ранніх відбиттів малого концертного залу може бути досягнута лише за умови дотримання заданих значень висоти і ширини простору перед сценою. Відомо, що низька стеля може негативно вплинути на звучання симфонічного оркестру, в той час, як вища може його покращити. Для досягнення чіткості мовлення, затримки мають бути мінімальними. При відтворенні музичних творів необхідно акцентувати мелодійний вступ, а для забезпечення злитості звуків потрібно виділити додатковий час для затримки початкового відлуння.

### 1.4 Межі застосування теорій.

В даний час у практиці проектування приміщень використовуються всі три теорії: хвильова, статистична та геометрична. Межі їх застосовності наближені і залежить від обсягу приміщення та часу реверберації в ньому.

Умовно весь чутний частотний діапазон можна розділити наступним чином: починаючи з частоти  $f_1 = 170/L$  можна використовувати хвильову теорію; з частоти  $f_2 = 2000(T/V)^{1/2}$  – статистичну; і з частоти  $f_3 = 4f_2$  – геометричну ( $L$  – довжина приміщення,  $V$  – об’єм,  $T$  – час реверберації) [13].

Наприклад, для приміщення, довжина якого складає 14,9 м, час реверберації 1,5 с, ці границі складають:

$$f_1 = \frac{170}{L} = \frac{170}{14,9} = 11,409 \text{ Гц}$$

$$f_2 = 2000 \left( \frac{T}{V} \right)^{\frac{1}{2}} = 2000 \left( \frac{1,5}{4533} \right)^{\frac{1}{2}} = 36,387 \text{ Гц}$$

$$f_3 = 4f_2 = 4 \cdot 36,387 = 145,5267 \text{ Гц}$$

Таким чином, отримуємо, що область застосування хвильової теорії починається з частоти 11,409 Гц, статистичної – 36,387 Гц, а геометричної – 145,5267 Гц. Межі застосування цих теорій зображені на рис.1.9.

Залежність ширини цих областей від розмірів приміщення показана на рис. 1.10 [13].

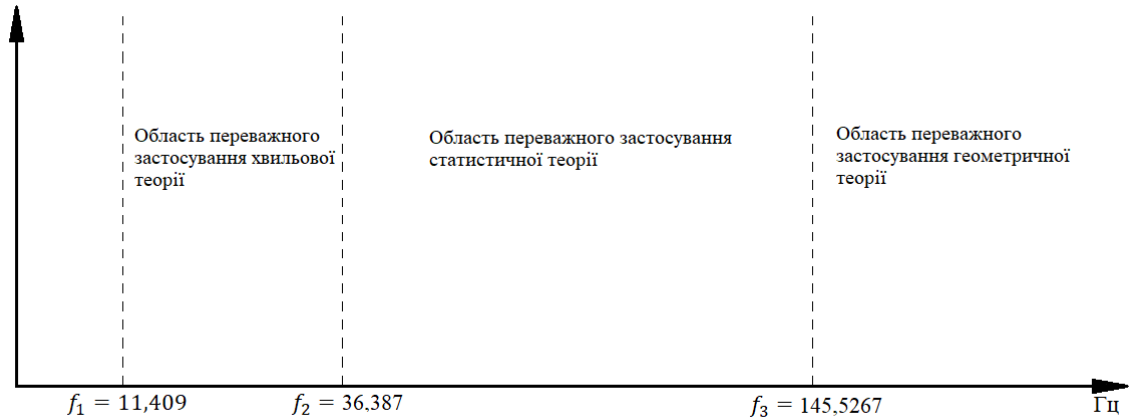


Рисунок 1.9 – Частотні границі застосування трьох теорій

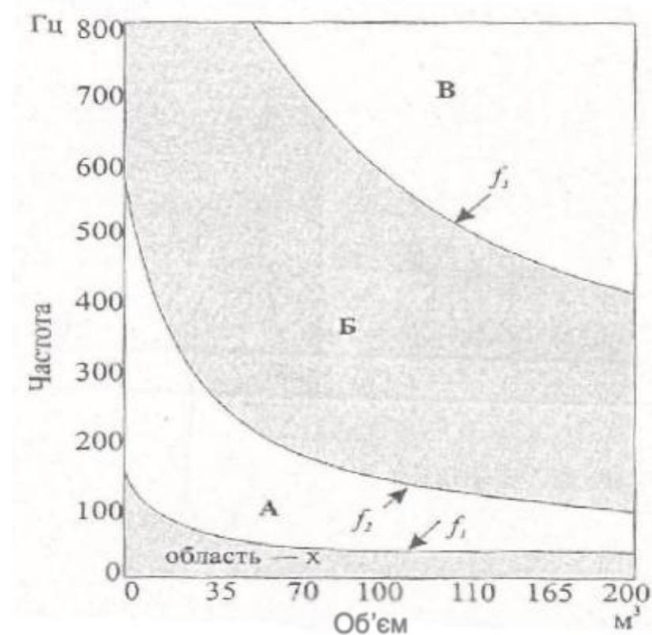


Рисунок 1.10 – Межі застосування теорій при зміні об'єму приміщення:  
 А – хвильова теорія; Б – статистична теорія; В – променева теорія

З цих даних видно, що зі збільшенням розмірів приміщення збільшується область застосування статистичної і геометричної теорії, і навпаки, для малих приміщень їх області застосування дуже обмежені і там в основному можливо використовувати хвильову теорію.

## Висновки до розділу

Було розглянуто три теорії, які з різних сторін пояснюють акустичні процеси, що існують у приміщеннях.

Хвильова теорія застосовується у випадках, коли мова йде про невеликі за розмірами приміщення, такі як студії звукозапису та аудиторії різного призначення. Статистична до приміщень правильних геометричних форм. В результаті, ці теорії взаємодоповнюють одна одну. Статистична дає можливість оцінити час реверберації, хвильова - розрахувати спектр власних (резонансних) частот, скоригувати розміри приміщення так, щоб спектр власних частот в області нижніх частот був рівномірним. Хвильова теорія являється найбільш точною, але і найбільш складною для розрахунку структури звукових полів в приміщенні.

Геометрична теорія більш застосована для аналізу акустичних процесів у приміщеннях великих розмірів, таких як концертні та театральні зали, а також великі студії. Оптимальні розміри приміщення визначають з урахуванням аналізу початкових відбиттів. Розрахунок часу реверберації, при проєктуванні великих залів, може бути неточним і відрізнятися від реального. Він також не відображатиме реальну акустичну якість приміщення. У такій оцінці ключову роль відіграють початкові відбиття, які мають велике значення. Можливо забезпечити чистоту звучання, навіть якщо значення часу реверберації суттєво відрізняється від оптимального, за умови забезпечення правильного тимчасового співвідношення початкових відбиттів.

Для проєктування приміщень сьогодні використовуються три теорії: хвильова, статистична та геометрична. Межі їх застосовності залежать від обсягу приміщення та часу реверберації в ньому. Виходячи з цього, хвильова теорія застосовується при низьких частотах, статистична - при середніх, а геометрична - при високих. Також слід зазначити, що зі збільшенням розмірів

приміщення збільшується область застосування статистичної та геометричної теорії, і навпаки - для малих приміщень їх області застосовуваності дуже обмежені і там в основному можливо використовувати хвильову теорію.

Отже, висновок полягає в тому, що в залежності від розмірів приміщення, частотного діапазону та часу реверберації, необхідно використовувати певну теорію.

## **РОЗДІЛ II.**

### **ЗАСТОСУВАННЯ ХВИЛЬОВОЇ І СТАТИСТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ДЛЯ АКУСТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ ГЛЯДАЦЬКОГО ЗАЛУ ОПЕРНОЇ СТУДІЇ**

#### **2.1 Архітектурно-акустичні характеристики залу**

Об'єктом дослідження є будівля Оперної студії, в якій знаходиться зал, споруджений відповідно до класичної театральної схеми з двома функціональними зонами - сценічною коробкою та глядацькою зоною. Ці зони розділені порталньою стіною зі сценічним прорізом розмірами 10,9 \* 8 метрів.

Розміри прямокутної сцени складають 20,2 на 15 метрів, а висота сценічної коробки становить 21,1 метра. У цьому об'ємі сцени розташовані різноманітні елементи, такі як колосникова система, інженерне обладнання, бокові куліси, передня та задня завіси, а також обладнання для технічного забезпечення вистав. Орган з розмірами 9,5 на 11 метрів і глибиною 2,5 метри розташований на відстані 11,2 метра від рівня сценічного прорізу.

Сцена в описуваному приміщенні має планшет з дерев'яних настилів, що укладений на дерев'яних балках. Вона розташована на висоті 0,9 м над рівнем першого ряду місць партеру.

Ар'єрсцена має складну конфігурацію стелі зі змінюваною висотою, яка змінюється від 8 до 10,3 м і зменшується до 9,5 м. Її бокові частини розширюють її ширину від 10,9 до 12,2 м. На бокових стінах розташовані декоративні решітки завширшки 1,28 м, а також знаходяться ліпні прикраси і заглиблення у вигляді «вікон».

Оркестрова яма в приміщенні має глибину 1,7 м і розміри в плані від 11,6 до 13,7 м по довжині та від 3 до 3,6 м по ширині.

Зал має складну криволінійну форму, що складається з прямокутної ділянки, розташованої поблизу сцени, і частини, що має форму, обмежену

циліндричною поверхнею з радіусом приблизно 11,4 м (з центром в середині 4-ого ряду партеру), яка знаходиться у другій половині залу. Зал має довжину 14,5 м і ширину прямокутної частини партеру 15,2 м. На бокових стінах розташовані ложі бенуар, а на задній частині залу розташований амфітеатр. Ширина прямокутної частини залу з ложами становить 20,4 м. Підлога в залі підіймається на 1,4 м до амфітеатру. Висота залу складає 13,5 м у середній частині і 12,1 м над амфітеатром.

Бельєтаж знаходиться на висоті 2,9 м над амфітеатром, а винос балкону в зал становить 4,4 м. Балкон розташований на висоті 2,4 м над бельєтажем, а його винос в зал становить 4 м. Висота стелі над балконом складає 2,8 м.

В залі встановлено 709 крісел, з яких 324 знаходяться в партері, 60 – у ложах та амфітеатрі, 168 - в бельєтажі, а на балконі - 161. Місця в партері розташовані паралельно до сценічного прорізу, тоді як на амфітеатрі, бельєтажі та балконі вони розташовані вздовж циліндричного кола. Крісла виготовлені з м'якої тканини, що забезпечує комфортність для глядачів під час тривалого перебування на виставі. Кожне крісло має підлокітники.

Інтер'єр залу опери Національної музичної академії України імені П.І. Чайковського відображає класичний стиль і надає особливого шарму та витонченості. Оформлення залу засноване на традиційних архітектурних формах та елементах, таких як декоративні стелі, різні форми карнизів. Передня частина залу прикрашена барельєфами. Стіни зала оздоблені штукатуркою, масивними колонами і пілястрами. Важливими елементами декору залу є також мальовничі розписи, що розташовані на стелях та стінах і виконані в класичному стилі, що додає залу неповторного шарму та краси. Окрім того, в залі присутні величні люстри зі скла та кришталю, які створюють особливу атмосферу під час вистав та концертів.

Основні кольори залу – блакитний та золотистий, які створюють відчуття духовності і підтримує класичний стиль.

Загальний вигляд залу показаний на рис. 2.1.

Креслення приміщення представлені на рис. 2.2-2.5.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд залу Оперної студії

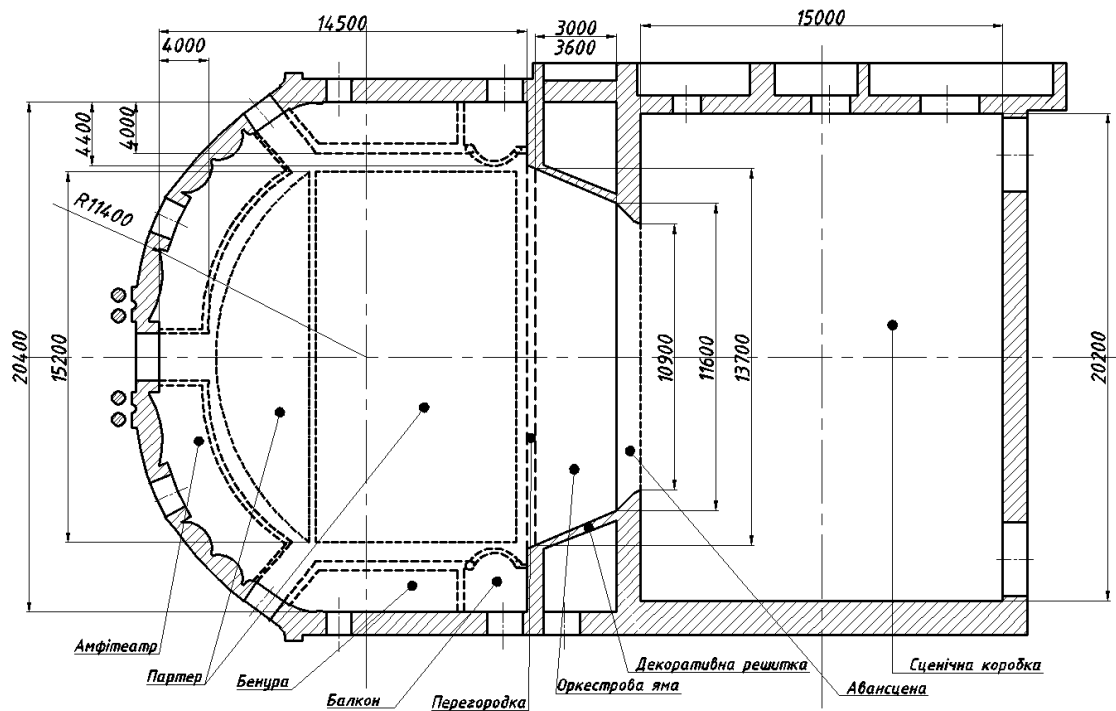


Рисунок 2.2 – Горизонтальний переріз першого поверху приміщення

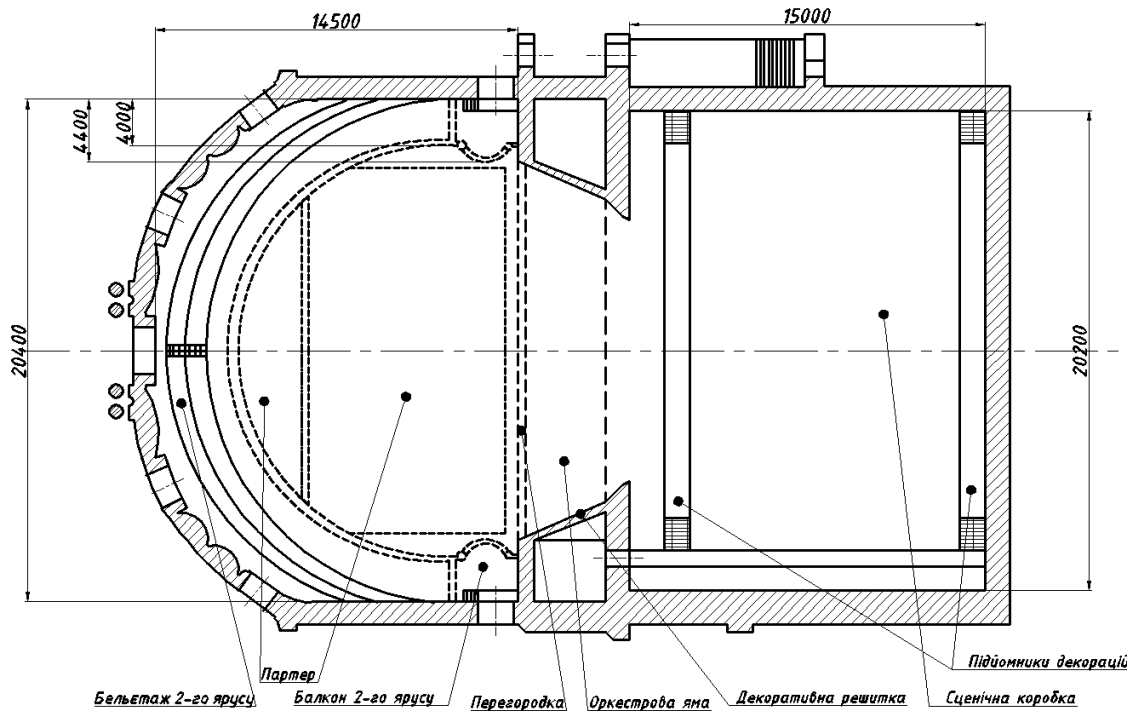


Рисунок 2.3 – Горизонтальний переріз другого поверху приміщення

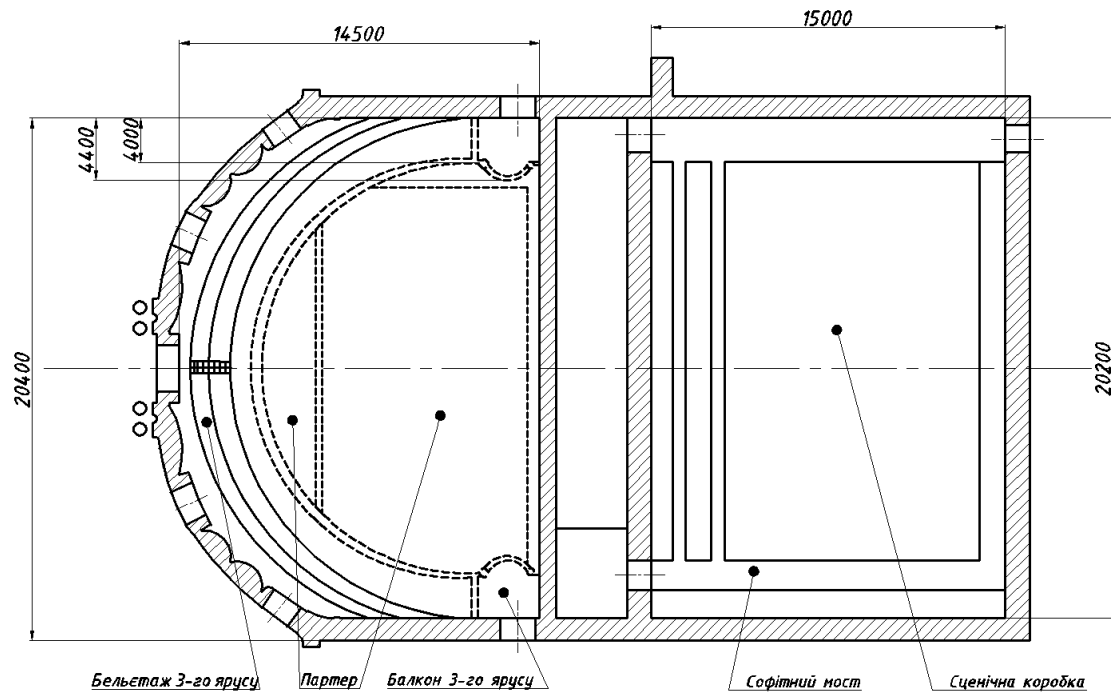


Рисунок 2.4 – Горизонтальний переріз третього поверху приміщення



- загальна площа всіх стін:

$$S_{\text{ст}} = S_{\text{ст.сцен.короб.}} + S_{\text{ст } 5} + S_{\text{ст } 6,7} + S_{\text{ст } 8,9} = 2095,54 \text{ (м}^2\text{)}$$

- стеля:

$$S_{\text{стеля}} = (15 \cdot 20,2) + (7,05 \cdot 20,4) + ((\pi \cdot 11,4^2) : 2) = 650,96 \text{ (м}^2\text{)};$$

- підлога:

$$S_{\text{під}} = (15 \cdot 20,2) + (3,45 \cdot 20,4) + ((\pi \cdot 11,5^2) : 2) = 577,52 \text{ (м}^2\text{)};$$

- оркестрова яма:

$$S_{\text{орк.яма}} = \frac{1}{2}(11,6 + 13,7) \cdot 3 = 37,95 \text{ (м}^2\text{)};$$

- двері:

$$6S_{\text{дв1}} = 1,2 \cdot 2,2 \cdot 6 = 15,84 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$4S_{\text{дв2}} = 1,9 \cdot 1,2 \cdot 4 = 9,12 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$2S_{\text{дв3}} = 1,9 \cdot 1,1 \cdot 2 = 4,18 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$2S_{\text{дв4}} = 2,2 \cdot 1,5 \cdot 2 = 6,6 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$2S_{\text{дв5}} = 1,9 \cdot 1,5 \cdot 2 = 5,7 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$S_{\text{дв6}} = 1 \cdot 2 = 2 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$S_{\text{дв7}} = 2 \cdot 3 = 6 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$S_{\text{дв8}} = 2,5 \cdot 4 = 10 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$S_{\text{дв9}} = 2,5 \cdot 2 = 5 \text{ (м}^2\text{)};$$

- декоративні решітки на першому поверсі:

$$S_{\text{декор.реш.1}} = (2,9 + 1,4) \cdot 1,28 = 5,5 \text{ (м}^2\text{)};$$

- декоративні решітки на другому поверсі:

$$S_{\text{декор.реш.2}} = 4,4 \cdot 1,28 = 5,6 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Таким чином, площа відбиваючих поверхонь приміщення складатиме:

$$\begin{aligned} S_{\text{від. пов.}} &= S_{\text{ст}} + S_{\text{стеля}} + S_{\text{під}} + S_{\text{орк.яма}} = \\ &= 2095,54 + 650,96 + 577,52 + 37,95 \approx 3362 \text{ (м}^2\text{)} \end{aligned}$$

До значення загальної площі відбиваючих поверхонь входять прилеглі до стін площі фундаментів бельєтажів 2 та 3 ярусів, балконів та підлоги під нахилом.

Без урахування цих моментів значення площі відбиваючих поверхонь складатиме:

$$S_{\text{від. пов.}} \approx 3338 \text{ (м}^2\text{)}$$

Загальний об'єм приміщення:

$$V_{\text{прим.}} = [15 \cdot 21 \cdot 20,2] + \left[ 3 \cdot 13,5 \cdot 20,4 - 13,7 \cdot 13,5 \cdot 2 - \frac{3 \cdot 4,8 \cdot 20,4}{2} \right] +$$

$$+[3,45 \cdot 13,5 \cdot 20,4 + \frac{\pi \cdot 11,5^2 \cdot 13,5}{2} - 2 \left( 0,2 \frac{(\pi \cdot 11,5^2)}{2} - 0,2 \frac{(\pi \cdot 7,5^2)}{2} \right)] \approx 11310(\text{м}^3).$$

До значення об'єму приміщення входять об'єми фундаментів бельєтажів та 3 ярусів, балконів та підлоги під нахолом. Без урахування цих моментів значення об'єму глядацького залу складатиме:

$$V_{\text{гляд.залу}} \approx 4533 (\text{м}^3);$$

Розрахуємо значення об'єму приміщення на одного слухача:

$$\frac{V_{\text{гляд.залу}}}{n} = \frac{4533}{709} \approx 6,4 (\text{м}^3),$$

де  $n$  – кількість слухачів згідно умови розрахункової роботи. Це значення знаходиться в межах рекомендованих значень (6 – 8 м<sup>3</sup> на одне місце).

## 2.2 Розрахунок за хвильовою теорією

Усереднені розміри глядацького залу Оперної студії становлять:

- довжина - 14,9 м;
- ширина - 19,7 м;
- висота - 13,5 м.

Звертаючись до формули (1.1), об'якуємо значення власних частот осьових хвиль, попарно прирівнюючи значення  $n, t, q$  до нуля.

$$\omega_n = 2\pi f_n$$

$$f_n = \frac{340}{2} \sqrt{\left(\frac{n}{l}\right)^2 + \left(\frac{0}{b}\right)^2 + \left(\frac{0}{h}\right)^2}$$

$$f_{\text{ос.}n_1} = \frac{340}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{14.9}\right)^2 + \left(\frac{0}{19.7}\right)^2 + \left(\frac{0}{13.5}\right)^2}$$

$$f_{\text{ос.}n_1} \approx 11.4 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{ос.}n_2} = \frac{340}{2} \sqrt{\left(\frac{2}{14.9}\right)^2 + \left(\frac{0}{19.7}\right)^2 + \left(\frac{0}{13.5}\right)^2}$$

$$f_{\text{ос.}n_2} \approx 22.8 \text{ Гц}$$

Аналогічним чином знаходимо значення  $f_{\text{ос.}m_1}$ ,  $f_{\text{ос.}m_2}$  та  $f_{\text{ос.}q_1}$ ,  $f_{\text{ос.}q_2}$

$$f_{\text{ос.}m_1} \approx 8.6 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{ос.}m_2} \approx 17.259 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{ос.}q_1} \approx 12.59 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{ос.}q_2} \approx 25.185 \text{ Гц}$$

Проведемо розрахунки власних частот тангенціальних хвиль, для яких одне з трьох значень  $n$ ,  $m$ ,  $q$  дорівнює нулю.

$$f_{\text{тан.}n_1} = 15.257 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{тан.}m_1} = 16.99 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{тан.}q_1} = 14.305 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{тан.}n_2} = 30.53 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{тан.}m_2} = 33.985 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{тан.}q_2} = 28.61 \text{ Гц}$$

Власні частоти косих хвиль:

$$f_{\text{кос.}1} = \frac{340}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{14.9}\right)^2 + \left(\frac{1}{19.7}\right)^2 + \left(\frac{1}{13.5}\right)^2}$$

$$f_{\text{кос.}1} = 19 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{кос.}2} = 38 \text{ Гц}$$

Зведемо отримані дані в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Власні частоти

Тип хвиль	Осьові хвилі	Тангенціальні хвилі	Косі хвилі
Перші власні частоти, Гц	$f_{\text{ос.}n_1} = 11.4 \text{ Гц}$ $f_{\text{ос.}m_1} \approx 8.6 \text{ Гц}$ $f_{\text{ос.}q_1} \approx 12.59 \text{ Гц}$	$f_{\text{тан.}n_1} = 15.257 \text{ Гц}$ $f_{\text{тан.}m_1} = 16.99 \text{ Гц}$ $f_{\text{тан.}q_1} = 14.305 \text{ Гц}$	$f_{\text{кос.}1} = 19 \text{ Гц}$
Другі власні частоти, Гц	$f_{\text{ос.}n_2} = 22.8 \text{ Гц}$ $f_{\text{ос.}m_2} \approx 17.259 \text{ Гц}$ $f_{\text{ос.}q_2} \approx 25.185 \text{ Гц}$	$f_{\text{тан.}n_2} = 30.53 \text{ Гц}$ $f_{\text{тан.}m_2} = 33.985 \text{ Гц}$ $f_{\text{тан.}q_2} = 28.61 \text{ Гц}$	$f_{\text{кос.}2} = 38 \text{ Гц}$

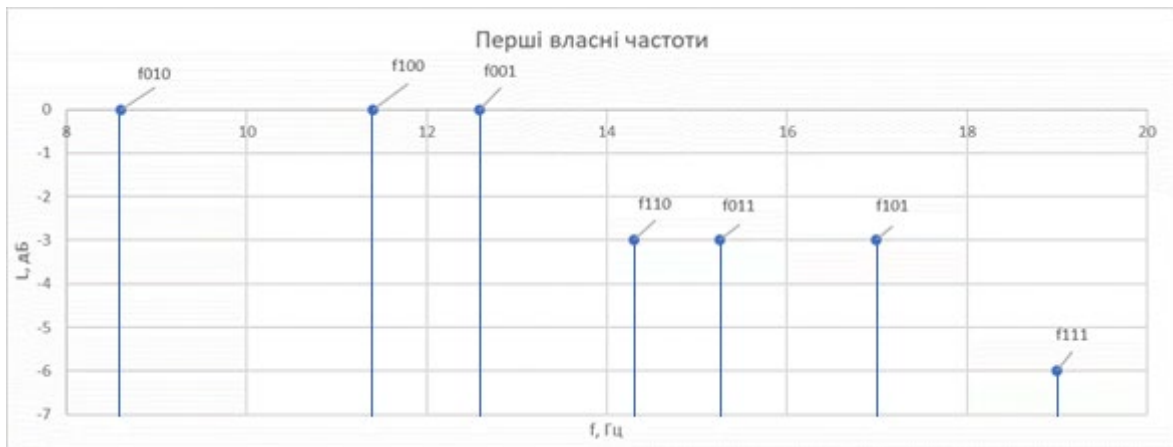


Рис. 2.6 – Перші власні частоти

З отриманих даних можна зробити висновок: завдяки значним розмірам приміщення, перші власні частоти мають величину до 20 Гц, тобто до слухового діапазону, тому вони і не впливають на загальне відчуття звуку.

Наступним кроком визначимо густину спектру, використовуючи формулу (1.2):

$$\Delta N = \left[ (4\pi \cdot 4533) \left( \frac{0.5}{340} \right)^3 + \left( \frac{\pi \cdot 3362}{2} \right) \left( \frac{0.5}{340} \right)^2 + \left( \frac{4(14.9 + 19.7 + 13.5)}{8} \right) \left( \frac{0.5}{340} \right) \right] \frac{1}{0.5} = 0.1$$

Отриманий результат говорить про те, що в середньому в смугу частот шириною 10 Гц потрапляє одна власна частота. Зі збільшенням частоти цей інтервал буде зменшуватися.

## 2.3 Розрахунок за статистичною теорією

### 2.3.1 Стандартний час реверберації

Для обчислення значення оптимального часу реверберації для приміщення оперної студії скористаємося наближеною формулою:

$$T_{\text{опт}} = 0,4 \lg V - 0,15.$$

$$T_{\text{опт}} = 0,4 \lg(4533) - 0,15 \approx 1,3 \text{ (с)}$$

Побудуємо таблицю оптимального часу реверберації для даного приміщення відповідно до отриманого значення часу реверберації.

Форми оптимальних частотних характеристик, рекомендовані Кнудсеном, показані на рис.2.6, де суцільна крива надає оптимальні результати для музики, тоді як пунктирна — для мови. Ці криві побудовані відповідно до вимог, за якими фактичний час післязвучання повинен бути однаковим для всіх компонентів складного звуку [6].

Але проф. Ліфшиц вважав, що слід виходити з вимоги, згідно якій однаковою для всіх частот спектра сигналу має бути швидкість зменшення рівня гучності. Таке уявлення приводить до залежності, показаної на рис.2.7 [14].

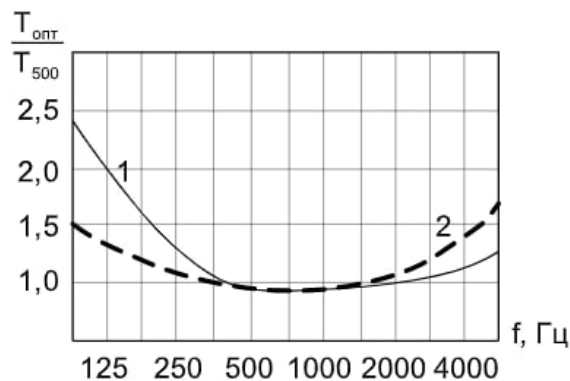
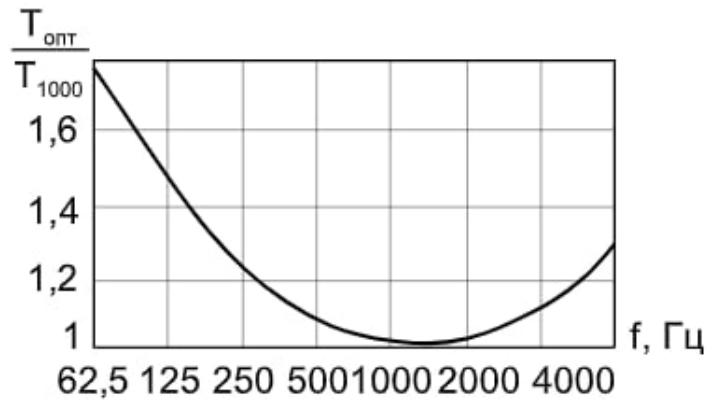


Рисунок 2.6 – Частотна характеристика  $T_{\text{опт}}$  за Кнудсеном:

1 – музика; 2 – мова

Рисунок 2.7 – Частотна характеристика  $T_{\text{опт}}$  за Ліфшицем

Для даного типу приміщень, призначення котрих полягає у проведенні як оперного співу, так і камерної музики, забезпечимо достатньо різний час реверберації на різних частотах: для частот 1000 і 2000 Гц візьмемо такий самий час реверберації, як і на частоті 500 Гц, а на частоті 125 Гц виконаємо збільшення на 20%. Залежність представимо у вигляді табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Оптимальний час реверберації

$f$ , Гц	125	250	500	1000	2000	4000
$T_{\text{опт}}$ , с	1,56	1,43	1,3	1,3	1,3	1,43
$T_{\text{min}} = 0,9 \cdot T_{\text{опт}}$ , с	1,4	1,29	1,17	1,17	1,17	1,29
$T_{\text{max}} = 1,1 \cdot T_{\text{опт}}$ , с	1,72	1,6	1,43	1,43	1,43	1,6

У таблицю 2.3 занесено інформацію стосовно коефіцієнтів звукопоглинання в матеріалах, які використовуються в даному проєкті зі вказаною їх площею та розраховане значення основного фонду поглинання.

Таблиця 2.3 – Основний фонд поглинання

Поверхня – матеріал поглинач	Площа (м <sup>2</sup> ) або кількість осіб	Основний фонд поглинання											
		Частота, Гц											
		125		250		500		1000		2000		4000	
		$\alpha$	$A$	$\alpha$	$A$	$\alpha$	$A$	$\alpha$	$A$	$\alpha$	$A$	$\alpha$	$A$
Підлога на дерев'яних балках	57,8	0,15	8,67	0,11	6,36	0,1	5,78	0,07	4,05	0,06	3,47	0,07	4,05
Штукатурка АЦП	838,61	0,27	226,4	0,31	259,9	0,31	259,9	0,31	259,9	0,33	276,7	0,4	335,4
Стіна поштукатурена і пофарбована олійною фарбою	1415,25	0,01	14,15	0,01	14,15	0,02	28,31	0,02	28,31	0,02	28,31	0,02	28,31
Двері лаковані	15	0,03	0,45	0,02	0,3	0,05	0,75	0,04	0,6	0,04	0,6	0,04	0,6
Скло зеркальне	22,2	0,04	0,78	0,03	0,56	0,02	0,42	0,01	0,27	0,07	1,55	0,04	0,89
Проем сцени	233,8	0,20	46,76	0,30	70,14	0,3	70,14	0,30	70,14	0,3	70,14	0,30	70,14
Оксамит, що стикається зі стінкою 0,65 кг/м <sup>2</sup> на відстані від стіни 10 см у вигляді драпрі 0,35кг/м <sup>2</sup>	37,5	0,06	2,25	0,28	10,5	0,44	16,5	0,5	18,75	0,4	15	0,35	13,13
Слухачі на дерев'яних стільцях 75%	532	0,17	90,44	0,36	191,5	0,47	250	0,52	276,6	0,5	266	0,46	244,7
Килим вовняний звичайного типу	15	0,08	1,2	0,08	1,2	0,2	3	0,26	3,9	0,27	4,05	0,37	5,55

## Продовження таблиці 2.3

Стілець м'який 25%	177	0,05	8,85	0,09	15,93	0,12	21,24	0,13	23	0,15	26,55	0,15	26,55
Загальне поглинання $A_0$		400	570,6	656,1	685,6	692,4	729,4						

Знайдемо  $T$  для кожної частоти за формулою:

$$T = \frac{0,164V}{-S_{\Sigma} \ln \left( 1 - \frac{A_0}{S_{\Sigma}} \right) + 4\mu V},$$

де  $S_{\Sigma}$  – площа відбиваючих поверхонь,  $V$  – об'єм приміщення,  $A_0$  – загальне поглинання,  $\mu$  – коефіцієнт затухання звука в повітрі, і занесено до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Фонд поглинання та час реверберації в приміщенні залу

$f$ , Гц	125	250	500	1000	2000	4000
$T_{розр}$ , с	1,54	1,19	1,02	0,97	0,92	0,8
$T_{min}$ , с	1,4	1,29	1,17	1,17	1,17	1,29
$T_{max}$ , с	1,72	1,6	1,43	1,43	1,43	1,6
$\alpha_{сер}$	0,1198	0,1709	0,1966	0,2054	0,2074	0,2185
$A_{потр}$ , Себ	400	570,6	656,1	685,6	692,4	729,4
$A_{min}$ , Себ	405	434	481	481	450	338
$A_{max}$ , Себ	491	529	579	579	548	436
$\varepsilon$ , %	11,85	16,9	21,72	25,49	29,59	44,2

Виміряні значення часу реверберації партері подані в таблиці 2.5. На рис.2.8 зображено максимальний, мінімальний, розрахований та вимірний час реверберації при заповненні залу глядачами на 75%.

Таблиця 2.5 – Виміряні значення часу реверберації в партері при заповненні залу слухачами

$f$ , Гц	125	250	500	1000	2000	4000
$T_{\text{вимір}}$ , с	1,28	1,19	1,04	1	1	0,85

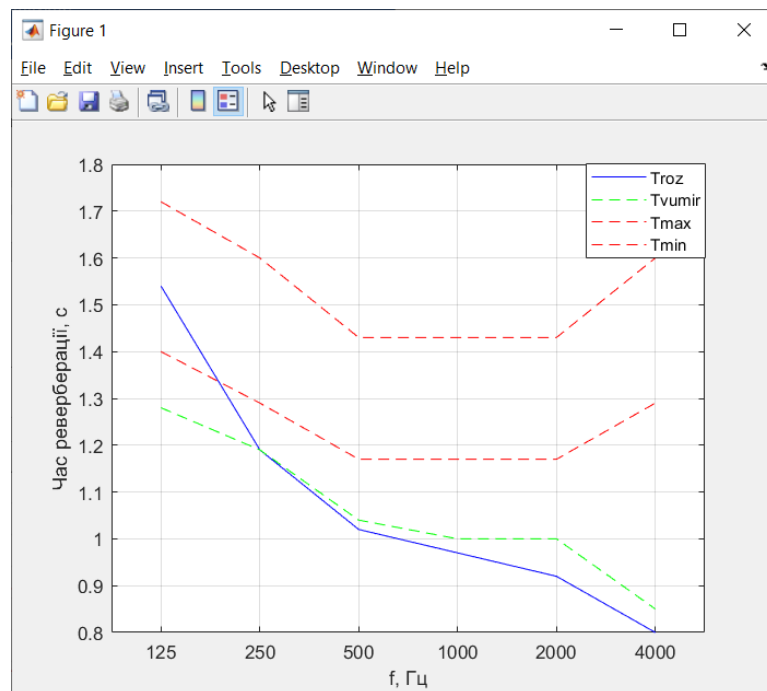


Рисунок 2.8 – Стандартний час реверберації

Проведені розрахунки показали, що оптимальним значенням відповідає тільки розрахований час реверберації в діапазоні частот 125 – 150 Гц, тобто до

малої октави. Поліпшити дану ситуацію можливо шляхом зменшення звукопоглинального фонду в залі. На даний час суттєві звукопоглинальні властивості має великий об'єм повітря в залі, підлога з розміщеними на ній м'якими кріслами і глядачами, відкрита оркестрова яма, а також сценічний проріз (конструкція театрального залу зі сценічним простором). Додатково, значне звукопоглинання створюється килимовими доріжками та шторами, що прикривають вхідні двері до зали.

Оскільки об'єм залу і його конструкцію змінити неможливо, то для зменшення поглинання звуку в залі можна запропонувати:

- зменшити місця в партері на два ряди та замінити крісла на більш жорсткі;
- зняти штори на вхідних дверях;
- під час концертів закривати оркестрову яму дерев'яними щитами;
- зменшити кількість штукатурки на бокових стінах біля сцени;
- прибрати килими.

Виконання вказаних заходів дозволить підвищити час реверберації в залі (табл.2.6, рис.2.9).

Таблиця 2.6 – Розрахований час реверберації в партері при вжитті запропонованих заходів

Частота, Гц	125	250	500	1000	2000	4000
$T_{\text{опт.}}$ , с	1,56	1,43	1,3	1,3	1,3	1,43
$T_{\text{розр.}}$ , с	1,63	1,45	1,24	1,21	1,2	1,19

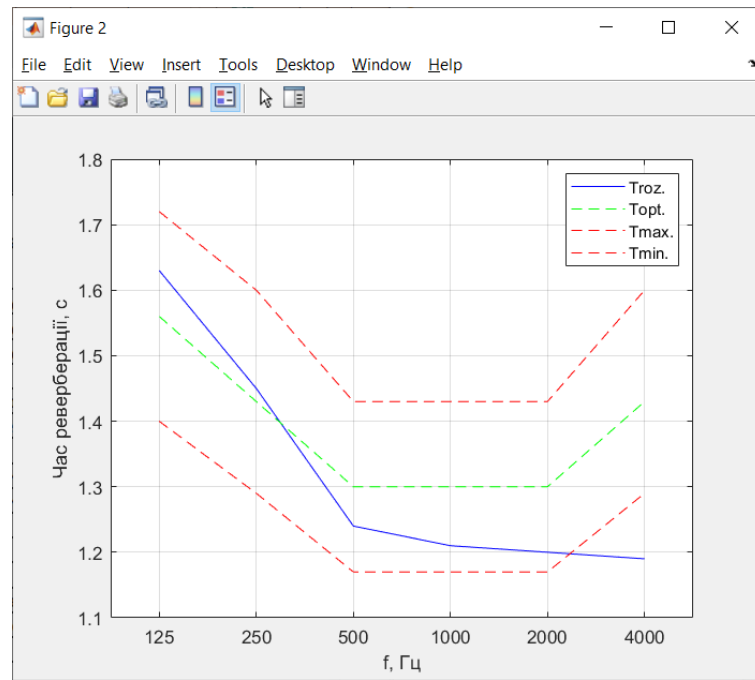


Рисунок 2.9 – Стандартний час реверберації при вжитті запропонованих заходів

З результатів вимірювання часу реверберації визначається критична частота залу  $f_{кр}$ , починаючи з якої спектр власних частот стає практично суцільним.

Згідно з [16]:

$$f_{кр} = 2000 \sqrt{\frac{T_{max}}{V}} = 2000 \sqrt{\frac{1.72}{4533}} = 38.958 \text{ Гц},$$

де  $T_{max}$  – максимальне значення часу реверберації в діапазоні частот що розглядається, с;  $V$  – об'єм зали, м<sup>3</sup>.

Отже, для залу Оперної студії достатня густина спектру власних частот починається, практично, із самих низьких частот ( $f_{кр} \approx 39$  Гц).

### 2.3.2 Акустичне відношення на глядацьких місцях

Використовуючи формулу (1.12) розрахуємо акустичне відношення в певних точках глядацького залу. На планах партеру, бельєтажу та балкону (рисунки 2.10-2.12) показані точки, де проводились вимірювання акустичних параметрів залу. При цьому джерело звукового сигналу (ДЗ) розташовувалось на авансцені.

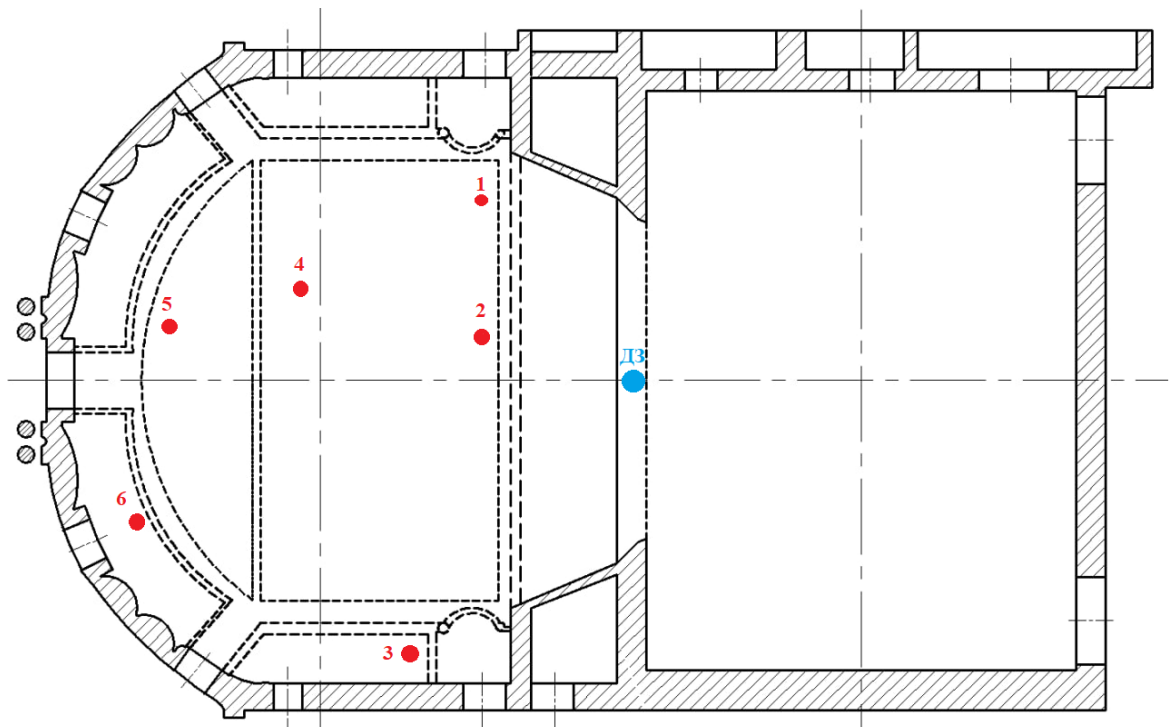


Рисунок 2.10 – Розташування точок вимірювання на плані партеру залу

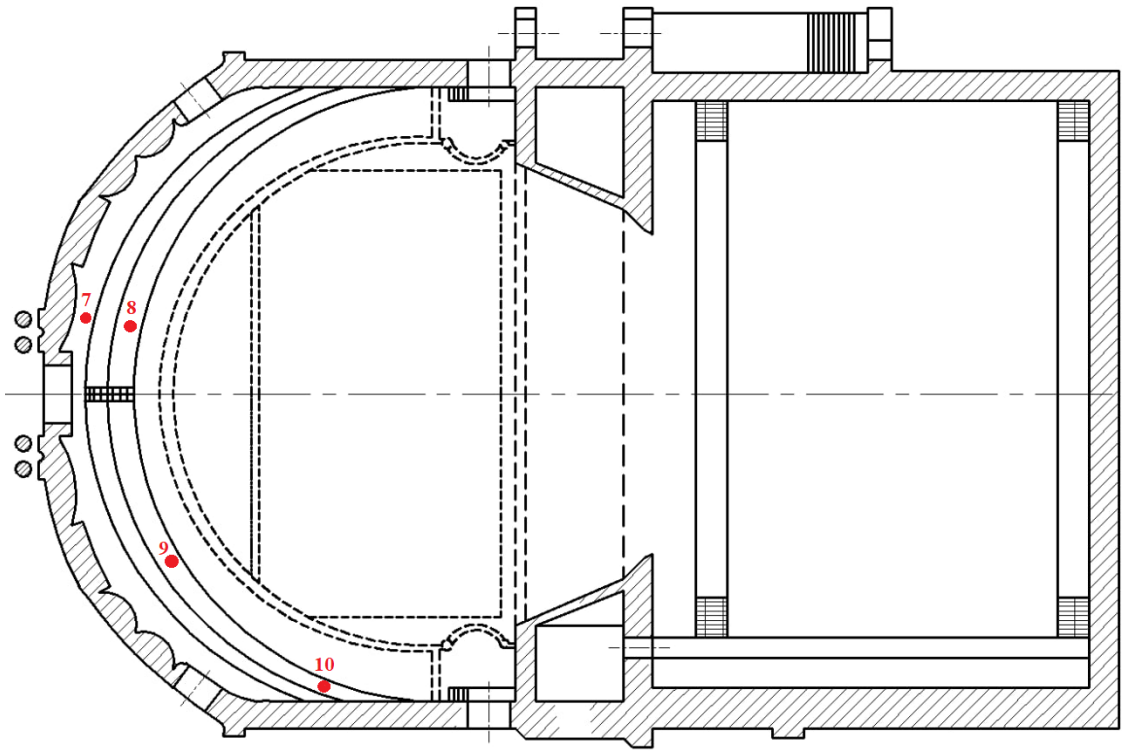


Рисунок 2.11 – Розташування точок вимірювання на плані бельєтажу

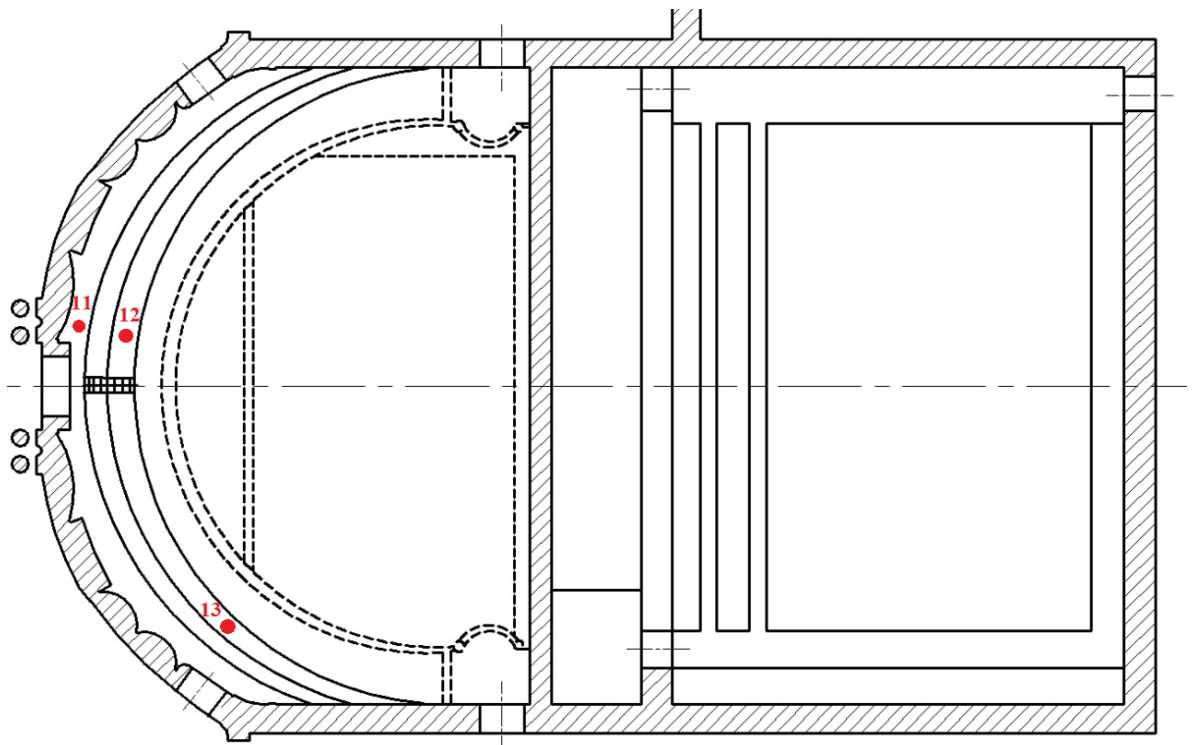


Рисунок 2.12 – Розташування точок вимірювання на плані балкону

Координати у м (X, Y,Z):

ДЗ (15; 10,1; 2,5);

т. 7 (32,45; 11,6; 6,8);

т. 1 (19,95; 15; 1,4);

т. 8 (31,45; 12,6; 6,7);

т. 2 (19,95; 12; 1,4);

т. 9 (31; 5,2; 6,7);

т. 3 (22,58; 1,5; 2,8);

т. 10 (26,2; 1; 6,7);

т. 4 (24,65; 12,6; 2,6);

т. 11 (32,45; 11,6; 11,2);

т. 5 (27,95; 12,3; 2,8);

т. 12 (31,45; 12,6; 11,1);

т. 6 (31,1; 6,2; 2,8);

т. 13 (28,1; 3,5; 11,1).

Таблиця 2.7 – Розраховані значення акустичного відношення

№	ƒ, Гц	125	250	500	1000	2000	4000
	N						
1		4,638	3,38	2,793	2,623	2,487	2,136
2		2,735	1,993	1,647	1,547	1,467	1,259
3		12,267	8,94	7,386	6,936	6,579	5,648
4		9,27	6,756	5,582	5,242	4,972	4,268
5		16,103	11,736	9,696	9,105	8,636	7,414
6		24,397	17,781	14,689	13,795	13,084	11,233
7		30,338	22,11	18,267	17,154	16,27	13,967
8		27,469	20,02	16,539	15,533	14,732	12,648
9		27,764	20,235	16,717	15,699	14,889	12,784
10		21,07	15,357	12,687	11,914	11,3	9,702
11		35,673	25,999	21,479	20,171	19,132	16,426
12		32,723	23,849	19,703	18,503	17,549	15,067

## Продовження таблиці 2.3

13	26,969	19,656	16,239	15,249	14,464	12,418
----	--------	--------	--------	--------	--------	--------

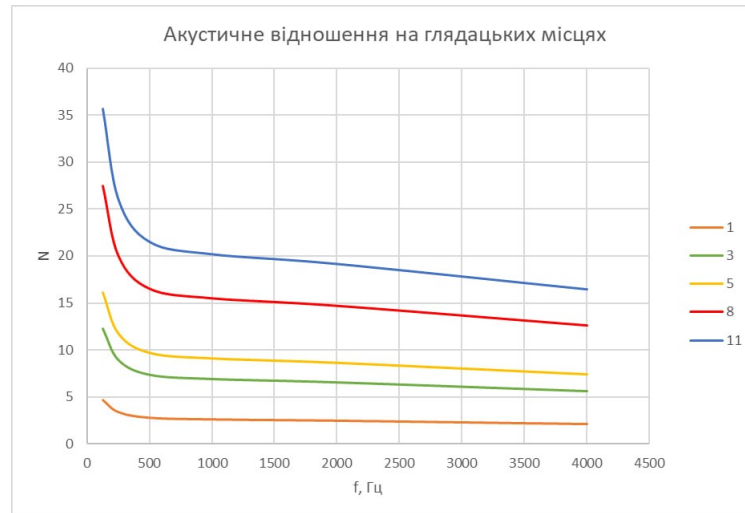


Рисунок 2.13 – Значення акустичного відношення на глядацьких місцях

З отриманих значень можна побачити, що в залі спостерігається велике значення акустичного відношення, це свідчить про те, що рівень звуку, який формується в приміщенні, в основному складається з дифузного, а прямий звук відносно низький. В цілому, отримуємо небажану акустичну ситуацію, що впливає на якість звукової передачі, комунікацію та загальний комфорт у приміщенні.

Виконавши попередні рекомендації, також покращиться і акустичне відношення, що призведе до кращої розбірливості.

### 2.3.3 Еквівалентний час реверберації

Еквівалентний час реверберації є показником, який використовується для вимірювання тривалості розпливання звуку у приміщенні після згасання

джерела звуку. Він виражається в секундах і вказує на час, протягом якого рівень звуку в приміщенні зменшується на 60 децибелів після припинення звукового сигналу.

Його можна розрахувати за допомогою наступної формули:

$$T_{\text{екв.}} = \left[ 1 - \frac{1}{6} \lg \left( 1 + \frac{1}{N} \right) \right]^2 \cdot T_{\text{ст.}}$$

Таблиця 2.8 – Розраховані значення еквівалентного часу реверберації

f, Гц	125	250	500	1000	2000	4000
$T_{\text{ст.}}, \text{с}$	1,54	1,19	1,02	0,97	0,92	0,8
№	$T_{\text{екв.}}, \text{с}$					
1	1,497	1,146	0,975	0,925	0,876	0,756
2	1,471	1,121	0,951	0,901	0,852	0,734
3	1,523	1,172	1,001	0,951	0,901	0,781
4	1,517	1,166	0,996	0,946	0,896	0,776
5	1,527	1,176	1,006	0,955	0,906	0,785
6	1,531	1,181	1,01	0,96	0,91	0,79
7	1,533	1,182	1,012	0,962	0,912	0,792
8	1,532	1,182	1,011	0,961	0,911	0,791
9	1,532	1,182	1,011	0,961	0,911	0,791
10	1,529	1,179	1,009	0,959	0,909	0,789
11	1,534	1,184	1,013	0,963	0,913	0,793
12	1,533	1,183	1,013	0,963	0,913	0,793
13	1,532	1,182	1,011	0,961	0,911	0,791

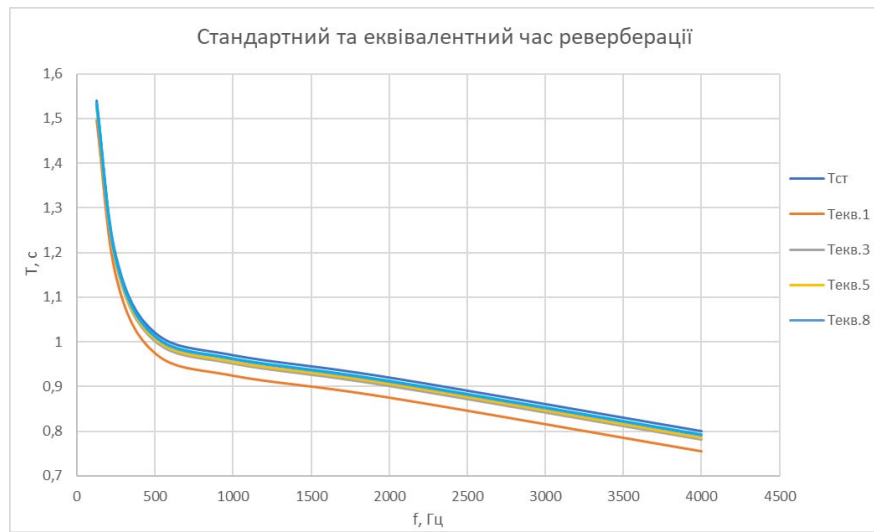


Рисунок 2.14 – Стандартний та еквівалентний час реверберації

З графіка випливає, що еквівалентний час реверберації в точці 8 найбільш наближений до оптимального.

## Висновки до розділу

Варто зазначити, що у випадку оперних вистав першорядним є спів, а не оркестровий супровід. Тому розрахунок залу здійснювався з урахуванням цього факту. В результаті, одна із основних акустичних характеристик – стандартний час реверберації – не відповідає призначенню залу.

Занижений час реверберації в області середніх частот призводить до погіршення чутності звучання, оскільки у великих за об'ємом залах рівень гучності підтримується часом реверберації.

В області високих частот зниження часу реверберації позбавляє звучання яскравості, звук стає тьмяним. Особливо це небезпечно для співочого голосу, у якого наявність співочої форманти в діапазоні 2500-3000 Гц надає голосу властивості «політності», тобто здатності перекривати оркестр. Звучання музичних програм в залах із заниженим часом реверберації видається сухим і безбарвним, зокрема при виконанні симфонічної музики і камерної музики романтичного стилю.

Виконавши запропоновані рекомендації, можна поліпшити дану ситуацію.

**РОЗДІЛ III.**  
**ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТЕОРІЇ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ**  
**ЯКОСТІ ЗВУЧАННЯ В ГЛЯДАЦЬКОМУ ЗАЛІ**

**3.1 Побудова променевої картини в залі**

Структура ранніх звукових відбиттів, що визнається рівнями відбитого звуку і часом запізнення відбиттів по відношенню до прямого звуку, має значний вплив на якість звучання як мовних, так і музичних програм [6]. Ця характеристика є локальною і тісно пов'язана з усіма архітектурними параметрами приміщення, такими як його розміри, форма, обрис і оздоблення внутрішніх поверхонь.

Розподіл звукових відбиттів від огороджувальних поверхонь залу Оперної студії можна побачити на рис.3.1 – 3.6, які відображають горизонтальну (від бокових і задньої стіни) та вертикальну (від стелі) площини.

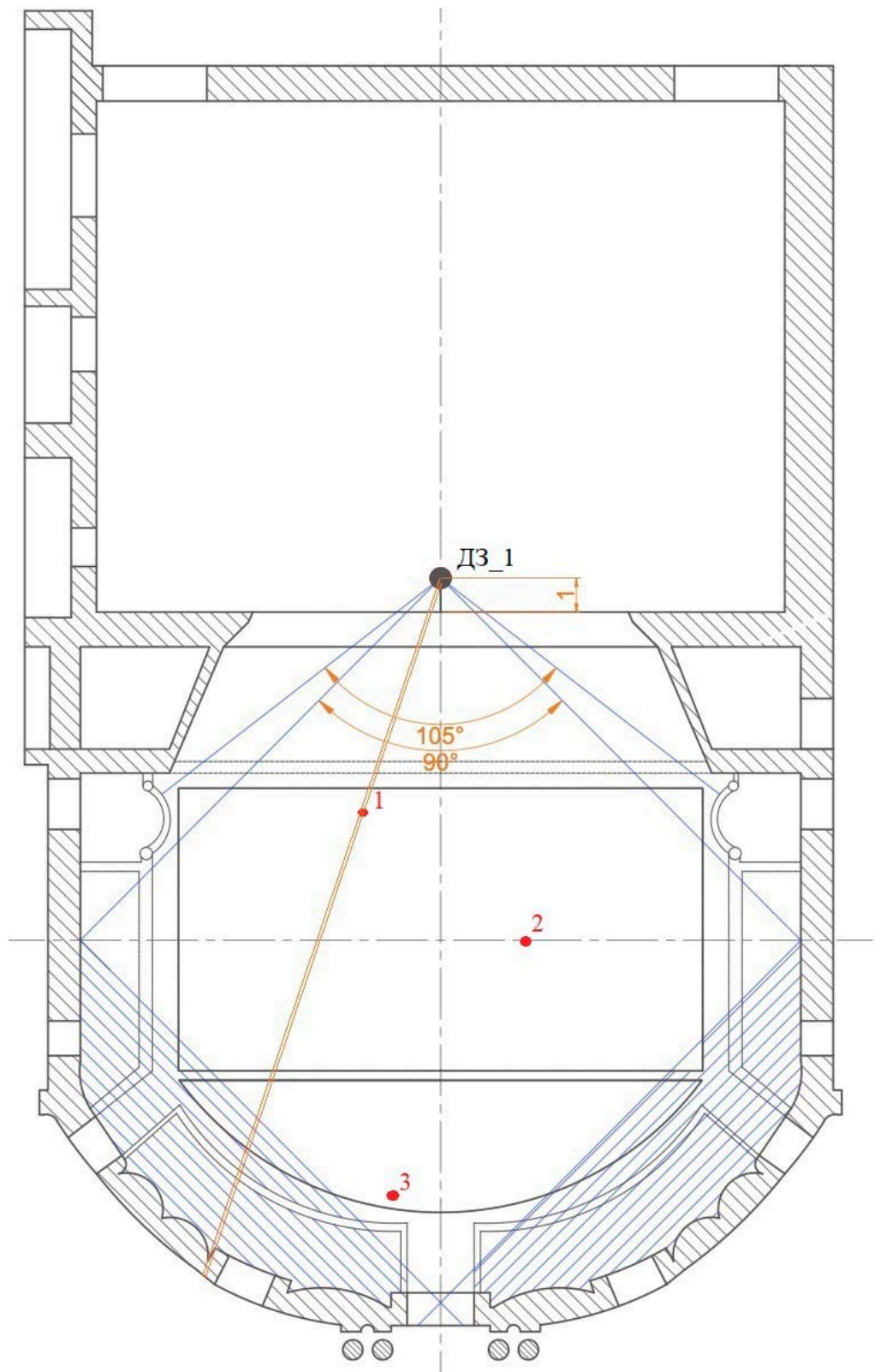


Рисунок 3.1 – Розподілення звукових відбиттів від бокових стін в горизонтальній площині залу (джерело звуку в центрі на авансцені)

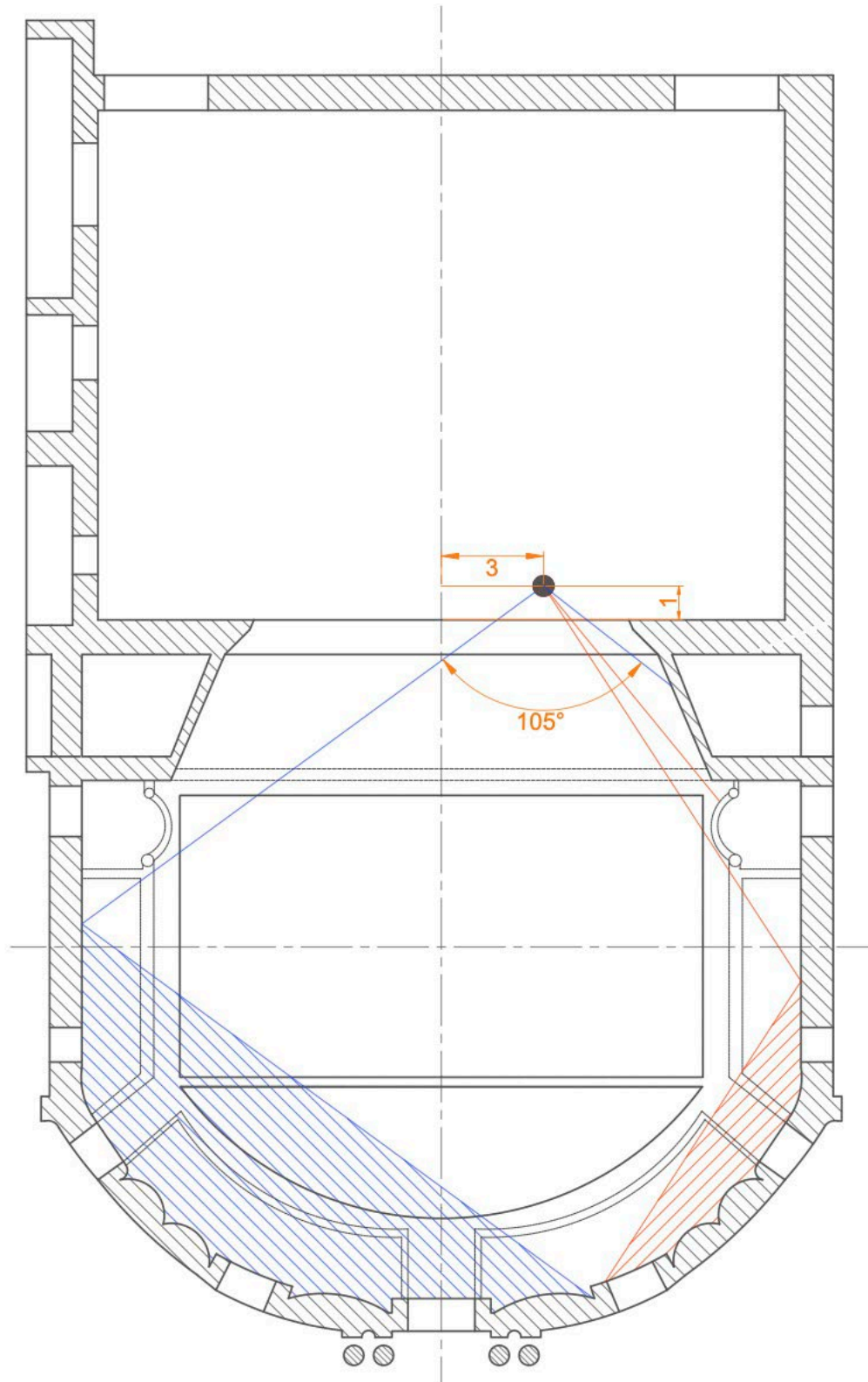


Рисунок 3.2 – Розподілення звукових відбиттів від бокових стін в горизонтальній площині залу (джерело звуку на авансцені на відстані 3 м від центру)

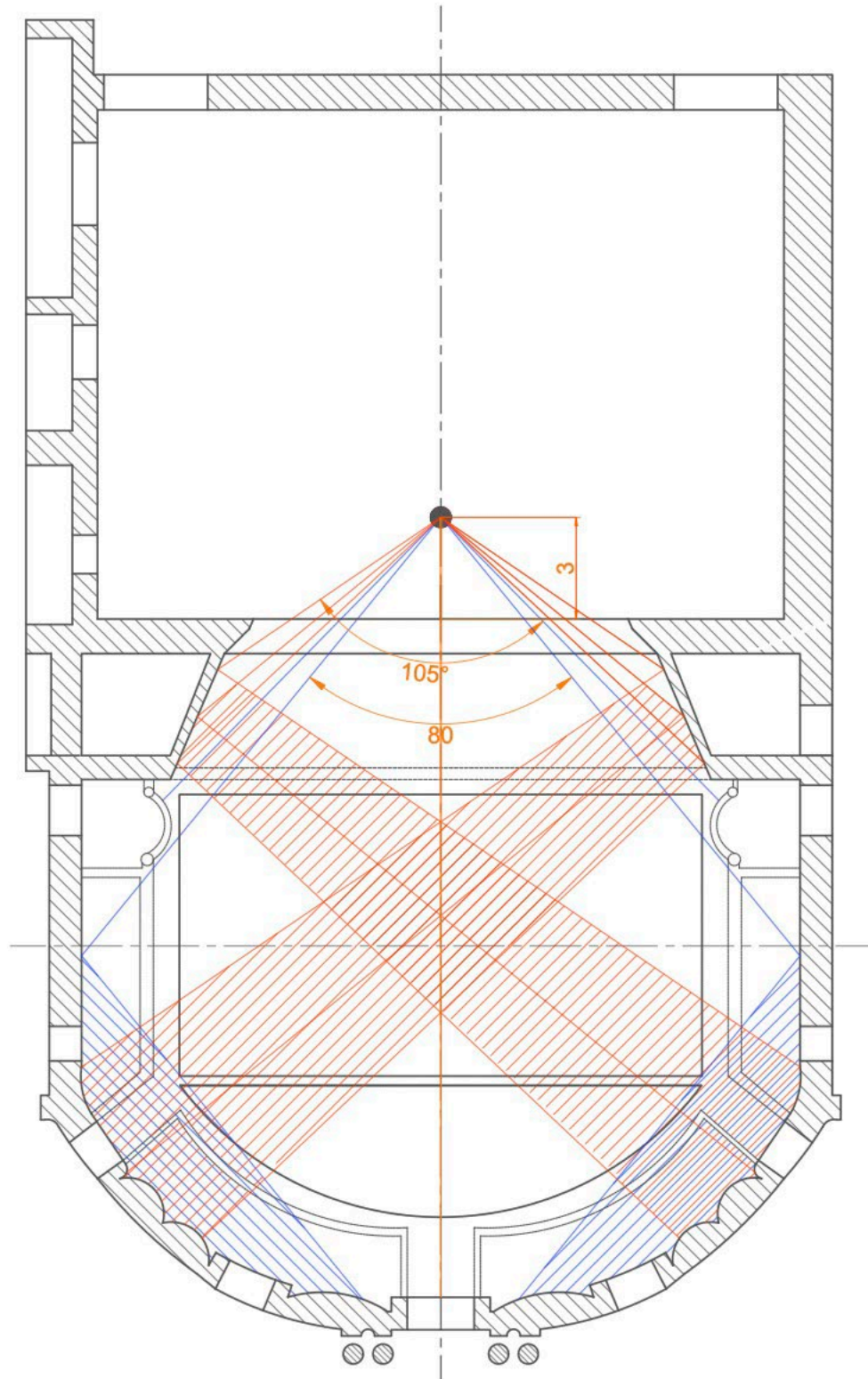


Рисунок 3.3 – Розподілення звукових відбиттів від бокових стін в горизонтальній площині залу (джерело звуку в глибині сцени на відстані 3 м від сценічного прорізу, по центру) і від задньої стіни

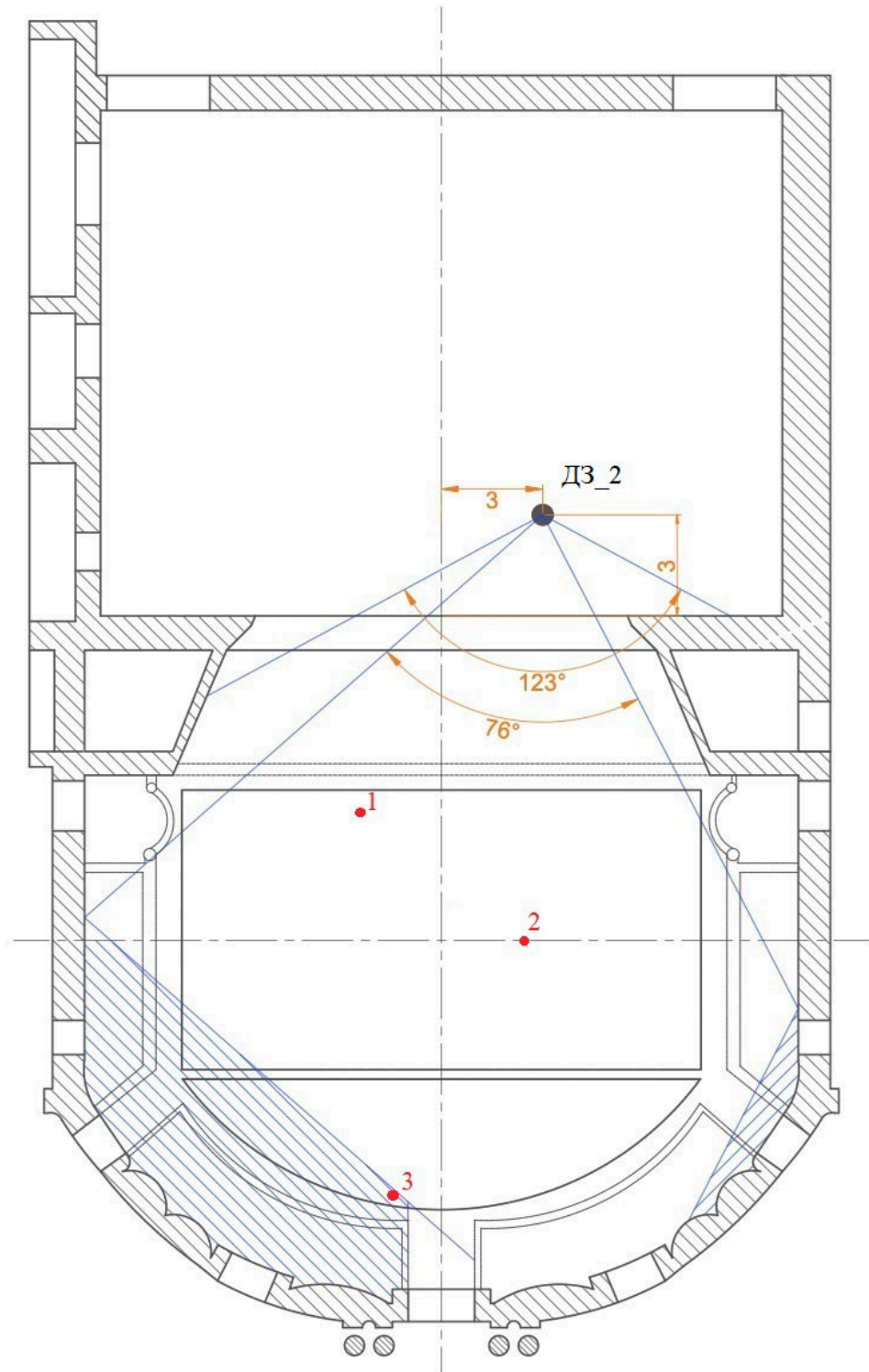


Рисунок 3.4 – Розподілення звукових відбиттів від бокових стін в горизонтальній площині залу (джерело звуку в глибині сцени на відстані 3м від сценічного прорізу і 3м від центру)

На рисунках показаний шлях звукових променів, що відбиваються від бокових стін та досягають огорожувальних поверхонь залу.

З аналізу променевих картин витікає, що в найбільш сприятливих умовах, коли ДЗ знаходиться в центрі авансцени, глядацькі місця в партері позбавлені відбитих звукових променів. Це означає, що озвучення центральних місць партеру відбувається тільки прямим, що позбавляє їх краси звучання, а через пізні відбиття від задньої стіни – і розбірливості звуку. Причиною цього є значна ширина залу, яка є в 1,3 рази більшою за довжину (при рекомендованому зворотному співвідношенні).

Ситуація покращується, коли ДЗ знаходиться в глибині сцени (рис.3.3), оскільки різниця довжини променів відбитого і прямого звуків зменшується.

Також існує ризик негативного впливу через відбиття від протилежної стіни, коли джерело розташоване збоку сцени (рис.3.2). У такому випадку розбірливість мови на глядацьких місцях, які розташовані з того ж боку, що і джерело, значно погіршується.

Ще одна небезпека поганої розбірливості звуку в залі пов'язана з криволінійною формою залу, тобто заокругленням задньої стіни по циліндричній поверхні. Через це прямі звукові промені, відбиваючись від задньої стіни, повертаються назад в напрямку сцени (рис.3.3).

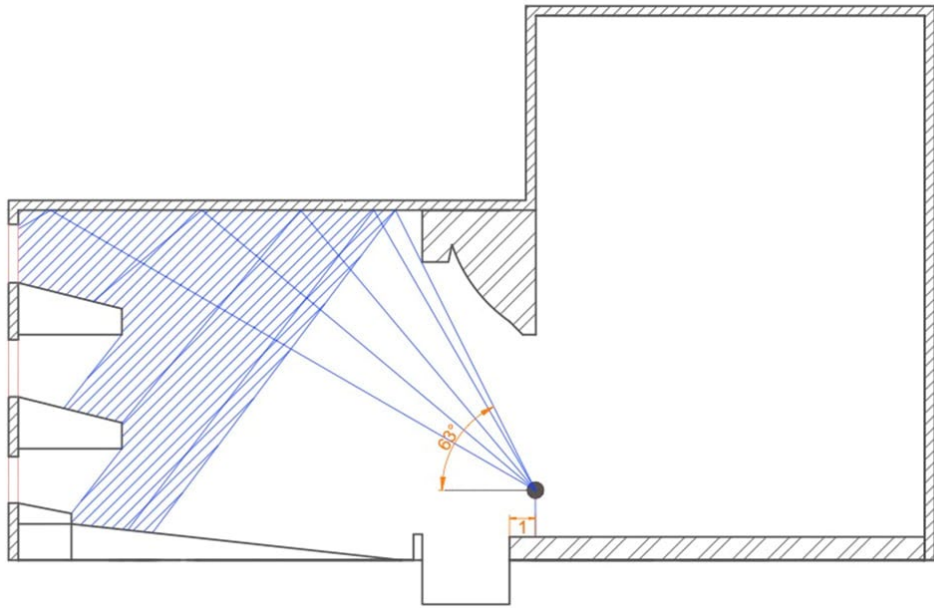


Рисунок 3.5 – Розподілення звукових відбиттів від стелі в вертикальній площині залу (джерело звуку на авансцені)

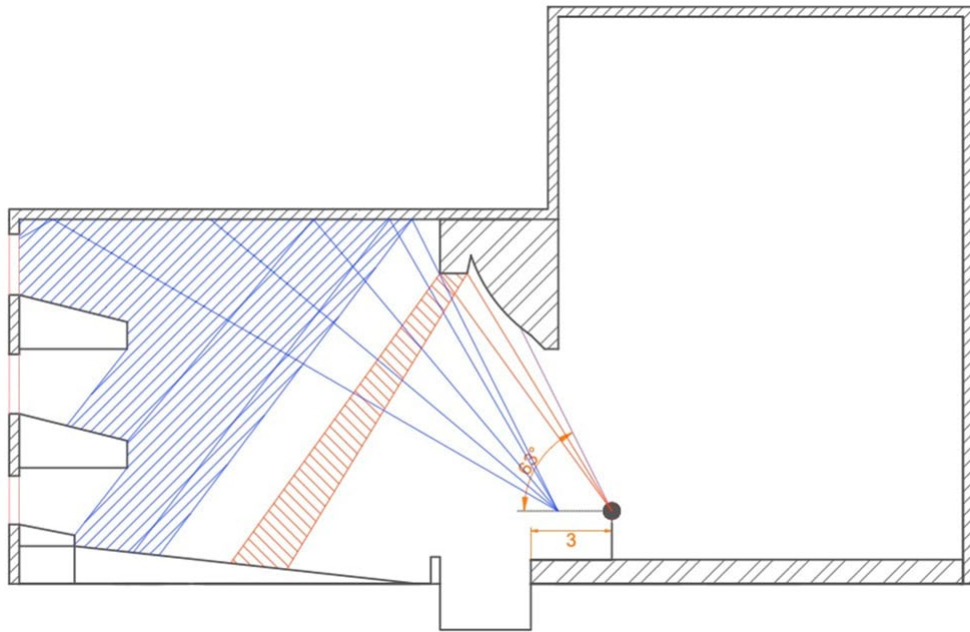


Рисунок 3.6 – Розподілення звукових відбиттів від стелі в вертикальній площині залу (джерело звуку в глибині сцени на відстані 3 м від сценічного прорізу)

Променеві картини відбиття звуку від стелі (рис. 3.5-3.6) показують, що найкраща чутність і розбірливість мови спостерігаються в перших рядах балконів і в другій половині залу. Коли джерело звуку знаходиться на авасцені, відбиття звуку досягають перших рядів партеру, але це можливо лише на високих частотах через обмежений розмір горизонтальної відбиваючої поверхні в вертикальному прорізі сцени. Місця в партері, що знаходяться під балконом, взагалі не отримують звук, який відбивається від стелі, незалежно від місцезнаходження джерела звуку, оскільки глибокий балкон є перешкодою. Аналогічна ситуація спостерігається на першому балконі (крім перших рядів), що призводить до погіршення розбірливості вокалу та чіткості звучання музики.

При розташуванні джерела звуку в глибині сцени (рис. 3.6), внаслідок зменшеної висоти сценічного прорізу, практично всі місця в партері виявляються без відбитого звуку від стелі. Це призводить до зниження слухової чутливості на цих місцях і втрати просторового звучання.

### **3.2 Рекомендації щодо зміни геометрії відбивальних поверхонь**

Оскільки конфігурацію зали, зокрема висоту сценічного прорізу, розміри підбалконних пазух і виносу балконів, змінити неможливо, для усунення вказаних недоліків доцільно виконати ряд запропонованих ідей.

Оформлення вертикальної частини сценічного прорізу недостатньо ефективно для передачі звуку і розповсюдження його в зал, особливо, якщо джерело звуку знаходиться на передній частині сцени. У результаті цього більша частина глядацького залу не отримує достатньо звуку, відбитого від стелі, що суттєво погіршує якість звучання.

Установка припортальної деки на сцені сприятиме покращенню акустичних характеристик залу, скоротить час прибуття перших відбиттів до передніх рядів партеру і покращить рівномірність звукового поля в приміщенні.

При проектуванні форми деки важливо враховувати необхідність створення корисних звукових відбиттів від джерел, які розташовані як на передній частині сцени, так і у глибині. Рекомендована форма деки та розташування перших відбиттів показані на рисунку 3.7.

Дека повинна бути виготовлена з матеріалів, що відбивають звук, таких як плити OSB, ГКЛ, ДСП, фанера, загальною товщиною 25-35 мм. Поверхнева маса матеріалу деки повинна бути не менше ніж  $20\text{-}25\text{ кг/м}^2$ . На поверхню матеріалу деки наноситься шар штукатурки і фарбується або покривається венеціанською штукатуркою для створення ефекту оселкового мармуру.

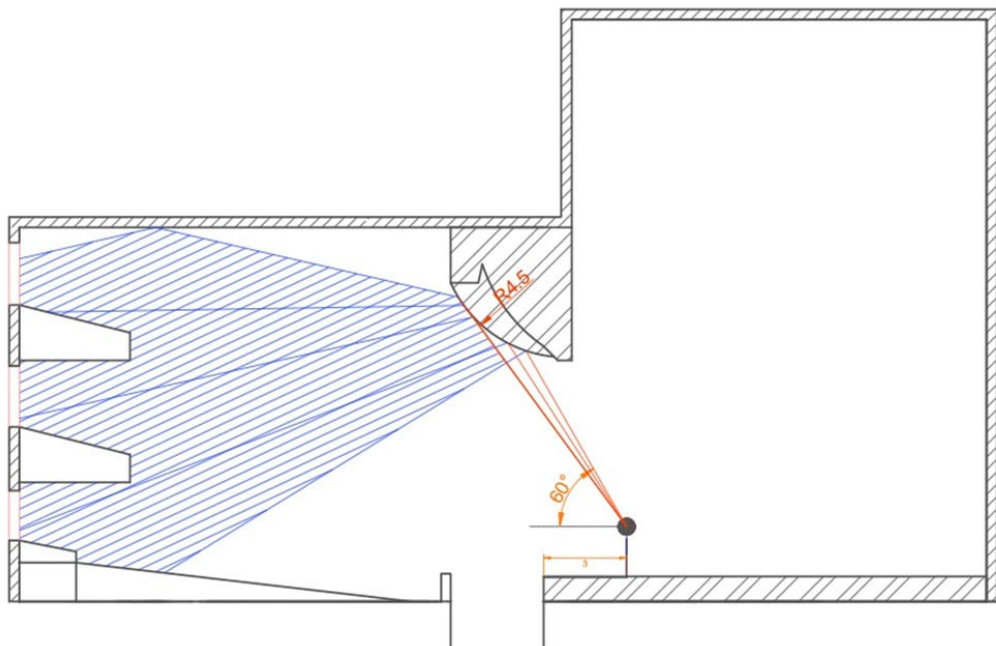


Рисунок 3.7 – Розподілення звукових відбиттів від стелі в разі зміни вертикального профілю (джерело звуку в глибині сцени на відстані 3 м від сценічного прорізу)

Оскільки існуюча конфігурація бокових стін залу є неоптимальною через надмірну ширину, а змінити її не можливо, оскільки вздовж бокових стін розташовані ложі. Тому запропоновано відмовитися від двох бокових лож, що знаходяться біля сцени, і закрити підбалконні пазухи цих лож. Це можна зробити, наприклад, використовуючи подвійні листи гіпсокартону від фірми KNAUF, щоб створити бар'єрну конфігурацію. Після цього поверхні можна покрити штукатуркою та фарбою або вкрити венеціанською штукатуркою для ефекту оселкового мармуру.

Такий захід змінить форму області біля сцени і поступово розширить зал у площині джерела звуку. Закриття підбалконних пазух лож дозволить забезпечити відбиття звуку від створених поверхонь. Разом з тим, закриття декоративних решіток на бокових поверхнях ар'єрсцени і створення відбиттів від цих поверхонь сприятимуть тому, щоб більша частина партеру отримувала звук, відбитий від бокових стін (див. рисунки 3.8-3.10).

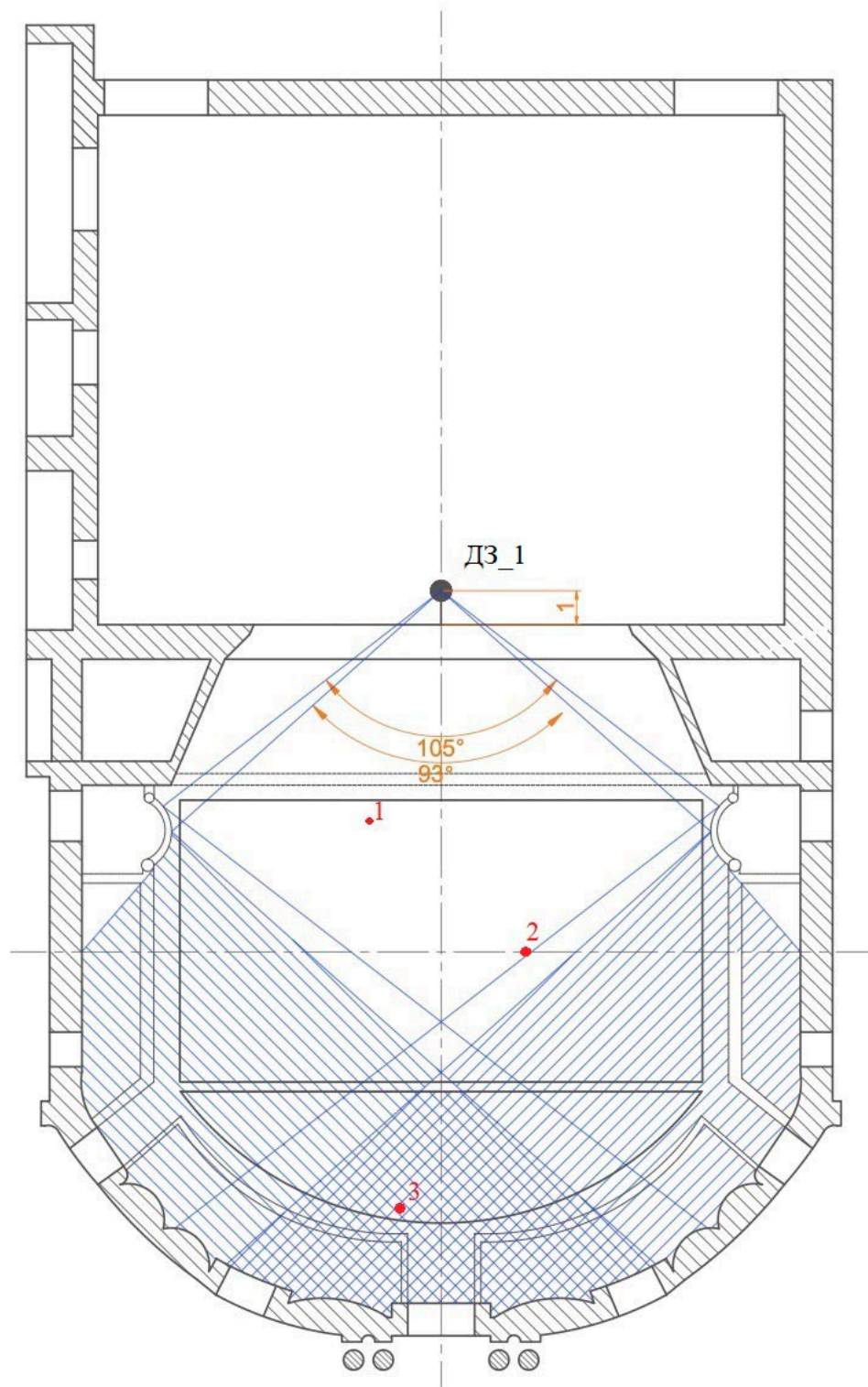


Рисунок 3.8 – Розподілення звукових відбиттів від стін в горизонтальній площині залу з урахуванням рекомендованих заходів (джерело звуку в центрі авансцени)

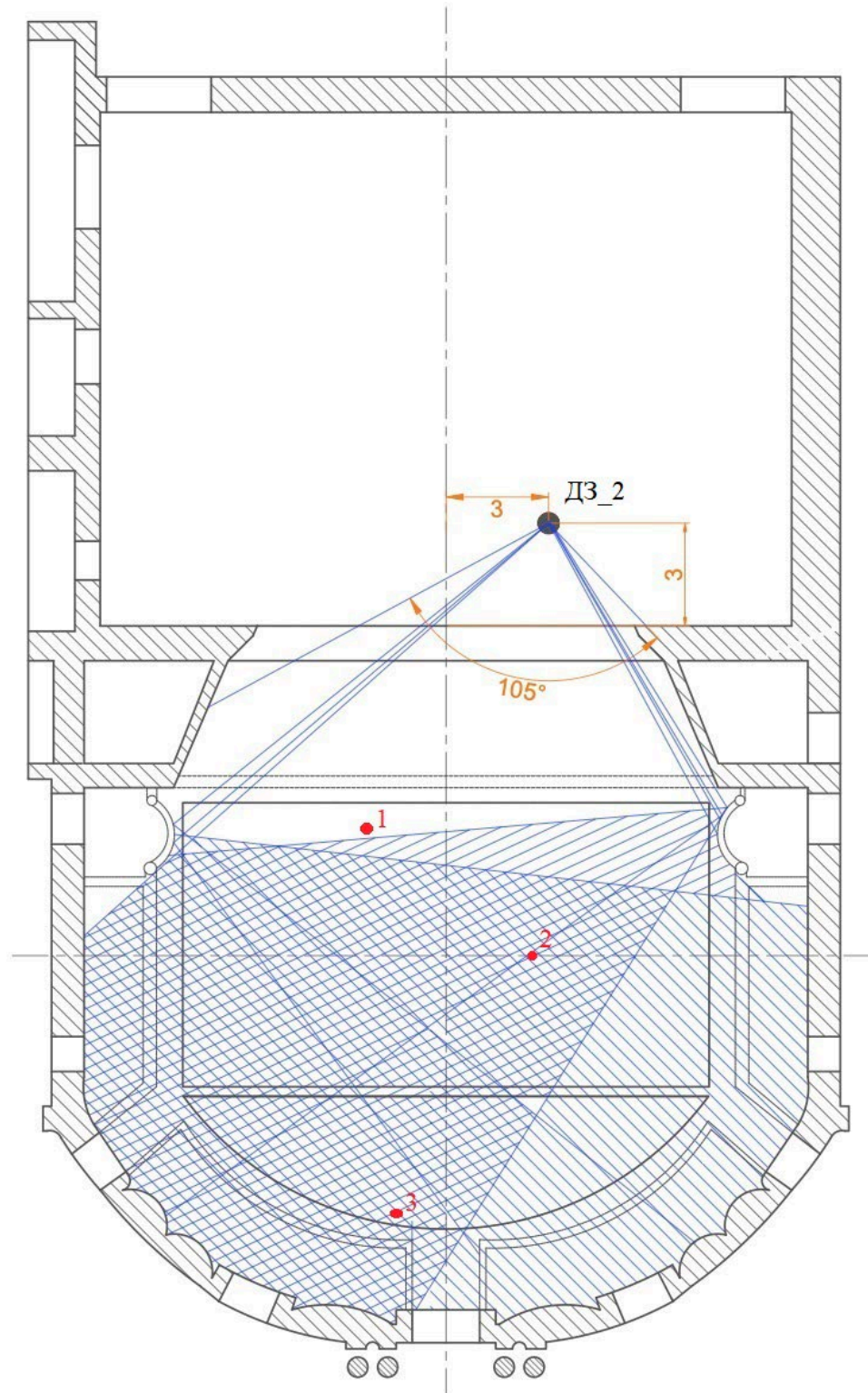


Рисунок 3.9 – Розподілення звукових відбиттів від стін в горизонтальній площині залу з урахуванням рекомендованих заходів (джерело звуку в глибині сцени на відстані 3 м від сценічного прорізу і 3 м від центру)

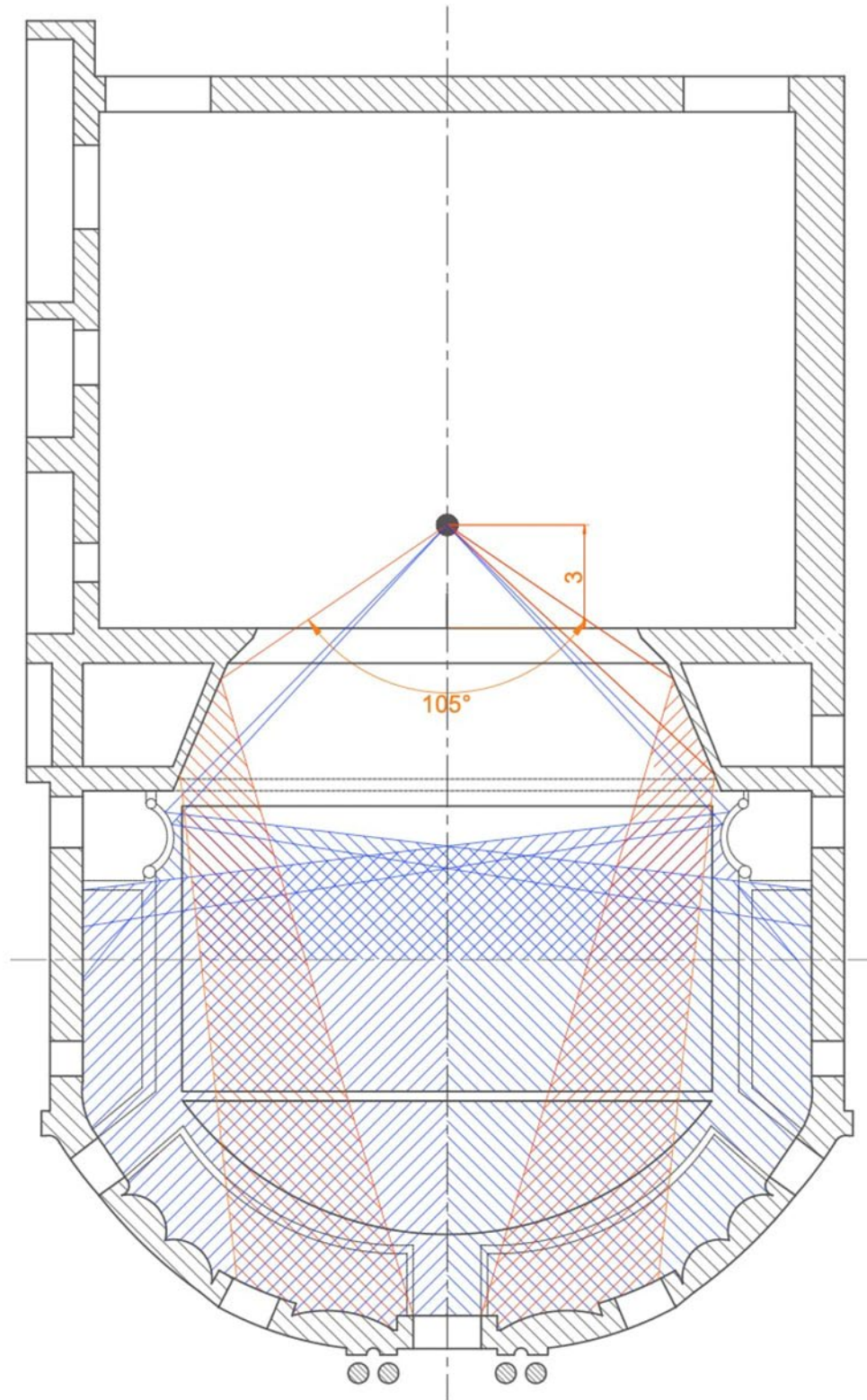


Рисунок 3.10 – Розподілення звукових відбиттів від стін в горизонтальній площині залу з урахуванням рекомендованих заходів (джерело звуку в глибині сцени на відстані 3 м від сценічного прорізу)



$$r_0 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

Час запізнення ( $\Delta\tau$ ) становить різницю в часі приходу першого відбиття звуку від огороження і прямим звуком.

Також визначають момент приходу відбитого сигналу і відношення його амплітуди до амплітуди прямого сигналу в логарифмічному масштабі. При розрахунку цього відношення величина  $P_a \Omega / 4\pi$  скорочується і рівень відбиття визначається формулою, в дБ :

$$L_n = 10 \lg \left( \frac{r_n^2}{r_0^2} (1 - \alpha_1) \dots (1 - \alpha_n) \right)$$

Для визначення необхідно коефіцієнти звукопоглинання матеріалів, що лежать на цих ділянках.

Таблиця 3.1 – Розрахунки для ситуації, коли джерело звуку в глибині сцени на відстані 3м від сценічного прорізу і 3м від центру (рис.3.4).

Сигнал	$r_n$ , м	$t_n$ , мс	$\Delta\tau$ , мс	$L_n$ , дБ
Точка 1				
Джерело – слухачі	9,69	28,5	–	0
Точка 2				
Джерело – слухачі	14,16	40	–	0

Продовження таблиці 3.1

Джерело – стеля – слухачі	26,08	80	40	-6,92
Джерело – задня стіна – слухачі	30,65	90	50	-6,79
Точка 3				
Джерело – слухачі	18,16	50	–	0
Джерело – стеля – слухачі	25,36	70	20	-4,5
Джерело – бокова стіна – слухачі	27,27	80	30	-3,62
Джерело – задня стіна – слухачі	27,89	82	32	-3,81

Таблиця 3.2 – Розрахунки для ситуації, коли джерело звуку на авансцені (рис.3.1).

Сигнал	$r_n$ , м	$t_n$ , мс	$\Delta\tau$ , мс	$L_n$ , дБ
Точка 1				
Джерело – слухачі	6,5	20	–	0
Джерело – задня стіна – слухачі	35	103	83	-14,71
Точка 2				
Джерело – слухачі	12,43	36	–	0
Джерело – задня стіна – слухачі	28,77	85	49	-7,38

## Продовження таблиці 3.2

Точка 3				
Джерело – слухачі	15,56	46	–	0
Джерело – стеля – слухачі	23,56	69	23	-5,21
Джерело – задня стіна – слухачі	25,5	75	29	-4,38

Таблиця 3.3 – Розрахунки для ситуації, коли джерело звуку в глибині сцени на відстані 3м від сценічного прорізу і 3м від центру, після застосування рекомендацій (рис.3.9).

Сигнал	$r_n$ , м	$t_n$ , мс	$\Delta\tau$ , мс	$L_n$ , дБ
Точка 1				
Джерело – слухачі	9,69	28,5	–	0
Точка 2				
Джерело – слухачі	14,16	40	–	0
Джерело – бокова стіна – слухачі	29,43	86	46	-14,86
Джерело – задня стіна – слухачі	30,65	90	50	-6,79
Точка 3				
Джерело – слухачі	18,16	50	–	0
Джерело – стеля – слухачі	25,36	70	20	-3,12
Джерело – бокова стіна – слухачі	27,27	80	30	-12,04

## Продовження таблиці 3.3

Джерело - задня стіна - слухачі	27,89	82	32	-3,81
---------------------------------	-------	----	----	-------

Таблиця 3.4 – Розрахунки для ситуації, коли джерело звуку на авансцені, після застосування рекомендацій (рис.3.8).

Сигнал	$r_n$ , м	$t_n$ , мс	$\Delta\tau$ , мс	$L_n$ , дБ
Точка 1				
Джерело – слухачі	6,5	20	–	0
Джерело – задня стіна – слухачі	35	103	83	-14,71
Точка 2				
Джерело – слухачі	12,43	36	–	0
Джерело – бокова стіна – слухачі	25,84	76	40	-14,86
Джерело – задня стіна – слухачі	28,77	85	49	-7,38
Точка 3				
Джерело – слухачі	15,56	46	–	0
Джерело – стеля – слухачі	23,56	69	23	-12,11
Джерело – бокова стіна – слухачі	23,69	69	23	-3,87
Джерело – задня стіна – слухачі	25,5	75	29	-4,38

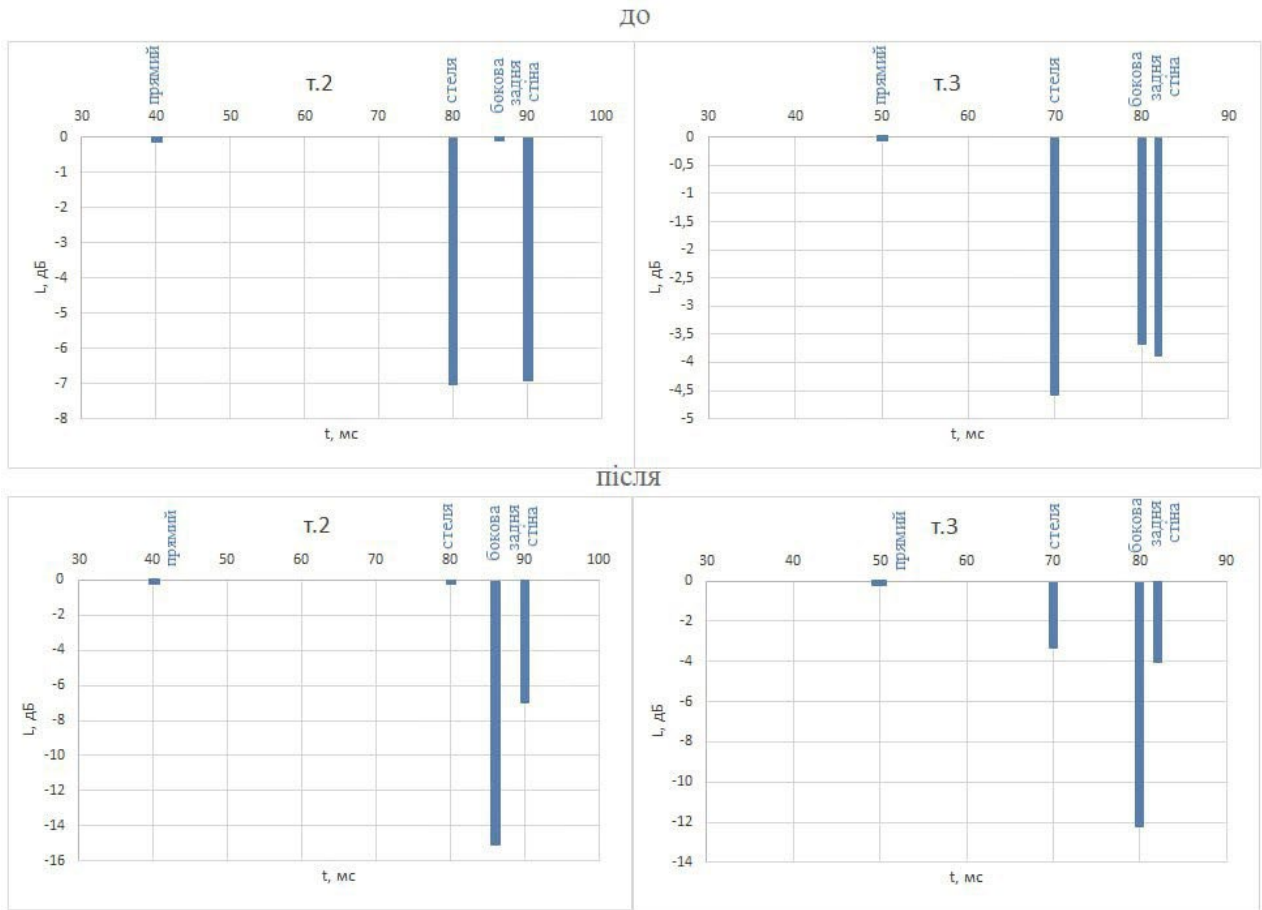


Рис. 3.11 – Часова залежність відбиттів в точці 2 та 3, коли джерело звуку в глибині сцени, до та після застосування рекомендацій

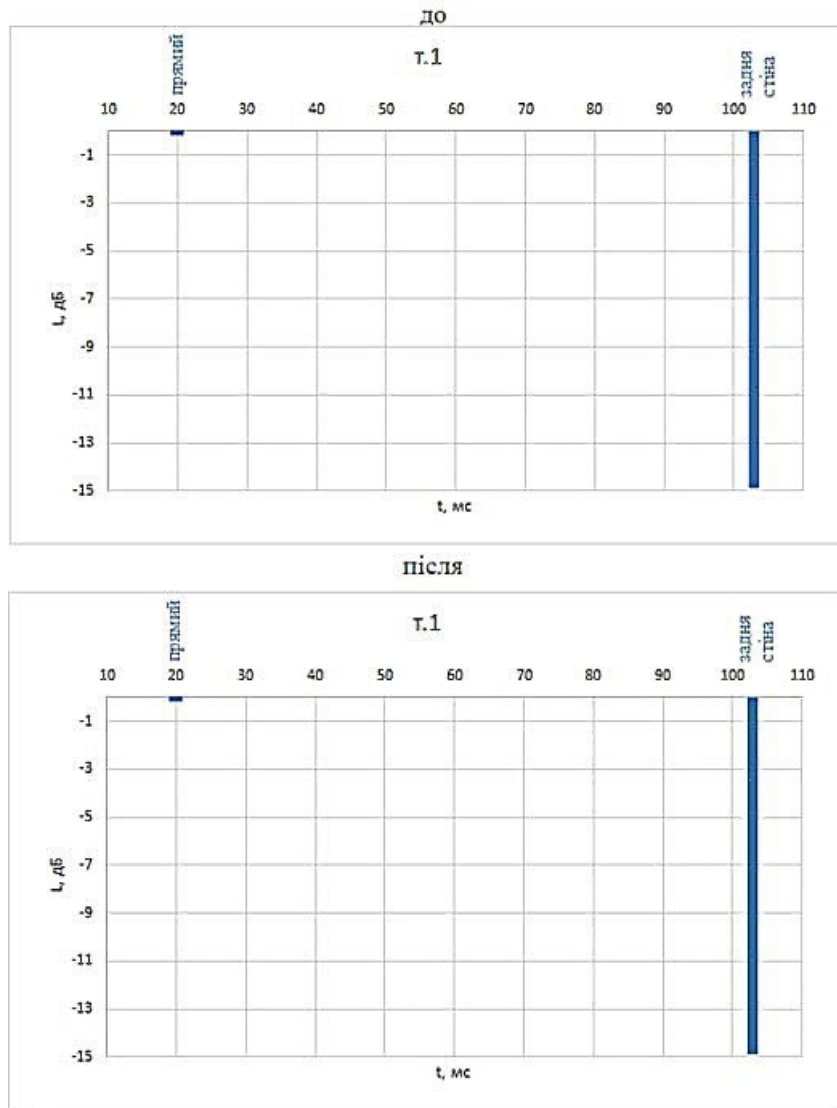


Рис. 3.12 – Часова залежність видбиттів в точці 1, коли джерело звуку на авансцені, до та після застосування рекомендацій

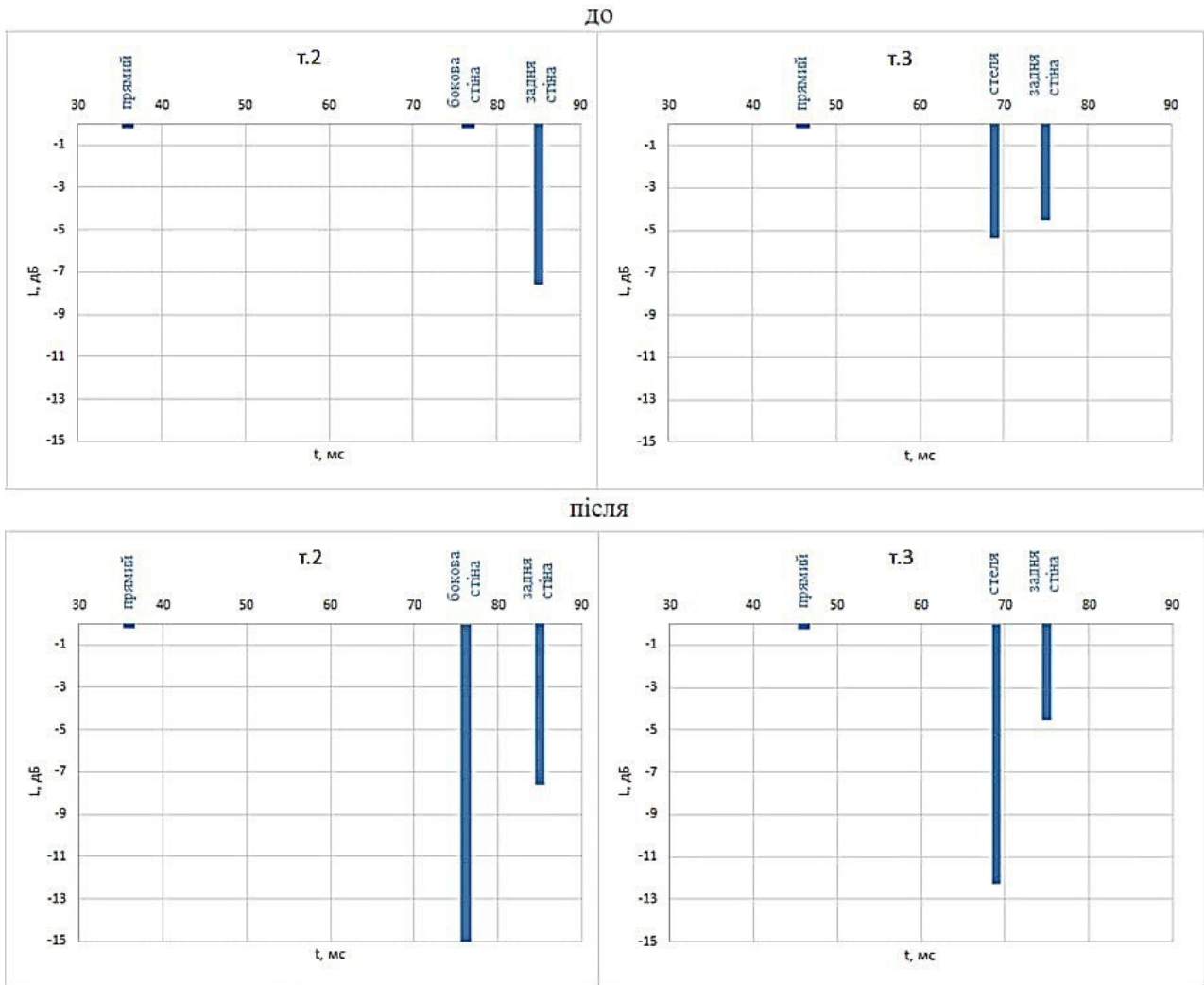


Рис. 3.13 – Часова залежність відбиттів в точці 2 та 3, коли джерело звуку на авансцені, до та після застосування рекомендацій

Для відмінної розбірливості мови час запізнення рекомендується в межах 10-25 мс (перше значення наведене для звуку, відбитого від стелі, друге – для бокових стін). Для музичних програм можливе збільшення часової різниці, відповідно, до 20-35 мс.

З аналізу отриманих значень витікає, що для ситуації, коли ДЗ знаходиться в центрі авансцени, затримка відбитого від задньої стіни звуку по відношенню до прямого значно перевищує припустимі межі і становить 83 мс

на перших рядах. Це є причиною закруглення задньої стіни по циліндричній поверхні. В кінці залу маємо оптимальне значення для музичних програм – 29 мс. Час запізнення на останніх рядах та в центрі залу становить 23-49 мс відповідно.

Отже, звучання в амфітеатрі та на останніх рядах партеру буде в нормі, що не можна сказати про передні ряди. Через відсутність відбиттів від стелі, звучання на перших рядах буде «сухим», а через великі значення затримки, взагалі погіршується розбірливість.

Ситуація покращується, якщо ДЗ знаходиться в глибині сцени, оскільки зменшується різниця довжини променів відбитого і прямого звуків. Тоді значення часу запізнення становлять 20-50 мс. Найкращі показники маємо в кінці залу.

Після виконання рекомендацій, щодо зміни залу, маємо значне покращення, оскільки додалися відбиття від бокових стін – звучання стало більш насиченим.

## Висновок до розділу

З аналізу променевих картин витікає, що при розташуванні ДЗ в глибині сцени найкраща ситуація на глядацьких місцях, особливо в кінці залу. Коли ДЗ знаходиться в центрі авансцени, глядацькі місця в партері позбавлені відбитих звукових променів. Причиною поганої розбірливості звуку являється заокруглення задньої стіни, оскільки через це прямі звукові промені відбиваючись від задньої стіни, повертаються назад в напрямку сцени. Променеві картини відбиття звуку від стелі показують, аналогічні результати.

Також після розрахунку запізнення відбиттів в часу, було підтверджено попередній висновок, що звучання в амфітеатрі та на останніх рядах партеру буде в нормі, що не можна сказати про передні ряди. Через відсутність відбиттів від стелі, звучання на перших рядах буде «сухим», а через великі значення затримки, взагалі погіршується розбірливість, в той час як найкраща чутність і розбірливість мови спостерігаються в перших рядах балконів і в другій половині залу.

Проаналізувавши дані ситуації було запропоновано вирішення даних проблем, за допомогою якого в партері з'являються відбиття від бокових стін, а розбірливість в залі покращується.

## Висновки

Акустичні умови в залі Оперної студії мають значні недоліки, які пояснюються невдалими геометричними пропорціями, наявністю криволінійної поверхні задньої стіни, великим повітряним об'ємом і значною кількістю слухачів. Час реверберації в цьому залі занижений у всьому регламентованому діапазоні частот, звукові відбиття від огорожувальних поверхонь не охоплюють площу глядацьких місць на першому поверсі, що призводить до зниженої розбірливості співочої мови. Ця проблема негативно впливає на якість звучання як оперного співу, так і камерної і симфонічної музики.

У зв'язку з цим, запропоновано ряд заходів, спрямованих на покращення акустичних умов в залі:

- зменшити місця в партері на два ряди та замінити крісла на більш жорсткі, зменшивши кількість крісел в залі;
- підбалконні пазухи двох бокових лож поблизу сцени закрити звуковідбивною поверхнею, встановленою по конфігурації бар'єру ложі;
- зняти штори на вхідних дверях;
- під час концертів закривати оркестрову яму дерев'яними щитами;
- зменшити кількість штукатурки на бокових стінах біля сцени;
- прибрати килими.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Історія. Національна музична академія України імені П.І. Чайковського.

URL: <https://knmau.com.ua/istoriya/>. Дата звернення: 17.04.2023

2. Морз Ф., Болт Р. Звуковые волны в помещениях. Успехи физических наук. Т. XXXII, 1947. – вып.2, с.185-238; вып.3, с.333–375; вып.4, с.417-463.

3. Дж. В. Стрэтт (Лорд Рэлей). Теория звука. пер. с англ. в 2-х томах. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1940. – т. 1 – 500 с., т. 2 – 476 с.

4. Верн О. Кнудсен. Современное развитие архитектурной акустики. Успехи физических наук. Т. XIV, 1934. – вып. 7 с.857-893.

5. Environmental and Architectural Acoustics / by P. Lord / 2 ed. – London: T&F, 2018. – 390 p.

6. Дідковський В.С., Луньова С.А. Основи архітектурної та фізіологічної акустики. – К.: Аванпостприм, 2001. – 422с.

7. Дідковський В.С., Луньова С.А., О.В. Богданов. Архітектурна акустика Навчальний посібник – НТУУ «КПІ» (ФЕЛ), 2012. – 383с.

8. Eyring, Carl F. Reverberation Time in "Dead" Rooms. The Journal of the Acoustical Society of America. 1 (2A), 1930. – с.217-241.

9. Soundscape/ by Larry Sider. – London: School of sound – 2010. – 250 p.

10. Поширення звуку в обмеженому просторі. URL: <http://um.co.ua/1/1-8/1-86484.html>. Дата звернення: 27.04.2023.

11. Xiang, N. *Architectural Acoustics Handbook*; J. Ross Publishing: Plantation, FL, USA, 2017.
12. Прикладна акустика – 2. Архітектурна акустика. Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 "Електроніка"/ О.П. Гребінь, Н.Ф. Левенець; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 34 Мбайт (.doc); 3 Мбайт (.pdf)). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 101 с.
13. *Handbook for Sound Engineers. The New Audio Cyclopedia. 2 ed./Ed. Glen Ballou. Carmd: SAMS, 1991.*
14. Long M. *Architectural acoustics. Amsterdam: Elsevier, 2005.*
15. István L Vér and Leo L Beranek. *Noise and vibration control engineering: principles and applications. John Wiley & Sons, 2005.*