

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження систем озвучення приміщень методом моделювання.  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи МІм-21-1  
Сотников М.А.  
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Посошенко В.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри Володимир КАРТАШОВ  
(підпис)

2022 р.

# Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Сотникову Микиті Анатолійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження систем озвучення приміщень методом моделювання.

затверджена наказом по університету від " 24 " 10 2022 р. № 1384 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 07.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Тип приміщення – дикторська студія. Розміри приміщення: ширина – 3,1 м, глибина – 2,9 м, висота – 2,5 м. Розміри дверей: 2 x 0,6 м. Розміри вікна апаратної: 0,5 x 0,6 м. Вихідні матеріали необробленого приміщення: підлога – паркет, стіни та стеля – вапняна штукатурка. Час стандартної реверберації та– згідно стандартних вимог до дикторських студій відповідного розміру. Розробити акустичне оформлення, розрахувати частотні характеристики часу реверберації та звукоізоляцію для акустично оформленої студії, методом моделювання та експериментально оцінити акустичні характеристики приміщення та їх відповідність розрахунковим.

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

Вступ

1. Аналітичний огляд літератури за тематикою роботи.

2. Розробка акустичного оформлення студії звукозапису.

3. Моделювання акустичних характеристик студії звукозапису.

4. Експериментальне дослідження акустичних характеристик приміщення студії.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Предметна зйомка (1 аркуш А4).

1. План приміщення студії звукозапису.

2. Розрахункові співвідношення.

3. Розрахунок часу реверберації.

4. Розрахунок шумоізоляції.

5. Моделювання акустичних характеристик.

6. Результати моделювання.

7. Експериментальні дослідження.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	01.09.22–13.09.22	
2	Моделювання акустичних характеристик	14.09.22–27.09.22	
3	Розробка методики експерименту	28.09.22–11.10.22	
4	Експериментальне дослідження	12.10.22–25.10.22	
5	Обробка результатів	26.10.22–10.11.22	
6	Графічна частина роботи	11.11.22–25.11.22	
7	Перевірка керівником	26.11.22–02.12.22	
8	Перевірка на академічний плагіат	03.12.22	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	04.12.22–07.12.22	

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 01.09.2022 р. \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Микита СОТНИКОВ \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Віталій ПОСОШЕНКО \_\_\_\_\_  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 63 сторінки, 52 рисунка, 8 таблиць, 14 джерел.

АКУСТИКА, ЗВУКОЗАПИС, ЗВУКОІЗОЛЯЦІЯ, РОЗБІРЛИВІСТЬ, РЕВЕРБЕРАЦІЯ, СТУДІЯ, ЧАСТОТА

Об'єкт дослідження – процес поширення звукових хвиль в приміщенні студії звукозапису.

Мета роботи – розробка методики вимірювання акустичних характеристик студії звукозапису на предмет відповідності розрахунковим.

Метод дослідження – теоретичний аналіз, розрахунки, модельний експеримент, натурний експеримент.

Проведено аналітичний огляд методів і засобів технічної організації студії звукозапису, розроблено акустичне оформлення студії, розраховані частотні характеристики часу реверберації і оцінена звукоізоляція студії, методом моделювання в середовищі EASE отримані акустичні характеристики студії, що визначають якість звучання, розроблена методика вимірювання акустичних характеристик студії звукозапису за допомогою програми EASERA, експериментально отримані частотні характеристики часу реверберації в реальній студії.

Дослідження підтверджують відповідність розрахункових, модельних і експериментальних даних.

## ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 63 pages, 52 figures, 8 tables, 14 sources.

ACOUSTICS, SOUND RECORDING, SOUND INSULATION, CABLE, REVERB, STUDIO, FREQUENCY

The object of study – the process of propagation of sound waves in the recording studio.

The purpose of the work is to develop a method for measuring the acoustic characteristics of a recording studio for compliance with the calculated values.

The research method is theoretical analysis, calculations, model experiment, field experiment.

An analytical review of the methods and means of technical organization of the recording studio was carried out, the acoustic design of the studio was developed, the frequency characteristics of the reverberation time were calculated and the studio's sound insulation was evaluated, the acoustic characteristics of the studio determining the sound quality were obtained using the EASE modeling method, a program was developed for measuring the acoustic characteristics of the recording studio EASERA, experimentally obtained frequency characteristics of reverberation time in a real studio.

Studies confirm the compliance of the calculated, model and experimental data.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів.....	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ОРГАНІЗАЦІЇ СТУДІЙ ЗВУКОЗАПИСУ.....	11
1.1 Звук, його характеристики і параметри.....	11
1.2 Особливості сприйняття звуку.....	13
1.3 Поширення звуків у приміщенні.....	17
1.4 Матеріали для звукопоглинання.....	20
1.5 Практична побудова студій звукозапису.....	21
2 МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРИМІЩЕННІ СТУДІЇ ЗВУКОЗАПИСУ В ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ EASE.....	27
2.1 Особливості використання програмного забезпечення акустичного моделювання EASE.....	27
2.2 Аналіз модельованих параметрів.....	29
2.3 Результати моделювання акустики студії.....	31
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОКАЛЬНОЇ КІМНАТИ СТУДІЇ ЗВУКОЗАПИСУ.....	42
3.1 План студії і акустичне оформлення.....	42
3.2 Розробка методики дослідження акустичних характеристик студії.....	45
3.3 Методика досліджень акустичних характеристик вокальної кімнати.....	48
3.4 Результати експериментальних досліджень вокальної кімнати.....	56
Висновки.....	59
Перелік посилань.....	62
ДОДАТКИ.....	64

Додаток А.....	65
Додаток Б.....	74

## ВСТУП

Визначальними факторами для досягнення якісного озвучення будь-якого приміщення – концертного і кінозалу, студії є засоби архітектурної акустики і системи звукопідсилення.

Акустичне проектування приміщення полягає у визначенні його пропорцій і форми (архітектурні методи), а також в акустичній обробці внутрішніх поверхонь цього приміщення (акустичні методи). При визначенні форми приміщення враховують характер відбиттів звуків від внутрішніх поверхонь приміщення, за рахунок чого формується дифузність (однорідність) звукового поля. При акустичній обробці внутрішніх поверхонь необхідно забезпечити необхідне значення поглинання у заданому діапазоні частот.

Основними параметрами, за якими оцінюють якість озвучення, є розбірливість, відношення сигнал-шум, відсутність паразитних або формантних призвуків. Не має бути допущено великої різниці в розбірливості, тембральному забарвленні і в якості звучання на різних місцях озву чуваного приміщення. Тому по всій площі глядацьких місць (в залі) або розташування мікрофонів (в студії) має бути досягнутий однорідний розподіл звукового поля і вірний баланс гучності звучання окремих джерел.

Побудова студії звукозапису – це багатоетапний і недешевий процес. Важливою його частиною є акустичний проєкт. Це комплекс рішень відносно захисту від шуму і конструювання акустичного оформлення приміщення. Даними на початку проектування служать архітектурні плани, апріорна інформація про джерела шуму та технічне завдання.

Акустичне проектування здійснюють як розрахунковим шляхом, так і методом моделювання. В обох випадках існує ряд припущень і не враховуються всі фактори, що визначають акустику в реальній студії. В результаті акустичні характеристики створеної студії можуть помітно відрізнятися від розрахункових або модельних.



Мета кваліфікаційної роботи – на прикладі реальної студії звукозапису показати, як і на скільки можуть бути відмінними реальні акустичні характеристики студії від розрахункових або модельних при ретельному врахуванні всіх факторів.

# 1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ОРГАНІЗАЦІЇ СТУДІЙ ЗВУКОЗАПИСУ

## 1.1 Звук, його характеристики і параметри

Звук – це малі механічні коливання у твердих, рідких і газоподібних середовищах, частоти яких займають межі від 20 Гц до 20 кГц. Частоти менше 20 Гц називають інфразвуковими, а вище 20 кГц відповідно ультразвуковими [1-5].

Простір, де відбувається поширення звукових хвиль, називають звуковим полем. Звукові хвилі носять подовжній характер, тобто сила, що створює пружні деформації в середовищі при розповсюдженні звукової хвилі, є нормальною до фронту хвилі [1,2,4].

Звук характеризують звуковим тиском ( $p$ ).

Звуковий тиск – це різниця між миттєвим значенням тиску збудженого повітря і середнім тиском за відсутності звукового поля [1–2,5]:

$$p = p_t - p_0.$$

Звуковий тиск є величиною скалярною. В області стиснення тиск є позитивним, в області розрідження – негативним. Звуковий тиск вимірюється в паскалях (Па). Один Па в  $10^5$  разів менше за нормальний атмосферний тиск ( $p_H = 101325$  Па).

Енергія, що переносить звукова хвиля, характеризується інтенсивністю ( $I$ ). Інтенсивність (чи сила) звуку – це середня кількість енергії звуку, що проходить за одиницю часу через 1-ну площадку, розташовану перпендикулярно напрямку поширення звукової хвилі, тобто це потужність, яка переноситься звуковою хвилею через 1-ну площадку. Інтенсивність пов'язана зі звуковим тиском такою формулою [1-5]:

$$I = \frac{P_{\text{эфф.}}^2}{\rho_0 c}$$

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

$c$  – швидкість поширення звуку (340 м / с за нормальних умов).

Одиницею вимірювання інтенсивності є Вт/м<sup>2</sup> (аналог щільності потоку потужності в електродинаміці).

Тиск, силу звуку і щільність звукової енергії зручно визначати в рівнях, виражених в дБ:

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

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

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

За опорну величину 0 дБ SPL вважають звуковий тиск  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па, це звук, що відповідає порогу слухового відчуття. А рівень потужності звукового сигналу, що відповідає даному порогу, вимірюють в дБ PWL відносно опорної величини  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/ м<sup>2</sup> [1-3].

При використанні даних одиниць рівень громових розкатів відповідає рівню приблизно 120 дБ, шум літака чи музика на рок-фестивалі – рівню 110 дБ, шум потягу поряд – 100 дБ, звуки жвавої вулиці – 80 дБ. Розмова в кімнаті – рівню звуку близько 50 ... 60 дБ, а шепіт – 20 ... 30 дБ [2-4].

Часто рівень звукового тиску вимірюється або розраховується в окремих частотних смугах. Найбільше поширення мають октавні або 1/3 октавні смуги з постійною відносною шириною смуги. Середньгеометричні частоти даних смуг регламентовані багатьма міжнародними і вітчизняними стандартами.

Стандартний ряд середніх частот для октавних смуг виглядає так: ... 125, 250, 500, ... Гц; для 1/3 октавних смуг: ... 125, 160, 200, 250, ... Гц. Крім вказаних вузьких частотних смуг використовується і широкопasmова корекція АЧХ. Форма АЧХ корекції позначається буквами А, В, С, вона строго регламентована і визначається сприйняттям звуку слухом людини [3].

## 1.2 Особливості сприйняття звуку

Знання особливостей сприйняття звуку слухом людини дозволяє створити системи озвучення з необхідними характеристиками, узгодженими із властивостями слуху.

Сприйняття по амплітуді. Усі звукові коливання сприймаються на слух як звуки, що мають певну гучність. Найменше значення інтенсивності звуку, що викликає відчуття, називається порогом чутності. Поріг чутності мінімальний у діапазоні від 1 до 5 кГц. На частоті 1 кГц мінімальне значення інтенсивності звуку дорівнює  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>, а тиску –  $2 \cdot 10^{-5}$  Па. Рівні цих величин приймаються за нульові.

Разом зі збільшенням інтенсивності звуку зростає і його гучність. Це відбувається, доки подальше підвищення інтенсивності звуку перестає змінювати відчуття гучності, але виникають больові відчуття. Найменше значення інтенсивності звуку, що викликає біль, називається больовим порогом.

Динамічним діапазоном слуху  $D_c$  – називають різницю рівнів звуку, які відповідають больовому порогові  $N_{\delta}$  і порогові чутності  $N_c$  [1,2,6]:

$$D_c = N_{\delta} - N_c.$$

В діапазоні середніх частот  $D_c = 120 \dots 130$  дБ.

За безперервної зміни інтенсивності звуку, відчуття гучності змінюватиметься не безперервно, а ступінчато, тобто стрибками. Ці стрибки

називаються порогом розрізнення інтенсивності. За невеликих гучностей величина стрибка (сходинки) дорівнює 2...3 дБ, а зі збільшенням гучності – зменшується до 0,4 дБ. Можна вважати, що у діапазоні від порога чутності до більшого порогу величина елементарної градації в середньому становить 0,8...1 дБ. Загальне число помітних вухом градацій сили звуку на середніх частотах становить 250, в діапазонах низьких і верхніх частот вона зменшується, так що у звуковому діапазоні в середньому складає 160 [1,4].

Для кількісних оцінок гучності застосовують метод суб'єктивного порівняння. Відповідно до даного методу еталонний звук (із частотою 1 кГц) зрівнюється за гучністю з досліджуваним. Отриманий при цьому рівень еталонного звуку приймають в якості рівня гучності досліджуваного звуку. Одиницею вимірювання рівня гучності є фон [2,5,6].

Отже, на частоті 1000 Гц рівень гучності у фонах, збігається з рівнем сили звуку в дБ.

На рис.1.1 показані залежності кривих рівної гучності від частоти [6]. Параметром цих кривих є рівень гучності. Кожна крива показує, як саме зі зміною частоти має змінюватися рівень інтенсивності звуку, щоби гучність гармонійних сигналів залишалася незмінною.

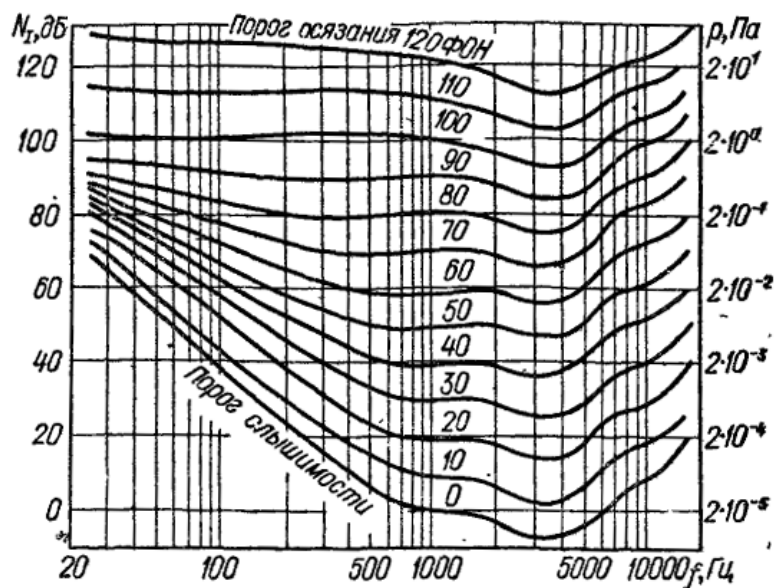


Рисунок 1.1 – Криві рівної гучності (ізофони)

Відзначимо характерну особливість, що визначається формою кривих рівної гучності: при зміні рівня звукового тиску рівень гучності на НЧ змінюється сильніше, ніж на СЧ і ВЧ частотах. Отже, частотно-незалежне регулювання рівня в пристроях відтворення звуку призводить до більш різкої зміни гучності НЧ складових сигналу, тобто до спотворення АЧХ і тембру сигналу. Тому у високоякісних пристроях відтворення звуку використовують тонкомпенсовані регулятори рівня.

При вимірюванні різного роду акустичних шумів і перешкод враховують властивості слухового сприйняття. З цією метою у шумомірах використовується 3 види частотних характеристик – А, В, С. Характеристика А використовується для вимірювання шумів з рівнем гучності 20...55 фон, характеристика В – з рівнем 55...85 фон, характеристика С – з рівнем вище 85 фон. Частотна характеристика С рівномірна, а характеристики А і В – протилежні ізофонам з рівнями гучності, які дорівнюють 40 і 70 фон відповідно [2,3,6].

Сприйняття по частоті. Синусоїдальні і періодичні коливання складної форми сприймаються як звуки, що мають певну висоту тону. Чим більшою є основна частота, тим вище тон звуку. Відмінність тону по висоті між двома звуками на слух буде однаковою, якщо є однаковим відношення частот цих звуків. Слух однаково реагує на різницю частот, якщо його утворюють дві складові з відношенням 200 Гц : 100 Гц або 2000 Гц : 1000 Гц [6]. За логарифмічною шкалою відношення цих двох частот однаково і дорівнює 2:1, по лінійній – відстані відрізняються в 10 разів. Саме тому у більшості вимірювань використовується логарифмічна шкала частот, бо це відповідає слуховому сприйняттю.

Відстань по висоті тону називають інтервалом. Інтервали вимірюються в октавах або її частинах. Якщо відношення частот дорівнює 2, то даний інтервал називають октавою, у  $\frac{1}{2}$  октаві відношення частот дорівнює  $\sqrt{2}$ . В загальному випадку октавність визначається формулою [6]:

$$n = \log_2(f_2 / f_1).$$

При  $n=1/3$  отримуємо  $f_2 / f_1 = \sqrt[3]{2}$ , і даний інтервал називається 1/3 октавою. Звуковий діапазон частот приблизно містить 10 октав.

Складні звукові коливання, які мають однакові основні частоти, але відрізняються по формі, на слух сприймаються як звуки, що мають різне частотне «забарвлення» – тембр. Звук з високим тембром є збагаченим вищими гармоніками (дзвінкий, форма має різкі фронти), звук з низьким тембром збіднений вищими гармоніками (глухий, плавні фронти).

Головний вплив на оцінку висоти тону дають перші 7..8 гармонік, ще 8..9 гармонік мають додаткову інформацію як для оцінки висоти тону, так і для оцінки тембру, тобто найбільш важливими для слуху є перші 15..17 гармонік.

Часові характеристики слуху. Слух має деяку інерційність при сприйнятті швидко зростаючих звуків. Близьке до граничного відчуття гучності виникає приблизно через 50 мс після появи звукового імпульсу. Слух також має «пам'ять», відчуття гучності зникає приблизно через 150...200 мс після зникнення сигналу [6].

Наявність «пам'яті» слуху пояснює такий відомий факт, що запізниті повторення сигналу не сприймаються як роздільні, якщо час запізнення не перевищує 50 мс. Це відбувається тому, що за 50 мс відчуття від прямого сигналу зменшується незначно і запізнитий сигнал сприймається як продовження прямого.

Нелінійні властивості слуху. Гармонійний сигнал з великим рівнем сприймається на слух як сигнал, що має гармонійні складові. Наприклад, якщо рівень звукового коливання 100 дБ, то рівні другої і третьої гармонік, які суб'єктивно відчуються, відповідно дорівнюють 88 і 74 дБ [2,6]. Коливання складної форми з високим рівнем може призвести до появи суб'єктивно відчутних комбінаційних складових, причому різниці складові сприйматимуться на слух більш потужно у порівнянні з сумарними.

Бінауральний ефект. Здатність слуху визначати напрямок на джерело звучання називається бінауральним ефектом. Точність, з якою може бути визначено напрямок на джерело в горизонтальній площині, досить висока, помилка складає приблизно  $3...4^\circ$  [6].

Можна зазначити 3 причини, які сприяють правильному визначенню напрямку на джерело звучання:

- до вуха, розташованого даліше від джерела, сигнал надходить з невеликим запізненням у часі по відношенню до 2-го вуха;
- сигнал у 1-го і 2-го вуха матиме різний рівень внаслідок екранування звуку головою;
- форма спектру на ВЧ через екрануючу дію голови у лівого і правого вуха також буде різною.

Бінауральні властивості слуху враховують при проектуванні систем об'ємного звучання.

### 1.3 Поширення звуків у приміщенні

Пряма хвиля, що випромінюється джерелом звуку (рис.1.2), потрапляючи на поверхню, частково відбивається від неї, частково поглинається матеріалом поверхні, трансформуючись у теплову енергію, і частково переходить в сусіднє приміщення.

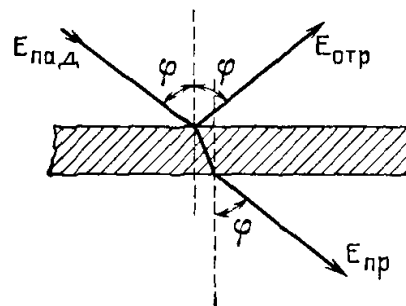


Рисунок 1.2 – Процеси відбиття і заломлення звукової хвилі

( $E_{пад}$  – енергія хвилі, що падає;  $E_{отр}$  – енергія відбитої хвилі;  $E_{пр}$  – енергія хвилі, яка пройшла крізь поверхню)



Процеси віддзеркалення і заломлення звукових хвиль відбуваються згідно законів геометричної акустики. Енергія відбитого звуку визначається коефіцієнтом звуковідбиття  $\beta$ , поглинена звукова енергія – коефіцієнтом поглинання  $\alpha$ , звукова енергія, що пройшла крізь поверхню – коефіцієнтом провідності  $\gamma$ .

Коефіцієнт поглинання звуку – це відношення поглинутої матеріалом певної поверхні звукової енергії до всієї падаючої на матеріал енергії звуку [2]:

$$\alpha = \frac{E_{\text{погд}}}{E_{\text{пад}}}$$

Довідкові значення коефіцієнтів поглинання звуку отримують в розсіяному звуковому полі з рівно вірогідними напрямками поширення звукових хвиль. Звукопоглинання визначають в октавних смугах частот, використовуючи діапазон від 125 до 8000 Гц.

У приміщенні, де розташоване джерело звучання, поле звукових хвиль формується із прямих хвиль і відбитих, які утворюють розсіяне (дифузне) звукове поле. При цьому, перші відбиті хвилі слідуєть одна за однією дискретно, хоч і з малими затримками, але з часом в формуванні звукового поля починають брати участь хвилі, що мають різне число відбиттів і різні співвідношення фаз. При цьому зменшення звукового рівня втрачає дискретний вигляд і стає неперервним (рис.1.3) [5].

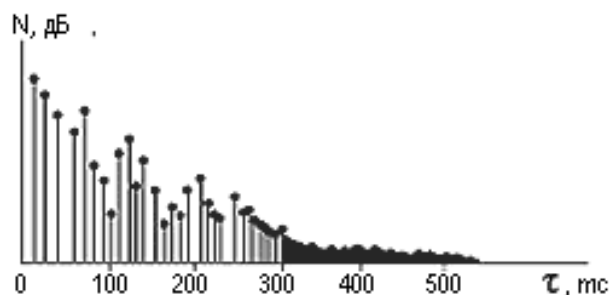


Рисунок 1.3 – Часова структура процесу реверберації

Ранні відбиття, які надходять до слухача, можуть як зливатися із прямою хвилею, покращуючи якість звучання, так і, навпаки, зменшувати розбірливість мови, і навіть прослуховуватися як ехо. Ехо виникає кожний раз, коли час затримки між прямим і відбитим звуками більше 50 мс [6].

Однією з найважливіших характеристик акустики приміщень є час реверберації  $T_p$ . Під даною характеристикою мають на увазі інтервал часу, протягом якого рівень звуку в кімнаті падає на 60 дБ після вимкнення джерела звуку.

Для оціночного розрахунку часу стандартної реверберації застосовується формула Ейрінга [1-5]:

$$T_p = \frac{0,071 \cdot V}{-S \cdot \lg(1 - \alpha)},$$

де  $V$  и  $S$  – відповідно об'єм і площа кімнати;

$\alpha$  – середньозважений коефіцієнт поглинання звуку покриттями приміщення.

Підбір звукопоглинаючих поверхонь приміщення, що забезпечували б необхідні значення часу реверберації при оптимальній структурі ранніх відбиттів, є головною складовою акустичного проектування.

Вихідними даними для проектування є об'єм приміщення, загальна площа внутрішніх поверхонь і потрібний оптимум реверберації.

Розрахунки або моделювання проводять для окремих смуг октавних частот, використовуючи зазвичай частотний діапазон від 125 до 8000 Гц. У довідкових посібниках приводяться значення коефіцієнтів поглинання різних матеріалів і конструкцій, а також дані про поглинання звуку виконавцями, слухачами, кріслами, апаратурою і іншими предметами.

## 1.4 Матеріали для звукопоглинання

Головна задача акустичного проектування полягає в підборі різного роду матеріалів з коефіцієнтами поглинання, відмінними на різних частотах звукового діапазону. Так отримують потрібне значення часу стандартної реверберації і її оптимальну залежність від частоти.

Як правило, застосовують 3 типи поглиначів звуку [1]:

- пористі акустичні плити, звукопоглинання яких має максимальне значення в діапазоні середніх і вищих частот звуку;
- пористі перфоровані екрани, що частіше представляють собою шар ефективного звукопоглинача (мінеральної вати, базальтового волокна і т.п.), оберненого тканиною і закритого ззовні перфорованим листом (фанерою товщиною 4...5 мм, гіпсовими чи металевими листами).

Залежність поглинання від частоти цих конструкцій має резонансний характер, причому в залежності від розміру отворів перфорації, відстані між ними, товщини наповнювача та інших чинників вдається змінити положення максимуму поглинання звуку на вісі частот, що дуже зручно при акустичному налаштуванні приміщення;

- панелі, які резонують на НЧ, наприклад листи гладкої фанери, сухої штукатурки, ДСП, МДФ або ОСБ панелі. Коефіцієнт поглинання звуку цих конструкцій є максимальним в області частот 100...300 Гц і зміщується в бік НЧ при збільшенні повітряного проміжку між панеллю і поверхнею стіни. Більшість сконструйованих з дерева або фанери звукорозсіючих конструкцій (напівколони, пілководні елементи стін, стелі і т.п.) також мають найбільшу звукопоглинальну дію в НЧ області спектра чутних частот.

Залежності поглинання звуку від частоти показані на рис.1.4 [1].

Звукопоглинальні конструкції з відмінними акустичними характеристиками розміщують янайбільш рівномірно по поверхням студії, це сприяє підвищенню дифузності (тобто рівномірності) звукового поля.

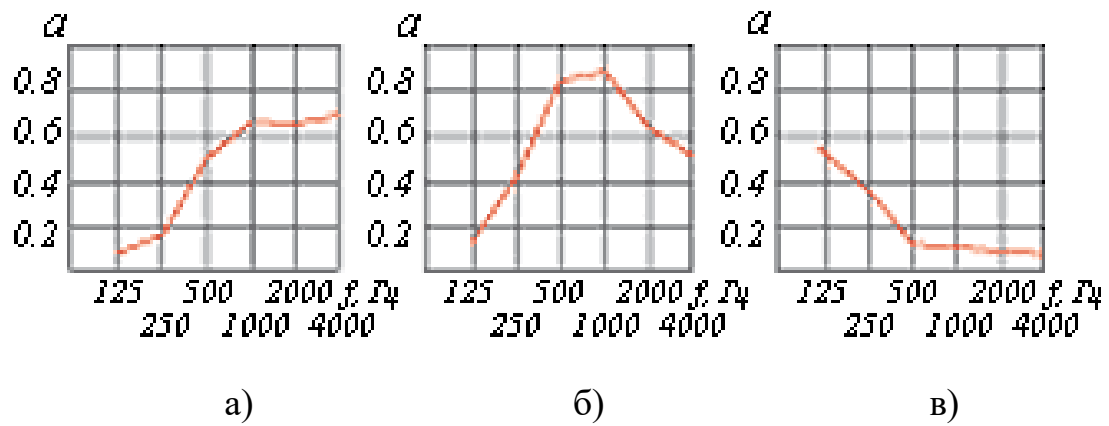


Рисунок 1.4 – Залежність коефіцієнтів поглинання звуку від частоти:  
 (а – для пористих акустичних плит; б – для перфорованих панелей з наповнювачем; в – для НЧ резонансних панелей)

Досвід показує, що краще звучання або оптимальний час реверберації не є однаковим для студій і залів з різними розмірами і різного призначення. Приблизно, оптимальний час реверберації для мовних студій малого об'єму вважається рівним 0,35 ... 0,5 с, і сягає до 2 с для концертних залів великих об'ємів [2].

Певне зменшення оптимального часу реверберації для малих студій пов'язане з необхідністю збереження максимальної розбірливості (чіткості) тексту, що погіршується при значній реверберації.

### 1.5 Практична побудова студій звукозапису

Методи звукоізоляції приміщення. Є декілька методів, що здатні звести провідність звуків практично до нуля:

– побудова «кімнати в кімнаті», дуже трудомісткий і дорогий процес, але найдієвіший і надійний.

– штукатурення стін;

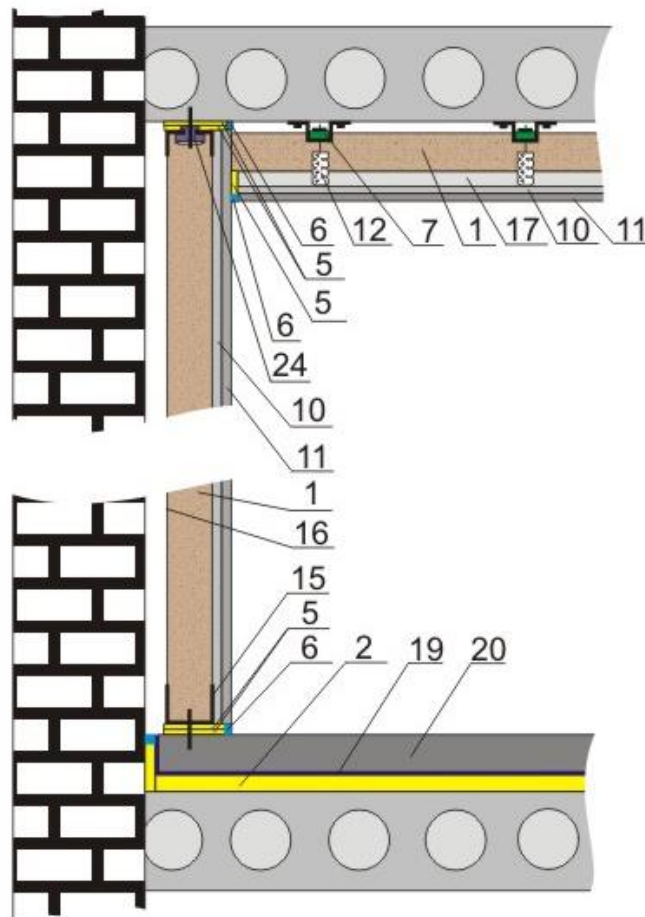
– використання акустичного поролону.

Метод обирається в залежності від необхідного результату і від наявних фінансових можливостей, крім того можливою є комбінація цих методів.

### Звукоізоляція «кімната в кімнаті».

Суть підходу полягає в тому, що у приміщенні влаштовується так звана "плаваюча" підлога, звукоізоляційне облицювання стін і стелі. При цьому робиться це таким чином, щоби виключалися непрямі шляхи передачі шуму.

Один з прикладів такої конструкції наведено на рис.1.5.



1 – акустична мінеральна вата; 2 – звукоізолюючі плити з мінерального волокна; 3 – звукоізолююче кріплення Vibrofix Floor; 4 – звукоізоляційна мембрана Vibrostop 5 мм; 5 – пружна прокладка з матеріалу «Vibrofix Tape» товщиною 3-5 мм; 6 – нетвердий силіконовий або поліуретановий герметик; 7 – звукоізолююче стельове кріплення; 8 – звукоізолююче стінне кріплення Vibrofix CD; 9 – універсальне звукоізолююче кріплення; 10 – гіпсокартонний лист товщиною 12,5 мм; 11 – гіпсокартонний лист товщиною 12,5 мм; 12 – П-подібний кронштейн (прямий підвіс); 13 – стельовий профіль ПП 60x27; 14 – направляючий профіль ПН 28x27; 15 – направляючий П-подібний металевий профіль ПН; 16 – стічний профіль; 17 – каркас підвісної стелі П212 в двох рівнях; 18 – акустичний шов; 19 – гідроізолюючий шар поліетилену; 20 – бетонна армована стяжка товщиною 60-80 мм; 21 – бетонна армована стяжка товщиною не менше 50 мм; 22 – плити ДСП товщиною 20-22 мм; 23 – дерев'яні лаги; 24 – звукоізоляційний направляючий профіль Vibrofix Liner; 25 – віброізолюючий опорний елемент з матеріалу Vibrofix Block; 26 – звукоізоляційний стельовий підвіс Vibrofix SP (з регульованим підвісом на спиці).

Рисунок 1.5 – Приклад звукоізоляції "кімната в кімнаті"

Починати доцільно з підлоги. Сама конструкція називається «плаваючою». Для його виготовлення необхідно взяти ізолюючий матеріал, типу «Шумопласт». Матеріал має бути по товщині не менше 2 см, так як необхідно заглушити всі шуми, включаючи звуки ударних.

Звукоізоляція підлоги в студії. Перше, що необхідно зробити – це закрити всі наявні дефекти і тріщини, для цього можна використовувати мінеральну вату або інший ізоляційний матеріал. Потім необхідно змонтувати дерев'яну обрешітку з бруса в 50 мм. Під брусом прокладається шумоізоляція в 20 мм.

Між брусами необхідно прокласти шумопласт – один з найкращих звукоізолюючих матеріалів. Потім монтується покриття, воно має бути наприклад з ОСБ 12-16 мм. Підлога готова, залишається тільки постелити ковровлін, але це необхідно буде зробити вже після усіх ізоляційних робіт. Загальна товщина стяжки і шару звукоізоляції має бути не менше 8 см.

Як тільки виконана підлога, приступають до монтажу звукоізоляційної стелі. Це може бути безкаркасний метод, або каркасний на системах «Віброфлекс», вони достатньо гарно поглинають вібрацію. Ізолюючий матеріал має бути товщиною від 20 до 60 мм, в залежності від товщини плит бетонних перекриттів.

На стелю монтується каркас, із використанням алюмінієвих профілів. Як тільки каркас готовий, прокладається ізоляційний матеріал і кріпиться гіпсокартон шляхом прикручування. Стеля готова, залишається тільки прошпаклювати і пофарбувати, але тільки після ізоляції стін.

Стіни ізолюються 3-м етапом. Якщо приміщення з високими стелями, і при цьому стіни в ньому рівні, то доцільно використати безкаркасні, незалежні облицювання, що спираються на підлогу і стелю. Монтувати подібну систему просто, але вона і коштує дорожче, ніж каркасна. На каркасних системах необхідно обов'язково використати віброізолюючі підвіси. На стіни, так само як і на стелю, монтується каркасна система із

профілів, які, так само, прокладаються ізоляційним матеріалом, і кріпляться гіпсокартон.

Як тільки всі монтажні роботи закінчені, можна перейти до обробки приміщення, стіни і стеля шпаклюються і облицьовуються.

Вікна та двері є останнім етапом у повній звукоізоляції кімнати. Варто відмітити, що входні двері доведеться замінити на важкі з великим пластом щільного утеплювача всередині. Для вікон в даній ситуації передбачається встановлення другого блоку скла з 5-камерним склопакетом.

Звукоізоляція шляхом штукатурки і стяжки.

Першою виконують стяжку на підлозі. Для цього треба розібрати старе підлогове покриття, очистити поверхню від будівельного пилу і сміття, заґрунтувати. Далі за рівнем виставляються маячкові профілі, при тому висота стяжки має бути не менше 5 ... 8 см.

Як тільки стяжка висохне не менше тижня, можна приступати до наступного етапу.

Штукатурка.

Треба зняти старе покриття зі стін до бетону, добре заґрунтувати поверхню. Закрити усі наявні тріщини у стінах, гарно підійде монтажна піна. Особливу увагу слід приділити місцям з'єднання стін зі стелею.

Далі виставити маячки по периметру стін на відстані 1,5 м один від одного. Маячковий профіль встановлюється за рівнем так, щоби на виході вийшов шар штукатурки не менше 4 см, інакше потрібного результату в ізоляції не вийде.

Як тільки штукатурка просохне, треба буде зашпаклювати стіни і нанести облицьовальні покриття. Для звукоізоляції стін штукатуркою потрібно вибрати матеріал із ізоляційними якостями на цементній основі.

На стелю треба змонтувати підвісну конструкцію із гіпсокартону з прокладкою звукоізолюючого матеріалу, як описано у першому випадку.

Акустичний поролон.

Цей матеріал може зменшити шум двох типів всередині приміщення:

- коливання, які поширюються через молекули повітря;
- ударні вібрації.

Акустичний поролон виготовляють у вигляді панелей різного розміру (рис.1.6), що можуть мати рельєфну і безрельєфну поверхню.



Рисунок 1.6 – Застосування акустичного поролону в студії

Рельєфні панелі нейтралізують звукові хвилі і подавляють імпульси вібрацій, мають профіль у вигляді пірамід або хвиль, що додає дифузності відбитим хвилям і надає приміщенню оригінальний і незвичний вигляд.

Панелі з рівним профілем усувають будь-які шуми, але для обробки студії вони мало придатні, тому що набагато менше поглинають ударні вібрації. Застосовується цей матеріал, в тому числі, в квартирах з маленькими дітьми, в яких потрібно трохи зменшити рівень шуму, і немає сильних ударних коливань.

Застосування ізоляційного поролону в студіях звукозапису.

Приміщення, де відбуваються постійні репетиції та запис музики – це основне місце використання рельєфного матеріалу. В більшості випадків панелі розташовуються по всьому периметру студії, включаючи стелі і спеціальні звукопоглинальні екрани.



Рельєфні панелі розташовуються всередині студії (рис.1.7), якщо не виконана попередня звукоізоляція підлоги, то їх можна установити під підлогове покриття, попередньо встановивши обрешітку з брусів. Якщо дизайн студії передбачає рівні фарбовані стіни, то акустичний поролон кріпиться як звичайний утеплювач при монтажі типу «кімната в кімнаті».



Рисунок 1.7 – Рельєфні панелі в студії

Акустичний поролон не можна м'яти і деформувати, оскільки будь-які заломы на матеріалі призводять до зниження його ефективності.

Поролон для звукопоглинання монтується на основу на звичайний клей або двосторонній будівельний скотч. Якщо стіна має сильну кривизну, то її можна вирівняти листами ДВП, які і стануть основою, на яку можна змонтувати поролон.

Матеріал випускається у досить широкому діапазоні товщин від 5 до 100 мм. Критерії вибору матеріалу будуть залежати від того, яку кількість шумового забруднення необхідно усунути, для досягнення якісного звучання апаратури або людського голосу.

Чим гучніше звук, тим товща потрібна буде панель звукопоглинаючого поролону. Наприклад, якщо необхідно звукоізолювати студію в квартирі, то застосовується панель з максимальною товщиною.

## 2 МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРИМІЩЕННІ СТУДІЇ ЗВУКОЗАПИСУ В ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ EASE

### 2.1 Особливості використання програмного забезпечення акустичного моделювання EASE

EASE (Electro-Acoustic Simulator for Engineers) – програмне забезпечення, що є незамінним інструментом для розробників систем озвучування. EASE дозволяє моделювати роботу звукових систем на майданчиках різної складності (студії, церкви та собори, стадіони, арени, театри тощо). Крім того, EASE пропонує деякі інструменти, призначені для інженерів та консультантів з акустики.

EASE дозволяє:

- створити тривимірну модель роботи акустичної системи у приміщенні;
- конструювати кластери та лінійні масиви, а також аналізувати їх можливості;
- проаналізувати акустичні властивості будь-якої обраної точки приміщення;
- імпульсна характеристика акустичної системи може бути представлена різних варіантах;
- відстежувати та підраховувати відображення звуку в приміщенні;
- створити звукове зображення акустичного сигналу у вибраній точці передбачуваного приміщення.

У програмному забезпеченні EASE є велика кількість окремих програм, з'єднаних в єдину основу – EASE Main. Підпрограми забезпечення умовно можна розділити на декілька груп [10,11]:

1. Підпрограми акустичного моделювання – дозволяють створювати і редагувати модель приміщення, розглядати акустичні процеси, які відбуваються в зоні дослідження як в цілому, так і локально в певній точці.

Можна візуально показати процес розповсюдження звукових хвиль від джерела по усьому приміщенню.

2. Допоміжні підпрограми – бази даних матеріалів, гучномовців, джерел світла і текстур (для дизайну приміщення).

3. Додаткові модулі – за допомогою них можна створити нові і редагувати вже присутні в базі матеріали, гучномовці, джерела світла.

Моделювання здійснимо так. Спочатку створимо модель приміщення, призначимо для поверхонь звукопоглинальні матеріали. Після цього можна обчислити середньозважений час реверберації приміщення.

Потім за необхідності шляхом підбору матеріалів і геометрії поверхонь отримаємо потрібний результат.

Після того оберемо гучномовці (за потужністю, АЧХ, діаграмою спрямованості), визначимо їх розташування і напрямок випромінення, межі місць розташування виконавців і мікрофонів. Після цього досліджуємо акустичні властивості приміщення в площині розташування місць для мікрофонів.

Методом послідовних наближень будемо домагатися необхідного результату. Після цього роботу акустичного інженера-проектувальника можна вважати закінченою.

Є декілька обмежень для правильної роботи програми [10,11]:

– важливо щоби все приміщення було «закритим», кілька точок не мають бути з однаковими координатами, всі точки мають належати площинам, площини не можуть перетинатися;

– рекомендується проектувати більшу частину приміщення і розміщувати площини аудиторії з від'ємного боку осі  $u$ ;

– в програмі використовується розрахунок двосторонніх площин. Площині призначають певний тип матеріалу з обох сторін, причому матеріали можуть бути з різними характеристиками. Якщо друга сторона площини не бере участі у процесі розповсюдження звукових хвиль, то вона не бере участі у розрахунках.

Перелік модельованих характеристик [10,11]:

- Direct SPL – звуковий тиск прямої хвилі;
- Total SPL – сумарний звуковий тиск прямої і відбитих хвиль;
- Lspk Overlap – перекриття діаграм спрямованості гучномовців;
- D/R Ratio – відношення прямої і відбитої хвиль;
- Arrival Time – час приходу прямої звукової хвилі від джерела;
- C (Clarity) – ясність звучання;
- Pressure Levels – рівні звукового тиску;
- Alcons (Articulation Loss) – втрати артикуляції;
- RaSTI (Rapid Speech Transmission Index) – швидкий індекс передачі

мови.

В наших дослідженнях найбільш важливими є 5 характеристик: Total SPL, Direct SPL, D/R Ratio, Alcons, C(50). Виконаємо більш детальний аналіз цих характеристик [10,11].

## 2.2 Аналіз модельованих параметрів

1. Direct SPL – найчастіше за все використовується при моделюванні і є ознакою правильного розташування гучномовців. Треба отримати максимально рівномірний розподіл поля прямої хвилі. Прийнято вважати, що акустична система розташована правильно у тому випадку, якщо нерівномірність звукового тиску у зоні озвучення знаходиться у межах +/- 3дБ. Чим меншою є нерівномірність, тим краще.

2. Total SPL – показує суму прямої і відбитої звукової енергії в дБ. Згідно експертних досліджень найбільш комфортно сприймається звук із загальним рівнем 75 дБ.

3. D/R Ratio – показує відношення енергій прямої звукової хвилі до відбитої, виражене в дБ. Для розбірливості звуку потрібно, щоби відношення D / R було більше ніж -10 дБ.

4. Arrival Time – час приходу прямого звуку від гучномовців (вимірюється в мс). Дана величина оцінюється в розподілених системах озвучення і не має перевищувати 70 мс.

5. C50 – відношення звукових енергій в перші 50 мс і після 50 мс. Застосовується, щоби продемонструвати ясність сприйняття мовлення. Будь-яка величина більше 0 дБ в кімнаті з нормальною реверберацією забезпечує гарну ясність звуку.

6. Alcons (Articulation Loss Alcons) – втрати артикуляції – використовується для оцінювання розбірливості мови.

Градації чіткості мови згідно параметра Alcons : 0 ... 7% – відмінно; 7 ... 11% – добре; 11 ... 15% – посередньо; 15 ... 18% – задовільно; більше 18% – незадовільно.

7. RaSTI – це інший спосіб оцінки розбірливості. Для розрахунків параметра RaSTI EASE застосовує модифіковану формулу ALcons. Ясність вимірюється за шкалою від 0 до 1, де 1 відповідає максимальній розбірливості.

Довідкові значення розбірливості у відповідності з параметром RaSTI: 0,6 ... 1 – відмінна розбірливість; 0,45 ... 0,6 – хороша; 0,3 ... 0,45 – часткова; 0 ... 0,3 – незадовільна розбірливість.

8. RT60 – Reverberation Time – час стандартної реверберації – час затухання звуку на 60 дБ після вимкнення джерела. EASE застосовує формули Ейрінга і Себіна для обчислення часу реверберації на основі геометрії моделі і звукопоглинальних характеристик матеріалів. Ці обчислення надалі застосовуються для обчислень інших критеріїв, таких як Alcons, Rasti, відношення D / R і т.д.

Точність даних узагальнених математичних виразів змінюється в залежності від типу приміщення. Формула Себіна є більш точною у великих кімнатах з малою кількістю поверхневих матеріалів, в той же час як формула Ейрінга дає кращі результати в менших кімнатах, що мають більш широке розмаїття звукопоглинаючих матеріалів.

### 2.3 Результати моделювання акустики студії

Тип приміщення: мала студія звукозапису (вокальна кімната).

Розміри приміщення: довжина – 2900 мм, ширина – 3100 мм, висота – 2500 мм.

Число виконавців: 1...2,

Площа крісла 1 м<sup>2</sup>.

Двері: 1, розмір 2х0,6 м.

Вікно в операторську: 1, розмір 0,6х0,5 м.

Початкові матеріали: підлога – паркет; крісла м'які, обшиті тканиною (2); стіни і стеля –штукатурка вапно; двері – деревина соснова лакована.

План приміщення малої студії звукозапису показано на рис.2.1.

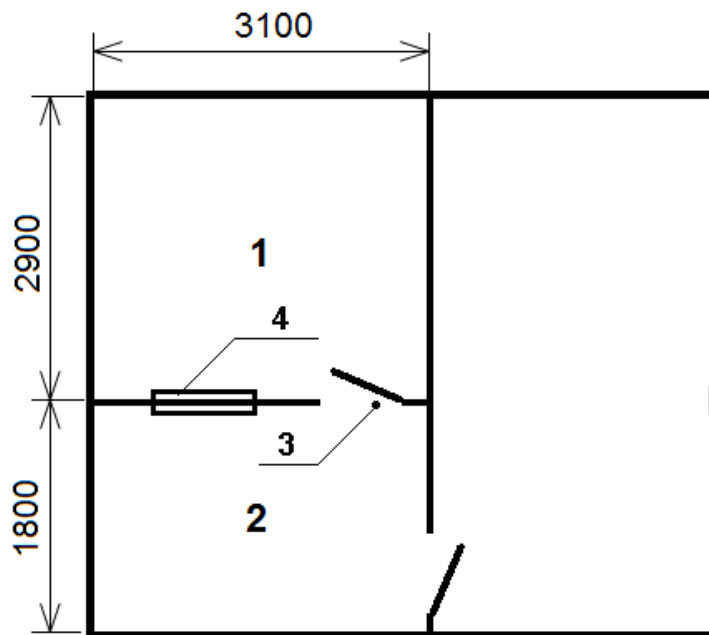



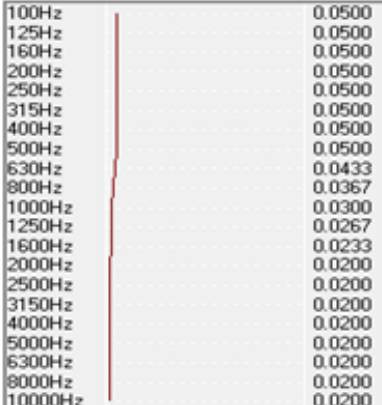

Рисунок 2.1 – План приміщення малої студії звукозапису  
(1 – вокальна кімната, 2 – апаратна, 3 – двері, 4 – вікно в апаратну)

У підпрограмі Project Data програмного забезпечення EASE створена 3D модель приміщення студії. У моделі як окремі поверхні створено стіни, стеля, підлога, двері, вікно. У якості поверхні, в якій будуть розраховані акустичні характеристики, створена площина для розташування мікрофонів.




Площина розташована на відстані 1,5 м від підлоги, тобто приблизно на рівні мовного апарату людини, яка стоїть.

Кожній поверхні призначено відповідний матеріал, що представлений в моделі у вигляді частотної характеристики коефіцієнта звукопоглинання (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Характеристики акустичних матеріалів

Місце розташування	Назва в середовищі EASE	Частотна характеристика звукопоглинання																																										
1	2	3																																										
Підлога	CARPT COMM Технічний килим	 <table border="1"> <tr><td>100Hz</td><td>0.0300</td></tr> <tr><td>125Hz</td><td>0.0300</td></tr> <tr><td>160Hz</td><td>0.0367</td></tr> <tr><td>200Hz</td><td>0.0433</td></tr> <tr><td>250Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>315Hz</td><td>0.0633</td></tr> <tr><td>400Hz</td><td>0.0767</td></tr> <tr><td>500Hz</td><td>0.0900</td></tr> <tr><td>630Hz</td><td>0.1367</td></tr> <tr><td>800Hz</td><td>0.1833</td></tr> <tr><td>1000Hz</td><td>0.2300</td></tr> <tr><td>1250Hz</td><td>0.2800</td></tr> <tr><td>1600Hz</td><td>0.3300</td></tr> <tr><td>2000Hz</td><td>0.3800</td></tr> <tr><td>2500Hz</td><td>0.4333</td></tr> <tr><td>3150Hz</td><td>0.4867</td></tr> <tr><td>4000Hz</td><td>0.5400</td></tr> <tr><td>5000Hz</td><td>0.5967</td></tr> <tr><td>6300Hz</td><td>0.6533</td></tr> <tr><td>8000Hz</td><td>0.7100</td></tr> <tr><td>10000Hz</td><td>0.7100</td></tr> </table>	100Hz	0.0300	125Hz	0.0300	160Hz	0.0367	200Hz	0.0433	250Hz	0.0500	315Hz	0.0633	400Hz	0.0767	500Hz	0.0900	630Hz	0.1367	800Hz	0.1833	1000Hz	0.2300	1250Hz	0.2800	1600Hz	0.3300	2000Hz	0.3800	2500Hz	0.4333	3150Hz	0.4867	4000Hz	0.5400	5000Hz	0.5967	6300Hz	0.6533	8000Hz	0.7100	10000Hz	0.7100
100Hz	0.0300																																											
125Hz	0.0300																																											
160Hz	0.0367																																											
200Hz	0.0433																																											
250Hz	0.0500																																											
315Hz	0.0633																																											
400Hz	0.0767																																											
500Hz	0.0900																																											
630Hz	0.1367																																											
800Hz	0.1833																																											
1000Hz	0.2300																																											
1250Hz	0.2800																																											
1600Hz	0.3300																																											
2000Hz	0.3800																																											
2500Hz	0.4333																																											
3150Hz	0.4867																																											
4000Hz	0.5400																																											
5000Hz	0.5967																																											
6300Hz	0.6533																																											
8000Hz	0.7100																																											
10000Hz	0.7100																																											
Стіни	GYP12.5MMB Гіпсокартон / Стіна (суха кладка)	 <table border="1"> <tr><td>100Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>125Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>160Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>200Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>250Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>315Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>400Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>500Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>630Hz</td><td>0.0433</td></tr> <tr><td>800Hz</td><td>0.0367</td></tr> <tr><td>1000Hz</td><td>0.0300</td></tr> <tr><td>1250Hz</td><td>0.0267</td></tr> <tr><td>1600Hz</td><td>0.0233</td></tr> <tr><td>2000Hz</td><td>0.0200</td></tr> <tr><td>2500Hz</td><td>0.0200</td></tr> <tr><td>3150Hz</td><td>0.0200</td></tr> <tr><td>4000Hz</td><td>0.0200</td></tr> <tr><td>5000Hz</td><td>0.0200</td></tr> <tr><td>6300Hz</td><td>0.0200</td></tr> <tr><td>8000Hz</td><td>0.0200</td></tr> <tr><td>10000Hz</td><td>0.0200</td></tr> </table>	100Hz	0.0500	125Hz	0.0500	160Hz	0.0500	200Hz	0.0500	250Hz	0.0500	315Hz	0.0500	400Hz	0.0500	500Hz	0.0500	630Hz	0.0433	800Hz	0.0367	1000Hz	0.0300	1250Hz	0.0267	1600Hz	0.0233	2000Hz	0.0200	2500Hz	0.0200	3150Hz	0.0200	4000Hz	0.0200	5000Hz	0.0200	6300Hz	0.0200	8000Hz	0.0200	10000Hz	0.0200
100Hz	0.0500																																											
125Hz	0.0500																																											
160Hz	0.0500																																											
200Hz	0.0500																																											
250Hz	0.0500																																											
315Hz	0.0500																																											
400Hz	0.0500																																											
500Hz	0.0500																																											
630Hz	0.0433																																											
800Hz	0.0367																																											
1000Hz	0.0300																																											
1250Hz	0.0267																																											
1600Hz	0.0233																																											
2000Hz	0.0200																																											
2500Hz	0.0200																																											
3150Hz	0.0200																																											
4000Hz	0.0200																																											
5000Hz	0.0200																																											
6300Hz	0.0200																																											
8000Hz	0.0200																																											
10000Hz	0.0200																																											
Стеля	PLAST/TILE	 <table border="1"> <tr><td>100Hz</td><td>0.0100</td></tr> <tr><td>125Hz</td><td>0.0100</td></tr> <tr><td>160Hz</td><td>0.0100</td></tr> <tr><td>200Hz</td><td>0.0100</td></tr> <tr><td>250Hz</td><td>0.0100</td></tr> <tr><td>315Hz</td><td>0.0133</td></tr> <tr><td>400Hz</td><td>0.0167</td></tr> <tr><td>500Hz</td><td>0.0200</td></tr> <tr><td>630Hz</td><td>0.0233</td></tr> <tr><td>800Hz</td><td>0.0267</td></tr> <tr><td>1000Hz</td><td>0.0300</td></tr> <tr><td>1250Hz</td><td>0.0333</td></tr> <tr><td>1600Hz</td><td>0.0367</td></tr> <tr><td>2000Hz</td><td>0.0400</td></tr> <tr><td>2500Hz</td><td>0.0433</td></tr> <tr><td>3150Hz</td><td>0.0467</td></tr> <tr><td>4000Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>5000Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>6300Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>8000Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>10000Hz</td><td>0.0500</td></tr> </table>	100Hz	0.0100	125Hz	0.0100	160Hz	0.0100	200Hz	0.0100	250Hz	0.0100	315Hz	0.0133	400Hz	0.0167	500Hz	0.0200	630Hz	0.0233	800Hz	0.0267	1000Hz	0.0300	1250Hz	0.0333	1600Hz	0.0367	2000Hz	0.0400	2500Hz	0.0433	3150Hz	0.0467	4000Hz	0.0500	5000Hz	0.0500	6300Hz	0.0500	8000Hz	0.0500	10000Hz	0.0500
100Hz	0.0100																																											
125Hz	0.0100																																											
160Hz	0.0100																																											
200Hz	0.0100																																											
250Hz	0.0100																																											
315Hz	0.0133																																											
400Hz	0.0167																																											
500Hz	0.0200																																											
630Hz	0.0233																																											
800Hz	0.0267																																											
1000Hz	0.0300																																											
1250Hz	0.0333																																											
1600Hz	0.0367																																											
2000Hz	0.0400																																											
2500Hz	0.0433																																											
3150Hz	0.0467																																											
4000Hz	0.0500																																											
5000Hz	0.0500																																											
6300Hz	0.0500																																											
8000Hz	0.0500																																											
10000Hz	0.0500																																											

Продовження табл 2.1

1	2	3																																										
Звукопоглинаючі акустичні панелі	WOOL GRID6	 <table border="1"> <tr><td>100Hz</td><td>0.0300</td></tr> <tr><td>125Hz</td><td>0.0300</td></tr> <tr><td>160Hz</td><td>0.0367</td></tr> <tr><td>200Hz</td><td>0.0433</td></tr> <tr><td>250Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>315Hz</td><td>0.0633</td></tr> <tr><td>400Hz</td><td>0.0767</td></tr> <tr><td>500Hz</td><td>0.0900</td></tr> <tr><td>630Hz</td><td>0.1367</td></tr> <tr><td>800Hz</td><td>0.1833</td></tr> <tr><td>1000Hz</td><td>0.2300</td></tr> <tr><td>1250Hz</td><td>0.2800</td></tr> <tr><td>1600Hz</td><td>0.3300</td></tr> <tr><td>2000Hz</td><td>0.3800</td></tr> <tr><td>2500Hz</td><td>0.4333</td></tr> <tr><td>3150Hz</td><td>0.4867</td></tr> <tr><td>4000Hz</td><td>0.5400</td></tr> <tr><td>5000Hz</td><td>0.5967</td></tr> <tr><td>6300Hz</td><td>0.6533</td></tr> <tr><td>8000Hz</td><td>0.7100</td></tr> <tr><td>10000Hz</td><td>0.7100</td></tr> </table>	100Hz	0.0300	125Hz	0.0300	160Hz	0.0367	200Hz	0.0433	250Hz	0.0500	315Hz	0.0633	400Hz	0.0767	500Hz	0.0900	630Hz	0.1367	800Hz	0.1833	1000Hz	0.2300	1250Hz	0.2800	1600Hz	0.3300	2000Hz	0.3800	2500Hz	0.4333	3150Hz	0.4867	4000Hz	0.5400	5000Hz	0.5967	6300Hz	0.6533	8000Hz	0.7100	10000Hz	0.7100
100Hz	0.0300																																											
125Hz	0.0300																																											
160Hz	0.0367																																											
200Hz	0.0433																																											
250Hz	0.0500																																											
315Hz	0.0633																																											
400Hz	0.0767																																											
500Hz	0.0900																																											
630Hz	0.1367																																											
800Hz	0.1833																																											
1000Hz	0.2300																																											
1250Hz	0.2800																																											
1600Hz	0.3300																																											
2000Hz	0.3800																																											
2500Hz	0.4333																																											
3150Hz	0.4867																																											
4000Hz	0.5400																																											
5000Hz	0.5967																																											
6300Hz	0.6533																																											
8000Hz	0.7100																																											
10000Hz	0.7100																																											
Двері	DOOR HOLLW	 <table border="1"> <tr><td>100Hz</td><td>0.1500</td></tr> <tr><td>125Hz</td><td>0.1500</td></tr> <tr><td>160Hz</td><td>0.1333</td></tr> <tr><td>200Hz</td><td>0.1167</td></tr> <tr><td>250Hz</td><td>0.1000</td></tr> <tr><td>315Hz</td><td>0.0867</td></tr> <tr><td>400Hz</td><td>0.0733</td></tr> <tr><td>500Hz</td><td>0.0600</td></tr> <tr><td>630Hz</td><td>0.0667</td></tr> <tr><td>800Hz</td><td>0.0733</td></tr> <tr><td>1000Hz</td><td>0.0800</td></tr> <tr><td>1250Hz</td><td>0.0867</td></tr> <tr><td>1600Hz</td><td>0.0933</td></tr> <tr><td>2000Hz</td><td>0.1000</td></tr> <tr><td>2500Hz</td><td>0.0833</td></tr> <tr><td>3150Hz</td><td>0.0667</td></tr> <tr><td>4000Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>5000Hz</td><td>0.0400</td></tr> <tr><td>6300Hz</td><td>0.0300</td></tr> <tr><td>8000Hz</td><td>0.0200</td></tr> <tr><td>10000Hz</td><td>0.0200</td></tr> </table>	100Hz	0.1500	125Hz	0.1500	160Hz	0.1333	200Hz	0.1167	250Hz	0.1000	315Hz	0.0867	400Hz	0.0733	500Hz	0.0600	630Hz	0.0667	800Hz	0.0733	1000Hz	0.0800	1250Hz	0.0867	1600Hz	0.0933	2000Hz	0.1000	2500Hz	0.0833	3150Hz	0.0667	4000Hz	0.0500	5000Hz	0.0400	6300Hz	0.0300	8000Hz	0.0200	10000Hz	0.0200
100Hz	0.1500																																											
125Hz	0.1500																																											
160Hz	0.1333																																											
200Hz	0.1167																																											
250Hz	0.1000																																											
315Hz	0.0867																																											
400Hz	0.0733																																											
500Hz	0.0600																																											
630Hz	0.0667																																											
800Hz	0.0733																																											
1000Hz	0.0800																																											
1250Hz	0.0867																																											
1600Hz	0.0933																																											
2000Hz	0.1000																																											
2500Hz	0.0833																																											
3150Hz	0.0667																																											
4000Hz	0.0500																																											
5000Hz	0.0400																																											
6300Hz	0.0300																																											
8000Hz	0.0200																																											
10000Hz	0.0200																																											
Вікно	WINDOW DS	 <table border="1"> <tr><td>100Hz</td><td>0.3500</td></tr> <tr><td>125Hz</td><td>0.3500</td></tr> <tr><td>160Hz</td><td>0.3167</td></tr> <tr><td>200Hz</td><td>0.2833</td></tr> <tr><td>250Hz</td><td>0.2500</td></tr> <tr><td>315Hz</td><td>0.2267</td></tr> <tr><td>400Hz</td><td>0.2033</td></tr> <tr><td>500Hz</td><td>0.1800</td></tr> <tr><td>630Hz</td><td>0.1600</td></tr> <tr><td>800Hz</td><td>0.1400</td></tr> <tr><td>1000Hz</td><td>0.1200</td></tr> <tr><td>1250Hz</td><td>0.1033</td></tr> <tr><td>1600Hz</td><td>0.0867</td></tr> <tr><td>2000Hz</td><td>0.0700</td></tr> <tr><td>2500Hz</td><td>0.0600</td></tr> <tr><td>3150Hz</td><td>0.0500</td></tr> <tr><td>4000Hz</td><td>0.0400</td></tr> <tr><td>5000Hz</td><td>0.0400</td></tr> <tr><td>6300Hz</td><td>0.0400</td></tr> <tr><td>8000Hz</td><td>0.0400</td></tr> <tr><td>10000Hz</td><td>0.0400</td></tr> </table>	100Hz	0.3500	125Hz	0.3500	160Hz	0.3167	200Hz	0.2833	250Hz	0.2500	315Hz	0.2267	400Hz	0.2033	500Hz	0.1800	630Hz	0.1600	800Hz	0.1400	1000Hz	0.1200	1250Hz	0.1033	1600Hz	0.0867	2000Hz	0.0700	2500Hz	0.0600	3150Hz	0.0500	4000Hz	0.0400	5000Hz	0.0400	6300Hz	0.0400	8000Hz	0.0400	10000Hz	0.0400
100Hz	0.3500																																											
125Hz	0.3500																																											
160Hz	0.3167																																											
200Hz	0.2833																																											
250Hz	0.2500																																											
315Hz	0.2267																																											
400Hz	0.2033																																											
500Hz	0.1800																																											
630Hz	0.1600																																											
800Hz	0.1400																																											
1000Hz	0.1200																																											
1250Hz	0.1033																																											
1600Hz	0.0867																																											
2000Hz	0.0700																																											
2500Hz	0.0600																																											
3150Hz	0.0500																																											
4000Hz	0.0400																																											
5000Hz	0.0400																																											
6300Hz	0.0400																																											
8000Hz	0.0400																																											
10000Hz	0.0400																																											

У місцях розташування виконавців знаходяться 2 "ідеальних" гучномовця.

На рис.2.2 показана 3D модель приміщення вокальної кімнати, створена в програмному забезпеченні EASE.



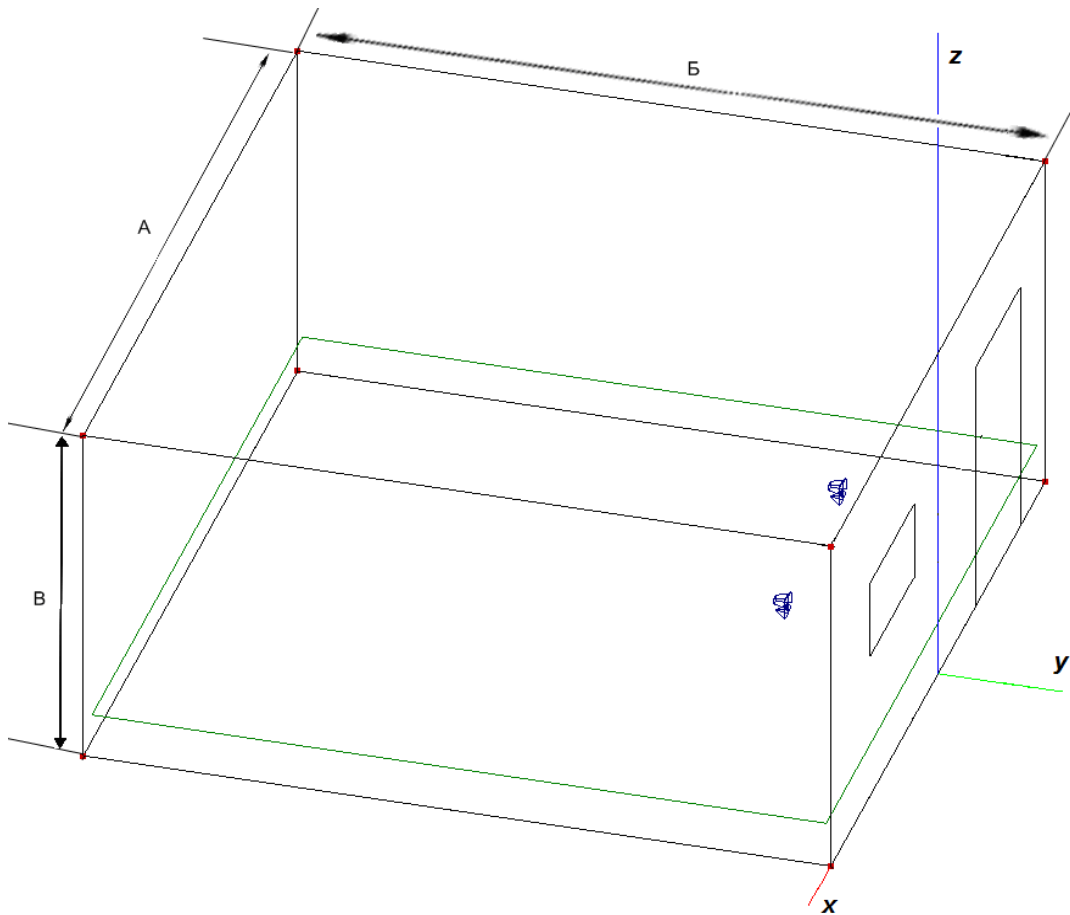


Рисунок 2.2 – Тривимірна модель вокальної кімнати в програмі EASE

Після створення 3D моделі виконано оцінку частотної характеристики часу реверберації. Вона наведена на рис.2.3.

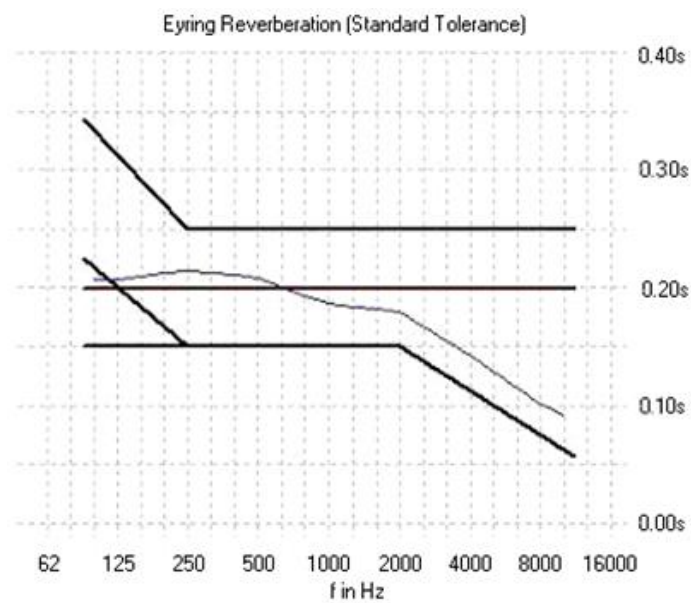


Рисунок 2.3 – Частотна характеристика часу реверберації

Як визначено раніше, оптимальним часом реверберації для студії звукозапису площі менше  $15 \text{ м}^2$  вважається значення від 0,2 до 0,3 с. На рис.2.4 представлено графік залежності часу реверберації від частоти в досліджуваній студії звукозапису. Також там представлені обмеження, які позначають припустимі значення кривої при цільовій реверберації 0,2 с.

Частотна характеристика часу реверберації в цілому вписується в допустимі межі. Порівнюючи отриману шляхом моделювання характеристику з розрахунковою можна зазначити, що модельний експеримент дав середню реверберацію близько на 0,05 с менше ніж розрахунковий. Зменшення часу реверберації є більш позитивним випадком в порівнянні зі збільшенням для малої вокальної кімнати.

Отримано розподіл рівня звуку прямої хвилі у вокальній кімнаті. Ця характеристика є дуже важливою для систем звукозапису, оскільки дозволяє зробити висновок про правильність розміщення виконавців.

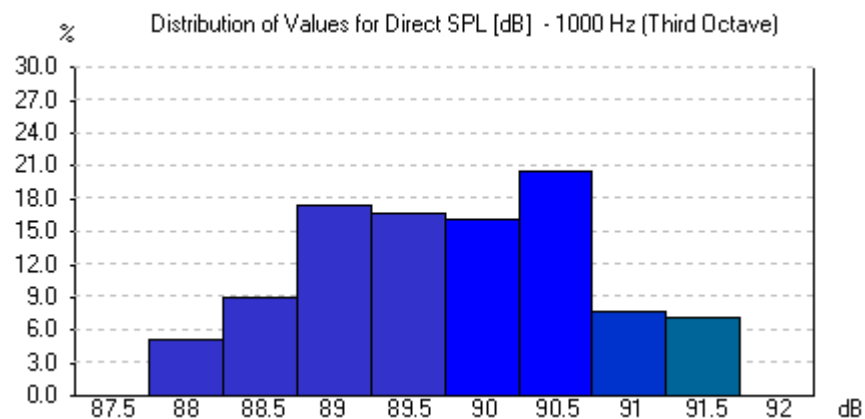


Рисунок 2.4 – Гістограма розподілу рівня звуку прямої хвилі у вокальній кімнаті

З рисунка видно, що звуковий тиск рівномірний, середнє значення звукового тиску на площі всієї зони прослуховування становить близько 90 дБ, розбіжність не перевищує  $\pm 2$  дБ. Це можна вважати хорошим показником, оскільки нормою вважається не більше ніж  $\pm 3$  дБ.

Гістограма розподілу загального рівня звукового тиску прямої і відбитих хвиль в площині мікрофонів показана на рис.2.5. Розподіл загального рівня звуку виходить ще більш рівномірним, розкид становить менше 1,5 дБ. Це вважається гарним показником для студії звукозапису.

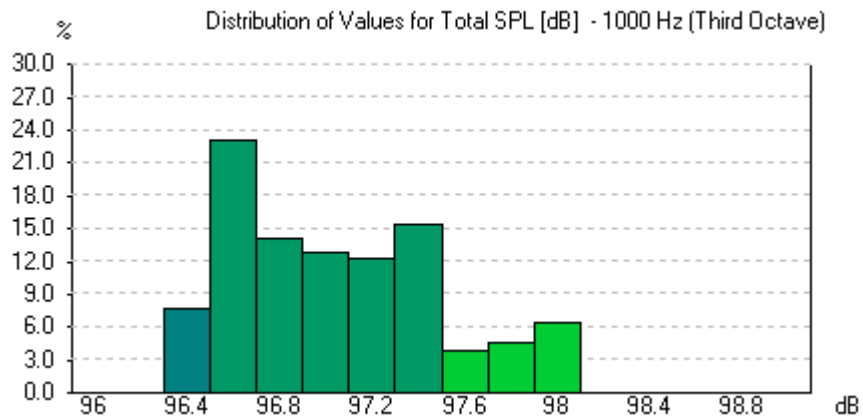


Рисунок 2.5 – Гістограма розподілу загального рівня звукового тиску прямої і відбитих хвиль у вокальній кімнаті

На рис.2.6 наведена гістограма розподілу рівня відношення звукового тиску прямої і відбитої хвилі в площині мікрофонів. Середнє значення складає 5 дБ, всі значення більше 0 і менше 9 дБ. Значення більше 0 дБ показують хорошу локалізацію джерела (гарне відношення D / R). Чим більше значення за 0 дБ, тим краще локалізація.

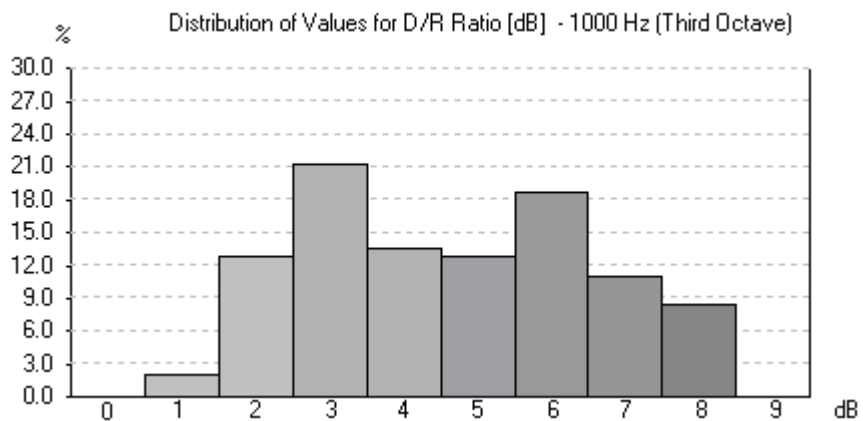


Рисунок 2.6 – Гістограма розподілу рівня відношення звукових тисків прямої і відбитої хвиль у вокальній кімнаті

На рис.2.7 наведена гістограма розподілу рівня відношення енергії звуку в перші 50 мс і після 50 мс. Параметр C50 служить для оцінки розбірливості звучання. Величина C50 більш ніж 0 дБ означає хорошу розбірливість мови.

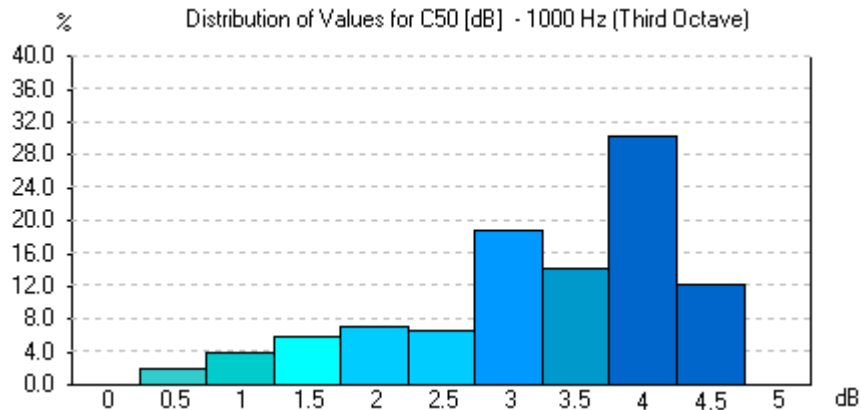


Рисунок 2.7 – Гістограма розподілу параметра C50 у вокальній кімнаті

"Alcons [%]" – це параметр втрат артикуляції мови, тобто відсоток приголосних, які не сприймаються. Інакше кажучи, цей показник враховує ті звукові складові мовлення, які відіграють значну роль для її розуміння.

Вважають, що за відсутності більше 15% приголосних (15% – Alcons) жодного з видів комунікації не може відбутися. На рис.2.8 видно, що значення Alcons в нашому випадку знаходиться в межах від 3,8% до 5,2%.

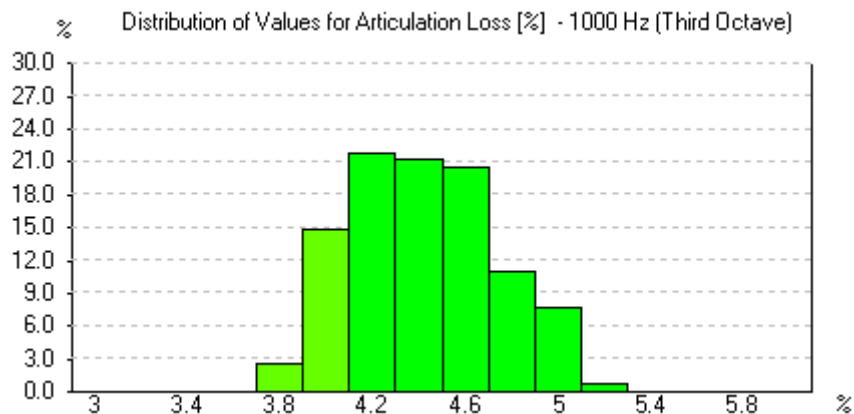


Рисунок 2.8 – Гістограма розподілу втрат артикуляції (Articulation Loss) у вокальній кімнаті

За одними результатами вважають [10], що Alcons нижче рівня 5% означає, що розбірливість мови можна оцінити як відмінну.

За іншою градацією розбірливість мови [11]: 0 ... 7% – відмінна; 7 ... 11% – добра; 11 ... 15% – посередня; 15 ... 18% – задовільна; вище 18% – незадовільна.

У нашому дослідженні параметр Articulation Loss не перевищує 5,2%. Тому можна вважати, що по обох варіантах градацій це відповідає відмінній розбірливості.

RaSTI – ще один із методів вимірювання розбірливості. Це модифікована за рівняннями Ф. Бекстєру формула Alcons. Шкала змінюється в межах від 0 до 1. Результати розрахунків RaSTI показані на рис.2.9.

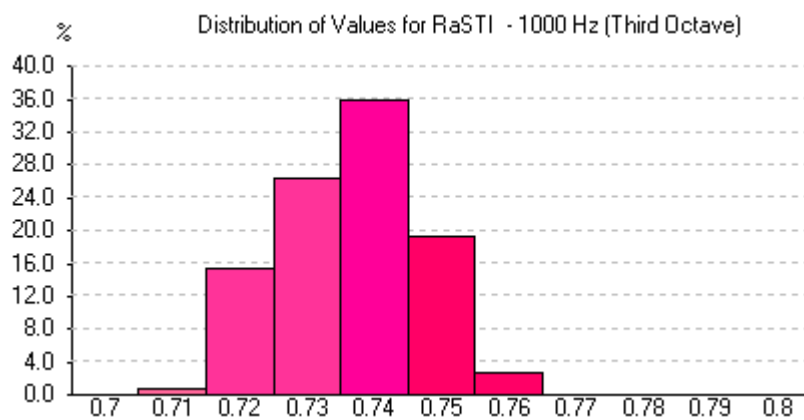


Рисунок 2.9 – Гістограма розподілу розбірливості по RaSTI у вокальній кімнаті

У розрахунках видно, що значення RaSTI знаходиться в межах від 0,71 до 0,76, що вважається відмінним результатом. Значення RaSTI за виразом Long Form [10,11] можна класифікувати так:

- від 0,6 до 1 – відмінно,
- від 0,45 до 0,6 – добре,
- від 0,3 до 0,45 – погано,
- від 0 до 0,3 – неприйнятно.

Рефлектограми – часові графіки відбиття для будь-якої точки звукового поля. Перші стовпці на рефлектограмі це рівень відбиттів від стін, стелі та підлоги. При виникненні луни (сприйняття одного і того самого сигналу як двох різних при взаємній затримці більше 50 мс) рефлектограма наочно

демонструє його у вигляді прогалин між інтенсивними відбиттями. Результати розрахунків рефлекторами показані на рис.2.10.

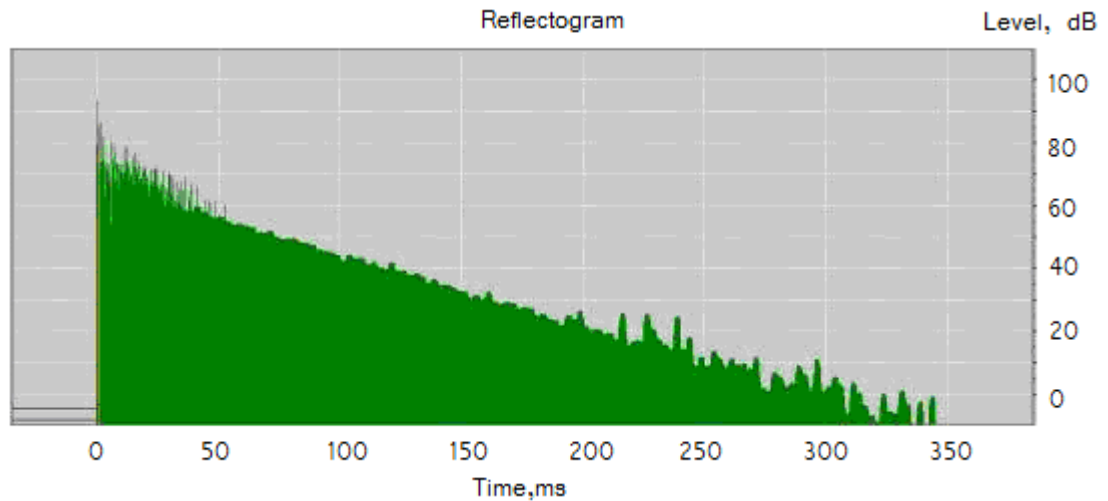


Рисунок 2.10 – Результати розрахунків рефлекторами у вокальній кімнаті

Характеристика "Frequency Response" (частотний відгук) демонструє загальний рівень залежності гучності від частоти. Результати моделювання частотного відгуку наведені на рис. 2.11.

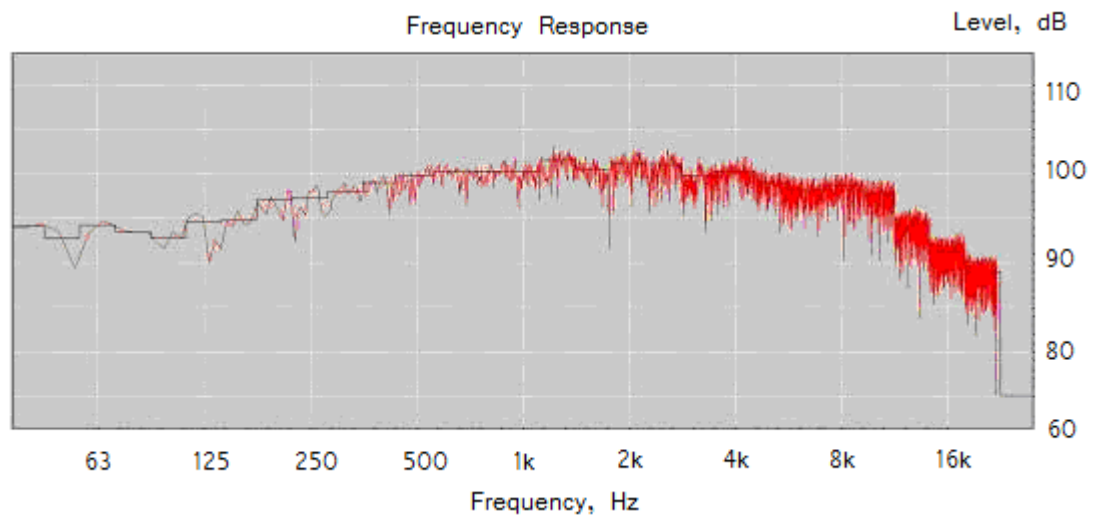


Рисунок 2.11 – Результати розрахунків частотного відгуку у вокальній кімнаті

Частоти, представлені на графіку, а саме з 500 Гц до 8 кГц, мають максимальний рівень гучності у вокальній кімнаті і складають загальний звуковий план.

Energy Time Curve (крива спаду енергії) – характеристика, близька за суттю до Impulse Response, але є більш об'єктивною порівнянні з рефлектограмою. Імітує спад звукової енергії після відтворення імпульсу і його запису на вимірювальний мікрофон. На відміну від рефлектограми, є показником спаду звукової енергії не на окремій частоті, а у діапазоні частот. Отримані результати моделювання говорять про відносно рівномірне спадіння звукової енергії на усіх частотах. Результати показані на рис.2.12.

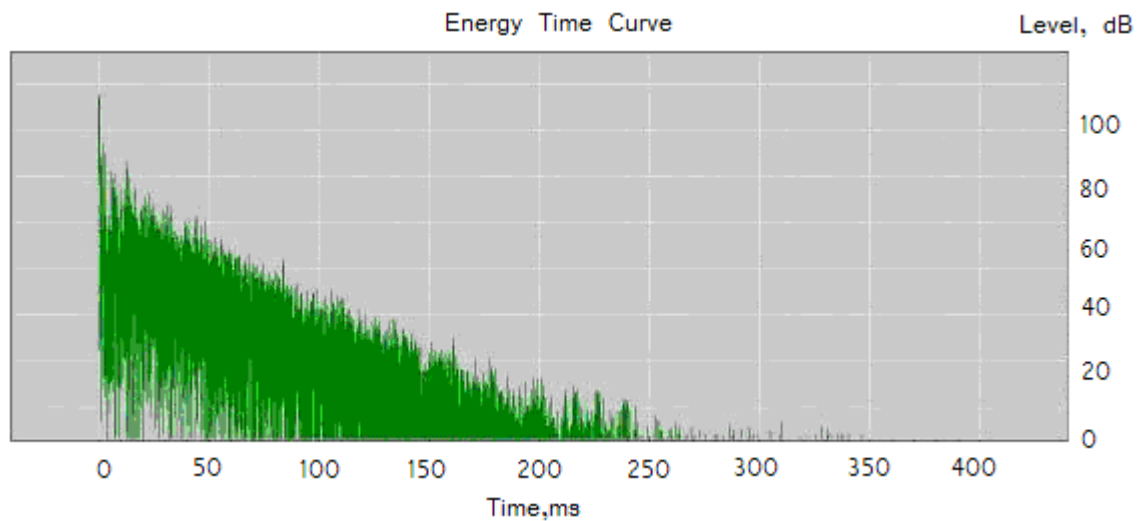


Рисунок 2.12 – Результати розрахунків Energy Time Curve у вокальній кімнаті

Характеристика "Waterfall" за суттю також є рефлектограмою, але являє собою її об'ємну форму, що показує не тільки графіки відбиттів і час затухання сигналу, але і рівномірність частотної характеристики. Результати розрахунку Waterfall показані на рис.2.13.

З рис. 2.13 слідує, що процес спаду звукової енергії є рівномірним як у часі, так і за частотою. Тобто немає жодних передумов для виникнення флатер-ехо або провалів у частотній характеристиці приміщення і так званого формантного звучання. Це свідчить про достатню якість акустичної обробки приміщення і достатно якісні акустичні показники студії звукозапису.

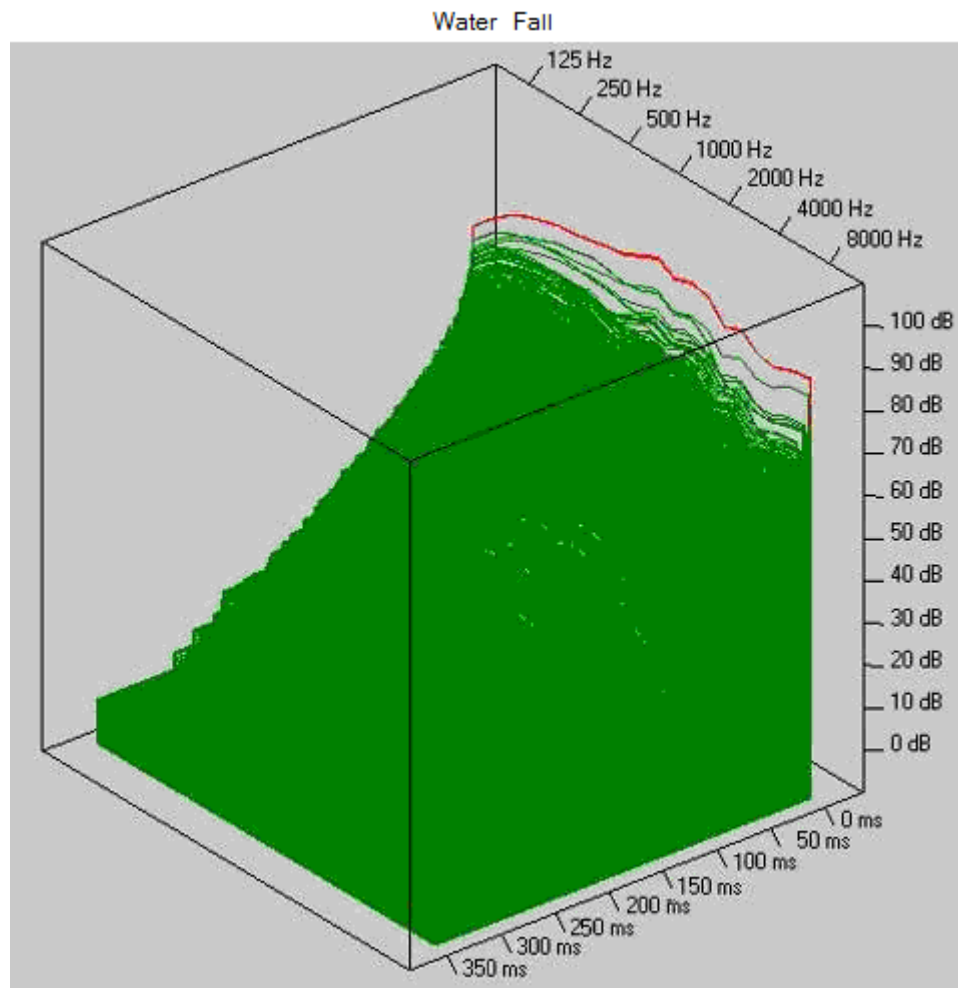


Рисунок 2.13 – Результати розрахунків Waterfall у вокальній кімнаті

Отже, моделювання акустичних характеристик вокальної кімнати студії звукозапису закінчено.



### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОКАЛЬНОЇ КІМНАТИ СТУДІЇ ЗВУКОЗАПИСУ

#### 3.1 План студії і акустичне оформлення

Дослідження виконані в приміщенні приватної студії звукозапису, план якої показаний на рис.3.1.

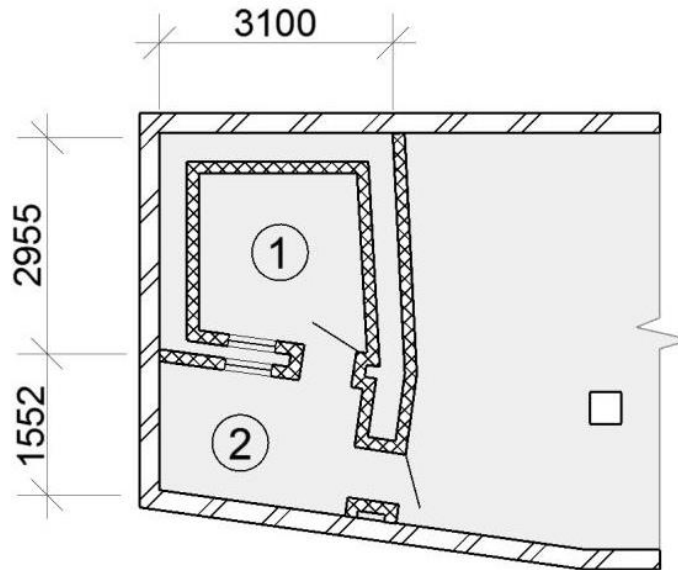


Рисунок 3.1 – План приміщення студії звукозапису  
(1 – приміщення вокальної кімнати, 2 – приміщення апаратної)

Відзначимо головні особливості приміщення. В цілому, звукове поле в вокальній кімнаті є сумою двох складових:

- прямого звуку джерела, який не зазнав ніякого відбиття;
- звуку, створеного відбитими хвилями звуку і хвилями від зовнішніх звукових джерел.

При цьому, в залежності від особливостей геометрії приміщення, крім традиційного зашумлення, на деяких частотах може мати місце ефект стоячої хвилі. Це відбувається, коли вздовж сторони приміщення укладається ціле число напівхвиль.

Резонансні частоти можна обчислити за формулою [2,8,9]:

$$f_{n,m,k} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n}{x}\right)^2 + \left(\frac{m}{y}\right)^2 + \left(\frac{k}{z}\right)^2}, \quad (3.1)$$

де  $x, y, z$  – розміри приміщення,

$n, m, k$  – цілі числа (моди).

У табл. 3.1 показані результати розрахунків резонансних частот при  $n, m, k \leq 3$ , а на рис.3.2 наведено спектр власних частот приміщення, що відповідає даним розрахункам.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків резонансних частот

Розміри кімнати		Резонансні частоти					
Довжина (м)	3,1	108	116	134	216	231	268
Ширина (м)	2,9	324	347	402	432	462	536
Висота (м)	2,5	540	578	670	648	693	804

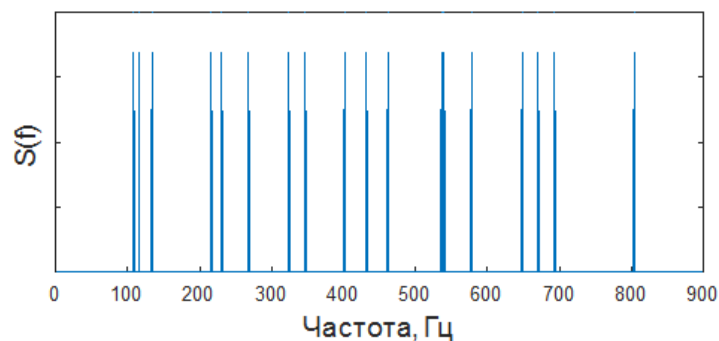


Рисунок 3.2 – Спектр власних частот вокальної кімнати

Для позбавлення від ефекту стоячої хвилі застосований поширений метод: необхідно уникати паралельних стін, що видно по плану-схемі приміщення вокальної кімнати на рис.3.1.

Задача зміни конфігурації стін була вирішена шляхом застосування каркасно-обшивних конструкцій із гіпсокартонних плит. Окремо зазначимо,

що вікно змонтоване під кутом відносно вертикальної площини, щоби звук відбивався вниз і поглинався підлогою [2,8].

Звукоізоляційні конструкції приміщення мають працювати як мембрани і бути здатними сильно гасити енергію звуку на НЧ. Чим більше звукопоглинання, тим менше шуму поширюється в приміщенні, де знаходиться джерело шуму.

Оскільки головне призначення студії є запис голосу диктора або вокаліста, то основними параметрами, що впливають на якість звукозапису є:

- зниження рівня зовнішнього шуму;
- час реверберації звуку на частотах, відповідних діапазону голосу диктора або вокаліста.

Фотографії на різних етапах обробки приміщення вокальної кімнати студії показані на рис.3.3.

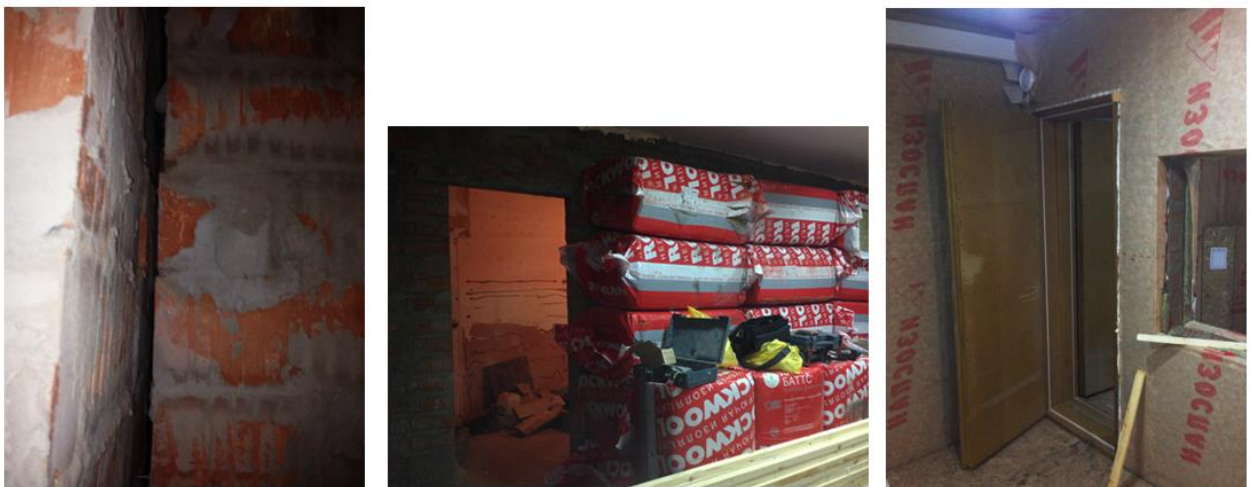


Рисунок 3.3 – Фотографії різних етапів обробки приміщення вокальної кімнати студії (а – ліквідація щілин в цегляній кладці, б – тюки з мінеральною ватою, в – гідроізоляція)

Розробимо методику вимірювання часу реверберації за допомогою джерела звуку, підключеного до персонального комп'ютера через підсилювач потужності. Таким чином в приміщенні створюються звукові хвилі, тиск яких реєструється в декількох точках за допомогою мікрофонів.

### 3.2 Розробка методики дослідження акустичних характеристик студії

Метою даного пункту є аналіз методики вимірювання і розрахунку загальних критеріїв акустики приміщення мовної і вокальної студії за допомогою програми EASERA [12].

В ході дослідження потрібно вирішити такі задачі:

- обрати звукові канали і налаштувати їх;
- відкалібрувати вимірювальні мікрофони;
- виконати вимірювання часу реверберації;
- отримати графіки залежності часу реверберації від частоти.

Для дослідження використана така апаратна частина:

- ноутбук Asus X507MA,
- зовнішня звукова карта E-MU Tracker Pro, підключена до ноутбука по USB 2.0,
- неспрямований мікрофон RAYLAB KINO EVENT-101,
- з'єднувальні кабелі.

Програмна частина: програмне середовище EASERA 1.3.3.

До загальних параметрів оцінки якості акустики залів відносять:

- час реверберації  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  і  $T_{30}$ ;
- ранній час спадіння (затухання) EDT;
- коефіцієнт низького тону BR.

Відомо, що час реверберації RT – це час, що проходить після того, як джерело звуку в приміщенні було вимкнене, до сталої нормальної щільності енергії  $w(t)$ , зменшеної у співвідношенні  $1/10^6$  від початкового значення  $w_0$ , тобто на 60 дБ.

Суб'єктивно сприйнята тривалість часу реверберації залежить від рівня сигналу збудження і від рівня шуму. Потрібного динамічного діапазону оцінки важко досягти навіть при об'єктивному вимірюванні, особливо в НЧ діапазоні. Тому, час реверберації визначається шляхом вимірювання затухання рівня звуку в діапазоні від -5 дБ до -35 дБ і називається  $T_{30}$ . Тобто

визначення моментів часу  $t_1, t_2$  здійснюються для двох порогів:  $\Pi_1 = -5$  дБ і  $\Pi_2 = -35$  дБ. Різницю у відповідних моментах часу слід помножити на 2:

$$T_{30} = 2 \cdot (t_2 - t_1). \quad (3.2)$$

Часто застосовуються [9,12] і інші значення другого порогу. Якщо установити  $\Pi_2 = -25$  дБ, тоді:

$$T_{20} = 3 \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.3)$$

Якщо  $\Pi_2 = -15$  дБ, то:

$$T_{10} = 6 \cdot (t_2 - t_1). \quad (3.4)$$

Кожне зі значень  $T_{10}, T_{20}, T_{30}$  має назву «пізнього часу реверберації» (late reverberation time).

При  $\Pi_1 = 0$  дБ і  $\Pi_2 = -10$  дБ визначають так званий «ранній час затухання» EDT (early decay time):

$$EDT = 6 \cdot (t_2 - t_1). \quad (3.5)$$

Початковий час реверберації (IRT,  $T_{15}$ , між -5 дБ і -20 дБ) і ранній час затухання (EDT,  $T_{10}$ , між 0 дБ і -10 дБ) скоріш відповідають суб'єктивній оцінці часу реверберації, особливо в приміщеннях з об'ємом малої величини.

Цей факт також пояснює, чому тривалість реверберації, суб'єктивно сприйнята в кімнаті, може змінитися, в той час як об'єктивні оцінки, отримані відповідно до класичного визначення із динамічним діапазоном 60 дБ або 30 дБ, за винятком невеликих коливань, взагалі незалежні від місця розташування мікрофону.

EASERA визначає часи реверберації T10, T20, T30 в частотно-зваженій формі (опціонально в третині октави або фільтрованої октаві) і відповідно до стандарту ISO3382 визначає їх енергетичними діапазонами:

- від -5 дБ до -15 дБ (T10),
- від -5 дБ до -25 дБ (T20)
- від -5 дБ до -35 дБ (T30).

Крутизна зворотно інтегрованого логарифмічного імпульсного відгуку приміщення (так званої ділянки Шредера) дозволяє виміряти час реверберації.

Для мінімізації помилки вимірювання через недостатнє відношення сигнал-шум необхідно обмежувати час інтегрування (час вимірювання). Рекомендується, щоб час вимірювання приблизно був становив від 0,6 до 0,7 від очікуваного часу реверберації  $T_{exp}$ . Це дозволяє отримати оптимальну криву реверберації з високим ступенем кореляції лінії регресії [12]. Додатково до обмеження часу вимірювання, застосовують процедури зниження шуму або його компенсації.

Окремим критерієм для частотної характеристики часу реверберації на НЧ є коефіцієнт низького тону (КНТ). КНТ визначає суб'єктивний параметр звуку, що зветься "теплота". Теплота – це відношення часу реверберації на НЧ до часу реверберації на СЧ. При цьому час реверберації на НЧ (125 Гц) має дорівнювати часу реверберації на СЧ (500, 1000 Гц), або бути більше приблизно на 20%.

"Теплота" суб'єктивно визначається експертами як милозвучність басів у порівнянні зі звучністю середніх частот. Вченим Беранеком був запропонований критерій КНТ – коефіцієнт низького тону, який дорівнює відношенню середнього часу реверберації на частотах 125 і 250 Гц до середнього часу реверберації на частотах 500 і 1000 Гц:

$$KHT = \frac{T_{20,125} + T_{20,250}}{T_{20,500} + T_{20,1000}}, \quad (3.6)$$

де  $T_{20,f}$  – значення часу реверберації T20 на відповідній частоті  $f$ .

Для музики, бажано мати значення КНТ –  $BR \approx 1 \dots 1,3$ , а для мови, навпаки, повинно бути найбільше значення  $BR \approx 0,9 \dots 1$ .

### 3.3 Методика досліджень акустичних характеристик вокальної кімнати

Для вимірювання EDT і часу реверберації застовується відгук на імпульсний вплив у приміщенні (RIR). Для цього:

1. Запускаємо програмне середовище EASERA 1.3.3.
2. Для початку досліджень заходимо в розділ Measurement в лівому вікні або у вкладку Measure в панелі зверху, після чого запуститься вікно вимірювань (рис.3.4).

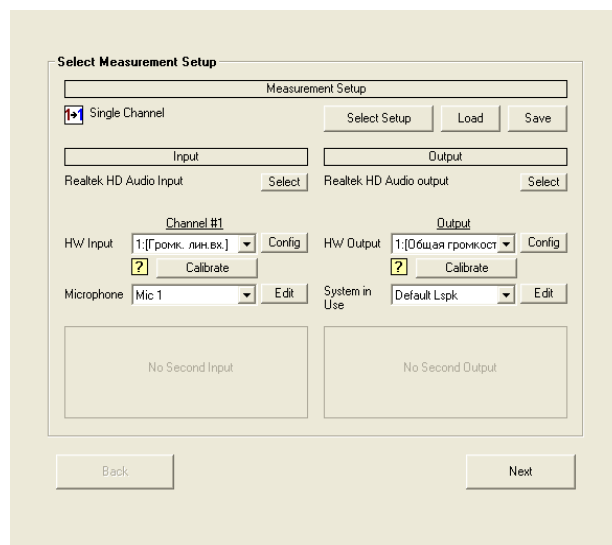


Рисунок 3.4 – Вікно налаштування вимірювань

3. Виконаємо вибір каналів, які будуть використовуватися. Для цього натиснемо кнопку Select Setup в лівій частині розділу Measurement Setup (рис.3.5). Для вимірювання оберемо режим Single Channel.

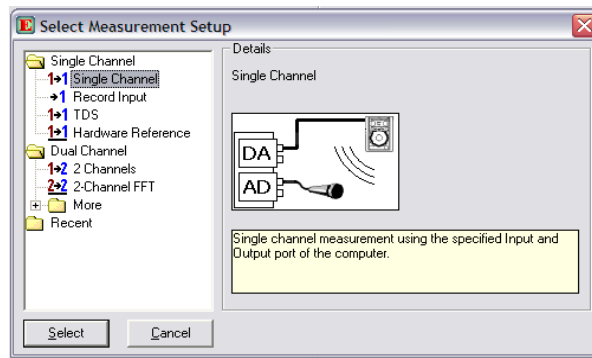


Рисунок 3.5 – Обрання каналів Select Measurement Setup

4. Потім у вікні вимірювань треба підключити звукову карту, яка буде застосовуватися. У лівій частині вікна (Input) за допомогою кнопки Select здійснюємо вхід у вікно налаштувань Device Options (рис.3.6).

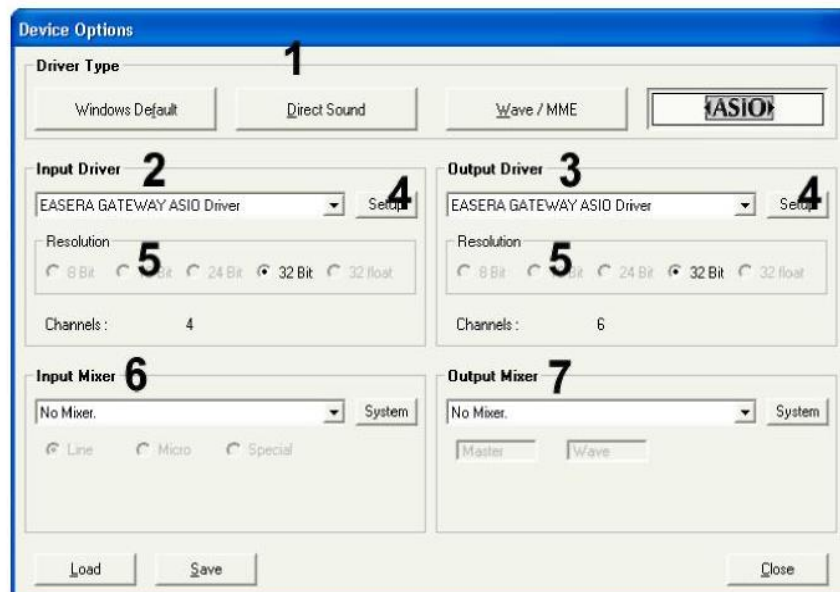


Рисунок 3.6 – Параметри звукової карти Device Options

У верхній частині вікна представлені чотири типи кнопок драйверів, які підтримуються у EASERA: 1 – ASIO; 2 – Direct Sound; 3 – Wave / MP3; 4 – Windows Default – для роботи із вбудованою звуковою картою.

В залежності від обраного типу драйвера, вони будуть установлені в поле Input Driver (2) і Output Driver (3). В полі Resolution (5) налаштуємо бітове розрізнення (16 bit). При Input Mixer (6) і Output Mixer (7) можна вибрати застосовані вхідний і вихідний мікшер, але для наших досліджень ці поля не затребувані, тому вони залишаться порожніми.



5. Для створення нового входу мікрофона виберемо кнопку Edit. У діалоговому вікні External Hardware натиснемо на кнопку New і введемо характеристики мікрофона (рис.3.7).

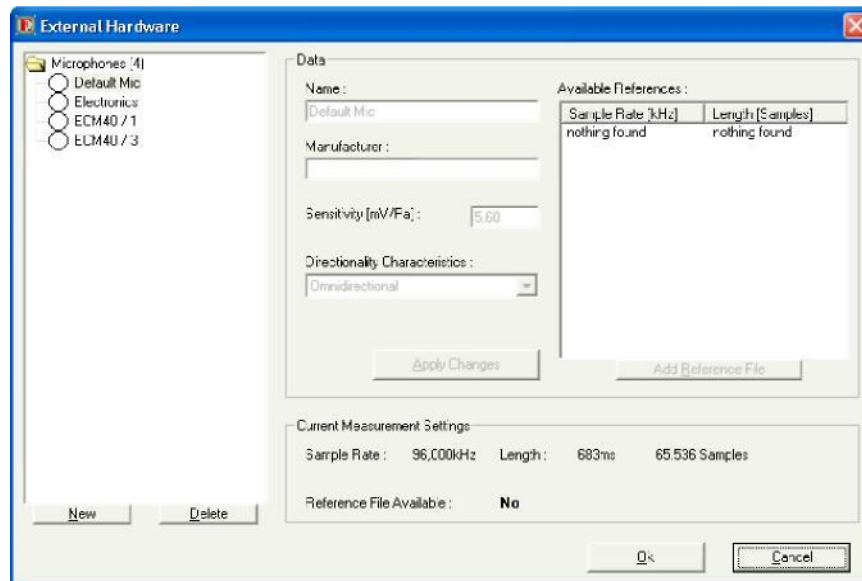


Рисунок 3.7 – Вікно налаштування характеристик мікрофона  
External Hardware

Необхідно ввести назву мікрофону, його фірму-виробника, а також вказати чутливість вимірювального мікрофону і характеристику його спрямованості (односпрямований, всеспрямований і т.д.). На рис. 3.8 показано приклад введення цих параметрів.

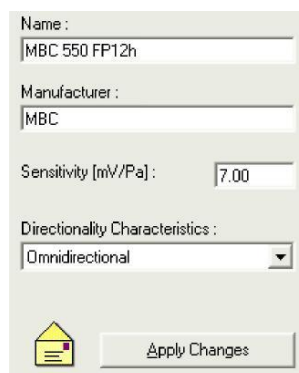


Рисунок 3.8 – Введення характеристик мікрофона

6. Наступним кроком є калібрування мікрофону. У вкладці Input під Microphone натиснемо на кнопку Calibrate для відкриття діалогового вікна Calibration (рис.3.9).

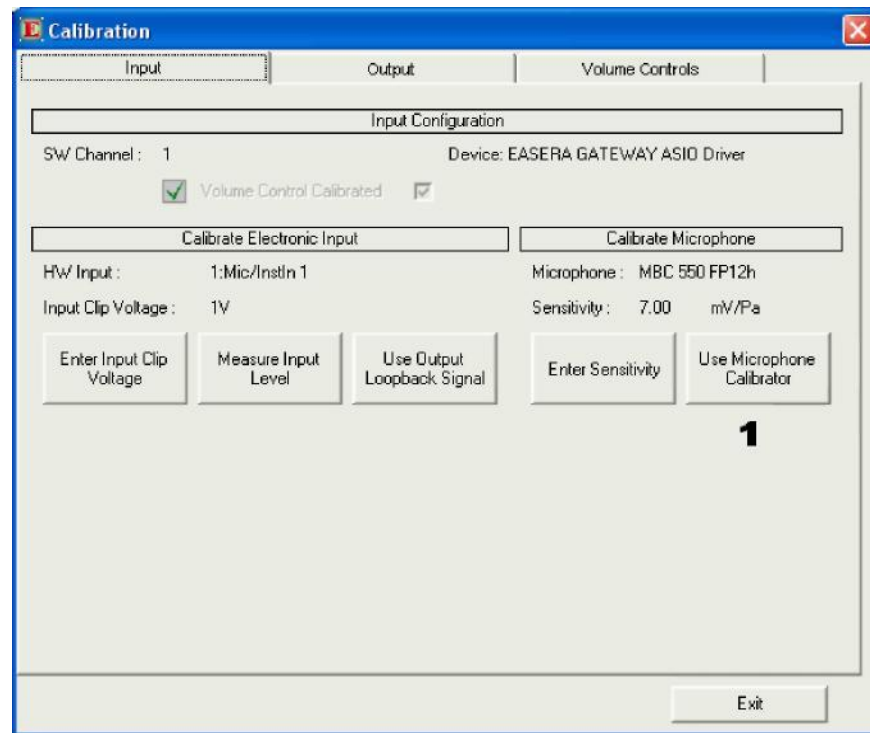


Рисунок 3.9 – Вікно калібрування мікрофону

Потрібно налаштувати мікрофон за допомогою калібруатора звуку (Use Microphone Calibrator). При натисканні Use Microphone Calibrator запускається вікно (рис.3.10), в якому треба встановити рівень сигналу для калібрування у розділі Enter Level of Calibration Signal.

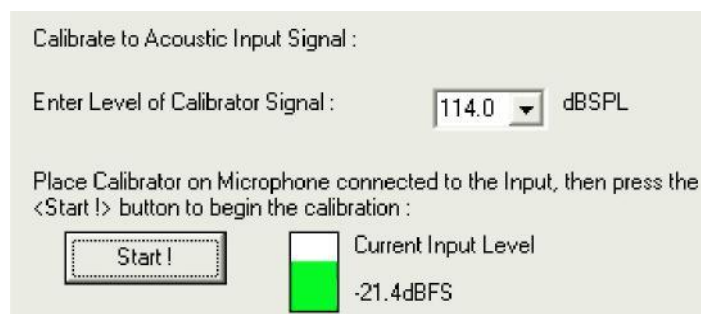


Рисунок 3.10 – Вікно калібруатора мікрофону

Потім за допомогою кнопки Start включимо установку. Як тільки покази стануть сталими, натиснемо клавішу Stop. Після цього з'явиться вікно Microphone Sensitivity (рис. 3.11), в якому програма запропонує застосувати для вимірювань отримане значення чутливості.

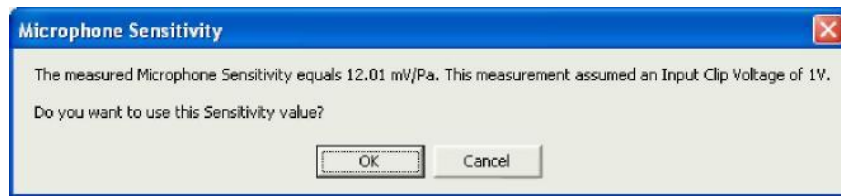


Рисунок 3.11 – Вимірювання чутливості мікрофону калібратором

За отриманими даними можна дійти висновку відносно їх правдоподібності. Для цього у розділі Live переглянемо отримані калібратором рівні (рис. 3.12).

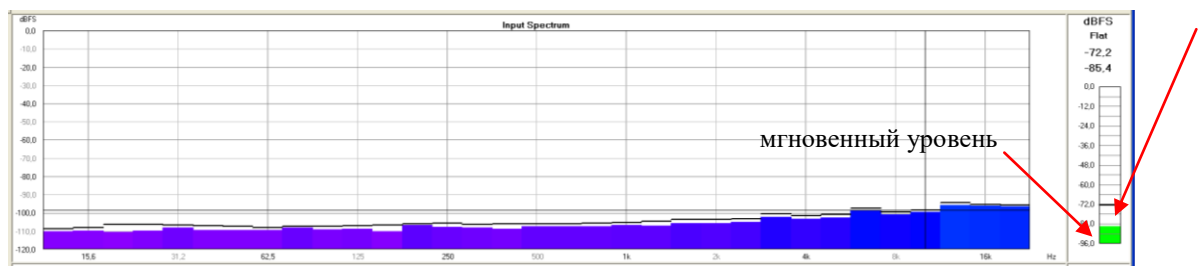


Рисунок 3.12 – Рівні та спектр вхідного сигналу

Піковий рівень складає 72,2 дБ а миттєвий – 86 дБ. Відхилення у декілька десятих дБ нормальні, якщо калібрування відбувається з впливом шуму навколишнього середовища. Отже, калібрування коректне, процедуру можна не повторювати протягом певного часу.

7. Виберемо тестовий сигнал для вимірювань у вікні Choose Stimulus Parameters (рис.3.13).

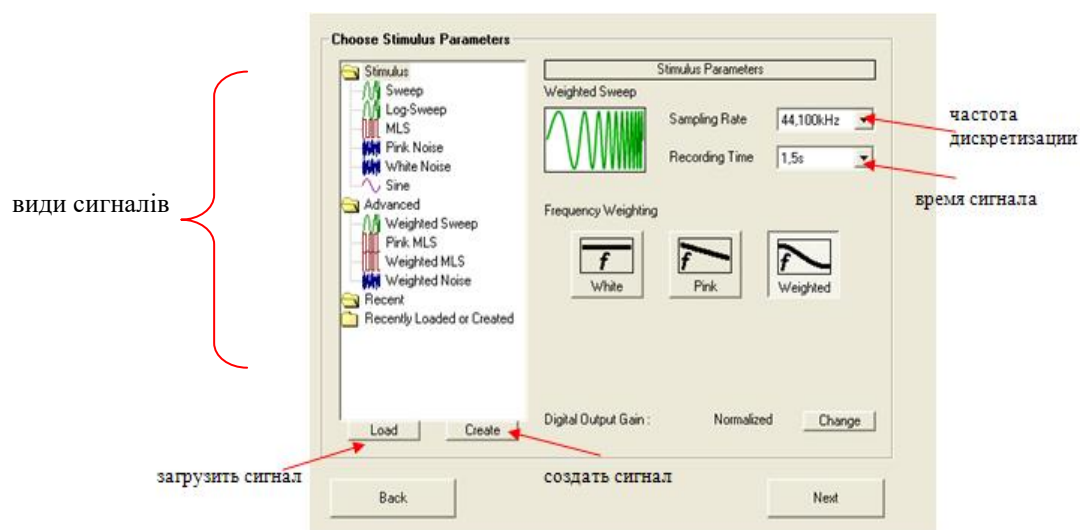


Рисунок 3.13 – Вибір тестового сигналу

Середовище EASERA пропонує генерувати сигнали ковзного тону (в лінійному та логарифмічному вигляді), MLS, білий і рожевий шум, сигнали синусоїд окремих частот, а також зважені сигнали і шуми.

Оберемо із запропонованих варіантів сигнал, задамо його тривалість (Recording Time) і частоту дискретизації (Sampling Rate, рис. 3.13).

8. Щоби не пошкодити гучномовець та / або вуха дослідника проводиться налаштування рівнів. Для цього у вікні Adjust Levels (Direct Sound) за допомогою кнопки Play Test Signal включається тестовий сигнал. У вікні 1-го каналу відображається дійсний рівень сигналу. В нормі необхідно, щоби він був зеленого кольору (надто високий рівень графічно показаний червоним, а високий – жовтим).

Якщо рівень приймає значення вище норми (перевантаження), потрібно за допомогою фейдера Output Gain виконати його регулювання.

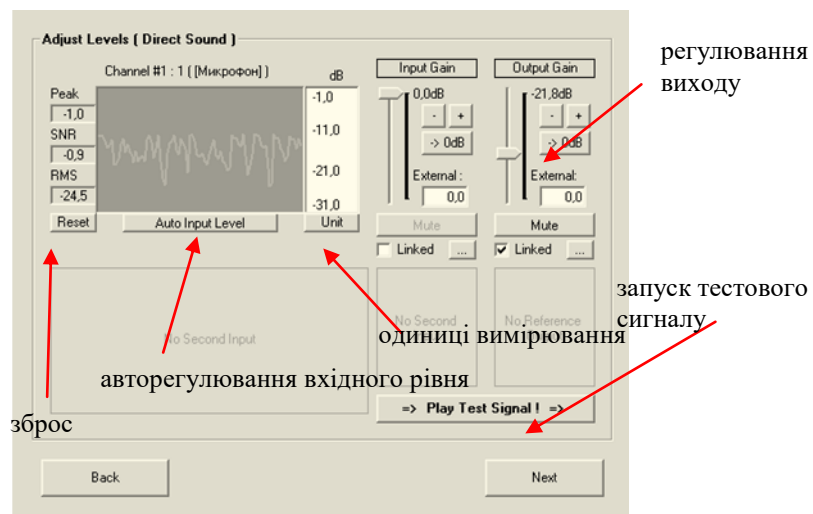


Рисунок 3.14 – Налаштування вхідних і вихідних рівнів

Даний сигнал показаний в дБ. Для зміни одиниць вимірювання рівня їх необхідно вибрати за допомогою списку Unit.

9. Для встановлення параметрів вимірювань зайдемо у вікно Start Measurement (рис. 3.15).

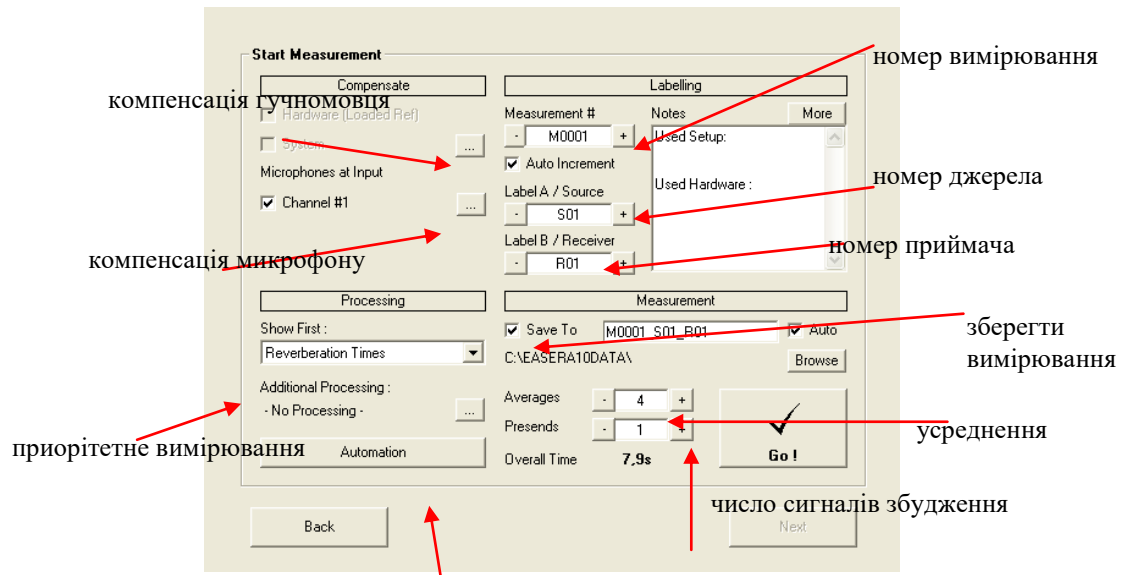


Рисунок 3.15 – Параметри виконаних вимірювань

У верхньому лівому кутку в області Compensate оберемо довідкові файли, що компенсують частотні характеристики застосованих пристроїв. Якщо акустичні вимірювання проводять від певного гучномовця, можна виміряти його частотні характеристики при першому вимірюванні і прийняти їх до уваги у наступних (наприклад, при серії вимірювань). Так само проводиться і компенсація мікрофону.

Необхідно вказати, яке вимірювання буде показано першим у графічному вигляді. Для цього у графі Show First зі списку вибрати, наприклад, час реверберації (рис.3.15).

У частині Save To розділу Measurement треба поставити галочку, щоби зберегти у файл результати.

При серії вимірювань в середовищі EASERA електронний блок виконує їх усереднення. З кожним подвоєнням кількості вимірювань відношення сигнал-шум збільшується на 3 дБ. Необхідно встановити значення усереднення в залежності від поставленої задачі за допомогою кнопок «+» і «-» в розділі Averages. Поставимо значення 1 у розділі Presends для того, щоб на протязі вимірювання генерувався один сигнал.

Почнемо вимірювання за допомогою кнопки Go.

10. У запущеному вікні View & Calculation відобразився графік частотної залежності  $T_{10}$  (рис. 3.16).

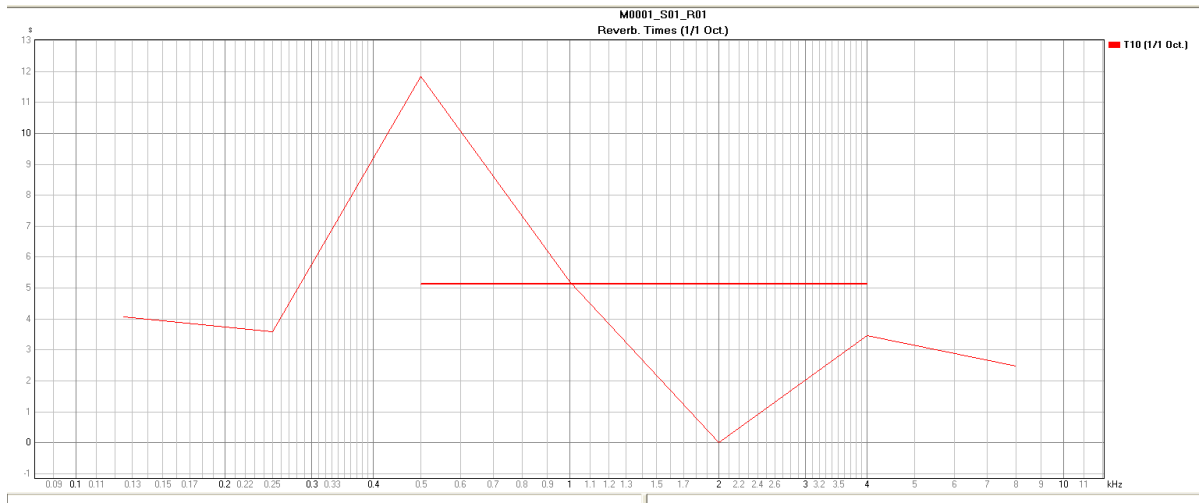


Рисунок 3.16 – Частотна залежність часу реверберації  $T_{10}$

Щоб додати більше залежностей часу реверберації потрібно в інструментальній панелі обрати кнопку Select Overlay (рис. 3.17) і в діалоговому вікні проставити мітки на EDT,  $T_{20}$  и  $T_{30}$  (рис.3.18).



Рисунок 3.17 – Панель інструментів

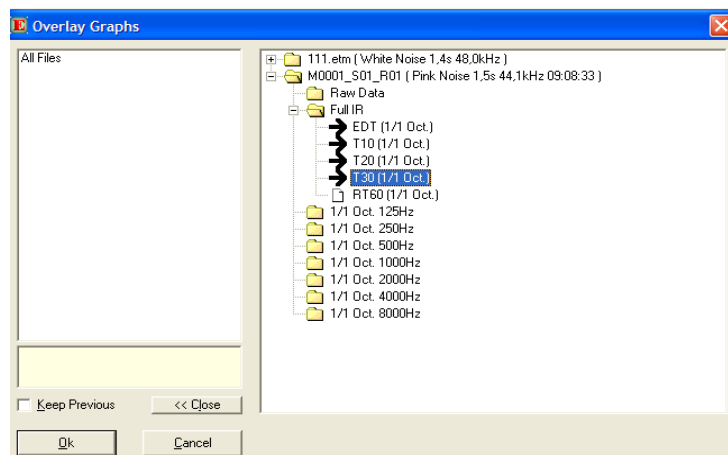


Рисунок 3.18 – Налаштування частотних кривих часу реверберації



Рисунок 3.19 – Графік частотних залежностей часу реверберації EDT,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  і  $T_{30}$

11. Для перегляду результатів вимірювання перейдемо на сторінку Results. В ній будуть показані значення раніше доданих кривих (рис.3.20).

Reverb. Times (1/1 Oct.)		M0001_S01_R01 : Measures									
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	250Hz-2kHz	500Hz-4kHz		
	s	s	s	s	s	s	s	s	s		
T10 (1/1 Oct.)	4.07	3.59	11.85	5.22	0.00	3.46	2.47	5.16	5.13		
EDT (1/1 Oct.)	9.01	3.26	8.20	10.07	0.00	8.86	10.92	5.38	6.78		
T20 (1/1 Oct.)	3.17	3.14	7.51	3.87	0.00	3.28	2.34	3.63	3.66		
T30 (1/1 Oct.)	3.16	3.09	7.41	3.30	0.00	3.18	1.93	3.45	3.47		
Average	4.85	3.27	8.74	5.61	0.00	4.69	4.42	4.41	4.76		
Std. Dev.	2.43	0.20	1.82	2.67	0.00	2.41	3.76	0.87	1.33		
Maximum	9.01	3.59	11.85	10.07	0.00	8.86	10.92	5.38	6.78		
Minimum	3.16	3.09	7.41	3.30	0.00	3.18	1.93	3.45	3.47		

Рисунок 3.20 – Числові результати вимірювань EDT,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  и  $T_{30}$

12. Розрахунок коефіцієнта низького тону виконується за виразом (3.6). Необхідно взяти значення  $T_{20}$  із таблиці результатів на відповідних октавних частотах.

За отриманим значенням КНТ можна зробити висновок про його якість відповідно для запису мовних і музичних програм.

### 3.4 Результати експериментальних досліджень вокальної кімнати

За допомогою студійного монітору, підключеного до персонального комп'ютера через підсилювач потужності, у випробуваному приміщенні генеруються звукові хвилі, тиск яких реєструється в двох точках за допомогою мікрофонів. Структурна схема підключення апаратури в ході експерименту показана на рис.3.21.

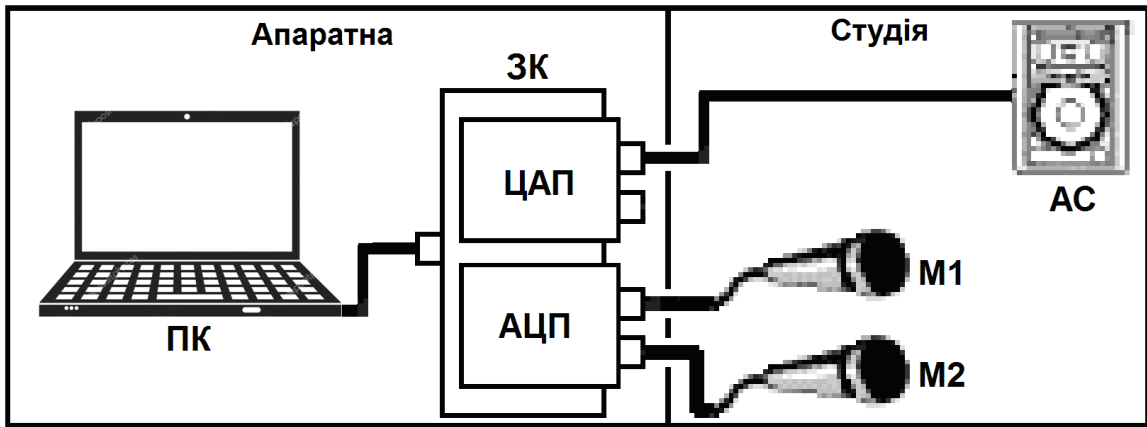


Рисунок 3.21 – Структурна схема підключення апаратури в ході експерименту

Після перетворення і посилення напруги з виходу всеспрямованого мікрофону, сигнал подається на мікрофонний вхід звукової карти персонального комп'ютера. За допомогою програмного середовища EASERA проводиться аналіз і обробка отриманого відгуку.

На рис. 3.22 показані виміряні частотні залежності часу реверберації  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ , а також середня частотна характеристика.

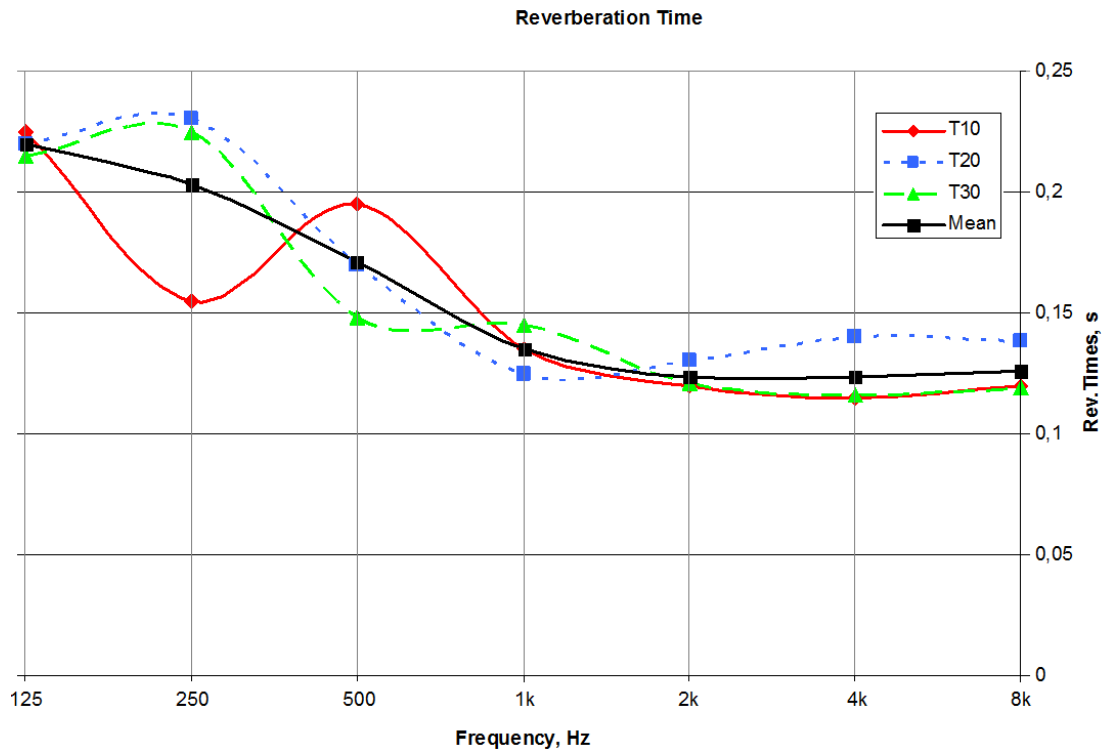


Рисунок 3.22 – Частотні залежності часу реверберації  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ , а також середня характеристика



Помітно, що виміряний час реверберації, починаючи з частоти 1000 Гц постійно знаходиться поблизу 0,12 с, а на інших частотах не перевищує 0,22 с. Отримані результати експерименту дуже близькі до модельних.

На рис.3.23 для порівняння показані частотні характеристики часу реверберації, отримані шляхом розрахунку, в результаті моделювання та експериментально.

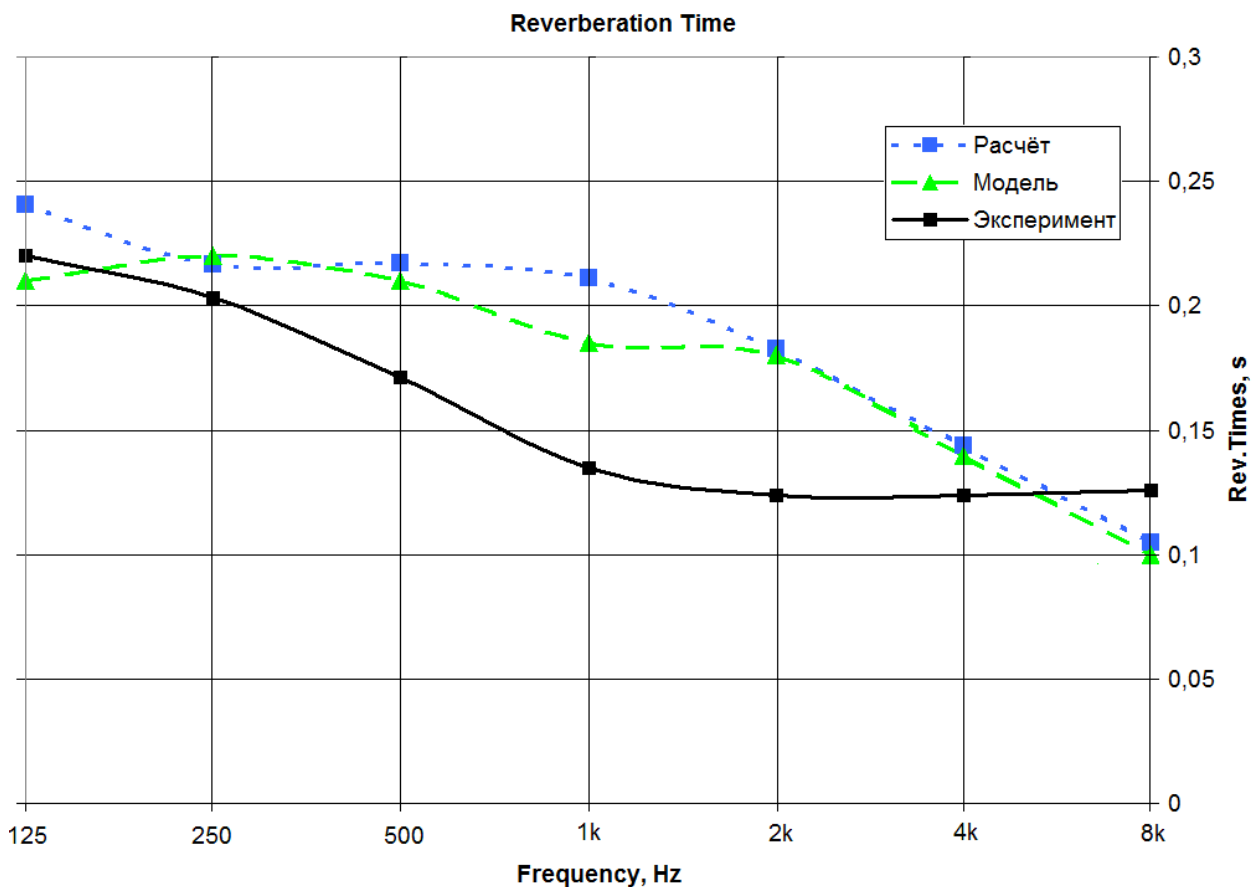


Рисунок 3.23 – Частотні залежності часу реверберації, отримані розрахунком, моделюванням та експериментально

Можна помітити, що графіки практично повністю збігаються на НЧ і ВЧ. На СЧ виміряний час реверберації трохи нижче розрахункового та модельного. Зменшення часу реверберації є більш сприятливим в порівнянні зі збільшенням, оскільки це зменшує резонанси приміщення малого об'єму і робить частотну залежність більш рівномірною.

## ВИСНОВКИ

Побудова студії звукозапису – це багатоетапний і недешевий процес. Важливою його частиною є акустичний проєкт. Це комплекс рішень відносно захисту від шуму і конструювання акустичного оформлення приміщення. Даними на початку проєктування служать архітектурні плани, апріорна інформація про джерела шуму та технічне завдання.

Акустичне проєктування здійснюють як розрахунковим шляхом, так і методом моделювання. В обох випадках існує ряд припущень і не враховуються всі фактори, що визначають акустику в реальній студії. В результаті акустичні характеристики створеної студії можуть помітно відрізнятися від розрахункових або модельних.

Мета кваліфікаційної роботи – на прикладі реальної студії звукозапису показати, як і на скільки можуть бути відмінними реальні акустичні характеристики студії від розрахункових або модельних при ретельному врахуванні всіх факторів.

За основу був узятий проєкт приміщення приватної студії звукозапису.

Дослідження розділили на наступні етапи: підбір акустичного оброблення внутрішніх поверхонь для досягнення потрібного часу реверберації, оцінки звукоізоляції від зовнішнього шуму, уточнення характеристик студії методом акустичного моделювання та експериментальні дослідження акустичних характеристик реальної студії.

Для зменшення реверберації на ВЧ застосовано покриття підлоги ковроліном на основі гуми. Для зменшення реверберації на НЧ застосований гіпсокартон товщиною 2,5 см на відстані від стін і стелі 10 см. Даний підхід створює "об'ємний резонатор" між стіною і гіпсокартоном, що поглинає енергію НЧ. Для додаткового поглинання на СЧ і ВЧ застосовано обробку стелі і стін пористо-волокнистими плитами із мінеральної вати щільністю 35 кг/м<sup>3</sup>. Дані заходи дозволили мати потрібну частотну характеристику часу реверберації, яка вписалася в задані допуски.

У програмному середовищі акустичного проектування EASE створена 3D модель студії, в місці знаходження виконавців розміщені гучномовці. Поверхні у моделі задані залежностями коефіцієнтів поглинання від частоти. Задано площину можливого розташування мікрофонів – на висоті 1,5 м від підлоги.

За результатами моделювання Частотна характеристика реверберації вписується у межі нормальної роботи і її можна порівняти з цільовою. Модельний експеримент показало середній час реверберації приблизно на 0,05 с менше цільового. Зменшення реверберації є більше позитивним варіантом у порівнянні зі збільшенням, тому що сухість звучання звукозапису покращується.

Отримані гістограми розподілу акустичних параметрів і характеристик по відсоткам місць в приміщенні студії. Нерівномірність розподілу поля прямої хвилі в приміщенні студії становить  $\pm 2$  дБ, нерівномірність суми прямої і відбитих хвиль не перевищує 1,5 дБ, що відповідає припустимим нормам і вважається добрими показниками для студії звукозапису.

Розраховані характеристики, які визначають розбірливість звучання. Відношення прямої і відбитих хвиль складає від 1 до 8 дБ при нормі більше 0 дБ. Відношення енергій хвиль звуку в перші 50 мс і після 50 мс від 0,5 до 4,5 дБ при нормі більше 0 дБ. Втрати артикуляції приголосних звуків менше 5% і в середньому біля 4%, що за загальноприйнятою шкалою означає відмінну розбірливість. Параметр розбірливості RASTI складає в середньому біля 0,74, що також свідчить про відмінну розбірливість звуку.

Рефлектограма і крива спаду енергії є рівномірними і показують відсутність суттєвих провалів між інтенсивними відбиттями.

Отримана характеристика типу "водоспад", що демонструє не тільки графіки відбиття і час затухання сигналу, але й рівномірність частотної характеристики. Процес спадання звукової енергії є рівномірним як у часі, так і за частотою. Тобто відсутні передумов для виникнення флатер-луни або провалів у частотній характеристиці студії і формантного звучання.

Проведено експериментальні вимірювання в приміщенні реальної студії. Для нейтралізації ефекту стоячої хвилі і резонансів в приміщенні застосовані непаралельні стіни. Ця задача була вирішена шляхом застосування каркасно-обшивних конструкцій із гіпсокартонних плит. Вікно встановлене під кутом до вертикальної площини, щоби звук відбивався вниз і поглинався підлогою.

Вимірювання виконані за допомогою програмного середовища EASERA. За допомогою активного студійного монітора, підключеного до зовнішнього аудіоінтерфейса, в приміщенні студії створювалися звуки випробувальних сигналів, звуковий тиск яких приймався в двох точках за допомогою мікрофонів.

Програма EASERA обчислила часи реверберації T10, T20, T30 в октавних інтервалах відповідно і енергетичних діапазонах -5 дБ ... -15 дБ (T10), -5 дБ ... -25 дБ (T20) і -5 дБ ... -35 дБ (T30).

Вимірний реальний час реверберації, починаючи з частоти 1000 Гц, постійно складає близько 0,12 с, а на інших частотах не більше 0,22 с. Отримані експериментальні дані дуже близькі до модельних.

Розрахункова, модельна і експериментальна залежності практично повністю збігаються на НЧ і ВЧ. На СЧ вимірний час реверберації трохи менше розрахункового та модельного. Зменшення часу реверберації є більш позитивним випадком ц порівнянні зі збільшенням, тому що це зменшує резонанси приміщення з малим об'ємом і робить частотну залежність реверберації рівномірною.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Радиовещание и электроакустика / [С.И. Алябьев, А.В. Выходец, Р. Гермер и др.]; под ред. Ю.А. Ковалгина. – Москва: Радио и связь, 2000. – 792 с.
2. Алдошина И.А. Электроакустика и звуковое вещание / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов. – Москва: Радио и связь, 2007. – 872 с.
3. Сапожков М.А. Электроакустика / М.А. Сапожков. – Москва: Связь, 1978. – 272 с.
4. Акустика: Справочник/ А.П.Ефимов, А.В.Никонов, М.А. Сапожков, В.И. Шоров; ред. М.А. Сапожкова. –2 изд. перераб. и доп. – Москва: Радио и связь, 1986. – 336 с.
5. Радиовещание и электроакустика: Учебник для вузов/ [А.В. Выходец, М.В. Гитлиц, Ю.А. Ковалгин и др.]; под ред. М.В. Гитлица. – Москва: Радио и связь, 1989. – 432 с.
6. Алдошина И.А. Основы психоакустики. Подборка статей [Электронный ресурс] : [подборка статей]/ И.А. Алдошина. – Режим доступа к журн.: <http://625.625-net.ru>. – Название с экрана.
7. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
8. Акустика студий звукового и телевизионного вещания. Системы озвучивания: учебно-методическое пособие/сост. Л.Г. Стаценко, Ю.В. Паскаль. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006 – 96 с.
9. Давыдов В.В. Акустика помещений / В.В. Давыдов. – Санкт – Петербург: Санкт–Петербургский институт кино и телевидения, 1995. – 95 с.
- 10.EASE 4.0: users manual. By Acoustic Design Ahnert. – Berlin. – 647 p.
- 11.Carl Dorwaldt of Rencus–Heinz EASE 4.1 Tutorial/[Wolfgang Ahnert Stefan Feistel Dr.Waldemar Richert, Frank Siegmann, Karen Irmscher,

Emad El-Saghir, Bruce Olson of ADA(Acoustic Design Ahnert) Berlin, Germany]; prepared by Carl Dorwaldt of Rencus-Heinz, inc. Footlich Ranch, California USA.

- 12.EASERA: Users Manual. By Software Design Ahnert GmbH. – Berlin. – 212 p.
- 13.Зрительные залы Метод определения разборчивости речи: ГОСТ 25902–83. – [Действовал с 1984–01–01, отменен Приказом от 26 февраля 2010 года N 78 «Про скасування міждержавних стандартів (ГОСТ), прийнятих до 1992 року» без заміни на відповідний національний стандарт]. – М.: 1984. – 6 с.
- 14.Исследование акустических свойств зала методом геометрической акустики / А.А. Чуйков, Г.В. Мочалин, Е.В. Ефремова // Архитектон: известия вузов. – Екатеринбург. 2008. – прил. к № 2 (22).