

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 методів зменшення еквівалентної реверберації в звукозаписі.
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи МІМ-21-1
Удовік Д.В.
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Олейніков В.М
(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 Удовіку Денису Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів зменшення еквівалентної реверберації
в звукозаписі.

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 – конференц-зал. Розміри приміщення – довжина 12 м, ширина 6,5 м, висота 3,5 м. Тип акустичної системи – 2.1. Типи випробувальних сигналів – ЛЧМ сигнал. Розробити методику вимірювання акустичних характеристик системи озвучення в заданому приміщенні, методику отримання імпульсної характеристики, ревербераційних характеристик, нелінійних спотворень. Визначати вплив приміщення на роботу системи озвучення. Виконати компенсацію ревербераційних завад для мінімізації спотворень, викликаних впливом приміщення.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ

1. Аналіз спотворень в трактах відтворення звуку.

2. Методи виправлення звукових спотворень у звукових трактах.

3. Експериментальне дослідження корекції АЧХ
в умовах приміщення конференц-залу.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Акустичні вади приміщень (1 аркуш А4).
2. План досліджуваного приміщення (1 аркуш А4).
3. Апаратура системи озвучення (1 аркуш А4).
4. Апаратура вимірювальної частини (1 аркуш А4).
5. Room Acoustics Software (1 аркуш А4).
6. Структурна схема вимірювань (1 аркуш А4).
7. Результати вимірювання АЧХ (1 аркуш А4).
8. Результати вимірювання ФЧХ (1 аркуш А4).
9. Інші результати вимірювань (1 аркуш А4).
10. Результати корекції ревербераційних завад (1 аркуш А4).
11. Висновки (1 аркуш А4).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	01.09.22–13.09.22	
2	Розробка методики досліджень	14.09.22–27.09.22	
3	Вимірювання відгуків, АЧХ і ФЧХ	28.09.22–11.10.22	
4	Компенсація ревербераційних завад	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 _____ Денис УДОВІК _____
(підпис)

Керівник роботи _____ Володимир ОЛЕЙНІКОВ _____
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 65 сторінок, 36 рисунків, 2 таблиці, 36 джерел.

АКУСТИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ, ПРИМІЩЕННЯ, СИСТЕМА ОЗВУЧЕННЯ, СПОТВОРЕННЯ, АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ФАЗО-ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА

Об'єкт дослідження – процес впливу характеристик приміщення та систем звукопідсилення на поширення звукових сигналів.

Мета роботи – визначення можливостей корекції ревербераційних завад на звуковий сигнал апаратними засобами.

Метод дослідження – теоретичний аналіз, проведення практичних вимірювань, експериментальні дослідження.

Проведено теоретичний аналіз спотворень звукових сигналів в системах звукопідсилення та властивостей приміщень, здійснюючих вплив на поширення звукових сигналів. Розглянуто способи корекції параметрів систем звукопідсилення та озвучення і боротьби зі спотвореннями сигналу. Також розглянуті способи поліпшення акустичних характеристик приміщень. Проведено практичний експеримент з вимірювання характеристик реальної системи озвучення в приміщенні конференц-залу, за результатами якого виконано корегування параметрів системи озвучення.

В результаті апробовано метод корекції акустичних характеристик приміщення, що дозволяє швидко виконати оптимізацію системи в заданих умовах роботи.

ABSTRACT

Explanatory note to the performance appraisal: 65 pages, 36 figures, 2 tables, 36 sources.

ACOUSTICAL MEASUREMENTS, ROOMS, SOUND SYSTEM, CONFIRMATION, AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS, PHASE-FREQUENCY CHARACTERISTICS

The object of study is the process of influencing the characteristics of the room and the sound amplification systems on the sound propagation.

The purpose of the work is to determine the possibilities of correction of reverberation noise on the audio signal by hardware.

Research method – theoretical analysis, practical measurements, experimental studies.

Theoretical analysis of distortions of sound signals in the systems of sound amplification and the properties of premises, which influence the propagation of sound signals, is carried out. The ways of correction of the parameters of the sound amplification and sound systems and the control of distortion of the signal are considered. Ways to improve the acoustic characteristics of the premises are also considered. A practical experiment was conducted to measure the characteristics of a real sound system in a conference hall, which resulted in the adjustment of the sound system parameters.

As a result, the method of correction of the acoustic characteristics of the room was tested, which allows rapid optimization of the system under the specified operating conditions.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, одиниць, скорочень і термінів	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІЗ СПОТВОРЕНЬ В ТРАКТАХ ВІДТВОРЕННЯ ЗВУКУ	11
1.1 Частотно-залежні спотворення.....	11
1.2 Спотворення фазо-частотних характеристик.....	14
1.3 Нелінійні спотворення сигналів.....	16
1.4 Вплив акустичних властивостей приміщень.....	19
1.5 Висновки по розділу 1.....	23
2 МЕТОДИ ВИПРАВЛЕННЯ ЗВУКОВИХ СПОТВОРЕНЬ У ЗВУКОВИХ ТРАКТАХ.....	24
2.1 Алгоритм виправлення амплітудно-частотних і фазо-частотних спотворень.....	24
2.2 Корекція нелінійних спотворень.....	30
2.3 Корекція ехо-сигналів.....	31
2.4 Корекція акустичних характеристик приміщення.....	34
2.5 Висновки по розділу 2.....	41
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕКЦІЇ АЧХ В УМОВАХ ПРИМІЩЕННЯ КОНФЕРЕНЦ-ЗАЛУ	42
3.1 Опис приміщення і системи підсилення звуку.....	42
3.2 Розробка методики вимірювань.....	45
3.3 Формування ЛЧМ сигналів.....	47
3.4 Аналіз експериментальних даних.....	51
3.5 Висновки по розділу 3.....	59
Висновки	60
Перелік джерел посилань	62

ДОДАТКИ.....	66
Додаток А	67
Додаток Б	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АС – акустична система;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

ВЧ – верхня частота;

ЗК – звукова карта;

НЧ – нижня частота;

КЗП – коефіцієнт звукопоглинання;

КНИ – коефіцієнт нелінійних спотворень;

ЛЧМ – лінійно-частотна модуляція;

МП – мікшерний пульт;

ПК – персональний комп'ютер;

СЧ – середня частота;

ФЧХ – фазо-частотна характеристика;

С50 – коефіцієнт чіткості (ясності) для мовних сигналів;

С80 – коефіцієнт чіткості (ясності) для музичних сигналів;

DSP – digital signal processor;

EDT – Early delay time;

FIR – Finite Impulse Response;

IIR – Infinite Impulse Response;

RMS – Rated maximum sinusoidal;

SBIR – Speaker Boundary Interference Response.

ВСТУП

Системи підсилення звуку використовуються повсякденно, починаючи від житлових кімнат звичайних користувачів, конференц-залів, студентських і учнівських аудиторій і до концертних залів. Частіше за все ці приміщення не підготовлені чи підготовлені недостатньо для повноцінного відтворення акустичних сигналів. Тому практично виникають проблеми, які пов'язані зі звуковими особливостями приміщень. Так, для прикладу, можуть виникати сторонні призвуки, які спотворюють сприйняття звукової інформації, також змінюється частотне сприйняття сигналів. Внаслідок даних ефектів може відбуватися значне зниження якості звучання як звукозаписів, так і живих виступів.

Рішенням проблеми в ідеалі повинно бути планування та акустична підготовка приміщення, усунення усіх його акустичних недоліків, що спрямоване на отримання рівномірного і неспотвореного поля звуку по усьому приміщенні. Однак, таке рішення не завжди можливо втілити, через те, що часто є потреба озвучити готове приміщення, що спочатку не передбачалося використовувати в описаних цілях. Також питання звукового оформлення часто ідуть врозріз з рішеннями дизайнерів в плані інтер'єру.

Тому впливає необхідність в зміні параметрів самої системи звукопідсилення для отримання її оптимальної роботи в наявних умовах. Є багато обладнання, яке дозволяє здійснювати регулювання різного роду параметрів системи. Таке обладнання часто є досить коштовним і вимагає певного досвіду роботи з ним. Отже, підвищується актуальність питань автоматизації процесу налаштувань, коли вимірювання будуть проводитися за допомогою стандартних тестових сигналів і оброблятися математичними алгоритмами, що дасть на виході готові дані для введення корекції.

В даній кваліфікаційній роботі магістра досліджуються методи компенсації ревербераційних завад у приміщеннях.

Виконується теоретичний аналіз спотворень звукових сигналів, поширених в системах підсилення звуку, та властивостей приміщень, які мають вплив на розповсюдження звукових сигналів. Розглядаються деякі методи корекції параметрів систем підсилення звуку та боротьби зі акустичними спотвореннями сигналу. Також розглянуті методи виправлення недоліків акустичних параметрів приміщень. Проведено натурний експеримент з вимірювання характеристик звуковідтворюючої апаратури в реальному приміщенні, за результатами чого виконана корекція для зменшення еквівалентної реверберації звучання.

1 АНАЛІЗ СПОТВОРЕНЬ В ТРАКТАХ ВІДТВОРЕННЯ ЗВУКУ

1.1 Частотно-залежні спотворення

Досліджуючи характеристики підсилювачів, можна помітити, що їхній коефіцієнт підсилення найчастіше спадає як на нижніх, так і на верхніх частотах. Це зветься завалами амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) і породжує додаткові зсуви фази. Завал нижніх частот обумовлений роздільними елементами. Будь-яке роздільне RC-коло між каскадами також створює спад на нижніх частотах – тим більший, чим меншою є його постійна часу $\tau = RC$. Тільки в підсилювачах низьких частот з безпосереднім зв'язком між каскадами завал АЧХ на низах відсутній.

Завал підсилення на верхніх частотах обумовлено двома головними факторами – інерційністю руху носіїв в активних елементах схеми і впливом шунтувальних ємностей. Перший фактор суттєвий лише для наймасовіших активних елементів – біполярних транзисторів. Коли вони застосовуються в схемі із загальною базою, кінцевий час прольоту носіїв крізь базу породжує спад підсилення на верхах. Він оцінюється за верхньою граничною частотою у схемі із загальною базою f_a . У схемі із загальним емітером ситуація набагато гірше – гранична частота в даному випадку дорівнює $f_{zp} = f_a(P + i)$. Щоби інерційність транзисторів не впливала на роботу підсилювача, дані частоти мають в декілька разів перевищувати граничну частоту робочого діапазону частот підсилювача. Електронні лампи і польові транзистори без врахування їхніх ємностей можна розглядати як неінерційні елементи. Однак їх ємності спричиняють спад підсилення на верхніх частотах у підсилювачів на цих елементах.

Якість приладів оцінюється відношенням їхньої крутизни S_0 до загальної ємності C_0 ; дане відношення отримало назву добротності приладу $Q = S_0/C_0$. Треба враховувати, що сучасні потужні польові транзистори

сильно перевершують підсилювальні електронні лампи за цим показником, а також за крутизною і максимальними вихідними струмами і напругами.

Частотні спотворення викликані тим, що коливання різних частот за відомих умова підсилюються не однаково. В звуковому підсилювачі це обумовлено тим, що навантаженнями для ламп є не тільки активні опори, алі і ємності (міжелектродні ємності ламп, ємність монтажу, ємності розділових конденсаторів та ін.), та іноді й індуктивності (дроселі, трансформатори), опори яких на різних частотах різні. А так як підсилення каскадів з певною лампою залежить від опору її навантаження в аноді, то і підсилення в даному випадку є різним на різних частотах. У підсилювачі на опорах зазвичай краще посилюються коливання середніх звукових частот, приблизно від 200 Гц до 3 кГц. На більш нижчих і більш верхніх частотах посилення зменшується. В результаті даного співвідношення між амплітудами коливань різних частот на виході підсилювача не дорівнює співвідношенню між амплітудами коливань даних частот на його вході, і тембр звучання спотворюється. Внаслідок відносного послаблення коливань верхніх частот у порівнянні із середніми пропадають характерні коливання в складі звучання, що надають йому певне звукове забарвлення, ті особливості, що відрізняють звучання різних музичних інструментів або голосів, тобто спотворюється саме тембр передачі.

Ослаблення коливань нижніх частот звуку позбавляє звук «соковитості», надає йому дзвінкий металевий неприродний тембр. Точно так зайве посилення одних частот в порівнянні з іншими тягне відповідні спотворення. Явища, які відбуваються внаслідок частотно-залежних спотворень, можна показати графічно. Припустимо, що посилюється складне звукове коливання, яке, крім синусоїдального коливання основної частоти, містить також 2-гу і 3-тю гармоніки. При цьому амплітуда 2-ї гармоніки вдвічі, а 3-ї – втричі менше амплітуди основного тону. Форма цього складного коливання і його складових показана на рис. 1.1 (в кожний момент часу ордината складної кривої являє собою суму ординат усіх 3-х складових).

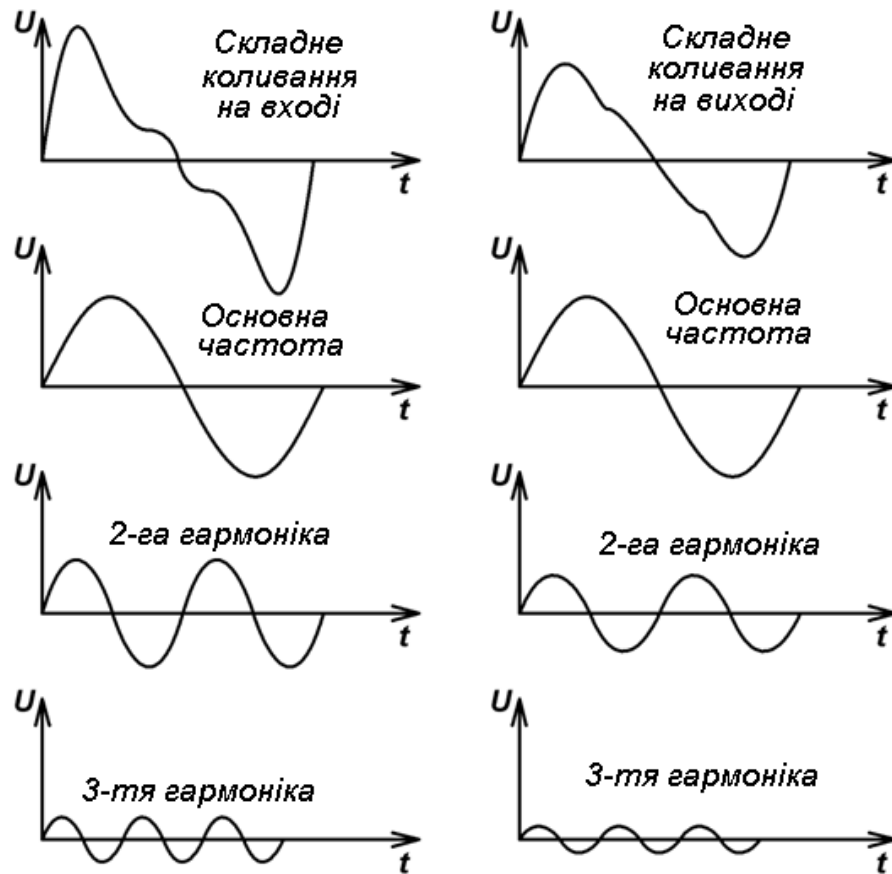


Рисунок 1.1 – Спотворення форми сигналів

Тепер припустимо, що на більш високій частоті коефіцієнт посилення підсилювача вдвічі менше, ніж на основній. Тоді на виході підсилювача амплітуди коливань 2-ї і 3-ї гармонік відносно амплітуди коливань основної частоти будуть вдвічі меншими, ніж у посилюваному сигналі. У результаті форма складного коливання на виході підсилювача сильно відрізнятиметься від форми сигналу на вході. Отже, при частотно-залежних спотвореннях, як і при нелінійних спотвореннях, змінюється форма сигналу. Але якщо в нелінійному випадку спотворення форми сигналу пояснюється появою нових гармонічних коливань, що не було в складі основного сигналу, то у лінійному випадку нові коливання не з'являються, а спотворення форми сигналу пояснюється лише зміною співвідношення між амплітудами сигналів різних частот, що входять до складу складного сигналу, що посилюється.

Щоби мати можливість оцінки частотних спотворень, знімають амплітудно-частотну характеристику підсилювача, що показує залежність

коефіцієнта посилення від частоти. Для цього від генератора звукових частот подають на вхід підсилювача коливання різних частот, які лежать в межах робочого діапазону, при тому напругу на вході підсилювача тримають на всіх частотах постійною. Тоді напруга на виході буде прямо пропорційною коефіцієнту посилення на цій частоті. За отриманими в результаті даними рисують амплітудно-частотну характеристику підсилювача.

Коефіцієнт частотних спотворень, який позначається літерою M , розраховують як відношення:

$$M = \frac{K}{K_{сер}}, \quad (1.1)$$

де $K_{сер}$ – коефіцієнт посилення на середніх частотах,

K – коефіцієнт посилення на даній частоті.

В підсилювачах звукових частот частотна характеристика має бути досить широкою для того, щоби пропустити без значного ослаблення усі частоти, що випромінює акустична система.

1.2 Спотворення фазо-частотних характеристик

Фазові спотворення можуть проявлятися тільки при посиленні складних коливань, які складаються з кількох простих синусоїдальних коливань з різними частотами. Так само, як і амплітудно-частотні спотворення, вони проявляються у результаті наявності у навантаженні каскадів посилення реактивних елементів, частіше всього, ємностей. Це призводить до зсувів фаз між струмами і напругами звукових частот, причому цей зсув виявляється різним для сигналів різної частоти. У результаті може бути так, що сигнали різних частот як би зміщуються один відносно іншого в часі і форма результуючого складного сигналу спотворюється.

На рис. 1.2 помітно, як різко змінюється вид складного сигналу, який складається з сигналу основної частоти і його другої гармоніки, внаслідок появи в результаті посилення зсуву фаз між цими сигналами.

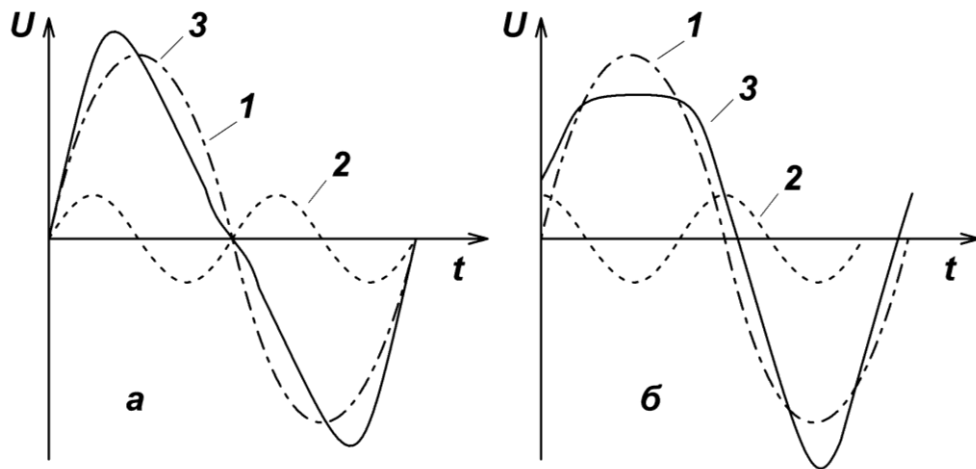


Рисунок 1.2 – Зміна форми складного сигналу внаслідок фазових спотворень: а – склад сигналу на вході підсилювача; б – склад сигналу на виході підсилювача (1 – сигнал основної частоти, 2 – друга гармоніка, 3 – сумарний сигнал)

Даний вид спотворень при прийомі і підсиленні звукових сигналів не має значення, оскільки слуховий апарат людини не реагує на зсув фаз між сигналами різних частот.

Фазові спотворення у підсилювачі оцінюють по його фазо-частотній характеристиці (ФЧХ). Дана характеристика являє собою залежність фазового зсуву $\Delta\varphi$ вихідної напруги (або струму) відносно вхідного сигналу від частоти при наявності на вході підсилювача сигналу синусоїди.

Типова ФЧХ підсилювача показана на рис. 1.3 суцільною лінією. При $\Delta\varphi \geq 0$ вихідна напруга випереджає вхідну, при $\Delta\varphi \leq 0$ – відстає від вхідної. Форма ФЧХ сигналу, яка не створює спотворень, є лінійною залежністю фазового зсуву від частоти:

$$\Delta\varphi(f) = -2\pi t_3(f - f_0). \quad (1.2)$$

де t_3 – груповий час запізнення.

Груповий час запізнення являє собою похідну за частотою від ФЧХ, тобто:

$$t_3 = \frac{d\varphi(f)}{2\pi df}. \quad (1.3)$$

При лінійній ФЧХ усі складові спектру вхідного сигналу зсуваються на однаковий час t_3 , що не викликає зміни форми сигналу. Якщо ФЧХ є нелінійною, то різні складові спектру вхідного сигналу будуть зсуватися на різний час, форма вихідного сигналу зміниться, вірність відтворення звукового запису порушиться.

Кількісною оцінкою спотворень фази служить нелінійність ФЧХ реального підсилювача, яка є різницею між реальною ФЧХ підсилювача і її лінійною функцією апроксимації у робочому діапазоні частот. Апроксимувати ФЧХ зручніше ломаною лінією, яка утворена прямолінійними ділянками (на рис. 1.3 вони позначені як 1, 2, 3).

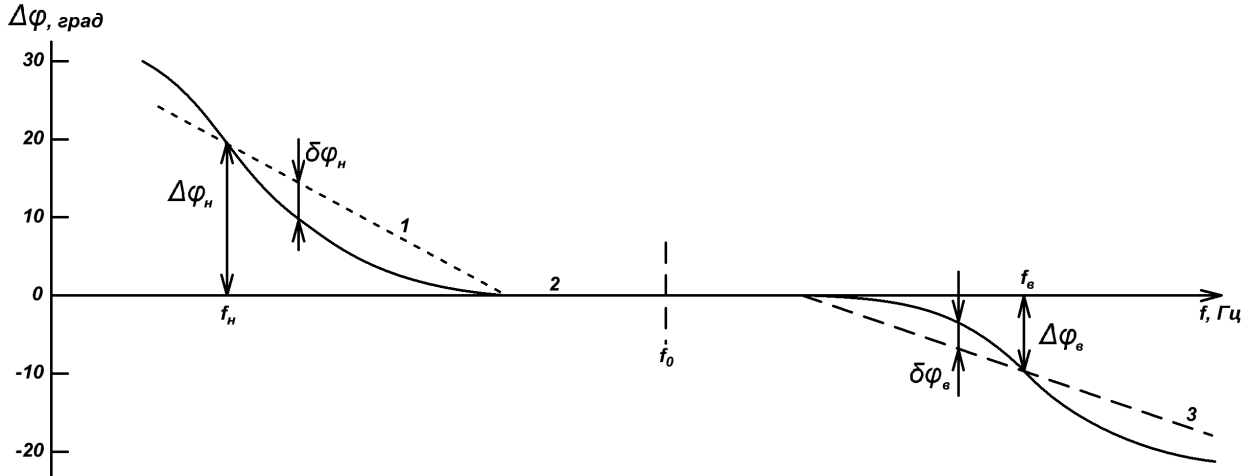


Рисунок 1.3 – Фазо-частотна характеристика

1.3 Нелінійні спотворення сигналів

Нелінійними спотвореннями називають зміни форми сигналу, обумовлені нелінійністю залежності між вихідним і вхідним сигналами у

стаціонарному режимі. У результаті нелінійних спотворень синусоїдального вхідного сигналу виходить сигнал складної форми:

$$y = y_0 + v_1x + v_2x^2 + v_3x^3 + \dots, \quad (1.4)$$

де x – вхідний сигнал;

y_0 – постійна складова сигналу;

v_1 – лінійний коефіцієнт посилення;

$v_2, v_3 \dots$ – вищі коефіцієнти нелінійних спотворень.

У системі з нелінійною передавальною характеристикою виникають складові спектру, яких не було на вході – результат нелінійності. При надходженні на вхід такої системи сигналу з однією частотою f_1 на виході з'являться складові із частотами $f_1, 2f_1, 3f_1$ тощо. Якщо на вхід надіодить сигнал, який складається з декількох частот f_1, f_2, f_3, \dots , то на виході системи крім гармонійних частот додатково з'являться і так звані "комбінаційні частоти" $n_1f_1 \pm n_2f_2 \pm n_3f_3 \pm \dots$, де $n=1, 2, 3, \dots$. При подачі сигналів із суцільним спектром на виході є також суцільний спектр, але зі зміненою обвідною спектру.

Нелінійні спотворення оцінюють у вигляді коефіцієнту нелінійних спотворень, який є відношенням ефективних величин гармонік до ефективної величини сумарного вихідного сигналу, вимірюється у відсотках:

$$K = 100 \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 + \dots}{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}}. \quad (1.5)$$

де A_n – амплітуди складових з частотами nf .

Наведена спрощена формула (1.5) справедлива для випадків, коли спотворення невеликі ($K \leq 10\%$).

Розрізняють два типи нелінійності: ступеневу і нелінійність з присини обмеження амплітуди. Обмеження ділиться на обмеження зверху і обмеження знизу. На рис. 1.4 наведені дані види обмежень. При першому виді обмежень спотворюються лише гучні сигнали, при другому – усі сигнали, але слабші спотворюються більше, ніж великі.

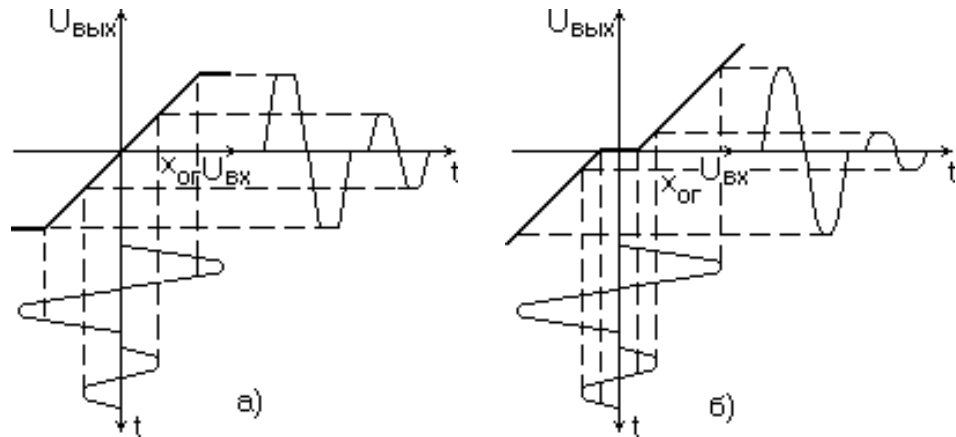


Рисунок 1.4 – Види нелінійності (а – зверху, б – знизу)

Нелінійні спотворення гармонійного сигналу з появленням комбінаційних частот відчувається як "деренчання", яке переходить у хрипи при значних спотвореннях на верхніх частотах. Нелінійні спотворення у вигляді комбінаційних частот спричиняють відчуття модуляції звуку. При звуженні смуги звукових частот нелінійні спотворення є менш помітними. Лінійні спотворення змінюють амплітудні і фазові співвідношення між спектральними компонентами сигналів і за рахунок цього змінюють його часову структуру. Такі спотворення приймаються як зміни тембру або «зафарбування» звуку.

При передаванні звуків первинні співвідношення між компонентами частот мають бути збережені. В зв'язку з цим, якість довільної ділянки звукового тракту оцінюється його амплітудно-частотною характеристикою, для позначення якої часто застосовують аббревіатуру АЧХ. Під АЧХ мають на увазі графік залежності коефіцієнту передачі від частоти сигналу, що подається на вхід цієї ділянки тракту або окремого звукового пристрою.

Коефіцієнт передачі – це відношення амплітуд сигналів на виході і вході підсилювача.

Амплітудно-частотна характеристика звукового тракту (частотна залежність коефіцієнта передачі) задає співвідношення між амплітудами складових частот. Це призводить до відчуття суб'єктивної зміни тембру. Показником ступеня амплітудно-частотних спотворень, які виникають у будь-якому пристрої, служить нерівномірність АЧХ, кількісним показником на певній частоті спектру сигналу є коефіцієнт частотних спотворень.

Нелінійні спотворення, що викликані нелінійністю обробки і передачі сигналів. Дані спотворення викликають появу в спектрі частот вихідного сигналу складових, які відсутні у вхідному сигналі. Нелінійні спотворення являють собою зміну форми коливань, які проходять крізь електричне коло (наприклад, крізь підсилювач або трансформатор), викликані змінами пропорційності між миттєвими значеннями напруг на вході даного кола і на його виході. Це відбувається, якщо залежність вихідної напруги нелінійна від вхідної. Кількісно нелінійні спотворення оцінюють коефіцієнтом нелінійних спотворень (КНС) чи коефіцієнтом гармонік (КГ).

Типові значення КНС:

– 0% – синусоїда; 3% – близько до синусоїди; 5% – наближення до синусоїди, але відхилення форми же помітні візуально; до 21% – сигнал трапеція або ступінчастої форми; 43% – прямокутний сигнал.

1.4 Вплив акустичних властивостей приміщень

На характер розповсюдження звуку впливають форми, розміри приміщення, вид лицьової обробки, меблі. Ці фактори впливають на те, як звук буде звучати в приміщенні.

Головні проблеми акустики приміщень:

- луна (echo);
- флаттер ехо;

- ранні відбиття;
- резонанси кімнати і стоячі хвилі;
- граничні ефекти в приміщенні.

Луна (ехо) – це звукове явище, що досить часто зустрічається після припинення звучання будь-якого звуку, і є наслідком багатократного відбиття звуків від стін, підлоги і стелі приміщення, а також від об'єктів, що розташовані в ній. Ще можлива поява так званого ревербераційного «хвоста», що помічається затуханні звуку, коли роздільні відбиття поєднуються в загальний звук, який поступово затухає. Є такі терміни як «жива» або «мертва» акустика, які застосовують при описі звукових характеристик приміщення. Як правило, встановити акустичний характер приміщення не складає проблем. Це можна зробити на слух, сенс полягає в тому, що потрібно плескати в долоні і потім аналізувати звуки, що продовжуються. Тут можливі два варіанти. Перший притаманний тому випадку, коли внаслідок сплеску він не згасає майже відразу і певний час залишається – це означає, що приміщення є акустично «живим». Однак можливий і другий випадок, коли звук сплеску в долоні неприродно швидко «обривається» – це характеризує акустичну середовище приміщення як «мертве». Але треба уточнити, що «мертве» акустичне середовище, як не дивно, іноді є необхідним. Так, є приміщення, у яких проводять випробування акустичних систем, призначених для запису звуку, і спеціалізовані приміщення без відлуння. Якщо виникає потреба зменшити час реверберації, для цього треба використовувати покриття на обмежуючих поверхнях приміщення, що поглинають звук. Тим не менш, основне в даному випадку «не перестаратися», тому що у відповідності з фізіологічними особливостями людей, система сприйняття звуку кожної людини налаштовується на природну реверберацію, і при її відсутності практично завжди відчувається дискомфорт. Тому звукове середовище будь-якого приміщення має бути врівноваженим, раціонально поєднувати ідеї «живої» і «мертвої» акустики і обов'язково слід враховувати індивідуальні особливості

слуху людини. Але, у всякому випадку, акустичне середовище приміщення не рекомендують надто «заглушати».

Флаттер ехо – явище, подібне відбиттю від дзеркальних поверхонь, які поміщаються одне навпроти іншого, коли звук по черзі «переміщується» від однієї поверхні до іншої і назад. Так, для відтворення даного акустичного явища потрібні дві паралельні поверхні, які відбивають звук. Наявність даного явища в сфері акустичних систем спричиняє негативний вплив на якість відтворення звуку, тому що це знижує чіткість мови, спотворює звучання музичних програм і надає йому неприємне пронизливе забарвлення.

Важливою властивістю первинних відбиттів є те, що до прибуття до слухача вони мають лише виключно одне відбиття від однієї відбиваючої поверхні. Приход цих відбиттів найбільш коротким шляхом, допустимим для відбиттів, забезпечує їм найменшу часову затримку, порівняно з моментом досягнення слухача прямого звуку і збереження досить значної амплітуди. Власне, цей фактор передбачає сприйняття вухом людини перших відбиттів разом з прямим звуком, тобто, у вигляді єдиного сумарного акустичного сигналу. Крім того, по суті, являючись «дзеркальним відбиттям» головного звукового сигналу, перші відбиття цілком зберігають його структуру. Перші відбиття з великою амплітудою, доходячи до слухача практично одночасно з прямим звуком і сприймаючись разом з ним, накладають на прямий звук підсилений вплив спотворення.

Одним з досить вагомих недоліків звукового середовища музичних приміщень, що важко виправляються, без сумніву, є акустичні резонанси в області низьких частот. Кожна звукова система має свої, властиві тільки їй резонанси. У стаціонарному стані, тобто, коли система знаходиться в рівновазі, вони зовсім не проявляються. Однак, як тільки система виходить зі стану рівноваги, наприклад, викликавши звук в приміщенні, як ця система відразу показує свої індивідуальні резонанси, яких досить багато. Сутність цього явища полягає в тому, що хвилі звуку, перед тим як повністю загаснути, здійснюють багатократні рухи «вперед-назад» між двома

паралельними поверхнями, які відбивають звук. Внаслідок того на окремих частотах відбиті хвилі звуку можуть збігтися за фазою і, як правило, збільшують одна іншу, що, як наслідок, проявляється у підвищенні їхньої сумарної амплітуди. Проте, проявляється це не на усіх частотах, а виключно тоді, якщо відстань між паралельними відбиваючими поверхнями цілочислено кратна половині довжини акустичної хвилі – реалізується так званий резонансний режим. Отже, резонанс звуку – це явище, за якого спостерігається значне збільшення амплітуди звуку при наближенні частоти збуджуючого сигналу до власної частоти приміщення.

Звукові хвилі невеликих частот, відбиваючись від перешкод, можуть багаторазово накладатися одна на іншу, сильно змінюючи вигляд картини інтерференції. Це залежить від точки розташування джерела звуку і перешкод на шляху хвиль. Проаналізуємо, що відбувається зі звуком на прикладі звукової системи, яка знаходиться в прямокутній кімнаті. Гучномовець випромінює звук на НЧ, він відбивається від поверхні перешкоди і взаємодіє із звуком, що відбився від інших перешкод, до прикладу, від стін або підлоги. Відбиті звукові хвилі сумуються зі звуковими хвилями, що виходять із гучномовців. В результаті взаємодії даних хвиль, окремі частини звучання можуть зменшуватися або навпаки, підсилюватися. Частоти, на яких відбуваються такі спотворення, називають "проблемними частотами". Смуга "проблемних частот" залежить від відстані від джерела звуку до відбиваючої поверхні. Чим менший даний період, тим ширша смуга частот і навпаки, чим більше відстань, тим менше проблемних частот. Інтерференційна картина ускладнюється при наявності в приміщенні декількох гучномовців. Природно, що кількість "проблемних частот" збільшується. Все викладене схоже з явищем "гребінчастої фільтрації", тільки лише для діапазону НЧ. Також, на відміну від НЧ резонансів, зазначеному процесу не потрібна наявність попарно паралельних відбиваючих поверхонь. Власне, тому, навіть незважаючи на те, що об'єктивні проявлення граничних ефектів виглядають так само, як і у випадку

з НЧ резонансами, дану акустичну проблему аналізують самостійно. Наведена звукова проблема отримала назву SBIR-ефект (Speaker Boundary Interference Response). Вона властива виключно для НЧ і з'являється в основному в малих приміщеннях.

1.5 Висновки по розділу 1

В результаті аналізу були виявлені головні проблеми акустики приміщень: ехо; флаттер ехо; ранні відбиття; резонанси кімнати і стоячі хвилі; граничні ефекти. Всі зазначені ефекти у підсумку впливають на імпульсну характеристику приміщень, тобто на їхню реакцію на короткий різкий звуковий імпульс. Тобто в імпульсній характеристиці є вся інформація про звукові характеристики приміщення і характер звучання.

Компенсація завад реверберації у цьому випадку полягатиме у вимірюванні імпульсної характеристики приміщення, знаходженні шляхом перетворення Фур'є АЧХ і ФЧХ системи і виправлення їх нелінійності у еквалайзері компенсації.

Дана кваліфікаційна робота виконана на кафедрі МІРЕС ХНУРЕ. На кафедрі проводяться дослідження в таких наукових областях, як виявлення та розпізнавання БПЛА за результатами акустичного спостереження [15-18], створення систем зондування атмосфери за допомогою акустичних хвиль [19-22]. Цілий ряд студентських доповідей [23-26] і атестаційних робіт магістрів минулих років [27-31] присвячені дослідженню систем озвучення приміщень. Отже, дослідження в даній роботі відповідають традиційному напрямку наукових робіт колективу кафедри МІРЕС.

2 МЕТОДИ ВИПРАВЛЕННЯ ЗВУКОВИХ СПОТВОРЕНЬ У ЗВУКОВИХ ТРАКТАХ

2.1 Алгоритм виправлення амплітудно-частотних і фазо-частотних спотворень

Виробники звукозаписуючих, відтворюючих і акустичних систем намагаються досягнути серйозного поліпшення у якісних показниках своїх продуктів, використовуючи цифрову обробку сигналів.

Розглянемо приклад використання цифрової обробки задля корекції АЧХ на прикладі системи CL3212 виробництва компанії PARK AUDIO. Система представляє собою гучномовець, який складається із 12-дюймової головки 12CL76 і 1-дюймового драйвера DE250 виробництва компанії V&C Speakers (Італія). Для початку опишемо роботу пасивної частини системи. Пасивна система не має вбудованого підсилювача і застосовує для розділення частотного спектра на окремі смуги пасивний кросовер. В системі CL3212 для НЧ динаміка використано фільтр 2-го порядку з крутизною спаду 12 дБ/окт., а для ВЧ динаміка – фільтр 3-го порядку з крутизною спаду 18 дБ/окт (рис.2.1).

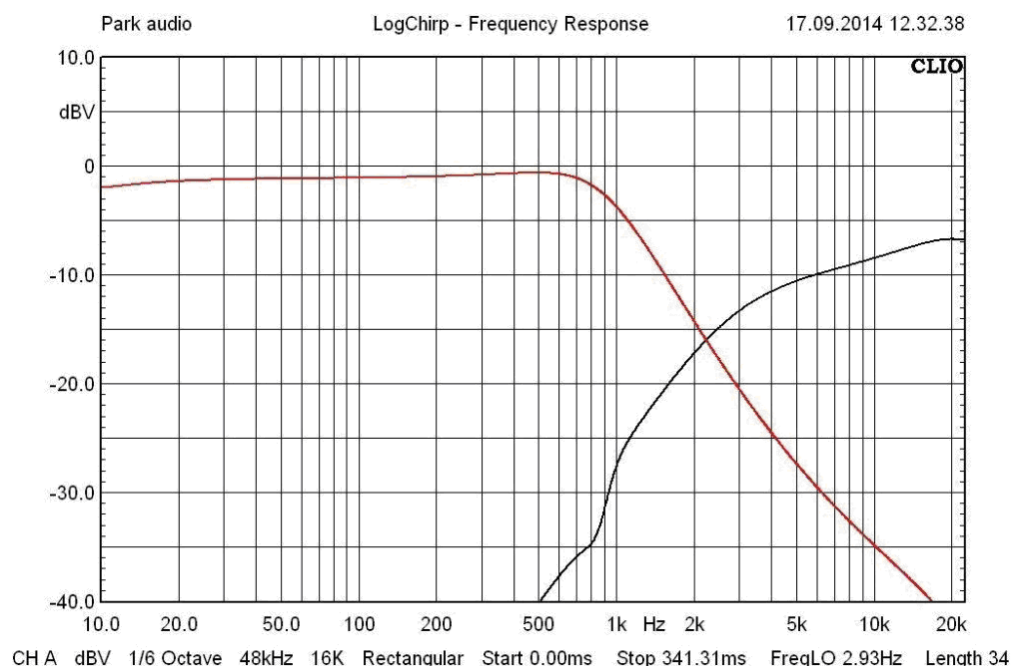


Рисунок 2.1 – АЧХ фільтрів пасивної системи

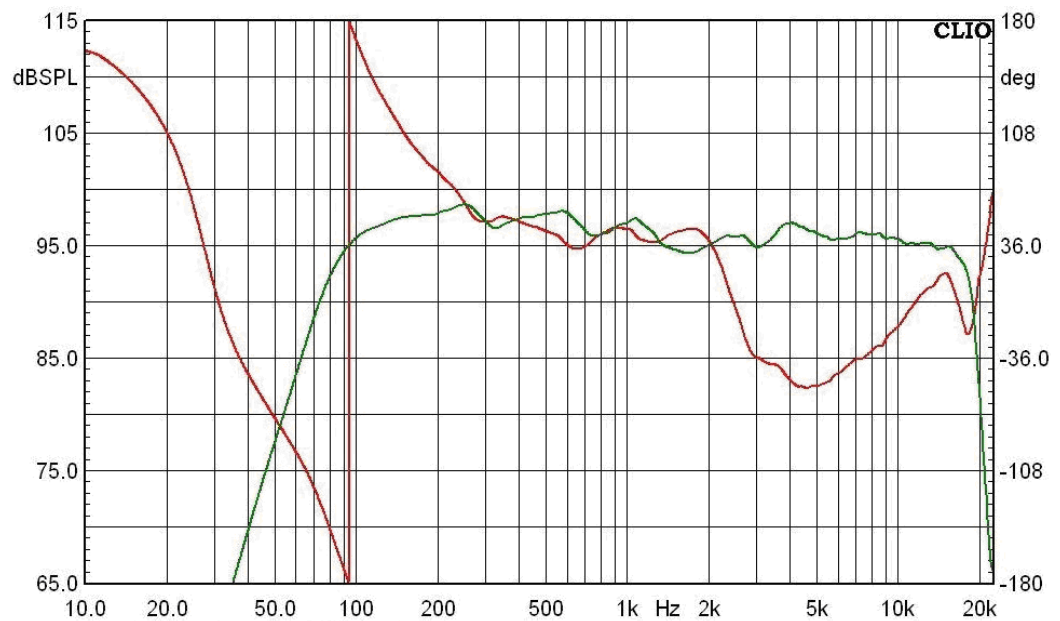


Рисунок 2.2 – АЧХ пасивної системи CL3212 на відстані 1 м при підведеній потужності 1Вт

На рис.2.2 зеленим кольором показана сумарна АЧХ системи, червоним – фазо-частотна характеристика (ФЧХ).

Видно, що в той час, коли АЧХ системи достатньо лінійна, ФЧХ має помітні спотворення. Отже, можливості пасивного фільтру обмежені. Зокрема, досить складно за його участю поєднати акустичні центри головок. Для того потрібно ввести затримку звукового сигналу, що надходить на одну із головок, а у пасивному фільтрі це не просто реалізувати. Можна спробувати коригувати АЧХ пасивної системи за допомогою параметричного еквайзера (рис.2.3).

Як видно з даних рис.2.3, АЧХ системи стала більш лінійна, але ФЧХ не вдалося вирівняти. Методи сучасної цифрової обробки сигналів дозволяють вирішити дану проблему шляхом застосування цифрових фільтрів. Для обробки звукових сигналів застосовують два класи фільтрів:

- ІІR фільтри;
- FIR фільтри.

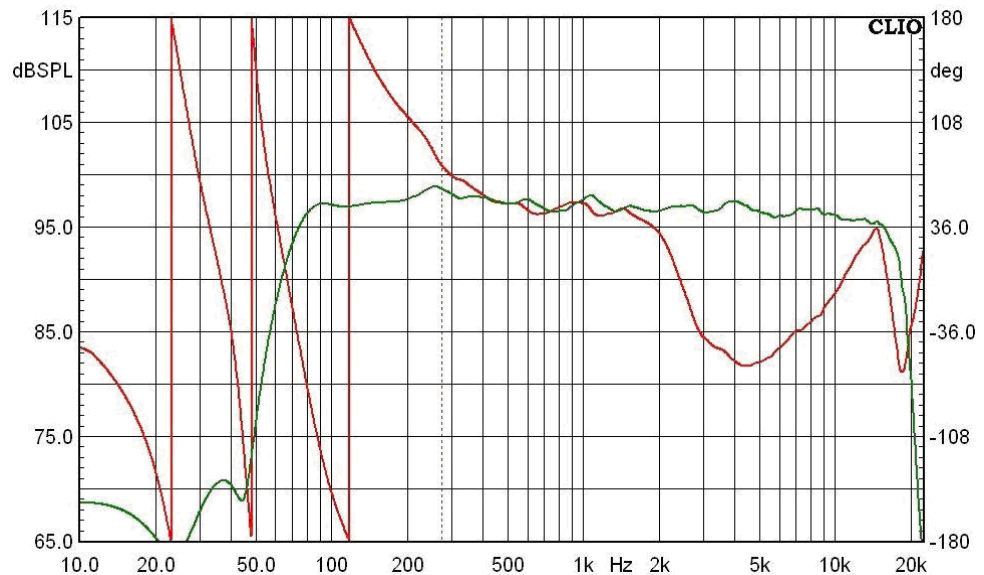


Рисунок 2.3 – АЧХ пасивної системи CL3212 після еквалізації на відстані 1 м при підведеній потужності 1Вт

IIR (Infinite Impulse Response) фільтри – фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою. Це є цифровою реалізацією аналогових фільтрів. Вони описуються тими ж параметрами: фільтр ВЧ Баттерворта 4-го порядку з крутизною спаду 24 дБ/окт., частотою зрізу 1,5 кГц. Також до даного типу фільтрів відносяться параметричні еквалайзери – коректори АЧХ. Вони зазвичай описуються наступними параметрами: частота налаштування, коефіцієнт підйому / спаду і добротність або ширина смуги. Ці фільтри прості в реалізації. Вони є так звані мінімально-фазові фільтри. Це означає, що будь-які зміни АЧХ неминуче змінюють фазові відношення у звуковому сигналі. Чим більше крутизна зрізу фільтра або добротність, тим більше отримуємо зсув фази в околиці частоти зрізу.

FIR (Finite Impulse Response) фільтри – фільтри з кінечною імпульсною характеристикою. В аналоговому варіанті ці фільтри реалізувати неможливо. Основною перевагою FIR фільтрів є те, що вони можуть змінювати АЧХ сигналу, не впливаючи на його фазу. З їх використанням можна реалізувати розділові фільтри, які не вносять зрушення фази на частоті перетину і застосовувати еквалізацію, яка не вносить фазових спотворень на частотах корекції. Взагалі можна сказати так: дані фільтри

роблять саме те, що мають робити, і нічого більше. Але ці фільтри мають і недоліки. FIR фільтри вносять затримки в оброблений сигнал, причому, чим більше НЧ сигнал потрібно обробити, тим більшу затримку у часі вносить фільтр.

Якщо у побутових системах, які звичайно працюють окремо від інших, можна мати досить великі значення затримки, то ц професійних звукових системах, які майже завжди працюють спільно з іншими системами (до прикладу, з сабвуферами) затримки більше 2 мс є неприпустимими. Тому діапазон оброблюваних частот FIR фільтрів зазвичай обмежується СЧ і ВЧ.

Для корекції НЧ діапазону застосовують традиційні ІІР фільтри. Розглянемо, як виглядатиме система після розділу смуг і корекції АЧХ за допомогою FIR фільтрів. Налаштуємо дану систему в активній конфігурації з роздільним посиленням смуг частот. Кожна із головок підключена до індивідуального каналу підсилення, а фільтри розділення і корекція АЧХ реалізовані на процесорі (DSP), який входить до складу модуля підсилення DX700DSP. Отримані результати показані на рис.2.4.

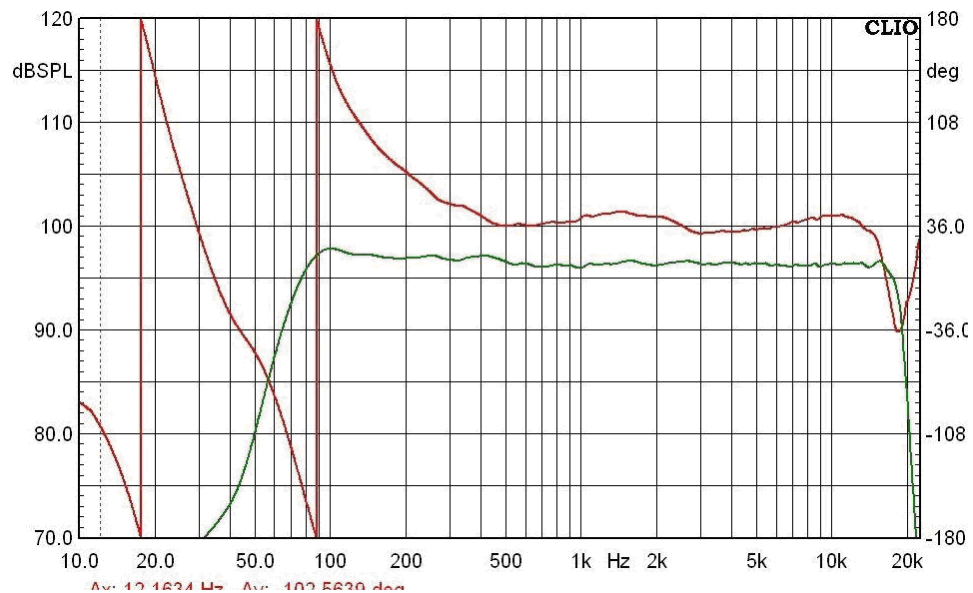


Рисунок 2.4 – АЧХ системи CL3212 з роздільними підсилювачами НЧ і ВЧ, застосована обробка з використанням FIR фільтрації, відстань 1 м, підведена потужність 1Вт

АЧХ системи перетворилася фактично в пряму лінію, ФЧХ в області СЧ також стала практично лінійною. В області НЧ вирівняти фазу не вдається, тому що внаслідок великих затримок обробки на НЧ не можна застосувати FIR фільтрацію.

Визначимо, як впливає лінійність ФЧХ на відтворення звуку акустичною системою. Для тестування використаємо у якості тестового сигналу меандр – послідовність прямокутних імпульсів за шпаруватістю 2 і нульовим середнім. В спектральному сенсі меандр є сумою нескінченного числа синусоїд, кожна із яких має свої амплітуду і фазу. Тому при проходженні меандру через звукову систему можна виявити проблеми в часовій області.

Всі синусоїдальні компоненти мають бути передані системою без зміни часу приходу для того, щоби мати на виході знову прямокутну форму. Важливо розуміти, що затримка в часі системи не має дорівнювати нулю. Але вона має бути однаковою для усіх частот у межах смуги пропускання системи. Ця умова легко виконується, якщо випробуванв система має лінійну ФЧХ. Навіть при тому, що меандр через акустичні системи не слухає ніхто, він являє собою тестовий сигнал, спостерігаючи який легко побачити спотворення сигналу у часі, що проходить крізь гучномовець. Амплітудні або часові спотворення зразу видно, і це допомагає усвідомити причини спотворень. Отже, подамо прямокутний сигнал на звукову систему з пасивним фільтром (рис.2.5).

На фронтах імпульсів на виході помітне неідеальне часове стикування сигналів від НЧ і ВЧ головок, а на пласкій частині – нерівномірність, яка викликана нерівномірністю АЧХ системи. Це дає 2 можливості для покращення форми вихідного сигналу: загладити частотну характеристику і покращити часове узгодження нучномовців між собою (це дасть, у тому числі, вирівнювання ФЧХ системи). Аналогічні вимірювання для активної системи з FIR фільтрацією показані на рис.2.6.

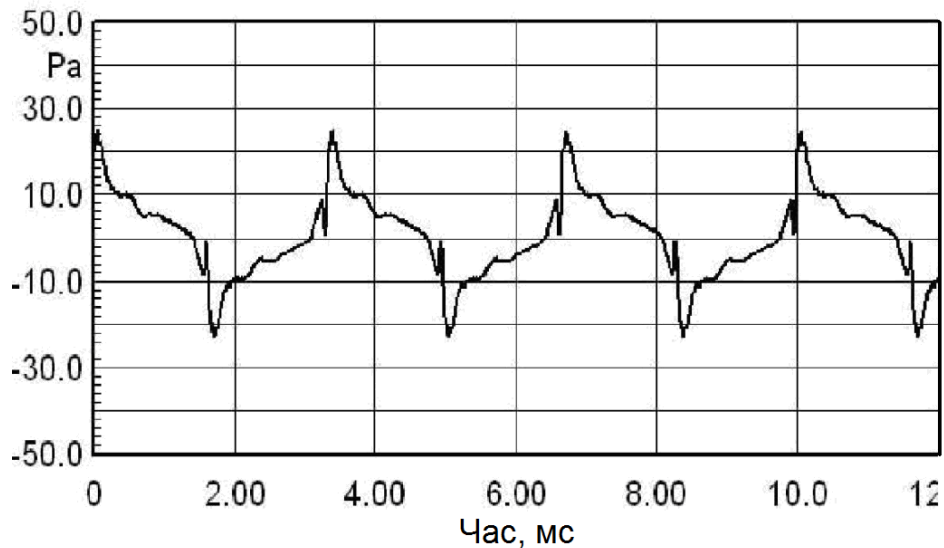


Рисунок 2.5 – Спотворення меандру на виході системи CL3212 з пасивним фільтром

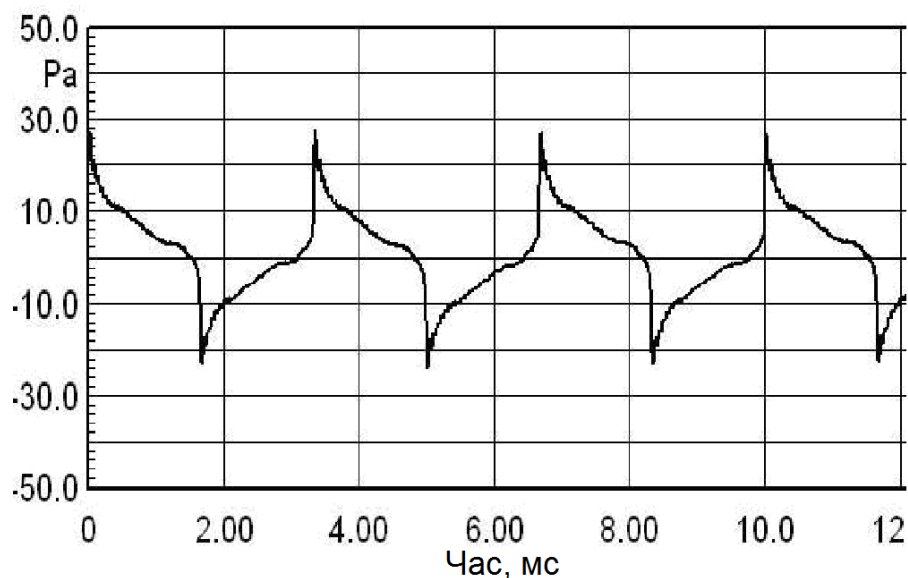


Рисунок 2.6 – Спотворення меандру на виході системи CL3212 с роздільними НЧ та ВЧ підсилювачами, обробка з застосуванням FIR фільтрації

Помітно, що зникли усі помилки у часі стикування на фронтах сигналів, плоска частина імпульсів стала практично рівною. Перехідні характеристики системи набагато поліпшилися. Це сприятливо позначається на чіткості і прозорості відтворення звучання акустичною системою. Система також буде більш передбачуваною при спробі додаткової її еквалізації під конкретні акустичні умови.

2.2 Корекція нелінійних спотворень

Існує метод корекції нелінійних спотворень в підсилювачах звукових сигналів шляхом паралельного підсилення сигналів в двох каналах (зі співпадаючими амплітудними характеристиками) і подальшого формування із даних сигналів, підсилених в каналах, різницевого вихідного сигналу. При цьому сигнал на вході одного з каналів ослаблюють на n дБ, вихідний сигнал другого каналу ослаблюють на $3n$ дБ, а різницевий вихідний сигнал отримують шляхом підсилення в каналах синфазних сигналів та віднімання одного посиленого сигналу з другого.

Метод дозволяє компенсувати 3-ю гармоніку і зменшити інтермодуляційні спотворення сигналу на виході.

Таким методом вирішується задача розширення кількості технічних засобів, спрямованих на покращення лінійності тракту підсилення за рахунок компенсації непарних гармонік сигналу.

Для досягнення даного технічного результату метод корекції нелінійних спотворень у підсилювачі звукових сигналів включає паралельне підсилення сигналів в 1-му і 2-му каналах посилення і подальше формування з посиленних в каналах сигналів різницевого вихідного сигналу. Метод також передбачає етап послаблення вхідного сигналу одного із каналів і етап послаблення вихідного сигналу одного з каналів. На відміну від оригіналу в даному методі струми спокою елементів підсилення 1-го каналу встановлюються більшими за струми спокою елементів підсилення 2-го каналу. При цьому ослаблюють вхідний сигнал 1-го каналу – в разі використання в каналах елементів підсилення з прохідною характеристикою, яка апроксимується показниковою функцією, або ослаблюють вхідний сигнал 2-го каналу – в разі використання елементів підсилення з прохідною характеристикою, яка апроксимується ступеневою функцією, або ослаблюють вихідний сигнал 2-го каналу – в останньому з вказаних випадків.

Для наведених в методів випадків або вхідний сигнал 1-го каналу ослаблюють в K_1 разів, або вхідний сигнал 2-го каналу ослаблюють в K_2 разів, або вихідний сигнал 2-го каналу ослаблюють в K_3 разів:

$$K_1 = \left(\frac{n}{m}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{I_{01}}{I_{02}}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad K_2 = \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{I_{01}}{I_{02}}\right)^{\frac{3-\alpha}{3}}, \quad K_3 = \frac{m}{n} \left(\frac{I_{01}}{I_{02}}\right)^{\frac{3-\alpha}{3}}, \quad (2.1)$$

де n, m – кількості паралельно включених елементів підсилення (або їх пар при 2-тактному посиленні) відповідно 1-го і 2-го каналів;

I_{01}, I_{02} – струми спокою елементів підсилення відповідно 1-го і 2-го каналів;

α – показник ступеневої функції, який апроксимує прохідну характеристику елемента підсилення.

Наведені в (2.1) вирази дозволяють отримати мінімальний рівень третьої гармоніки у спектрі вихідного звукового сигналу.

Різницевий вихідний звукового сигнал формується шляхом посилення в першому і другому каналах інвертованих сигналів і наступного додавання посиленних сигналів. Метод дозволяє найбільш просто реалізувати себе в безтрансформаторних двотактних каскадах.

2.3 Корекція ехо-сигналів

На практиці звукові сигнали мають певну ступінь забруднення шумами, інтенсивність таких спотворень може приводити аж до повної втрати інформативності корисного звуку в точці його приймання. Це пов'язано з варіативністю характеристик акустичних завад і трактив передачі. Тому правильно розглядати звуковий сигнал комплексно, як носій інформації, а також завади і (або) шуми.

За своїми характеристиками звукові сигнали значно відрізняються від завад. До цих характеристик належать одномірні функції розподілу вірогідностей, функції автокореляції і спектральні щільності потужності на короткому інтервалі в силу нестационарності звукових сигналів. Досліджувані спотворення відповідають випадку, коли приймання сигналу здійснюється у закритому просторі, де потрібно враховувати спотворення, пов'язані з численними відбиттями. Ехо-сигнали утворюються за рахунок відбиттів звукового сигналу від різного роду перешкод (стін, підлоги, стелі, меблів тощо), тобто мають залежність від характеристик озвучуваного приміщення.

Є різні алгоритми компенсації ехо. Найбільш ефективним по швидкості і точності налаштувань виявився алгоритм найменших квадратів з нормалізацією потужності, рекурсивний алгоритм найменших квадратів із перетворенням Хаусхолдера, метод афінних проєкцій і решітчастий рекурсивний метод найменших квадратів. Серед методів адаптації, які функціонують в частотній області, найбільш ефективними виявилися метод найменших квадратів на основі швидкого перетворення Фур'є і дискретного косинусного перетворення.

Адаптивна корекція використовується у випадках, коли умови обробки сигналів не є постійними або невідомі і потрібно їх постійне підлаштування. Ехо-компенсація є процесом видалення паразитного ехо-сигналу з корисного звукового сигналу. Коефіцієнти передачі і затримки в каналах розповсюдження ехо можна вважати незмінними. У даному випадку модель численних відбиттів без врахування реверберації можна описати за допомогою формули:

$$x(t) = \sum_{k=0}^r a_k x_0(t - \tau_k) = \sum_{k=0}^r a_k x_0(t - D_k T_0). \quad (2.2)$$

Задача при цьому полягає у визначенні затухань $a_k(\theta)$, що залежать від орієнтації θ мікрофона, і затримок $\tau_k = D_k T_0$ в $r + 1$ каналах ехо.

За визначенням, сигнал $x_0(t)$ є відомим і стаціонарним. Це дозволить використати метод кореляційного аналізу, обчислюючи взаємну кореляційну функцію сигналів $x_0(t)$ та $x(t)$ за таким виразом:

$$\widehat{R}_{x_0x}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x_0(t)x(t-\tau)dt. \quad (2.3)$$

Можна вважати, що оцінки затримок $\tau_k = D_k T_0$ є точками локальних максимумів функції (2.3), тобто знаходяться в результаті вирішення задачі:

$$\widehat{\tau}_k = \widehat{D}_k T_0 = \arg \text{loc max } \widehat{R}_{x_0x}(\tau). \quad (2.4)$$

Коефіцієнти затухання обчислюються за формулами:

$$a_k = \frac{1}{\widehat{R}_{x_0x}(0)} \widehat{R}_{x_0x}(D_k T_0), \quad \widehat{R}_{x_0x}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T x_0(t)x(t)dt. \quad (2.5)$$

В ході приймання сигналу здійснюється його перетворення в електричні сигнали, які потім оброблюються. На рис. 2.7 показана структурна схема обробки звукового сигналу із застосуванням пам'яті з повторними (однотипними) завадами і шумами, що зменшує час на компенсацію ехо-завад і перешкод в оброблюваному сигналі.

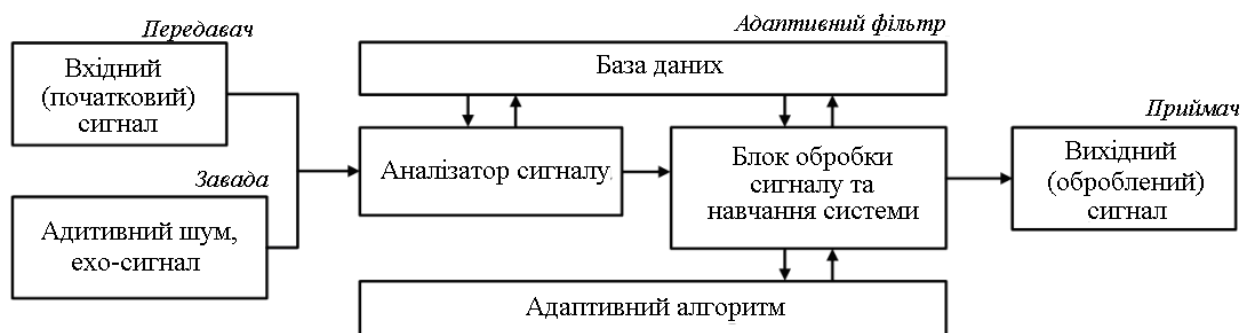


Рисунок 2.7 – Структурна схема обробки звукового сигналу

Після виконання необхідної кількості ітерацій для навчання системи, якість фільтрації сигналів зростатиме незалежно від ступеня і складності

його зашумлення. На рис. 2.8 представлено зашумлений вхідний мовний сигнал (а) і його відфільтрований варіант (б).

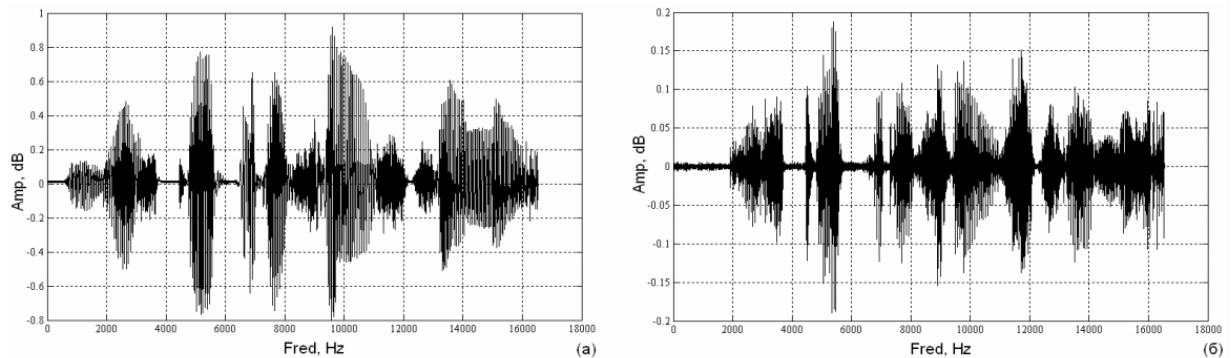


Рисунок 2.8 – Зашумлений мовний сигнал (а) і його відфільтрований варіант (б)

Адаптивні компенсатори завад дозволяють значно поліпшують якість зашумлених сигналів – до декількох десятків дБ, але вимагають наявності опорного сигналу, що суттєво звужує сферу їхнього застосування. У даному алгоритмі адаптивний фільтр є складовою частиною, яку інтегровано в систему.

2.4 Корекція акустичних характеристик приміщення

Звукопоглинання є головним і найбільш часто використовуваним інструментом з акустичного оброблення невеликих приміщень, на кшталт вокальних кімнат, малих концертних залів, приміщень студій звукозапису і т.ін. Це обумовлено універсальністю методу звукопоглинання, що дозволяє контролювати практично всі акустичні параметри приміщення: НЧ резонанси, SBIR-ефект, ефект формантного звучання, флаттер ехо, великий час реверберації.

Дія майже усіх відомих звукопоглинальних матеріалів і спеціальних конструкцій основана на зменшенні однієї з двох головних характеристик звукової хвилі, а саме, компоненти її швидкості або створюваного хвилею

звукового тиску. Відповідно розрізняють два основні типи звукопоглинання: резистивне поглинання і резонансне поглинання.

В природі немає матеріалів, що абсолютно поглинають звук. Є різниця – наскільки ефективно вони виконують поглинання. Ефективність поглинання звуку конкретного матеріалу α визначається як відношення поглиненої ним звукової енергії до загальної кількості акустичної енергії, яка потрапляє на нього і називається коефіцієнтом поглинання звуку.

Отже, за «1» коефіцієнта поглинання звуку приймається ідеальний 100% звукопоглинач, що поглинає повністю всю падаючу на нього акустичну енергію.

Коефіцієнт поглинання звуку в усіх матеріалів різних, його значення дуже сильно залежить від частоти. З даної причини вибір поглинаючих матеріалів і конструкцій є непростим завданням для новачків і навіть для професіоналів.

У табл.2.1 показані значення коефіцієнтів поглинання звуку для матеріалів різного типу в залежності від частоти.

Таблиця 2.1 – Значення звукопоглинання матеріалів

Коефіцієнт звукопоглинання						
Матеріал	Смуги частот, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Вода (басейн)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Цемент	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Гіпсові панелі	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04
Дерево	0,15	0,2	0,1	0,1	0,05	0,05
Цегляна стіна	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05
Скло	0,3	0,2	0,1	0,07	0,05	0,02
Паркет	0,1	0,25	0,1	0,1	0,05	0,05
Пластик	0,03	0,04	0,05	0,05	0,08	0,08
Килим	0,05	0,1	0,3	0,5	0,05	0,7
Пусте м'яке крісло	0,15	0,25	0,35	0,4	0,45	0,35
М'яке крісло з людиною	0,25	0,4	0,55	0,05	0,65	0,6
Скловата	0,2	0,45	0,7	0,8	0,8	0,8
Публіка (м ²)	0,4	0,6	0,8	0,9	0,9	0,8
Пінополіуретан	0,15	0,4	0,95	1	1	1

Аналізуючи дані, показані в табл.2.1, можна помітити, що коефіцієнт поглинання звуку обернено пропорційний щільності матеріалів, тобто, в загальному випадку, більш щільніші матеріали мають менший коефіцієнт, в той час, як менш щільніші і пухкі матеріали мають значно вищі показники коефіцієнту поглинання звуку.

У зв'язку з цим, для оброблення приміщень, до акустичного середовища яких висуваються особливі вимоги, застосовуються, в основному, поглинаючі матеріали із пухкою структурою. Часто такі матеріали називаються акустичними.

Найчастіше для створення опору потоку повітря використовуються акустичні матеріали, які мають пористу (порожнинну або волоконну) внутрішню структуру, на кшталт мінеральної або скловолоконної вати, акустичного поролону, ватину і т.ін. При проходженні крізь тіло такого матеріалу виникає тертя рухомих молекул повітря об щільно розташовані переплетені волокна чи стінки матеріалу з пористою структурою, в результаті чого частина звукової енергії акустичної хвилі перетворюється в теплову.

У загальному об'ємі структури пористого звукопоглинального матеріалу головна речовина складає тільки незначну його частину, представляючи собою щось типу «скелета», який формує численні відкриті ззовні і сполучені між собою пори, канали чи порожнини, заповнені повітрям. З огляду на особливості внутрішньої структури і механізму поглинання звуку, такі акустичні матеріали також називають поглиначами пористого типу, пористими звуковими абсорберами або пористими акустичними матеріалами.

Отже, в основі резистивного звукопоглинання знаходиться принцип поглинання швидкісної енергетичної компоненти звукової хвилі.

Ще однією відмінною особливістю акустичних матеріалів, які відносяться до даної групи, є той факт, що при впливі звукової хвилі вони

лишаються нерухомими. Тому їх також звать пасивними акустичними поглиначами.

На підставі зазначеного вище, очевидно, що розташовувати акустичні поглиначі, дія яких заснована на принципі резистивного поглинання звуку слід на достатньому віддаленні від поверхонь, підлоги, стелі, стін тобто, в областях, яких швидкість часток повітря є максимальною.

Отже, оскільки акустична дія пористих абсорберів заснована на принципі поглинання швидкісної енергетичної компоненти звукової хвилі, то їх розташування безпосередньо у твердій відбиваючій поверхні зовсім не раціонально, оскільки швидкість звукових хвиль в даних областях дорівнює нулю.

В загальному випадку, чим більшою є відстань між поглинальним матеріалом і відбиваючою поверхнею, тим активнішим є поглинання звукової енергії в більш низькочастотному діапазоні (рис 2.9).

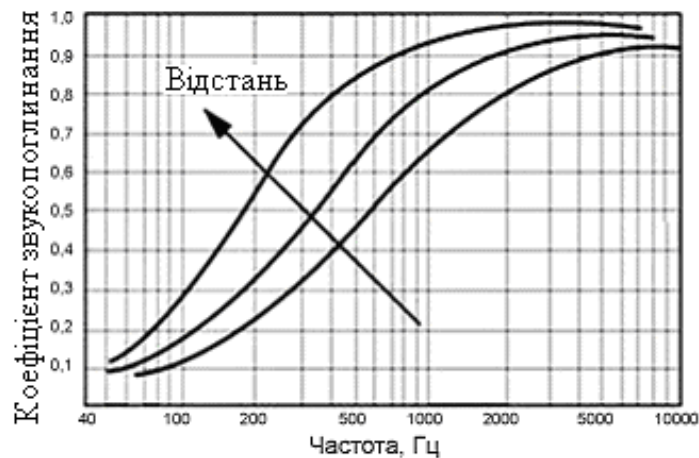


Рисунок 2.9 – Залежність коефіцієнта звукопоглинання від відстані до відбиваючої поверхні

Даний ефект безпосередньо пов'язаний із довжиною звукових хвиль, а саме, чим більше зазор повітря між звукопоглинальним матеріалом і відбиваючою поверхнею, тим більшої довжини звукові хвилі здатний поглинати акустичний матеріал.

Звукопоглинальна конструкція даного типу, по суті, є « $\frac{1}{4}$ -хвильовим поглинальним фільтром». Вона має максимум поглинання звуку на частоті, для якої відстань від найближчої відбивної поверхні до поглинального матеріалу становить $\frac{1}{4}$ довжини звукової хвилі або кратна непарному числу чвертей її довжини.

Приблизна величина найнижчої частоти поглинання звичайного $\frac{1}{4}$ -хвильового поглинача нескладно обчислити за формулою:

$$F_0 = \frac{c}{4L}, \quad (2.6)$$

де c – швидкість поширення звуку в повітрі, м/с,

L – відстань між пористим поглиначем і відбивною поверхнею, м.

Наприклад, при відстані між пористим поглиначем і відбивною поверхнею $L=15$ см нижня частота $F_0 = 565$ Гц. Крім того, дана конструкція також має максимуми поглинання і на непарних кратних значеннях частот F , наприклад: $3F_0$ (1695 Гц), $5F_0$ (2825 Гц), $7F_0$ (3955 Гц) і т.д.

Чим товстішим є пористий абсорбер, тим ефективніше він поглинатиме низькі частоти (рис. 2.10).

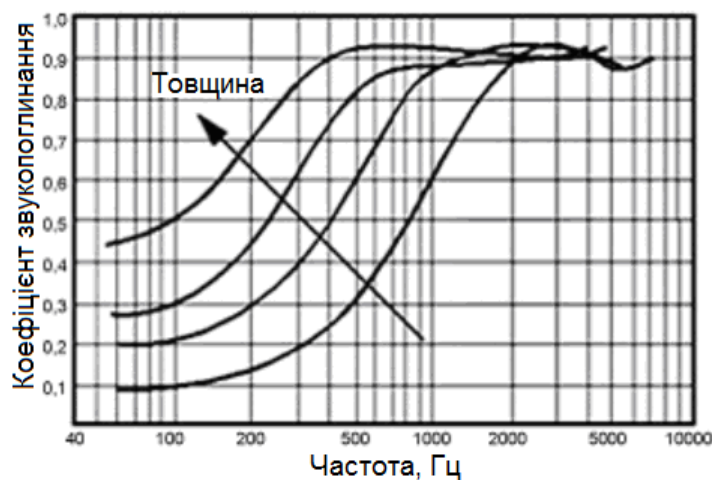


Рисунок 2.10 – Залежність коефіцієнта поглинання звуку від товщини абсорбера

Отже, товщину пористого поглинача, як і мінімальну відстань повітряного зазору між ним і відбивною поверхнею, обирають із розрахунку, як мінімум чверті довжини хвилі планованої найнижчої частоти, що має поглинатися.

Крім того, коефіцієнт поглинання звуку пористим поглиначем також залежить від щільності матеріалу, з якого він виготовлений або від величини його об'ємної маси, тобто, маси 1 м^3 акустичного матеріалу. Чим більше пористість, тим легший матеріал і, відповідно, тим менше його щільність. Такий матеріал краще поглинає ВЧ і гірше – більш низькі.

У той же час, чим більше щільність матеріалу пористих поглиначів, тим ефективніше вони поглинають більш низькі частоти. Зрозуміло, що це твердження є справедливим лише до певних значень об'ємної маси, як правило, не вище 120 кг/м^3 . Також слід пам'ятати про той факт, що щільні акустичні матеріали відбивають більш високі частоти.

Отже, пористі поглиначі раціонально використовувати для звукової корекції у СЧ і ВЧ діапазонах.

На відміну від пористих поглиначів, в основі акустичної дії абсорберів резонансного типу лежить принцип поглинання акустичної енергії звукового тиску, створюваного хвилею звуку безпосередньо у відбивній поверхні. Це визначає як конструктивні особливості подібних засобів, так і специфіку їхнього розміщення в приміщенні.

Резонансний тип поглинання звуку має на увазі використання принципу резонансу, а значить, розмова йде про НЧ діапазон нижче 200 Гц, де акустичні матеріали вже малоефективні або зовсім неефективні. Для такої задачі використовуються спеціальні акустичні засоби – низькочастотні поглиначі резонансного типу.

Акустична дія цих засобів заснована на принципі виникнення вільних коливань у деяких елементах їхньої конструкції синхронно з коливаннями частинок повітря у приміщенні, викликаними впливом хвиль звуку.

В акустиці найбільш часто застосовують два види таких засобів, це:

- мембранні поглиначі;
- поглиначі, які працюють за принципом резонатора Гельмгольца.

Характерною особливістю поглиначів звуку резонансного типу є їх здатність поглинати звуки на частотах, довжини хвиль яких набагато перевершують розміри самих засобів.

Розглянемо мембранні НЧ поглиначі. Резонансним елементом подібних конструкцій є пружна передня панель, яка виконує роль акустичної діафрагми чи мембрани. Саме тому ці акустичні пристрої називають низькочастотними діафрагмовими (мембранними) поглиначами або панельними поглиначами.

Панельний поглинач є системою маса-пружина («маса» – діафрагма, «пружина» – внутрішній об'єм повітря, укладений в герметичний корпус конструкції) і, відповідно, має власну частоту резонансу. Внаслідок цього, робочий діапазон частот таких пристроїв достатньо вузький і не виходить за межі обмеженої околиці від значення цієї частоти. Найбільша ефективність поглинання звуку спостерігається на частоті резонансу панельного поглинача. Отже, на відміну від пористих поглиначів, мембранний абсорбер є високодобротним пристроєм.

Конструктивно корпусом панельного абсорбера є жорсткий прямокутний рамковий каркас, що жорстко закріплюється безпосередньо на поверхні стіни або стелі і герметично закривається ззовні гнучкою масивною панеллю. Отже, пристрій являє собою герметичний ящик-резонатор із замкнутим всередині повітряним об'ємом. Передньою стінкою поглинача є гнучка діафрагма (мембрана), задньою – поверхня стіни (або стелі), а роль бічних стінок виконують елементи прямокутного рамкового каркасу. Іноді, в мобільному варіанті панельного абсорбера, його задня стінка виконана у вигляді окремого елемента корпусу.

Як матеріал для мембрани звичайно використовують листи не дуже товстої фанери, ДВП, MDF або геометрично стабільні еластичні листові матеріали.

2.5 Висновки по розділу 2

Компенсація ревербераційних завад полягатиме у вимірюванні імпульсної характеристики приміщення, знаходженні через перетворення Фур'є АЧХ і ФЧХ системи і виправлення їх нелінійності у компенсуючому еквалайзері.

Суть вимірювання полягає в формуванні ЛЧМ сигналу заданого частотного діапазону, відтворення отриманого сигналу акустичною системою з подальшим записом звукової картини за допомогою вимірювального мікрофона.

Задача наступного розділу – визначити особливості, умови і деталі експерименту з компенсації ревербераційних ефектів.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕКЦІЇ АЧХ В УМОВАХ ПРИМІЩЕННЯ КОНФЕРЕНЦ-ЗАЛУ

3.1 Опис приміщення і системи підсилення звуку

Дослідження проведено в приміщенні конференц-залу в січні 2022 р. Приміщення має витягнуту прямокутну форму з габаритними розмірами 12 м в довжину, 6,5 м в ширину і 3,5 м в висоту. Схематичне зображення приміщення наведено на рис.3.1.

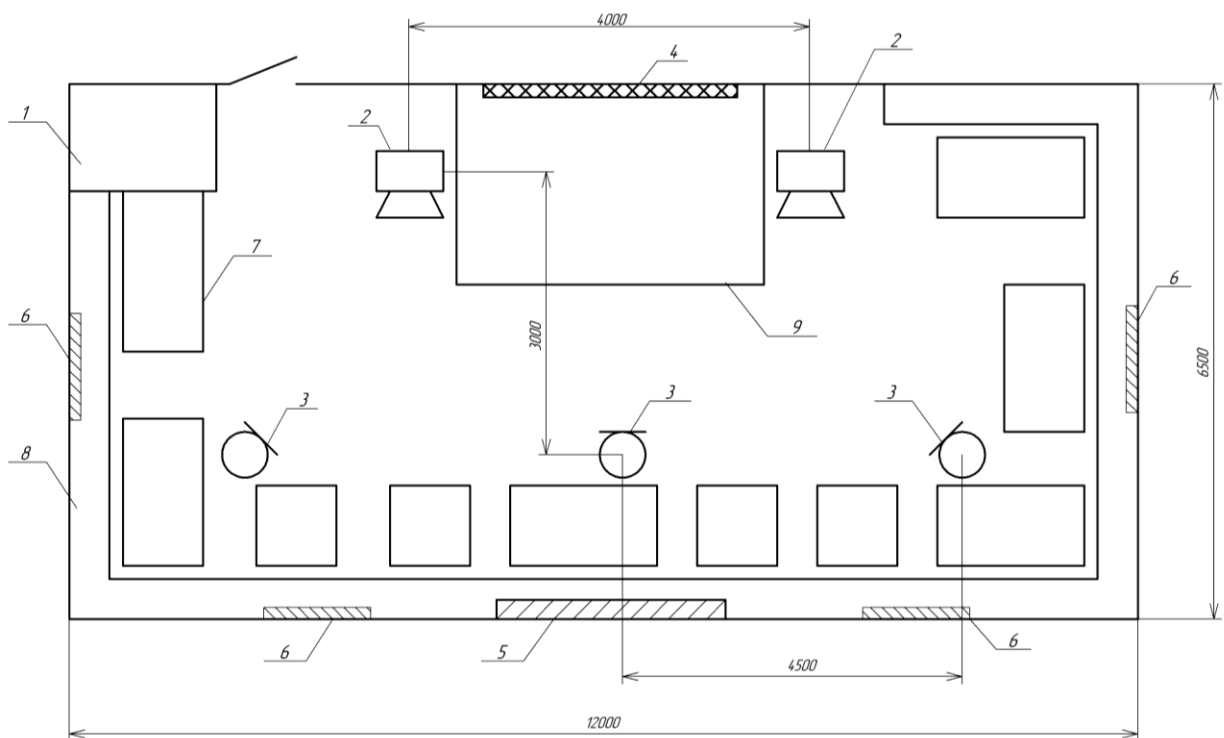


Рисунок 3.1 – План приміщення конференц-залу

Конференц-зал має ряд особливостей. Підлога покрита ковровіном, за винятком підйому, який імітує сцену, по центру приміщення, позначеного поз.9. Дана сцена має суцільне покриття деревом. Поз.1 позначено робоче місце режисера звуку, що відділене від іншого приміщення стінками з гіпсокартону і має дерев'яні дверцята. Вагома частина стін конференц-залу закрита декоративними шторами із щільної тканини, тим не менш, є і непокріті ділянки, які мають штукатурену офарбовану поверхню. Також на

стінах є дві декоративні картини: поз.5 – суцільна квадратна картина зі скла зі стороною 2 м; поз.4 – дзеркальна мозаїка з невеликих фрагментів, що займає ділянку стіни $2 \times 2,5$ м. Крім того, на стінах розташовані чотири LED-екрани поз.6, що мають глянцеві поверхні схожі за характеристикам зі склом. Уздовж стін по периметру залу розташовані м'які дивани (поз.8). Перед диванами розташовані дерев'яні столи (поз.7), їх кількість і розташування може змінюватися в разі необхідності. Стеля має складну структуру, яка включає поверхні з гіпсокартону, рельєфної плитки із легкого пластика, а також пінопласту. Зліва і справа від сцени симетрично розташовано акустичні системи (поз.2). Поз.3 позначені положення мікрофону під час виконання вимірювань.

Система підсилення звуку представлена мікшерним пультом Soundcraft EFX 8 і звуковою системою Peesker Sound Upturned T. Зовнішній вид і склад звукової системи показані на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 – Звукова система Peesker Sound Upturned T

Дана звукова система має з три елемента:

- широкосмугова колонка з вузькою діаграмою спрямованості,
- широкосмугова колонка з широкою діаграмою спрямованості,
- активний сабвуфер.

Кожна колонка має вісім 4-дюймових гучномовців, розташованих попарно під певними кутами у протилежні сторони. Так, для колонки з вузькою діаграмою спрямованості пари динаміків від нижнього до верхнього стоять під кутами 30°, 20°, 10° і 0°, а для колонки з широкою діаграмою пари з кутами повороту 30° і 20° чергуються через один.

Параметри і характеристики колонок:

- RMS потужність 400 Вт;
- діапазон частот 140...18000 Гц;
- звуковий тиск (максимальний, довготривалий) 107 дБ;
- звуковий тиск (піковий) 129 дБ;
- вхідний імпеданс 16 Ом.

Параметри і характеристики сабвуфера:

- RMS потужність 800 Вт;
- діапазон частот 40...160 Гц;
- звуковий тиск (максимальний) 132 дБ;
- клас підсилення D;
- обробка DSP с чотирма пресетами.

На рис.3.3 показано зовнішній вигляд міксерного пульта Soundcraft EFX8. До особливостей даного мікшерного пульта слід віднести наявність вбудованого процесора звукових ефектів Lexicon, додаткової шини AUX, наявність розриву перед загальним виходом, це дозволяє застосовувати обробку загального міксу.

Даний пульт має 8 монофонічних каналів, що мають як мікрофонні так і лінійні входи. Додатково є 2 стереофонічних канали, що мають лінійні входи. Кожен монофонічний канал має регулювання чутливості, 3-смуговий квазіпараметричний еквайзер, регулювання рівню посиленн на шину AUX-виходу і шину процесора ефектів, а також налаштування панорами.



Рисунок 3.3 – Мікшерний пульт Soundcraft EFX8

Рівень сигналу, що відправляється з каналів на головну шину, керується індивідуально 10 мм фейдерами. Стерефонічні канали мають аналогічні налаштування, за винятком еквайзера, який має 3 фіксовані смуги.

3.2 Розробка методики вимірювань

Суть вимірювань полягає в формуванні лінійно частотно модульованого (ЛЧМ) сигналу в заданому частотному діапазоні, відтворення отриманого сигналу звуковою системою з подальшим прийманням за допомогою вимірювального мікрофона і подальшим записом звукової картини.

Структурна схема вимірювальної системи показана на рис.3.4. Елементами схеми є:

- мікшерний пульт (МП);
- акустична система (АС);

- звукова карта (ЗК);
- персональний комп'ютер (ПК);
- вимірювальний мікрофон (М).

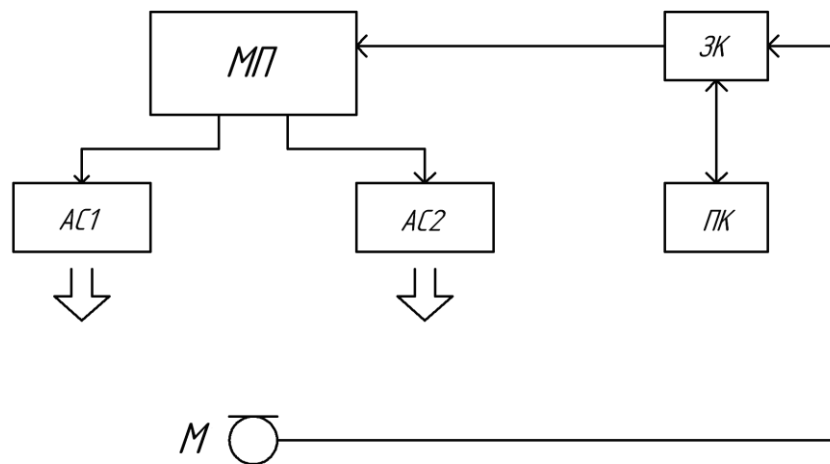


Рисунок 3.4 – Структурна схема вимірювань

У якості звукової карти був обраний тип Lexicon Lambda, що має необхідний функціонал для проведення дослідження, а саме:

- мікрофонний вхід з наявністю фантомного живлення 48 В,
- лінійний вихід для підключення до системи підсилення звуку
- універсальний USB-інтерфейс для підключення до персонального комп'ютера.

Незважаючи на те, що сучасні звукові карти мають високу рівномірність АЧХ, для подібного роду вимірювань потрібне її калібрування. Воно проводиться шляхом поєднання виходу і входу звукової карти коротким проводом і відтворення контрольного сигналу. Після чого отриманий результат оцінюється шляхом його порівняння з контрольним сигналом і за необхідності вводяться корекції характеристик, з врахуванням чого виконуються подальші вимірювання.

У якості вимірювального мікрофона використано мікрофон типу Superlux ESM999. Головною відмінністю вимірювального мікрофону є широка смуга пропускання з високою рівномірністю АЧХ, тому цей мікрофон не потребує калібрування.

Зовнішній вигляд вимірювального мікрофону Superlux ECM999 показаний на рис.3.5.



Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд вимірювального мікрофону Superlux ECM999

Параметри мікрофону Superlux ECM999:

- тип перетворювача – конденсаторний (електретний);
- діаграма спрямованості – всеспрямований;
- частотний діапазон – 20 Гц ... 20 кГц;
- чутливість мікрофону – 14 мВ/Па;
- імпеданс – 200 Ом;
- максимальний рівень звукового тиску – 132 дБ;
- напруга живлення +9...+52 В.

3.3 Формування ЛЧМ сигналів

Вид лінійного ЛЧМ сигнал зображений на рис.3.6. У лінійному ЛЧМ сигнал миттєва частота, яка визначається формулою (3.1), змінюється лінійно у часі (3.2)

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{\omega(t)}{2\pi}, \quad (3.1)$$

$$f(t) = f_0 + kt, \quad (3.2)$$

де f_0 – початкова частота (в момент $t = 0$) та

k – швидкість збільшення частоти або швидкість ЛЧМ сигналу (рис.3.6), $k = (f_1 - f_0)/T$,

де f_1 – кінцеве значення частоти,

T – тривалість свіпу між частотою f_0 та f_1 .

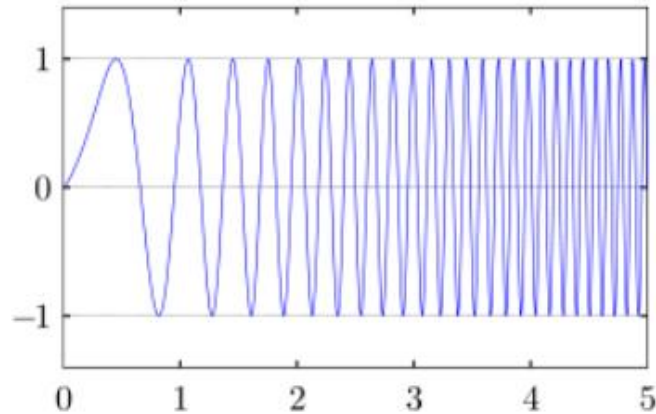


Рисунок 3.6 – Форма ЛЧМ сигналу – синусоїдальної хвилі з лінійним зростанням частоти

Відповідна функції часу фаза ЛЧМ сигналу є інтегралом від функції частоти при збільшенні фази

$$\varphi(t + \Delta t) \sim \varphi(t) + 2\pi f(t)\Delta t, \quad (3.3)$$

тобто похідна фази є кутовою частотою $\varphi'(t) + 2\pi f(t)$.

Для ЛЧМ сигналу це призведе до такого виразу:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + 2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau = \varphi_0 + 2\pi \int_0^t (f_0 + k\tau) d\tau = \varphi_0 + 2\pi(f_0 t + \frac{k}{2} t^2), \quad (3.4)$$

де φ_0 – початкова фаза при $t=0$.

Сигнал, що описується виразом (3.4), називається квадратично фазовим сигналом.

Відповідною функцією часу для ЛЧМ сигналу є синус фази у радіанах:

$$x(t) = \sin \left[\varphi_0 + 2\pi \left(f_0 t + \frac{k}{2} t^2 \right) \right]. \quad (3.5)$$

Експоненційний ЧМ сигнал показаний на рис.3.7.

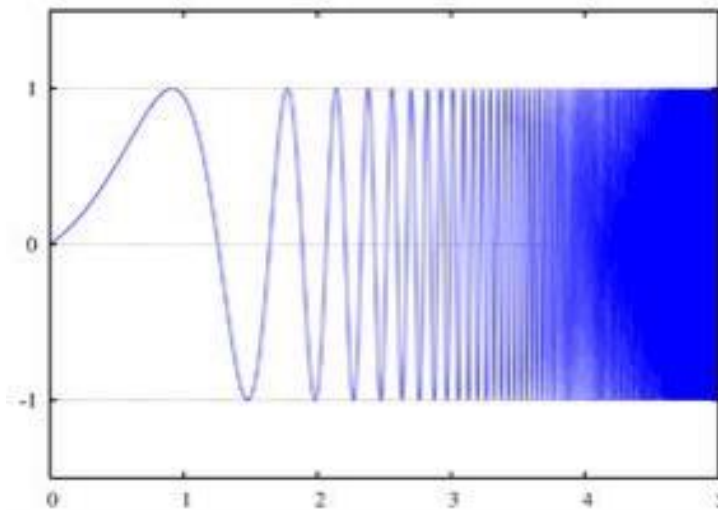


Рисунок 3.7 – Форма експоненційного ЧМ сигналу – синусоїдальна хвиля з геометричним зростанням частоти з часом

Такий сигнал часто називають також геометричним, так як частота змінюється в геометричному відношенні у часі. Тобто, якщо два відліки t_1 і t_2 обрані у сигналі так, що інтервал між ними дорівнює їх різниці $t_2 - t_1$, то відношення цих частот $f(t_2)/f(t_1)$ також буде незмінною величиною. В експоненційному ЧМ сигналі частота змінюється по експоненті, як функція від часу:

$$f(t) = f_0 \cdot k^t, \quad (3.6)$$

де f_0 – початкова частота в момент $t = 0$;

k – швидкість експоненційного зростання частоти у часі.

На відміну від ЛЧМ сигналу, у якого швидкість зміни частоти постійна, у експоненційного швидкість зміни частоти експоненціально збільшується.

Відповідна часовій функції фаза експоненціального ЧМ сигналу отримується як інтеграл по частоті:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + 2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau = \varphi_0 + 2\pi \int_0^t k^\tau d\tau = \varphi_0 + 2\pi f_0 \left(\frac{k^t - 1}{\ln(k)} \right), \quad (3.7)$$

де φ_0 – початкова фаза при $t = 0$.

Відповідною з часовою функцією для синусоїдального експоненціального ЧМ сигналу є функція сигналу синусоїди від фази в радіанах, що може бути записана у вигляді:

$$x(t) = \sin \left[\varphi_0 + 2\pi f_0 \left(\frac{k^t - 1}{\ln(k)} \right) \right]. \quad (3.8)$$

Як і у випадку з ЛЧМ сигналом, миттєве значення частоти експоненціального ЧМ сигналу основної частоти супроводжується появою додаткових гармонік.

Ступеневий ЧМ сигнал є важливим окремим класом ЛЧМ сигналів. Функції амплітуди і фази визначаються відповідно до виразу $x(t) = a(t) \exp(j\varphi(t))$:

$$a(t) = \alpha |t|^{-\alpha} \text{ і } \varphi(t) = 2\pi d |t|^\beta \text{ при } \alpha, \beta \in \mathbb{R} \text{ і } \beta \neq 0. \quad (3.9)$$

Гіперболічний ЧМ сигнал – це продовження статичного за тієї умови, що при $\beta \rightarrow 0$ і логарифмічної фази вигляду $\varphi(t) = 2\pi d \lg|t|$ при $d \in \mathbb{R}$.

Даний висновок впливає з тих визначень, що можуть бути отримані з різних типів видів хвиль в залежності від значень α і β . По-перше, розглядаючи функцію $a(t)$, як амплітуду ЧМ сигналу, можна отримати $a(0) = 0$ за умови, що $a > 0$.

По-друге, визначаючи $\dot{\varphi}(t)$ як $\frac{\dot{\varphi}(t)}{2\pi} = d\beta|t|^{\beta-1}$ з миттєвою частотою ЛЧМ сигналу, отримуємо, що відхилення від 0 для усіх значень параметра β задовольняють умові $\beta < 1$. Разом з цим дана ситуація буде відповідати невизначено хиткому сигналу в нульовій точці тільки у випадку суворого виконання умови $\beta \leq 0$. По факту в діапазоні $0 < \beta < 1$ фаза не має певного значення в момент $t = 0$, а саме $\varphi(0) = 0$. Так утворюється зв'язок між сингулярною (знаковою) поведінкою, її похідною і сингулярністю сигналу при $t = 0$.

3.4 Аналіз експериментальних даних

Вимірювання виконувалися при 3-х положеннях мікрофона відносно акустичної системи, що показано на рис.3.1. В результаті виміряні три АЧХ, показані на рис. 3.9 – рис. 3.11.



Рисунок 3.9 – АЧХ при розміщенні мікрофона по центру

Аналізуючи отримані дані видно значну нерівномірність характеристик більше 15 дБ. Варто відзначити помітні зміни у формі характеристик при змінах положення мікрофона.

Так, розташувавши мікрофон по центру маємо значний підйом на діапазоні від 100 до 260 Гц.

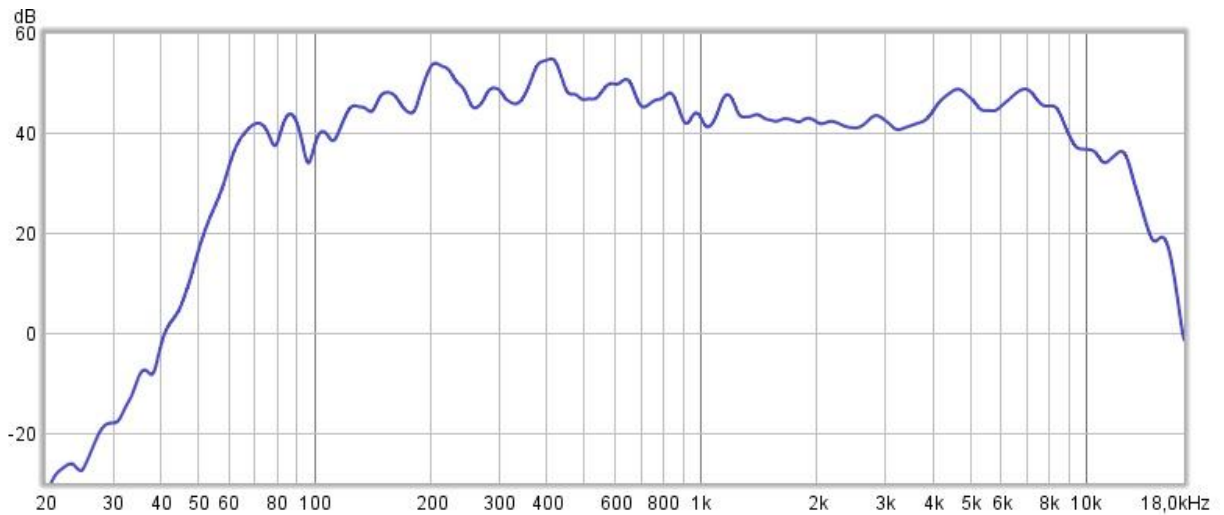


Рисунок 3.10 – АЧХ при положенні мікрофона зліва

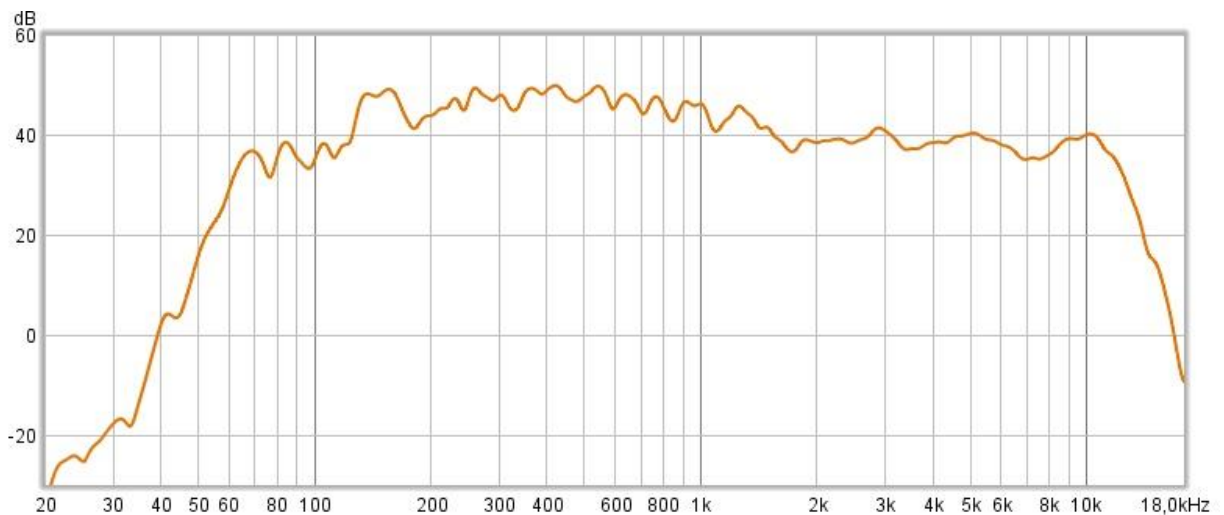


Рисунок 3.11 – АЧХ при положенні мікрофона справа

При положенні мікрофона зліва чи справа при тому ж діапазоні істотного підйому не спостерігається, але замість того спостерігається підкреслення СЧ в діапазоні від 200 Гц до 1 кГц. Такі відмінності можна пояснити конфігурацією приміщення, через те, що при поміщенні мікрофону в крайніх лівому і правому позиціях, він виявляється в суттєйому віддаленні від головної осі поширення звукових хвиль. З іншого боку, завдяки широкій діаграмі акустичних систем в області частот вище 1 кГц таких відмінностей менше, за винятком одиничних викидів. На усіх АЧХ помітно завал НЧ нижче 60 Гц, що свідчить про неправильну роботу сабвуферів.

ФЧХ системи наведені на рис.3.12 – рис.3.14.

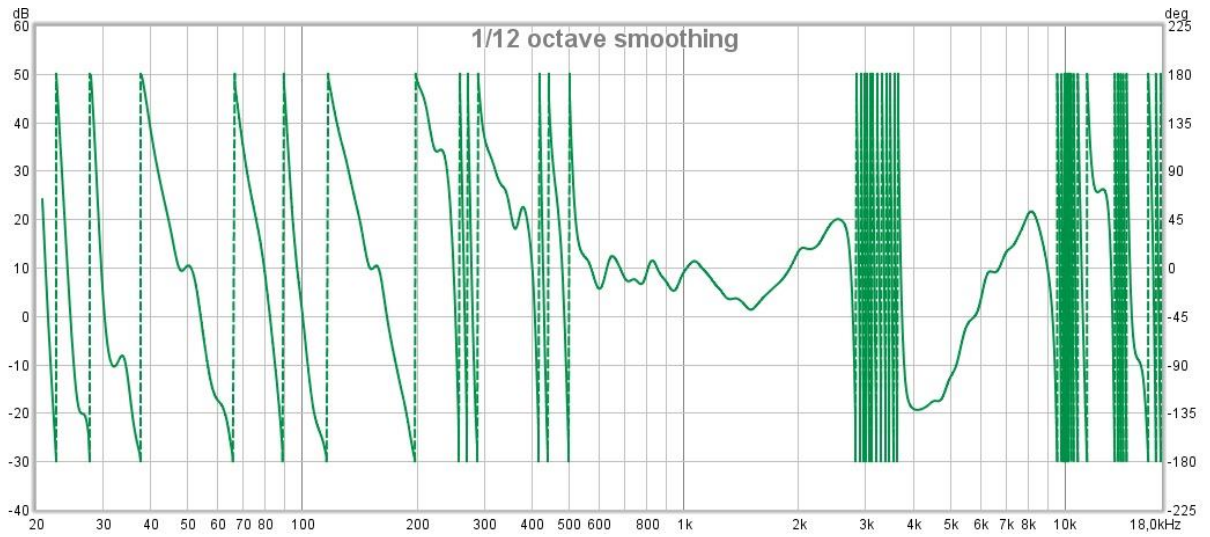


Рисунок 3.12 – ФЧХ при положенні мікрофона по центру

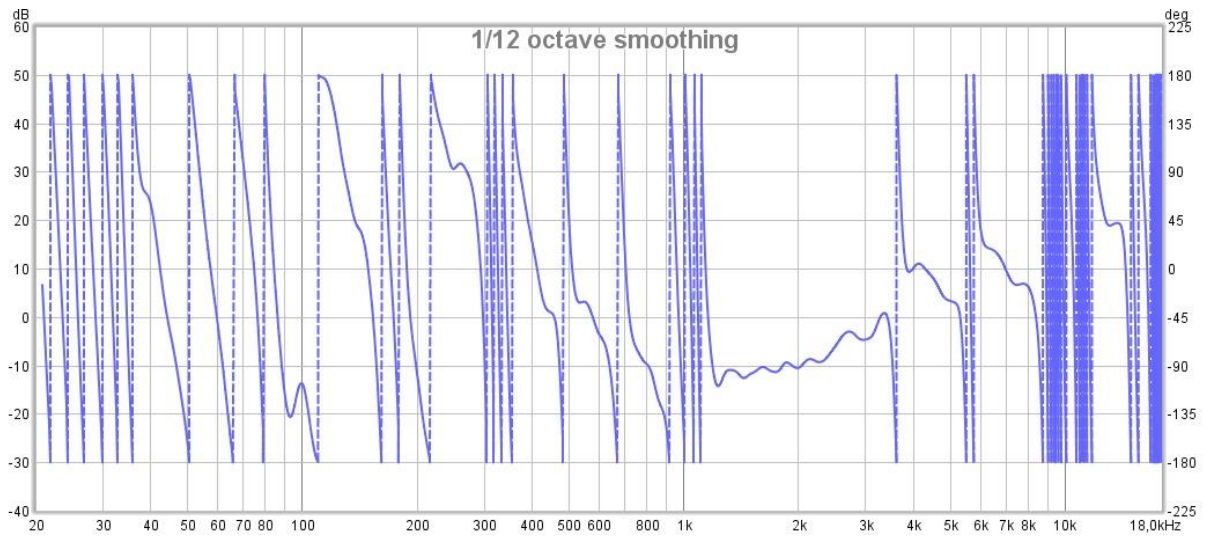


Рисунок 3.13 – ФЧХ при положенні мікрофона ліворуч

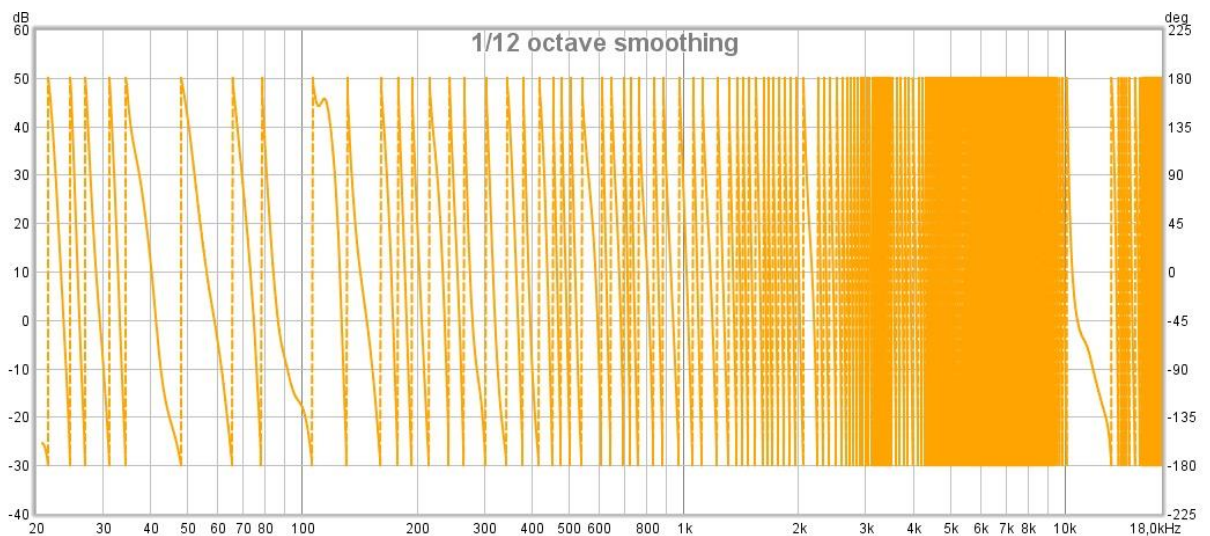


Рисунок 3.14 – ФЧХ при положенні мікрофона праворуч

Фазо-частотні характеристики мають помітну нелінійність. Слід відзначити, що картина фазових спотворень значно змінюється при зміні положення мікрофона. Можна здійснити висновок, що причиною є спотворення не в системі підсилення звуку, а у впливі характеристик приміщення на розповсюдження звукових хвиль.



Рисунок 3.15 – Залежність коефіцієнта нелінійних спотворень від частоти

Отримані дані показують також суттєві нелінійні спотворення в області НЧ (рис.3.15). То ж, маємо пікове значення КНС 8,04% на частоті 83 Гц. Починаючи з 166 Гц можемо спостерігати поступове зменшення спотворень, і на частотах більше 250 Гц КНС становить уже 0,2...0,3%, що є гарним показником якості звучання.

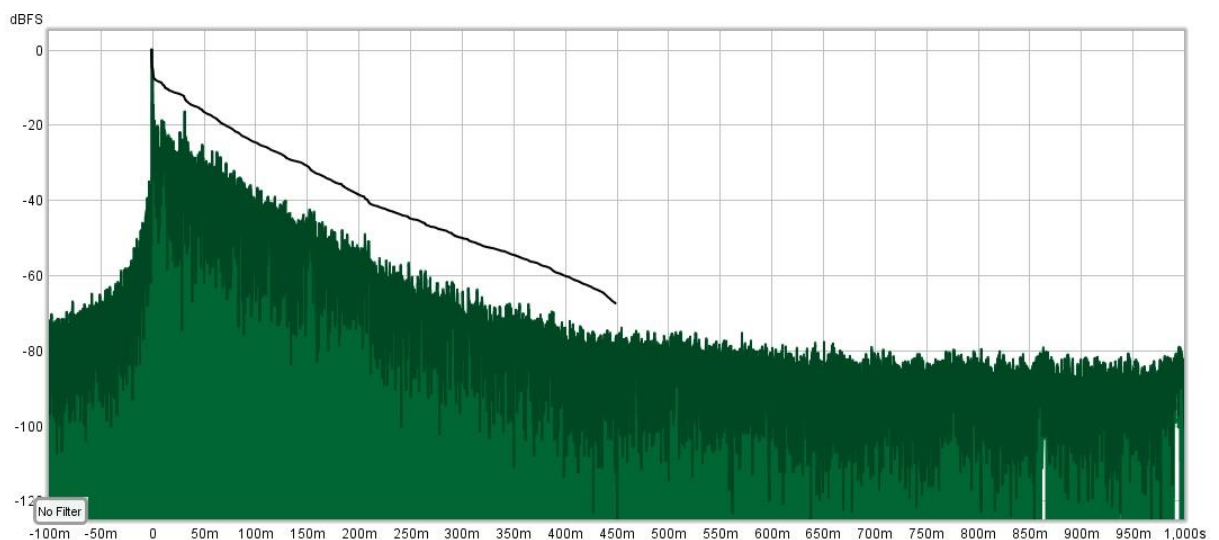


Рисунок 3.16 – Імпульсна характеристика системи (разом із приміщенням)

Імпульсна характеристика (рис.3.16) має плавний спад без сплесків. Видно, що сигнал згасає на інтервалі 0 ... 450 мс, після цього спостерігаються певні шуми, проте їхній рівень надто малий, тому їх можна майже не брати до уваги.

Час реверберації розраховується як час зменшення рівня звукового тиску на 60 дБ після припинення дії джерела. При вимірюванні застосовують різні частини кривої на графіку. Позначення T_{20} і T_{30} зазвичай називаються "часом пізньої реверберації", так як вони описують нижню частину графіку. EDT називається " часом ранньої реверберації" і описує реверберацію, що сприймає людський слух. Для раннього часу затухання (EDT) застосовується інтервал 10 дБ. Для T_{20} і T_{30} застосовуються інтервали 20 і 30 дБ відповідно, вимірювання починається з падіння рівня звукового тиску на 5 дБ.

Графіки, що показують ревербераційні процеси в приміщенні, показані на рис. 3.17 – рис. 3.19. Отримано наступні показники: стандартний час реверберації – 0,406 с; ранній час затримок – 0,184 с; пізній час затримок T_{20} – 0,343 с; пізній час затримок T_{30} – 0,386 с. Видно, що для наведеного приміщення показники є в межах задовільного.

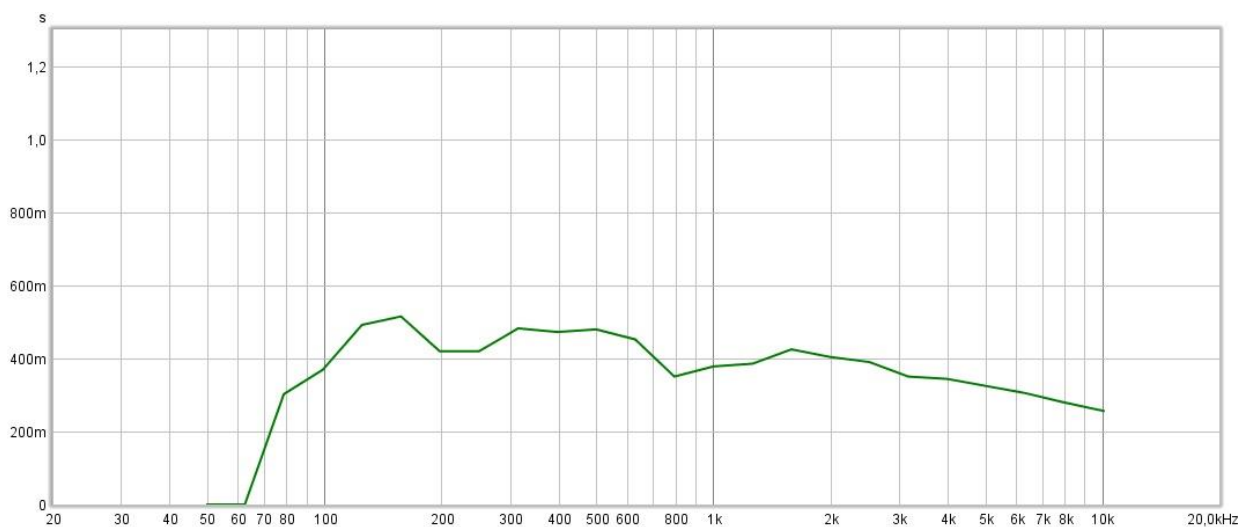
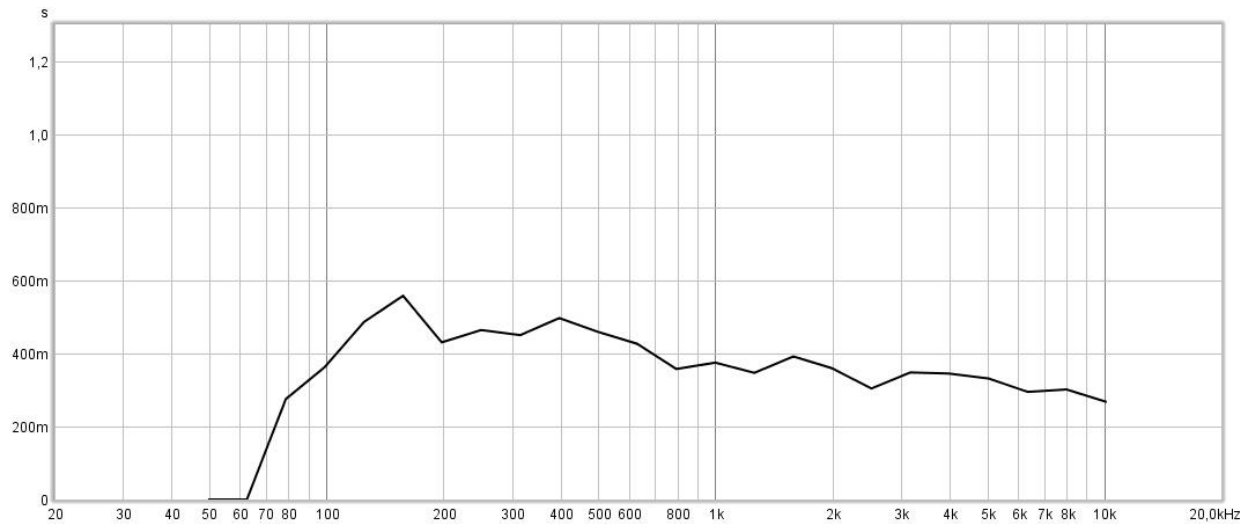
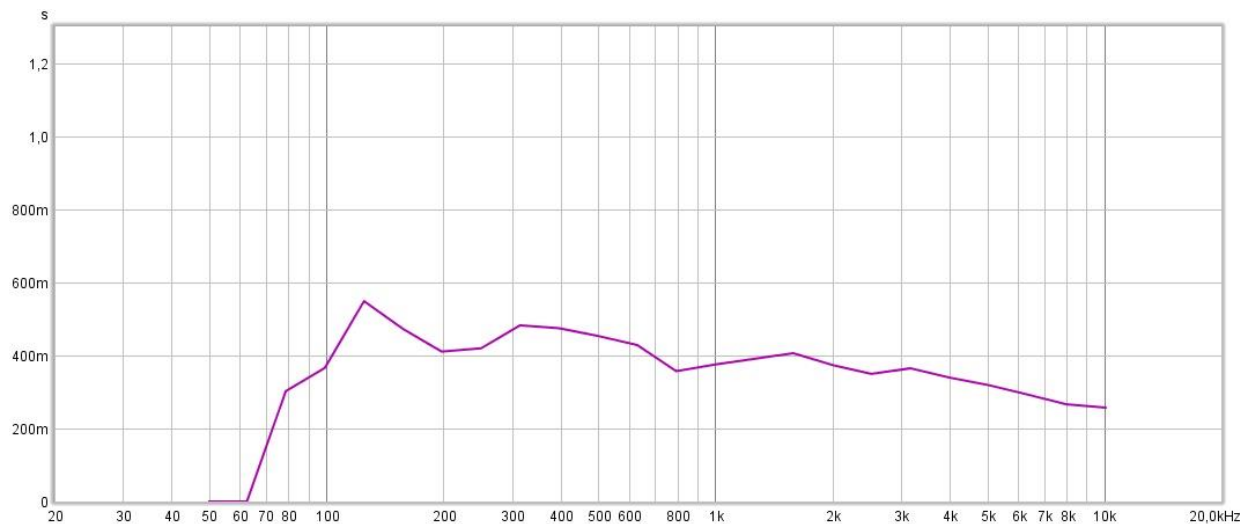


Рисунок 3.17 – Час стандартної реверберації

Рисунок 3.18 – Час реверберації T_{20} Рисунок 3.19 – Час реверберації T_{30}

Необхідно зазначити, що крім найбільш поширених в наш час методів оцінки розбірливості мови досить широко застосовуються при оцінці приміщень оцінка розбірливості мови за коефіцієнтом ясності (чіткості). Коефіцієнт $C50$ – коефіцієнт чіткості. Значення $C50$ визначає ясність (чіткість) звучання музики, і обчислюється як відношення енергії ранніх до пізніх відбитих звуку в приміщенні. Для того необхідно вимірювати відношення $E_{ран.}/E_{піз.}$ в декількох смугах частот, зі спеціальними зважуваннями для мовного сигналу. До ранньої відноситься енергія сигналу за перші 50 мс.

Для визначення значення C80 енергія ранніх відбитих звуків приймається у межах перших 80 мс. Значення параметрів C50 і C80 показані на графіках рис.3.20.

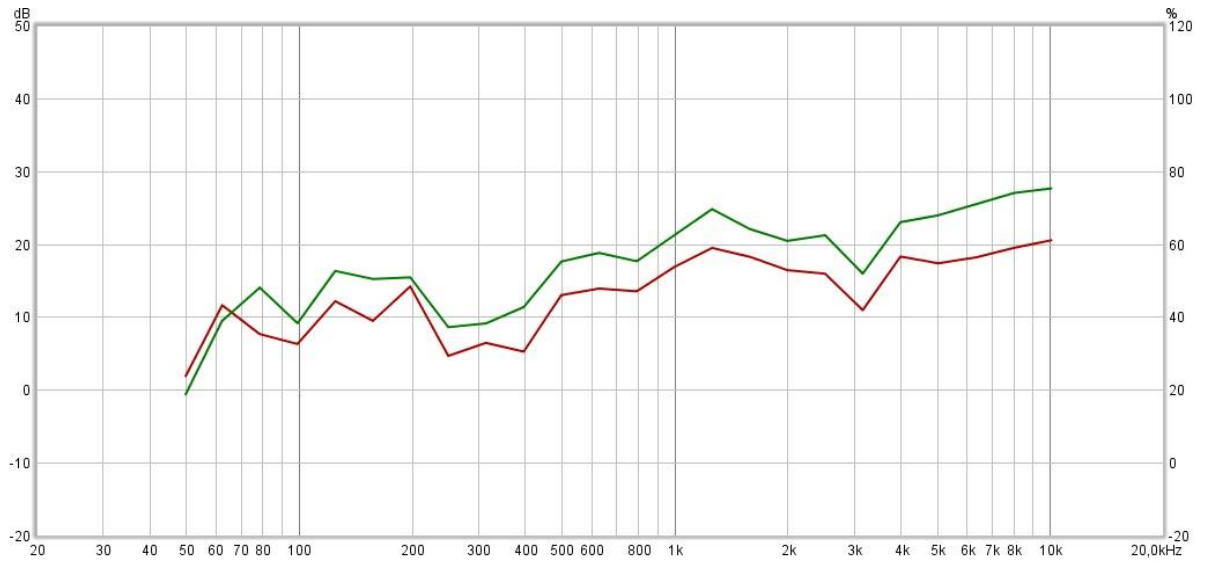


Рисунок 3.20 – Ясність (C50 – знизу, C80 – зверху)

На рис. 3.21 показана характеристика «водоспад», яка наочно показує процес згасання звукового сигналу в усьому діапазоні частот. З графіка помітно, що в області ВЧ рівень звукового тиску має відносно плавне і рівномірне спадання. В області НЧ помітні нерівномірності, що викликані призвуками і резонансами приміщення.

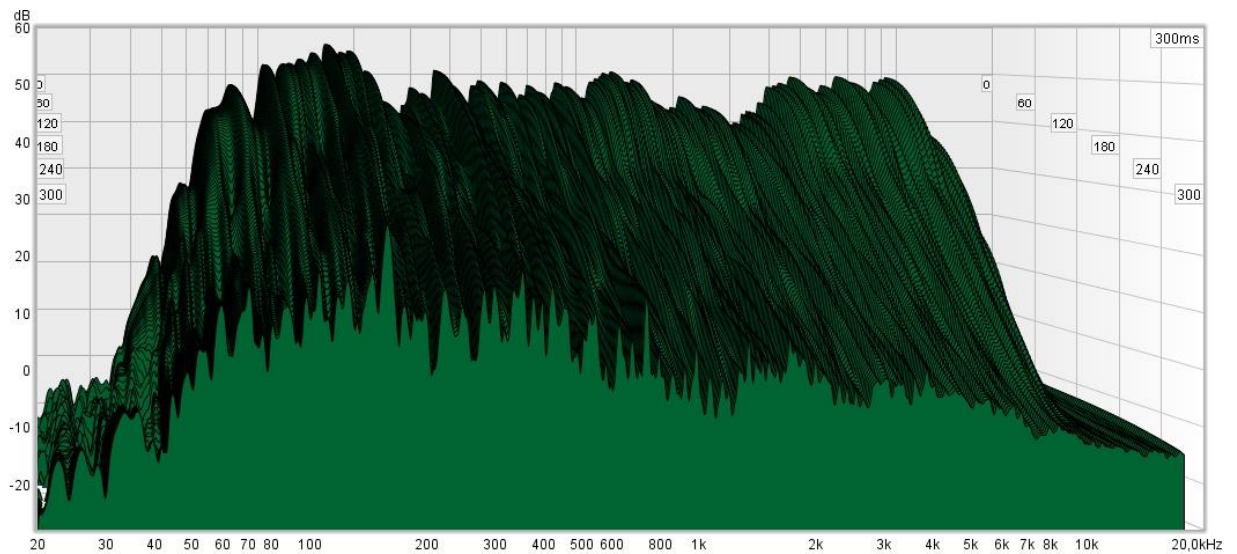


Рисунок 3.21 – Характеристика «водоспад»

На підставі даних вимірювань були сформовані вимоги відносно введення корекцій АЧХ. А саме:

- діапазон частот корекції 20 Гц ... 20 кГц;
- цільовий рівень звуку 45 дБ;
- індивідуальне максимальне підсилення фільтрів 3 дБ;
- загальний максимально допустимий рівень підсилення 12 дБ;
- цільова допустима нерівномірність АЧХ 3дБ.

Виходячи з висловлених вимог до АЧХ були використані параметричні фільтри, характеристики яких наведені у табл.3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики параметричних фільтрів

№	Центральна частота, Гц	Підсилення, дБ	Добротність	Смуга пропускання, Гц
1	125,5	-8	2	62,8
2	177	-9,3	3,556	49,8
3	1253	-6,8	2,77	452
4	5907	-8,6	1,036	5700
5	9059	-7,8	5	1810

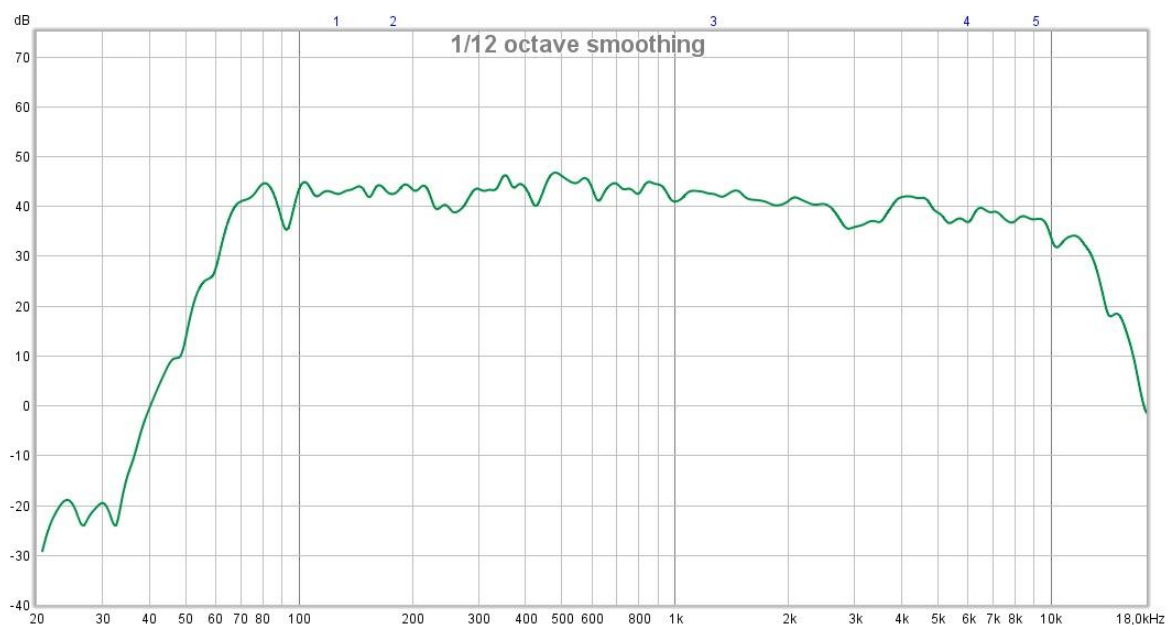


Рисунок 3.22 – АЧХ системи озвучення після корекції

Після застосування корекції вдалося отримати більш рівномірну АЧХ, це свідчить про ефективність протестованого методу компенсації спотворень акустичної системи і приміщення.

3.5 Висновки по розділу 3

Компенсація ревербераційних завад полягає у вимірюванні імпульсної акустичної характеристики приміщення, знаходженні шляхом перетворення Фур'є АЧХ і ФЧХ системи і корекція їхньої нелінійності у коригуючому еквалайзері.

Вимірювання виконувалися при 3-х положеннях мікрофона відносно акустичної системи. В результаті вимірянні три АЧХ, ФЧХ, імпульсна характеристика системи.

На підставі вимірювань були сформовані вимоги відносно введення корекцій АЧХ. А саме: діапазон частот корекції 20 Гц ... 20 кГц; цільовий рівень звуку 45 дБ; індивідуальне максимальне підсилення фільтрів 3 дБ; загальний максимально допустимий рівень підсилення 12 дБ; цільова допустима нерівномірність АЧХ 3дБ.

Виходячи з висловлених вимог до АЧХ були використані параметричні фільтри. Після застосування корекції вдалося отримати більш рівномірну АЧХ, це свідчить про ефективність протестованого методу компенсації спотворень акустичної системи і приміщення.

ВИСНОВКИ

Системи підсилення звуку використовуються повсякденно, починаючи від житлових кімнат звичайних користувачів, конференц-залів, студентських і учнівських аудиторій і до концертних залів. Частіше за все ці приміщення не підготовлені чи підготовлені недостатньо для повноцінного відтворення акустичних сигналів. Тому практично виникають проблеми, які пов'язані зі звуковими особливостями приміщень. Так, для прикладу, можуть виникати сторонні призвуки, які спотворюють сприйняття звукової інформації, також змінюється частотне сприйняття сигналів. Внаслідок даних ефектів може відбуватися значне зниження якості звучання як звукозаписів, так і живих виступів.

В результаті аналізу були виявлені головні проблеми акустики приміщень: ехо; флаттер ехо; ранні відбиття; резонанси кімнати і стоячі хвилі; граничні ефекти. Всі зазначені ефекти у підсумку впливають на імпульсну характеристику приміщень, тобто на їхню реакцію на короткий різкий звуковий імпульс. Тобто в імпульсній характеристиці є вся інформація про звукові характеристики приміщення і характер звучання.

Компенсація завад реверберації у цьому випадку полягатиме у вимірюванні імпульсної характеристики приміщення, знаходженні шляхом перетворення Фур'є АЧХ і ФЧХ системи і виправлення їх нелінійності у еквалайзері компенсації.

Компенсація ревербераційних завад полягає у вимірюванні імпульсної характеристики приміщення, знаходженні через перетворення Фур'є АЧХ і ФЧХ системи і виправлення їх нелінійності у компенсуючому еквалайзері.

Суть вимірювання полягає в формуванні ЛЧМ сигналу заданого частотного діапазону, відтворення отриманого сигналу акустичною системою з подальшим записом звукової картини за допомогою вимірювального мікрофона.

Компенсація ревербераційних завад полягає у вимірюванні імпульсної акустичної характеристики приміщення, знаходженні шляхом перетворення Фур'є АЧХ і ФЧХ системи і корекція їхньої нелінійності у коригуючому еквалайзері. Задача експерименту – визначити особливості, умови і деталі експерименту з компенсації ревербераційних ефектів.

Вимірювання виконувалися при 3-х положеннях мікрофона відносно акустичної системи. В результаті виміряні три АЧХ, ФЧХ, імпульсна характеристика системи.

На підставі вимірювань були сформовані вимоги відносно введення корекцій АЧХ. А саме: діапазон частот корекції 20 Гц ... 20 кГц; цільовий рівень звуку 45 дБ; індивідуальне максимальне підсилення фільтрів 3 дБ; загальний максимально допустимий рівень підсилення 12 дБ; цільова допустима нерівномірність АЧХ 3дБ.

Виходячи з висловлених вимог до АЧХ були використані параметричні фільтри. Після застосування корекції вдалося отримати більш рівномірну АЧХ, це свідчить про ефективність протестованого методу компенсації спотворень акустичної системи і приміщення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Алдошина И.А. Основы психоакустики – Москва, 2000. – 520 с
2. Беляев С.В. Акустика помещений. – ЛКИ, 2012. – 228 с.
3. Бьюик П. Живой звук – Москва, 1998. – 334 с.
4. Верн О. Кнудсен – Архитектурная акустика – ЛКИ, 2010. – 718 с.
5. Выходец А.В., Гитлиц М.В., Ковалгин Ю.А. Радиовещание и электроакустика – Москва, 1989. – 312 с.
6. Меерзон Б.Я. Основы звукорежиссуры и оборудование студий звукозаписи, 2012. – 414 с.
7. Сапожков М.А. Электроакустика / М.А. Сапожков. – Москва: Связь, 1978. – 272 с.
8. 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.
9. Зрительные залы. Метод измерения времени реверберации / ГОСТ 24146-89.
10. Петелин Р.Ю. Музыкальный компьютер. Секреты мастерства / Р.Ю. Петелин Ю.В. Петелин. – Изд. 2-е. – СПб.: БВХ-Петербург; Арлит, 2004. – 688 с.
11. Волощук Ю.І. Сигнали та процеси у радіотехніці. Том 1. – Х.: Компанія СМІТ, 2003. – 580 с.
12. Волощук Ю.І. Сигнали та процеси у радіотехніці. Том 2. – Х.: Компанія СМІТ, 2003. – 444 с.
13. Рабинер Л.Р., Шафер Р.В. Цифровая обработка речевых сигналов. – М.: Радио и связь, 1981. – 496 с.
14. В. Кнудсен. Архитектурная акустика. Под ред. Е.А. Копиловича, Л.Д. Брызжева. Изд. 4-е. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. – 520 с.
15. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин, С.А. Шейко, И.С. Селезнев. Экспериментальная оценка

ефективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37.

16. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin, I. Selieznov. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). 2020. 4 p.

17. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Koryttsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles/ Telecommunications and Radio Engineering. – New York. – 2020. – Vol. 79, №9. – P.769-780.

18. V. Kartashov, V. Oleynikov , I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35-39.

19. V.M. Kartashov, G.I. Sidorov, S.A. Sheiko, M.M. Kolendovskaya, O.Yu. Sergienko. Principles of construction and assessment of technical characteristics of multi-frequency atmospheric sodar in the humidity measurement mode. Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 79. N.4. 2020. – pp. 323-333.

20. S. Sheiko. Study of the method for assessing atmospheric turbulence by the envelope of sodar signals // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2/5 (92). – April, 2018. – p. 33–40.

21. Сідоров Г.І., Шейко С.О., Шаповалов С.В., Полонська А.С., Дмитренко А.І. Акустичний метод вимірювання турбулентного стану атмосферного прикордонного шару // Радиотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2018. – Вип. 192. – С. 46–50.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

32. Назаров М.В., Прохоров Ю.Н. Методы цифровой обработки и передачи речевых сигналов. – М.: Радио и связь, 2005. – 176 с.

33. Адаптивные фильтры. / Под ред. К. Ф. Н. Коуэна и П. М. Гранта. – М.: Мир, – 1988. – 392 с.

34. Ананьев А. Линейная эхокомпенсация в микросхемах DuSLIC-xT компании Lantiq / Компоненты и технологии. – 2011. –Т5. – С. 88-89.

35. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.

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