

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет Радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій

Кафедра Радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих
засобів і технологій

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи

магістр

(освітній ступінь)

на тему «Дослідження амплітудно-частотних характеристик двохполосних
акустичних систем»

ХАІ.502.560М.23О.172.1805004 ПЗ

Виконав: здобувач (ка) 2 курсу групи № 560М

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації
(код та найменування)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»
(код та найменування)

Освітня програма Радіоелектронні
комп'ютеризовані засоби
(найменування)

Омелянчук Д.О.

(прізвище та ініціали здобувача (ки))

Керівник: Олійник В.М.
(прізвище та ініціали)

Рецензент: Невлюдов І. Ш.
(прізвище та ініціали)

Харків – 2024

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет Радіоелектроніки, комп'ютерних систем інфокомунікацій
(повне найменування)

Кафедра Радіоелектронних і біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій
(повне найменування)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації
(код та найменування)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код та найменування)

Освітня програма Радіоелектронні комп'ютеризовані засоби
(найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

О.В. Висоцька
(підпис) (ініціали та прізвище)

«10» жовтня 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Омелянчуку Дмитру Олександровичу
(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Дослідження амплітудно-частотних характеристик двохполосних акустичних систем»

керівник кваліфікаційної роботи Олійник Вячеслав Миколайович, канд. техн. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету № 1873а -уч від «10» жовтня 2023 р.

2. Термін подання здобувачем кваліфікаційної роботи 10.01.2024

3. Вихідні дані до роботи: двохполосні акустичні системи; характеристика високочастотного та середньочастотного випромінювачів звуку; характеристика пасивного акустичного фільтра; максимальна величина потужності до 10 Вт.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати) _____

4.1. Аналітичний огляд теорії звуку, типів акустичних систем і гучномовців.

4.2. Проведення дослідження амплітудно-частотних характеристик високо- та середньочастотних гучномовців.

4.3. Проведення дослідження амплітудно-частотних характеристик пасивного акустичного фільтра. Отримання спільної амплітудно-частотної характеристики гучномовця і пасивного акустичного фільтра.

4.4. Створення стартап-проекту на дослідження амплітудно-частотних характеристик двохполосних акустичних систем.

5. Перелік графічного матеріалу (додатків):

5.1. Структурна схема вимірювального стенду (плакат А4).

5.2. Амплітудно-частотна характеристика високочастотного гучномовця (плакат А4).

5.3. Амплітудно-частотна характеристика середньочастотного гучномовця (плакат А4).

5.4. Структурна схема акустичного фільтра (плакат А4).

5.5. Амплітудно-частотна характеристика акустичного фільтра (плакат А4).

5.6. Сумарна амплітудно-частотна характеристика акустичного фільтра і високота середньочастотних гучномовців. (плакат А4).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Усі розділи	Олійник В. М., доцент	23.10.23 р.	

Нормоконтроль _____ В. М. Олійник «10» січня 2024 р.
(підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання «23» жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Отримання завдання, аналіз теми, пошук інформаційних джерел	23.10.2023	
2	Аналітичний огляд теорії звуку, типів акустичних систем і гучномовців	01.11.2023	
3	Проведення дослідження амплітудо-частотних характеристик високо- та середньочастотних гучномовців	11.11.2023	
4	Проведення дослідження амплітудо-частотних характеристик пасивного акустичного фільтра. Отримання спільної амплітудно-частотної характеристики гучномовця і пасивного акустичного фільтра	28.11.2023	
5	Створення стартап-проекту на дослідження амплітудно-частотних характеристик двополосних акустичних систем	15.12.2023	
6	Оформлення роботи та графічних матеріалів	27.12.2023	
7	Передзахист та усунення зауважень	17.01.2024	
8	Захист роботи	19.01.2024	

Здобувач



(підпис)

Д.О. Омелянчук
(ініціали та прізвище)

Керівник кваліфікаційної роботи



(підпис)

В.М. Олійник
(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до науково-дослідної роботи магістра містить: 105ст., 45 рис., 24 табл., 28 джерел., 6 додатків.

АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА, АКУСТИЧНА СИСТЕМА, АКУСТИЧНИЙ ФІЛЬТР, ГУЧНОМОВЕЦЬ, МОДЕЛЮВАННЯ.

Об'єкт дослідження – високочастотна та середньо частотна ланки акустичної системи.

Предмет дослідження – є процес дослідження амплітудно-частотних характеристик двополосних акустичних систем.

Мета дослідження – розробка методу для покращення якості амплітудно-частотної характеристики з урахуванням реальних параметрів гучномовців і акустичного фільтра.

Методи дослідження – отримання амплітудно-частотних характеристик гучномовців за допомогою методу фізичних експериментів у контрольованому середовищі з використанням вимірювального стенду. Дослідження амплітудно-частотних характеристик акустичного фільтра методом математичного моделювання за допомогою програмного забезпечення Multisim. Отримання гладкої амплітудно-частотної характеристики гучномовців та акустичного фільтра методом премноження їх окремих характеристик з урахуванням їх параметрів.

В даній роботі проводиться дослідження акустичних систем та їх елементів, а саме динаміків і фільтра. Розглядаються акустичний фільтр і високо- та середньочастотні гучномовці. Для дослідження було використано вимірювальний стенд та програмне забезпечення для моделювання Multisim, за допомогою яких отримано значення амплітуд та побудовано графіки АЧХ динаміків та акустичного фільтра. Результатом роботи є отримання спільної гладкої амплітудно-частотної характеристики акустичного фільтра та динаміків з урахуванням їх попередньо отриманих реальних параметрів, що є запорукою успіху в створення якісної акустичної системи.

ABSTRACT

The explanatory note to the research master's thesis contains: 105 articles, 45 figures, 24 tables, 28 sources, 6 appendices.

AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS, ACOUSTIC SYSTEM, ACOUSTIC FILTER, LOUDSPEAKER, SIMULATION.

The object of research is the high-frequency and medium-frequency links of the acoustic system.

The subject of research is the process of researching the amplitude-frequency characteristics of two-way acoustic systems.

The purpose of the research is to improve the quality of sound reproduction by creating a smooth amplitude-frequency characteristic, taking into account the real parameters of loudspeakers and an acoustic filter.

Research methods - obtaining the amplitude-frequency characteristics of loudspeakers using the method of physical experiments in a controlled environment using a measuring stand. Study of the amplitude-frequency characteristics of the acoustic filter by the method of mathematical modeling using the Multisim software. Obtaining a smooth amplitude-frequency characteristic of loudspeakers and an acoustic filter by the method of multiplying their individual characteristics taking into account their parameters.

In this work, acoustic systems and their elements, namely speakers and filters, are studied. An acoustic filter and high- and medium-frequency loudspeakers are considered. A measuring stand and Multisim simulation software were used for the study, with the help of which the amplitude values were obtained and graphs of the frequency response of the speakers and the acoustic filter were constructed. The result of the work is obtaining a joint smooth amplitude-frequency characteristic of the acoustic filter and speakers, taking into account their previously obtained real parameters, which is the key to success in creating a high-quality acoustic system.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АЧХ – амплітудо частотна характеристика;

АЦП – аналогово цифровий перетворювач;

АС – акустична система;

ВЧ модуль – високочастотний модуль;

ВЧ канал – високочастотний канал;

СЧ модуль – середньочастотний модуль;

СЧ канал – середньочастотний канал;

ВЦК – вимірювальні-обчислювальні цифрові комплекси;

ГМ – гучномовець;

ДС – діаграма спрямованості;

МЕК – міжнародна електро-технічна комісія.

AES (Audio Engineering Society) – товариство інженерів із звукотехніки

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ЗВУКУ І КОМПОНЕНТИ ДЛЯ ЙОГО ВІДДТВОРЕННЯ	11
1.1 Звук. Основні характеристики.....	11
1.2 Види акустичних систем.....	13
1.3. Типи динаміків.....	21
1.4 Висновки до розділу.....	32
2 ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКО- ТА СЕРЕДНЬОЧАСТОТНИХ ГУЧНОМОВЦІВ.....	34
2.1 Постановка задач дослідження.....	34
2.2 Вимірювальний стенд.....	34
2.3 Високочастотний динамік 3ГД-2.....	38
2.4 Середньочастотний динамік 15ГД-11 Б.....	41
2.5 Дослідження АЧХ високочастотного динаміка 3 ГД-2.....	44
2.6 Дослідження характеристик середньочастотного динаміка 15ГД-11 Б.....	46
2.7 Висновки до розділу.....	48
3 ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАСИВНОГО АКУСТИЧНОГО ФІЛЬТРА. ОТРИМАННЯ СПІЛЬНОЇ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГУЧНОМОВЦЯ І ПАСИВНОГО АКУСТИЧНОГО ФІЛЬТРА.....	49
3.1 Методи дослідження акустичних систем.....	49
3.2 Загальні принципи побудови активних фільтрів кросоверів багатосмугової акустичної системи та критерії якості.....	51
3.3 Акустичний фільтр.....	54
3.4 Дослідження та імітація режимів роботи кросовера у програмі Multisim..	59
3.5. Методи отримання спільної амплітудно частотної характеристики для акустичної системи.....	64

3.6 Утворення загальної амплітудо частотної характеристики акустичної системи.....	69
3.7 Висновки до розділу.....	75
4 СТВОРЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ НА ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОПОЛОСНИХ АКУСТИЧНИХ СИСТЕМ.....	77
4.1 Постановка задачі проекту.....	77
4.2 Оцінка технологічності ідеї проекту.....	79
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	79
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	87
4.5 Розроблення маркетингової стратегії для стартап-проекту.....	90
4.6 Висновки до розділу.....	92
ВИСНОВКИ.....	93
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	98
Додаток А Структурна схема вимірювального стенду.....	100
Додаток Б Амплітудно-частотна характеристика високочастотного гучномовця.....	101
Додаток В Амплітудно-частотна характеристика середньочастотного гучномовця.....	102
Додаток Г Структурна схема акустичного фільтра.....	103
Додаток Д Амплітудно-частотна характеристика акустичного фільтра.....	104
Додаток Е Сумарна амплітудно-частотна характеристика акустичного фільтра і високо- та середньочастотних гучномовців.....	105

ВСТУП

Актуальність роботи. Дослідження амплітудно-частотних характеристик акустичних систем є актуальною та важливою темою в аудіоінженерії сучасного світу, оскільки вимоги до якості звуку надзвичайно високі. Якість звуку є дуже важливою складовою мультимедійних пристроїв, які використовуються в різних сферах, включаючи домашнє аудіо та кінотеатри, вплив кожного динаміка та фільтра на загальну АЧХ колонки є важливим фактором, що впливає на якість звуку. Амплітудно-частотна характеристика акустичної системи визначає, як система реагує на звукові сигнали різних частот у відношенні до їх амплітуди. Це важливий параметр при виготовленні та користуванні акустичною системою.

Також амплітудно-частотна характеристика визначає, як система відтворює звукові сигнали різних частот. Правильно налаштована акустична система має рівномірну амплітудно-частотну характеристику, що дозволяє відтворювати звук без спотворень та втрати деталізації на всьому діапазоні частот. Під час проектування акустичної системи амплітудно-частотна характеристика визначає необхідні параметри компонентів, таких як динаміки і фільтри, для досягнення бажаних характеристик звуку.

Слух є одним із основних органів чуття в людини, і він відіграє важливу роль у сприйнятті навколишнього світу. Приблизно 13% інформації, яку ми сприймаємо, надходить до нас через слух. Для точного відтворення звуків, які ми сприймаємо в реальному світі, необхідні високоякісні акустичні системи.

Тому тема роботи, яка спрямована на дослідження амплітудно частотної характеристики акустичної системи, є актуальною науково-технічною задачею.

Робота виконана в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» на кафедрі радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій.

Мета і завдання дослідження. Метою є розробка методу для покращення якості амплітудно-частотної характеристики з урахуванням реальних параметрів гучномовців і акустичного фільтра.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішення наступних завдань:

- провести аналітичний огляд існуючих акустичних систем, виявити їх переваги та недоліки;
- провести розбір основних елементів акустичних систем;
- провести експериментальні дослідження гучномовця і отримати його характеристику;
- провести дослідження акустичного фільтра за допомогою методу моделювання в програмному забезпеченні;
- з урахуванням реальних параметрів гучномовців і акустичного фільтра розробити методику за допомогою якої можна зробити зведення двох динаміків з досягненням мінімальної нерівномірності у полосі частот від середньої до високочастотної ланки.

Об'єктом дослідження є процеси утворення звукових сигналів різних типів і частот.

Предметом дослідження є методи та засоби дослідження параметрів компонентів акустичної системи для отримання загальної амплітудно частотної характеристики.

Методи дослідження – метод частотного аналізу, метод математичного моделювання, тестування в контрольованому середовищі, отримання спільної амплітудно частотної характеристики методом їх перемноження.

Наукова новизна отриманих результатів – розробка методики за допомогою якої можна зробити зведення двох динаміків з досягненням мінімальної нерівномірності у полосі частот від середньої до високочастотної ланки.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що пропонуються оптимальні методи дослідження амплітудно частотних характеристик головних компонентів акустики для її виробників.

1 ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ЗВУКУ І КОМПОНЕНТИ ДЛЯ ЙОГО ВІДТВОРЕННЯ

1.1 Звук. Основні характеристики

Звукова або акустична хвиля - це тип механічної хвилі, яка рухається через середовище і має частоти від 20 Герц (Гц) до 20 000 Герц (20 кілогерців, кГц). Швидкість, з якою звук розповсюджується, залежить від характеристик цього середовища, таких як температура, густини та склад. Наприклад, у рідинах звук рухається швидше, ніж у газах, і повільніше, ніж у твердих тілах.

Швидкість поширення звуку зазвичай збільшується зі збільшенням температури середовища (так 0 градусів С у повітрі швидкість поширення звуку дорівнює 330м/с, а за температури 20 С – 340 м/с). До того ж чим менша маса молекул середовища, тим швидше поширюється звук. Швидкість звуку у воді = 1400м/с, у сталі – 5000 м/с.

Звук виникає внаслідок коливань тіл, і ці коливання можуть бути різного характеру: вимушеними (коливання, ініційовані зовнішніми джерелами, наприклад, динаміком динаміка), вільними (тобто коливання структур, які коливаються незалежно) або автоколиваннями (коливання, які виникають самі по собі, наприклад, коливання струн смичкових інструментів). Важливо пам'ятати, що звук не може поширюватися у вакуумі, і під час його руху не відбувається переміщення речовини, але передається енергія. Звукові хвилі можуть накладатися одна на одну (це називається інтерференцією) і обходити перешкоди (явище дифракції).

Людина може відчувати звуки у діапазоні частот від 20 Гц до 20 000 Гц (20 кГц). Звуки, що перебувають поза цим діапазоном, також існують, але не сприймаються людиною. Звук може бути простим, який складається з одного сигналу або складним, що складається з декількох сигналів з різними амплітудами та частотами. Основними характеристиками звуку є звуковий тиск, спектральний склад і акустична потужність тобто гучність.

Гучність звуку визначається переважно за амплітудою звукової хвилі та звуковим тиском, але також залежить від частоти цієї хвилі. Людське вухо менше чутливе до низьких (приблизно 20 Гц) і високих (приблизно 20 кГц) частот, а найкраще сприймає середні (1-3 кГц). Гучний звук може негативно впливати на слух і навіть призводити до глухоти, особливо, коли відбувається прослуховування гучної музики через навушники.

Висота звуку головним чином залежить від частоти звукової хвилі: більша частота вказує на вищий тон звуку. Наприклад, нота "ля" першої октави має частоту 440 Гц, а нота "ля" другої октави - 880 Гц. Можливість відмічати звуки за їхньою частотою також залежить від інтенсивності звуків. Збільшення інтенсивності може призвести до відчуття звуку як більш низького тону.

Тембр звуку визначається складом звукової хвилі, включаючи основну частоту та різні слабкі вищі частоти, відомі як обертони. Тембр дозволяє розпізнавати різні джерела звуку і відрізнити, наприклад, людину від інших звуків, таких як фортепіано чи скрипка.

Звукові хвилі можна класифікувати в залежності від їхнього характеру та сприйняття наступним чином:

1. Удар: одиночні коливання, що виникають при короткочасних неперіодичних подіях, таких як удар молота або постріл.
2. Шум: неперіодична послідовність ударів, як у шумі моря, дощу, оплесках, роботі двигунів або вібраціях верстатів.
3. Музикальні звуки або тони: періодичні гармонічні коливання, що тривають неперервно і переходять одне в одне, як у музиці.

Вчені провели дослідження, які підтверджують, що усі об'єкти в матеріальному світі мають свою звукову природу, випромінюючи звукові вібрації. Наш організм, в свою чергу, чутливо реагує на ці вібрації, бо сам є свого роду музичним інструментом. Кожна клітина, орган, а навіть ДНК в наших клітинах мають свої власні вібрації, і при відтворенні їх з використанням спеціального обладнання можна почути справжні мелодії.

Звуки і мелодії грають ключову роль у нашому житті. Наприклад, звуки певного діапазону можуть впливати на об'єкти будь-якого розміру, включаючи клітини в живих організмах. Вони можуть змінювати генетичний код, впливати на роботу серця або відновлювати роботу хворих органів. Різні ритми і стилі музики можуть викликати різні емоційні і фізичні реакції у людей і тварин, оскільки вібрації створюють енергетичні поля, з якими наш організм може вступати у резонанс [1].

1.2 Види акустичних систем

Акустичні системи або колонки – це остання ланка аудіосистеми, що передає звук шляхом перетворення електричного сигналу, що надходить з джерела звуку, в механічні коливання випромінювачів, а слідом і в звукові коливання повітря, що сприймаються органами слуху, а при високій потужності і іншими частинами тіла.

Як не крути, а акустична система – це ящик, зібраний з механічно міцного матеріалу з вмонтованими в нього динаміками. Ящик може бути виконаний відповідно до однієї з численних конструкцій, що визначають тип акустичного оформлення системи.

Розглянемо основні різновиди цих конструкцій:

Акустичні системи відкритого типу

Пояснюється такий інтерес системи відкритого типу повною відсутністю будь-якої компресії з тилової сторони дифузорів динаміків (див. рис. 1.1). Результатом є вкрай відкрите і повітряне звучання акустики і реальне задоволення при прослуховуванні практично будь-яких музичних жанрів, включаючи сучасні танцювальні, де на перший план виходить не натуральність звучання, а необхідність наявності потужних компресійних басів.

Крім відсутності хороших басів істотним недоліком відкритої акустики є і вкрай висока ціна промислових виробів, і необхідність наявності великого

приміщення для правильної орієнтації колонок по відношенню до слухача, а також можливості розміщення їх на неабиякій відстані від стін. [2]



Рисунок 1.1 – Акустична система відкритого типу

Акустичні системи закритого типу

Як не дивно, промисловий випуск систем закритого типу почався не тільки пізніше появи на світ акустики відкритого типу, але також і пізніше поширення акустичних систем з фазоінвертором на борту (див. рис. 1.2).

Замкнутий об'єм повітря всередині корпусу володіє деякою пружністю, яка заважає вільному пересуванню дифузора динаміка і призводить до підвищення резонансної частоти рухомої системи, що в свою чергу різко погіршує відтворення частот нижче даного резонансного порогу.

Вирішується це або збільшенням внутрішнього обсягу виробу, або підвищенням маси дифузора для зменшення частоти механічного резонансу, що призводить до майже пропорційного зниження чутливості.

До незаперечних переваг закритої акустики можна віднести повну відсутність будь-яких призвуків і фазових огріхів, властивих фазоінверторній акустиці і акустичним лабіринтів.



Рисунок 1.2 – Акустична система закритого типу

Панель акустичного опору

Давно відома, але неабияк призабута панель акустичного опору (ПАО) несе в собі переваги як відкритих, так і закритих акустичних систем, поєднуючи природність звучання без фазових і перехідних спотворень з простотою виконання (див. рис. 1.3).

Панель являє собою безліч отворів 5...20 мм в діаметрі на задній стінці корпусу гучномовця. Сумарна площа отворів-близько 60...80% від ефективної площі дифузора НЧ динаміка. Поверх отворів туго натягується і приклеюється бавовняна тканина в один або два шари. [2]

Недоліком ПАС є спад звукового тиску в області низьких частот. Однак він не такий великий, як у акустичної системи закритого типу і легко усувається незначним підвищенням потужностей підсилювача і НЧ головки.

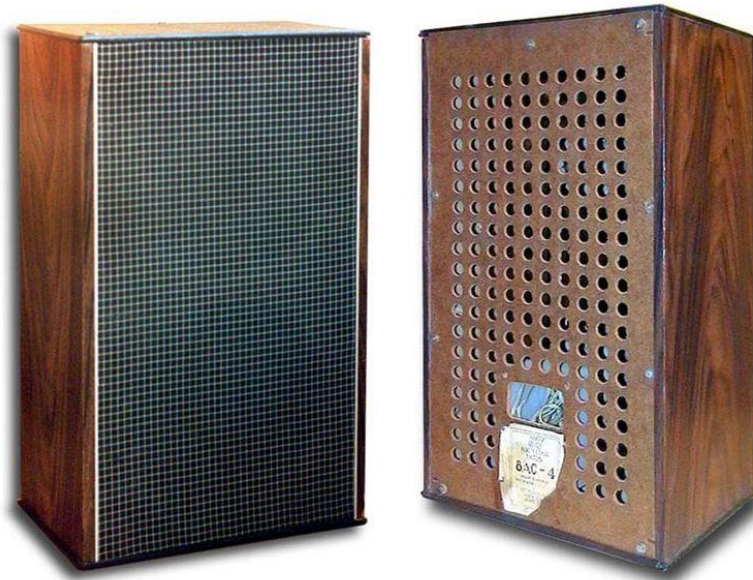


Рисунок 1.3 – Панель акустичного опору

Акустичні системи з фазоінвертором

Фазоінвертор – це черговий спосіб приборкати надлишок внутрішнього тиску всередині корпусу гучномовця і пустити його на благо збільшення віддачі на найнижчих частотах.

За своєю суттю фазоінвертор – це труба, виведена кінцем назовні і йде всередину корпусу колонки.

Труба фазоінвертора може виходити: на лицьову панель, на задню або бічну панелі. Однак, в найбільш дорогих і якісних акустичних системах вона, як правило, розташована саме з тильного боку конструкції (див. рис. 1.4).

Незважаючи на популярність даного типу виробів, фазоінверторна акустика завжди програє як закритому, так і відкритому ящику з точки зору динамічних параметрів, а також фазових характеристик, що обумовлюють детальність і чистоту звукопередачі.

Власне кажучи, плюс у фазоінверторних акустичних систем всього один-підвищена віддача на низьких частотах і можливість відтворення найглибших басів при відносній простоті і дешевизні конструкції.



Рисунок 1.4 – Акустична система з фазоінвертором

Акустичні системи бандпасс або смуговий гучномовець.

Бандпасс або смуговий сабвуфер – представляє собою фазоінверторний ящик, розділений всередині додатковою стінкою на дві різні за обсягом камери. Динамік розміщується на перегородці між камерами, тобто знаходиться всередині корпусу. Акустичні системи бандпасс не є системами прямого випромінювання. Залежно від конструкції і кількості фазоінверторів існує 3 види бандпассов: 4-го порядку (див. рис. 1.5 зліва), 6-го порядку тип-а (див. рис. 1.5 посередині), 6-го порядку тип-б (див. рис. 1.5 праворуч). [3]

Системи з пасивним випромінювачем є одним з різновидів акустики фазоінверторного типу і покликані забезпечити глибоке відтворення низьких частот без надмірного збільшення розмірів виробу.

Сенс конструкції полягає в установці в закритому ящику додаткового низькочастотного динаміка (див. рис. 1.6), у якого повністю відсутня магнітна система. Тобто він складається тільки з дифузора, підвісу і рами і, при цьому - нікуди не підключається.



Рисунок 1.5 – Акустична система бандпасс

Пасивний випромінювач приводиться в рух коливаннями повітря всередині акустичної системи, які породжуються зворотною стороною активних НЧ динаміків і, по суті, є аналогом резонансної системи, утвореної трубою фазоінвертора.



Рисунок 1.6 – Акустична система з пасивним випромінювачем

Акустичні системи ізобаричного типу

Акустична система ізобаричного типу - ще один різновид низькочастотного оформлення, покликана забезпечити гідне відтворення басів в корпусі обмеженого обсягу.

Конструктивно ящик ізобаричної акустики розділений герметичною перегородкою на дві частини, в кожную з яких встановлено по одному НЧ динаміку так, що між ними знаходиться постійний незмінний обсяг повітря (див. рис. 1.7).

На обидва динаміки одночасно подається один і той же сигнал. Іншими словами їх можна включити паралельно, або послідовно, або підключити кожен з них до окремого підсилювача. Результатом є подвоєння потужності акустичного випромінювання при незмінному обсязі корпусу АС.



Рисунок 1.7 – Акустична система ізобаричного типу

Акустичні системи кругової спрямованості

Завдання озвучування приміщення полягає в тому, щоб наповнити його рівномірним звуковим полем у всіх його точках без максимумів і провалів. Для вирішення цього завдання було створено акустичну систему кругової спрямованості (див. рис. 1.8). Будова такої системи досить проста, вона має два

динаміка, зазвичай високочастотний та низькочастотний, які направлені на конусний дефлектор. Він забезпечує рівномірне розповсюдження звуку навкруг колонки. Тому відмітна особливість даної системи в тому, що вона випромінює звуки на 360° навколо себе. Відбиваючись потім з усіх боків, вона створює об'ємну звукову середу. [4]

З плюсів таких акустичних систем можна відмітити високу чутливість і, відповідно, ККД, пристойне музичне звучання, спрямовані властивості.

З мінусів: конструктивна і технологічна складність.



Рисунок 1.8 – Акустична система кругової спрямованості

Кожна акустична система має місце в своєму використанні. На сьогодні їх досить велика кількість, їх використовують в кінотеатрах, студіях, автомобілях, вдома, коротше кажучи, скрізь де потрібно відтворювати музику. Певний вид акустичної системи має своє призначення, але найбільш цікавою за звучанням є акустика з круговою спрямованістю, вона рівномірно розповсюджує звук навколо себе.

1.3. Типи динаміків

Звукові динаміки – це важлива частина аудіоапаратури, яка відіграє вирішальну роль у якості звуку, який ми сприймаємо, вони мають досить різноманітні види.

Широкосмуговий динамік

Широкосмуговий тип динаміків мають частотний діапазон, що сприймається людським слухом, як вже говорилося, перебуває в межах приблизно від 20 Гц до 20 кГц. Логічніше було б мати такий динамік, який здатний відтворити його повністю. І такі динаміки є. Вони називаються широкосмуговими (див. рис. 1.9-1.10).

Питання в тому, наскільки якісно вони здатні працювати в крайніх значеннях частот цього діапазону. Справа в тому, що для ефективного відтворення низьких частот дифузор класичного динаміка повинен мати досить великі розміри. Наприклад, для частоти 40 Гц його діаметр повинен бути близько 30 см. Це досить просто реалізувати.[5]



Рисунок 1.9 – Широкосмуговий динамік ScanSpeak 10F/4424G00

Але на високих частотах такий дифузор просто не зможе «встигати» передавати коливання всією своєю поверхнею. Саме тому найчастіше широкосмугові динаміки є результатом компромісу.

Для якісного відтворення верхньої частини частотного діапазону в центр дифузора широкополосника часто вклеюється додатковий високочастотний дифузор — «рупорок» (конус-візер, «дудка»), який здатний відтворювати швидкі коливання в той час, як основний, великий дифузор працює набагато повільніше.

Застосовувані в аудіофільських системах широкополосники — предмет серйозних інженерних розробок, що межують з мистецтвом. Тут використовуються матеріали з максимально можливими параметрами, ноу-хау, що дозволяють все-таки отримати повнодіапазонний драйвер.



Рисунок 1.10 – Широкосмуговий динамік Lii Audio 2PCS Fast-10

Найбільш проблемним для широкопосмугового динаміка є відтворення крайніх частот чутного діапазону. Якщо широкополосник здатний працювати в діапазоні 60-16000 Гц з нерівномірністю ± 10 дБ – це вже непоганий результат.

При цьому в зв'язку з простотою конструкції і відсутністю фільтрів (кросоверів) акустична система з широкополосником здатна демонструвати високу чутливість – від 90-92 дБ і вище. Це робить колонки з широкопосмуговими динаміками особливо затребуваними серед любителів лампових підсилювачів, що мають, як правило, обмежену потужність.

У зв'язку з цим голосові котушки таких широкопосмуговиків володіють підвищеним опором. Загальноприйняті значення для всіх інших динаміків, призначених для установки в акустичні системи — від 2 до 8 Ом.

Крім того, саме широкопосмуговий динамік максимально наближений за своїми параметрами до точкового джерела звуку – ідеального акустичному об'єкта з точки зору його локалізації. Напрямок на джерело у такому разі визначається слухачем максимально точно. Такий випромінювач дозволяє створити найбільш точну стереосцену (звукову сцену), оскільки джерело звуку в стереоканалі – лише один і він має мінімальну площу.

З іншого боку, найпростіша колонка з широкополосником — найдешевше рішення, але говорити про повнодіапазонне відтворення в цьому випадку не доводиться.

Твітер

Зрозуміло, що, якщо важко відтворити весь діапазон одним випромінювачем, є сенс розділити цей діапазон на кілька частот, у кожній з яких буде працювати окремий динамік. За верхні частоти в цьому випадку відповідає твітер (див. рис. 1.11-1.12).

Цей динамік повинен мати дифузор (мембрану) невеликій площі, але досить жорсткий і максимально легкий, адже смуга випромінювання твітера, в більшості випадків, не нижче 1,5 кГц. Серед динаміків найбільше поширення отримав купольний твітер. У ньому центральне тіло дифузора або елемент, який

в повнорозмірному динаміці називається пілозахисним ковпачком, займає практично всю площа випромінюючої поверхні.



Рисунок 1.11 – Твітер колонки Apple HomePod

Мембрану купольного твітера найчастіше роблять з тканини з просоченням, що підвищує її твердість. Застосовують і більш жорсткі матеріали, кращим з яких по праву вважається берилій.

Важливий параметр твітера – це частота власного резонансу. Розробники прагнуть до того, щоб вона перебувала нижче смуги його відтворення. У цьому випадку пицалка звучить максимально точно. Справа в тому, що на частотах, близьких до резонансу, комплекс підсилювач-динамік починає працювати некоректно, йде «в рознос», і система стає погано керованою.

Результат – спотворення, причому в тій частотній області, в якій наш слух до них особливо чутливий. Вихід виявився простий: кросовер – пристрій, що обмежує частотний діапазон роботи твітера, «обрізає» частоти його власного

резонансу, розташовані нижче робочого діапазону твітера, який починається, як правило, від 2-3 кГц.



Рисунок 1.12 – Твітер з алмазної мембраною Seas Excel E0100-04

Друга вимога до твітера – підвищена верхня гранична частота відтворення. В оптимальному випадку вона повинна перевершувати верхній частотний поріг чутного діапазону, тобто бути вище 20 кГц. Здавалося б, навіщо вище, якщо на цих частотах ми вже не чуємо нічого? Розширена догори межа частотного діапазону дозволяє твітеру відтворювати так звані верхні гармоніки, формуючи максимально точне звучання високих частот.

Названі дві вимоги до конструкції твітера є взаємовиключними. Для зниження резонансу необхідно робити мембрану більшого розміру і ваги, а для підвищення верхньої межі АЧХ – навпаки. Вихід – максимальне співвідношення жорсткості і маси мембрани твітера, за яку і йде технологічна боротьба.

Середньочастотний динамік

Динамік, який грає середні частоти (його ще іноді називають мідренч або, правильніше, мідрейндж – цей термін, від англійського *midrange speaker*, прийшов з автозвуку), зазвичай найбільш близький по конструкції до класичного

динаміку. Важливо, що цей динамік відтворює саме той діапазон частот, в якому розташовується людський голос і на якому наш слух особливо чутливий до спотворень. Приклад поведінки такого динаміка, заміри отримані лазерним інтерферометром можна побачити на рисунку 1.13.

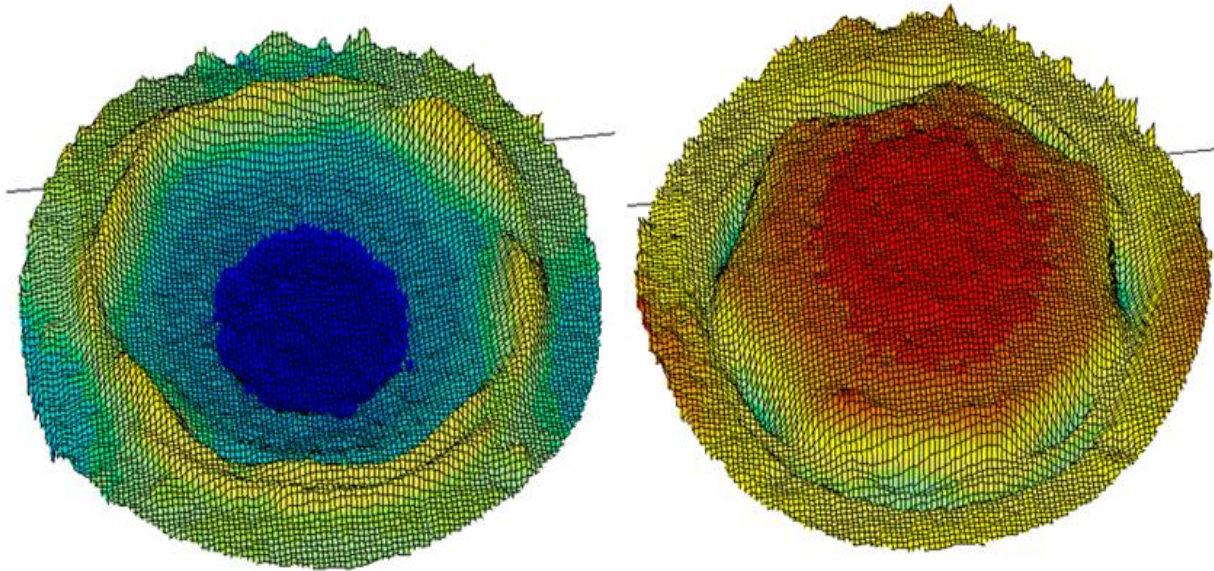


Рисунок 1.13 – Приклад поведінки динаміка, заміри отримані лазерним інтерферометром

Ахіллесовою п'ятою середньочастотника є ефект появи специфічних деформацій дифузора – так званої згинальної хвилі, коли периферична область дифузора не встигає за рухами центральної зони, де кріпиться голосова котушка. Тобто різні зони дифузора, до речі, розташовані, як правило, плямами, а не концентрично, як слід було б з логіки процесу, коливаються не синфазно – одні ділянки відстають від інших.[5]

Звучання стає «рихлим», неточним. Значить, дифузор повинен бути максимально жорстким. Якщо вирішувати проблему в лоб – отримаємо дійсно жорсткий дифузор, який буде важити так багато, що не зможе звучати. Тому, як і у твітері, і в широкополоснику, в конструкції дифузора закладений складний компроміс між жорсткістю і легкістю.

Наявність в центральній частині динаміка фізичної перешкоди виключає проходження звукової хвилі від одного боку дифузора до іншого, а його пулевидна форма дозволяє перенаправити звукові хвилі вперед і в сторони, посилюючи тим самим віддачу динаміка і трохи розширюючи його діаграму спрямованості. Середньочастотний динамік з дифузором-пулею та динамік звичайної конструкції можна побачити на рисунку 1.14.



Рисунок 1.14 – Середньочастотний динамік з дифузором-пулею та динамік звичайної конструкції

НЧ-динамік

Низькочастотний динамік часто ще називають вуфером. Для практично будь-якого класу акустичних систем вуфер, природно, є найбільшим за площею випромінювачем. Для низькочастотника кращим є повністю поршневий режим роботи, коли дифузор рухається зворотно-поступально, як єдине ціле. Приклад такого динаміка зображено на рисунку 1.15.

Тут проблема вирішується ще більш радикально, ніж у випадку зі середньочастотним драйвером. Дифузор роблять максимально жорстким, навіть за рахунок його обтяження. Справа в тому, що на низьких частотах наш слух найменш чутливий до спотворень. І у випадку, коли для дифузора вуфера насамперед важлива амплітуда коливань, заради жорсткості йдуть на збільшення ваги.



Рисунок 1.15 – 18-дюймовий басовий вуфер JBL

Особливо яскраво «порода» низькочастотного динаміка проявляється в драйверах, які встановлюються в сабвуфери. Це важкий, потужний пристрій діаметром від 8 до 15 дюймів (найбільш часто застосовуваний користувача АС діапазон розмірів). Вони мають дуже потужні магнітні системи і, в зв'язку з цим, чималий загальна вага. При цьому в низькочастотних драйвери, що працюють від потужних напівпровідникових підсилювачів, часто встановлюються котушки мінімального опору — 2, а то і 1 Ом.

Коаксіальні динаміки

У двох трисмуговий колонці твітер, середньочастотник і низькочастотний динамік встановлюються окремо, тобто, вони рознесені в просторі. Це є серйозним недоліком. Наш слух, який легко визначає напрям на джерело звуку,

буває обдурять тим, що середні частоти і високі частоти надходять практично з різних точок. Приклад такої динаміки зображено на рисунку 1.16.

Направлення на низькочастотний випромінювач визначити важче, але тим не менш його віддаленість також вносить свою лепту. В результаті, така геометрія колонки погіршує сприйняття стереообразу.[6]

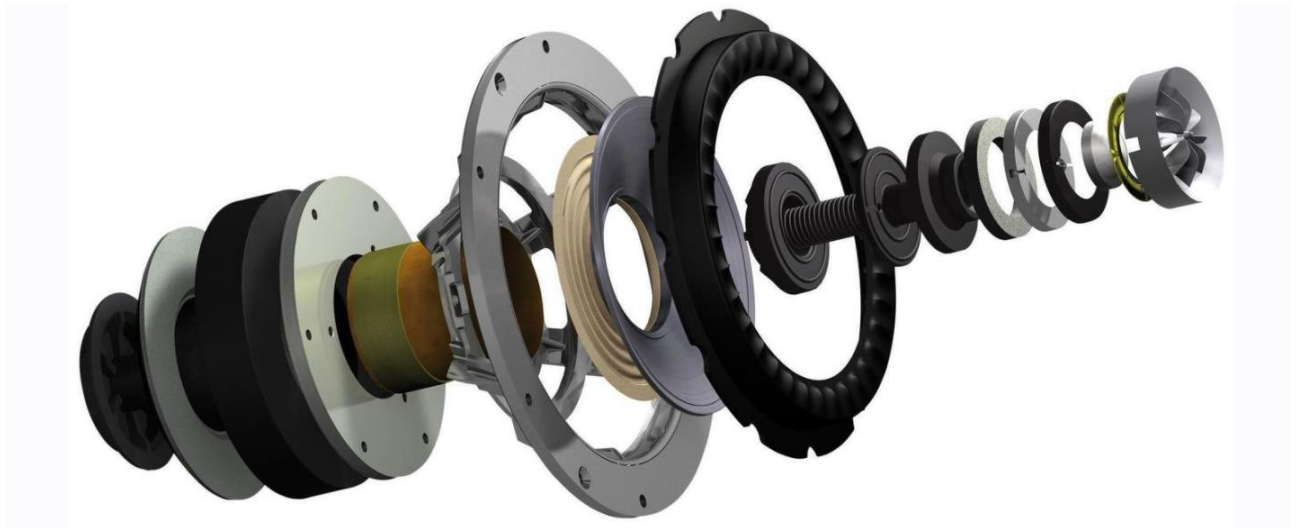


Рисунок 1.16 – Будова коаксіального драйвера KEF UniQ

Широкосмуговий динамік, про який написано вище, просто в силу фізики процесу має обмеження як по максимальній потужності, так і по частотному діапазону. Крім того, для широкосмугового динаміка немінуча висока нерівномірність АЧХ (вище 10-20 дБ), яку практично неможливо, та й немає сенсу компенсувати електронікою або акустичним оформленням.

Виходом з цієї ситуації став коаксіальний драйвер. На перший погляд, такий поєднаний динамік виглядає досить просто. У двосмуговому варіанті твітер розташований в центрі низькочастотного динаміка — традиційні розміри пищалок цілком для цього підходить. Але з інженерної точки зору така конфігурація різко ускладнює розробку та виготовлення подібної системи.

І це відбивається на її вартості. Є варіанти, які дозволяють спростити конструкцію: наприклад, розміщення твітера перед низькочастотним дифузorzом

на спеціальному кріпленні. І все-таки саме «повноцінні» коаксіальні системи створюють найбільш точний стереоефект. Тому у всі часи різні розробники і компанії випускали коаксіальні драйвери, які були присутні в складі їх топових систем. Приклад готової конструкції зображено на рисунку 1.17.



Рисунок 1.17 – Коаксіальний динамік TAD CST

Динаміки навушників

Для навушників насамперед довелося розробити мініатюрні динаміки: калібром від 6 до 12 мм для внутрішньоканальні і до 50-60 мм максимум – для накладних моделей. У переважній більшості випадків це широкосмугові драйвери. Малий розмір полегшує їм задачу відтворення повного діапазону. (див. рис. 1.18)

З іншого боку, виробництво ускладнюється саме мінімальними розмірами. Найчастіше дифузор динаміка такого зроблений з синтетичного матеріалу, хоча целюлоза та інші природні волокнисті матеріали теж можуть бути присутніми. Зважаючи вимог компактності і низької ваги саме в

наушниках найбільш часто використовуються неодимові магніти, завдяки яким динаміки можуть демонструвати високу чутливість — до 120 дБ і вище.

Специфіка застосування вимагає, щоб динаміки навушників мали підвищений опір. І якщо звукові котушки динаміків акустичних систем мають опір від 2 до 16 Ом (частіше всього від 4 до 8), то динаміки навушників мають опір не нижче 16 Ом, а максимальне значення може досягати 600-800 Ом для професійних моделей.



Рисунок 1.18 – Динамік навушників Apple EarPods

В окремих моделях навушників, навіть внутрішньоканальні, можуть використовуватися роздільні динаміки для різних смуг частот, але це рідкісний

випадок. Частіше зустрічається спільне застосування випромінювачів різних типів – динамічних і арматурних.

Загалом вибір динаміка повністю залежить від наших потреб і цілей, нам слід вибирати звукові динаміки, які найкраще відповідають нашим вимогам. Також потрібно пам'ятати про їх параметри – максимальне звучання, його якість, розмір, матеріал з якого виготовлено, витрати і інші фактори, щоб зробити найкращий вибір певного типу динаміка чи можливо їх пари, для конкретного його застосування, як наприклад зазвичай користується популярністю спарення середньо частотного і високочастотного динаміка в одній конструкції. [6]

1.4 Висновки до розділу

Існує розмаїття акустичних систем та динаміків, кожен з яких має свої унікальні характеристики та можливості. Вибір правильного обладнання для конкретних потреб може бути складним завданням через широкий спектр доступних опцій.

Таким чином для ефективного і оптимального створення та використання акустичних систем і динаміків важливо проводити подальші дослідження їх технічних параметрів. Це допоможе краще розуміти їхні можливості, обмеження та специфічні особливості. Аналіз параметрів, таких як частотний діапазон, чутливість, опір, потужність та інші, дозволить зробити більш обґрунтований вибір при розробці акустичних систем у відповідності з конкретними вимогами та умовами використання.

Дослідження параметрів акустичних систем є важливим етапом для досягнення оптимальної якості звуку та максимальної ефективності їхнього використання. Враховуючи різноманітність факторів, які впливають на звучання, подальші дослідження допоможуть вдосконалити технічні характеристики та забезпечити найкращі результати при створенні акустичних систем. Подальші дослідження амплітудно-частотних характеристик акустичних систем є

важливим етапом для розробників, які прагнуть створити аудіообладнання з високою якістю звучання.

Глибоке розуміння амплітудно-частотних характеристик дозволить розробникам удосконалити параметри акустичних систем, щоб досягти оптимальної якості звуку. Ці характеристики визначають, як акустична система реагує на різні частоти звуку та як це впливає на звукове відтворення. Також дослідження амплітудно-частотних характеристик дозволять розробникам виявити потенційні недоліки в звуковому відтворенні, такі як нерівномірна чутливість на різних частотах або спотворення звуку. Це допоможе покращити конструкцію акустичних систем, забезпечуючи більш точне відтворення звуку на всьому частотному спектрі.

В результаті подальших досліджень характеристик розробники зможуть вдосконалити конструкцію та налаштування акустичних систем, що призведе до створення продуктів з вищою точністю відтворення звуку та відмінною якістю звучання.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКО- ТА СЕРЕДНЬОЧАСТОТНИХ ГУЧНОМОВЦІВ

2.1 Постановка задач дослідження

Метою роботи є покращення якості відтворення звуку за рахунок створення гладкої амплітудо-частотної характеристики з урахуванням реальних параметрів гучномовців і акустичного фільтра.

Загалом акустична система складається з трьох полос – низькочастотні секції, середньочастотні секції та високочастотної секції. Часто середньочастотні та високочастотні об'єднуються в одну секцію у вигляді сателіту. Тому зазвичай користуються більшою потребою двохсмугові акустичні системи. Таким чином краще всього використовувати динаміки високочастотні та середньочастотні.

Тому для початку потрібно провести дослідження амплітудно частотних характеристик високо- та низькочастотного гучномовців.

Високочастотні та середньочастотні динаміки мають свої амплітудно-частотні характеристики тому дослідження проводитимуться окремо для кожного гучномовця.

2.2 Вимірювальний стенд

Для експериментальних досліджень, що уточнюють параметри гучномовців був зібраний вимірювальний стенд (рис 2.1) до його складу входять:

- генератор звукових частот ГЗ-111;
- підсилювач сигналу звукових частот ГЗ-112(1);
- осцилограф С1-77;
- електронний вольтметр VC9805;
- вимірювач звукового тиску ВШВ-003-М2 з мікрофоном ВПМ101.

Генератор сигналів низькочастотний ГЗ-111. Це генератор RC-типу з плавною установкою частоти в межах кожного з п'яти піддіапазонів призначений для налаштування та випробування різної радіоапаратури. Генератор є джерелом синусоїдального, додаткового режиму і прямокутного сигналу. Частоту генератора можна синхронізувати зовнішнім сигналом довільної форми. У генераторі ГЗ-111 реалізована система стабілізації вихідної напруги, що забезпечує рівномірну ЛЧХ генератора та сталість рівня при впливі факторів, що дестабілізують. Регулювання напруги генератора ГЗ-111 плавне та дискретне в широких межах. [7]

Представлений характеристиками генератор сигналів має широкий діапазон частот від 20 Гц до 2 МГц, розділений на 5 піддіапазонів. Основна похибка встановлення частоти становить $\pm[1+(50/f)]\%$, де f - частота в Гц. Вихідна напруга складає 5 вольт при опорі 600 Ом, з можливістю ослаблення від 0 до 60 децибел з дискретністю через 20 дБ (з атенюатором) та 22 дБ (плавно регульоване). Зміна вихідної напруги при зміні частоти становить $\pm 1,5\%$ до 100 кГц та $\pm 5\%$ понад 100 кГц відносно рівня напруги на частоті 1 кГц. Потужність генератора становить 20 ват.

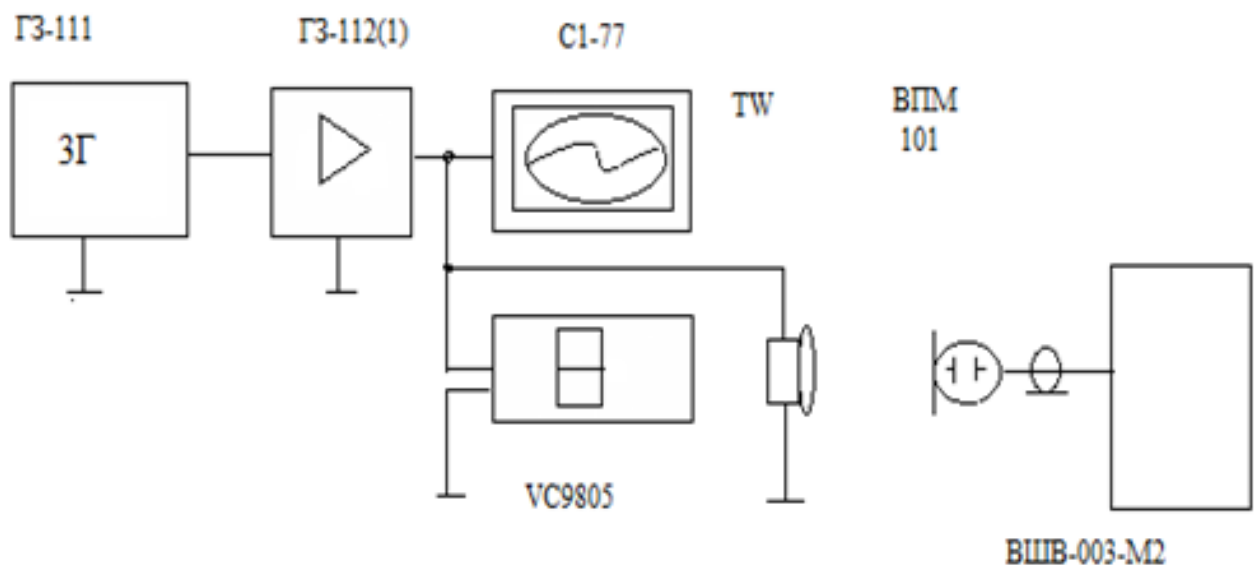


Рисунок 2.1 – Структурна схема вимірювального стенду

Генератор ГЗ-112/1 сигналів низькочастотний ГЗ-112/1 являє собою джерело синусоїдального та прямокутного сигналів і призначений для дослідження, налаштування та випробувань систем та приладів, що використовуються в радіоелектроніці, зв'язку, автоматиці, обчислювальній та вимірювальній техніці. У генераторі передбачено режим зовнішньої синхронізації синусоїдальним сигналом. Генерація прямокутного сигналу.

Генератор сигналів з широким діапазоном частот від 10 Гц до 10 МГц, поділений на шість піддіапазонів для точних вимірювань у різних діапазонах частот. Має номінальний вихідний опір 50 Ом, можливість підсилення з рівнем вихідного сигналу до 25 В (для частот від 10 Гц до 1 МГц) та 20 В (від 1 до 10 МГц). Забезпечує розмах не менше 10 В на навантаженні 50 Ом і 20 В без навантаження. Оцінюється за рівнем шумів та точністю у відповідності до частотного діапазону. Його живить мережа змінного струму 220 В при 50 Гц або 115/220 В при 400 Гц, забезпечуючи потужність генератору до 60 ВА та підсилювача до 35 ВА.

Осцилограф універсальний С1-77 призначений для дослідження форми електричних сигналів у діапазоні частот 0 - 10 мГц, вимірювання розмахів у діапазоні від 0,01 до 200 В та часових інтервалів від $0,1 \cdot 10^{-6}$ до 0,4 с. Наявність двох каналів вертикального відхилення забезпечує одночасне дослідження двох сигналів однією розгортці. Режим роботи розгортки: автоколивальний, зовнішній сигнал.

Вертикальне відхилення: 2 канали зі змінною смугою пропускання від 0 до 10 мегагерц, з часом наростання перехідної характеристики приблизно 35 наносекунд (або 40 наносекунд з виносним дільником). Коефіцієнт відхилення регулюється від 5 мілівольт на поділ до 10 вольт на поділ відповідно до ступінчастого ряду чисел 1, 2, 5, з можливістю плавного налаштування відхилення в 2,5 рази.

Допустиме сумарне значення постійної та змінної напруги при закритому вході становить 300 вольт (або 200 з виносним дільником). Вхідний імпеданс складає 1 мегом до 30 пікофарад (або 1 мегом до 12 пікофарад з дільником 1:10).

Горизонтальне відхилення має коефіцієнт розгортки від 0,1 мікросекунди на поділ до 0,05 секунди на справ, відповідно до ступінчастого ряду чисел 1, 2, 5. Можливе плавне регулювання коефіцієнта розгортки в 2,5 рази з перекриттям. Основна похибка складає $\pm 4\%$.

Мультиметр моделі VC9805A є універсальним вимірювальним приладом з розширеним функціоналом. Окрім основних параметрів, він здатний вимірювати температуру, індуктивність, ємність та частоту. Має підсвічування дисплея та функцію автоматичного вимкнення. Пристрій має розширені можливості. [7]

Він здатний працювати з такими величинами:

- постійна напруга: до 1000 В;
- змінна напруга: до 700 В;
- постійний та змінний струм: до 20 А;
- опір: до 20 МОм;
- ємність: до 200 мкФ;
- температура: до 1000 °С;
- індуктивність: до 20 Гн;
- частота: до 200 кГц.

Мікрофон ВПМ-101, мікрофонний підсилювач призначений для використання з капсулем мікрофонним конденсаторним М-101 у складі шумоміра ВШВ-003. Зовнішній вигляд вимірювального мікрофону ВПМ-101 на стійці, що регулюється показано на рис.2.2.

Шумомір ВШВ-003-М2 призначений для вимірювання рівня звукового тиску у діапазоні від 2 Гц до 18 кГц та октавних смуг від 2 Гц до 8 кГц у вільному та дифузному полях. Він також здатний вимірювати рівень звуку з частотними характеристиками А, В, С, а також середні квадратичні значення віброшвидкості та віброприскорення.

Технічні характеристики шумоміра ВШВ-003-М2, включають в себе клас точності 1, основну відносну похибку вимірювання віброшвидкості та віброприскорення на рівні $\pm 10\%$, частотний діапазон від 1 до 18 000 Гц,

динамічний діапазон вимірювання рівня звуку від 22 до 140 дБ. Щодо живлення, пристрій може працювати від мережі змінного струму з напругою 220 В або від батарей, які забезпечують напругу від 5 до 7,5 В. Потужність варіюється від 1 до 5 Вт залежно від джерела живлення.[7]



Рисунок 2.2 – Вимірювальний мікрофон ВПМ-101 на стійці, що регулюється

2.3 Високочастотний динамік ЗГД-2

У цьому дослідженні використовується двосмугова акустична система, яка складається з двох типів динаміків: високочастотного (твітер) та середньочастотного випромінювача звуку. Для цього дослідження було вибрано динамік ЗГД-2 у ролі твітера, що зображено на рисунку 2.3 та 15ГД-11Б див. рис. 2.5 як середньочастотний випромінювач звуку. Нижче описано параметри кожного з них.

Гучномовець призначений для використання у виносних акустичних системах рівня вищої та першої складності як високочастотний елемент для приміщень. Він доступний у двох варіаціях з опором 15 або 25 Ом.

Технічні характеристики акустичної системи ЗГД-2 такі, що для динаміка включають діапазон частот від 5000 до 18000 Гц, нерівномірність АЧХ більше 8 дБ, чутливість на рівні 90 дБ, коефіцієнт гармонічних спотворень у діапазоні від 400 до 10000 Гц - 3%, опір може бути 15 Ом або 25 Ом, а також має стабільну потужність - паспортну, довготривалу та короткочасну - на рівні 6 Вт. Типова частотна характеристика для даного динаміка зображена на рисунку 2.5.[8]

Особливість конструкції заключається в тому, що головка електродинамічного типу, високочастотна, кругла з неекранованим магнітним ланцюгом. Настановний фланець та акустична лінза виконані з пластмаси.



Рисунок 2.3. – Гучномовець ЗГД-2

Конструкція магнітного кола гучномовця ЗГД-2 включає наступні елементи:

1. Кільцевий феритовий магніт марки М16БА190 розміром К52х23х8 мм.
2. Керн діаметром 20 мм.
3. Верхній фланець з отвором діаметром 21,2 мм.
4. Повітряний зазор з висотою 2,5 мм, радіальною шириною 0,6 мм і індукцією у зазорі 1 Тл. Детальні розміри зображено на рисунку 2.4.

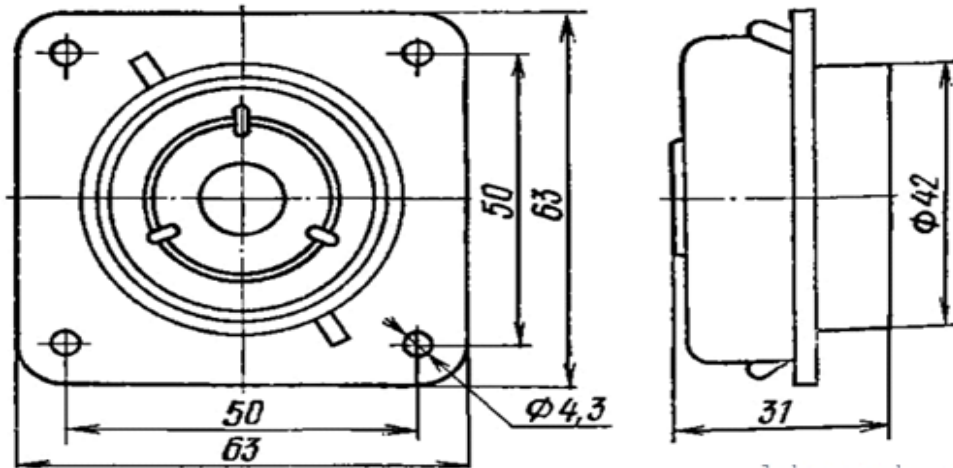


Рисунок 2.4 – Конструкція гучномовця 3 ГД-2

Рухома система включає наступні складові:

1. Звукову котушку, намотану проводом марки ПЕВЛ діаметром 0,07 мм. Намотування двошарове: у першому шарі 21 виток, у другому – 20. Висота намотування 2 мм. Омичний опір 12 ± 1 Ом.
2. Каркас котушки з паперу марки ЕН-70. Висота - 8 мм, внутрішній діаметр 20,3 мм, зовнішній (разом із намотуванням) 20,9 мм.
3. Куполоподібну діафрагму з підвісом, виготовлену з тканини, просоченої розчином бакелітового лаку.[8]

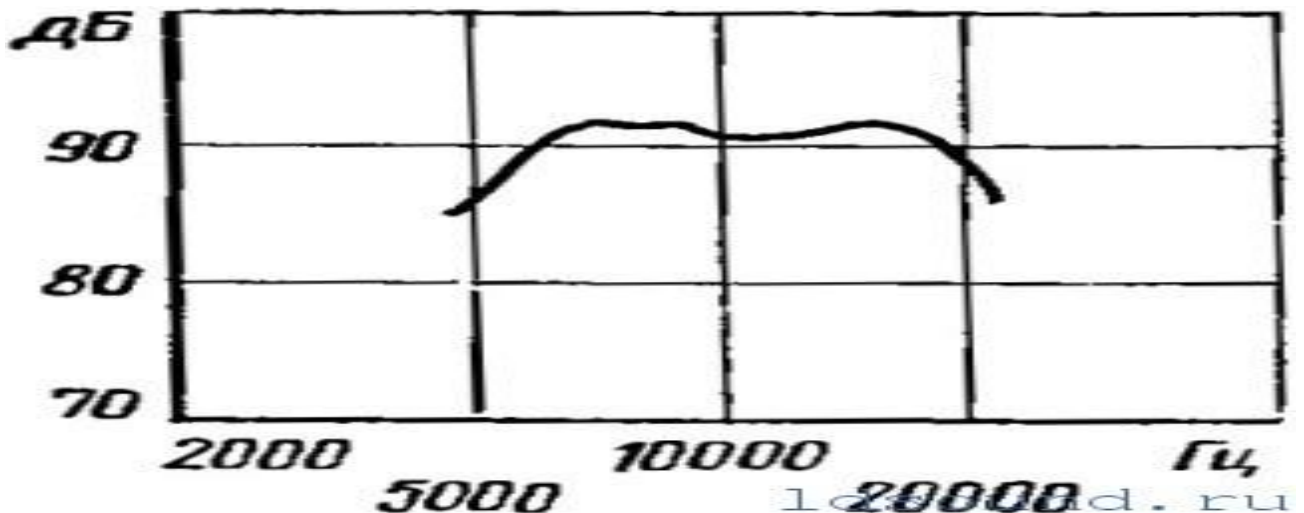


Рисунок 2.5 – Типова частотна характеристика для даного динаміка

2.4 Середньочастотний динамік 15ГД-11 Б

Динамік 15 ГД-11Б, що надано на рис. 2.6, має наступне призначення: для застосування в закритих і фазоінверсних акустичних системах першої і другої груп складності в якості середньочастотної ланки для роботи в приміщеннях.

Динамік 15ГД-11 Б в рупорній системі і з фазо корегувальною кулею показано на рис.2.7.

Голівка гучномовця електродинамічного типу, середньочастотна, кругла, з неекранованим магнітним ланцюгом. Кошик виготовлений з алюмінієвого сплаву литвом під тиском. Детальні розміри такого дингаміка зображені на рисунку 2.8.

Магнітна система побудована на кільцевому феритовому магніті. Дифузор конічної форми і ковпачок сферичної форми виготовлені з паперової маси. Підвіс тороїдальної форми з прогумованої тканини або гуми. Центруюча шайба з тканини з просоченням.[9]



Рисунок 2.6 – Динамік 15ГД-11 Б

Акустичний пристрій 15ГД-11 Б характеризується широким діапазоном частот від 200 до 5000 Гц та високою чутливістю на рівні 90 дБ. Він має номінальний звуковий тиск 0,3 Па та номінальний опір 8 Ом.



Рисунок 2.7 – Гучномовець 15ГД-11 Б з фазо корегувальною кулею

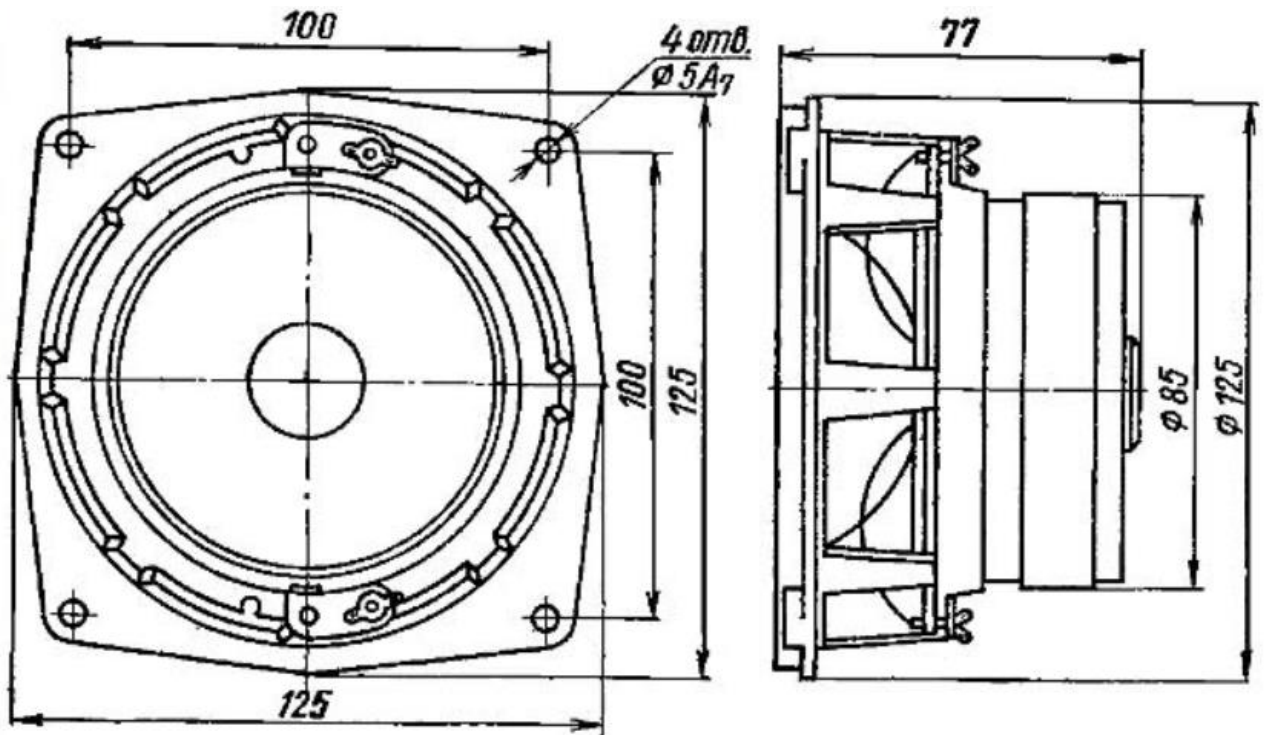


Рисунок 2.8 – Конструкція гучномовця 15ГД-11 Б

Цей пристрій забезпечує паспортну потужність 10 Вт, довготривалу потужність 25 Вт та короткочасну потужність 30 Вт. Його резонансна частота становить 110 Гц з відхиленням ± 50 Гц, а розміри складають $\varnothing 125 \times 77$ мм. Типова частотна характеристика для даного динаміка зображена на рисунку 2.9.[9]

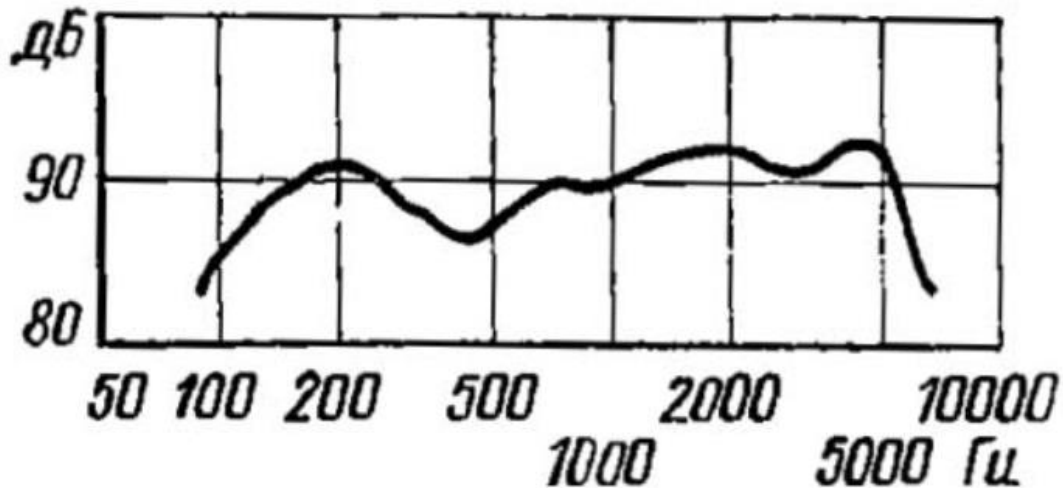


Рисунок 2.9 – Типова частотна характеристика для даного динаміка

Аналіз та дослідження динаміків для звукових систем є важливим з різних причин. Він допомагає встановити якість та ефективність звукової системи, а також виявити можливі проблеми або несправності.

Перевірка динаміків дозволяє оцінити їхню розбірливість, динаміку, чутливість та звукову якість. Це допомагає визначити, наскільки добре вони відтворюють звук і чи відповідають вимогам користувача.

Також аналіз динаміків допомагає виявити можливі проблеми, такі як перекручення звуку, нерівномірне розподілення звукового тиску або пошкодження динаміків. Це дозволяє вчасно вжити заходів для їхнього виправлення або заміни, що забезпечує більш якісний звуковий досвід.

Загалом, проведення аналізу динаміків для звукових систем допомагає забезпечити оптимальну якість звуку, виявити можливі проблеми та зробити відповідні корекції для задоволення потреб користувача.

2.5 Дослідження АЧХ високочастотного динаміка

Для проведення досліджень звукових систем використовується генератор частоти, який створює сигнал, що подається на гучномовці за допомогою підсилювача потужності. Для контролю потужності проводяться дослідження при потужності 1 Вт, яку виміряють за допомогою електронного вольтметра. Для вимірювання рівня звукового тиску використовують високоякісний професійний мікрофон, який встановлюють на відстані 1 м від гучномовця. За допомогою пристрою ВШВ-003-М2 відображається значення рівня звукового тиску, яке фіксується на індикаторній панелі. Відповідно до ГОСТ 12090-80 розташовують гучномовці і проводять зняття амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) для частот від 2000 до 16000. Результати досліджень записуються в таблицю 2.1. Оскільки сприйняття людського вуха має логарифмічну характеристику, звуковий тиск вимірюється за логарифмічною шкалою у децибелах (дБ). [10]

Графік АЧХ високочастотного гучномовця наведені на рисунку 2.10

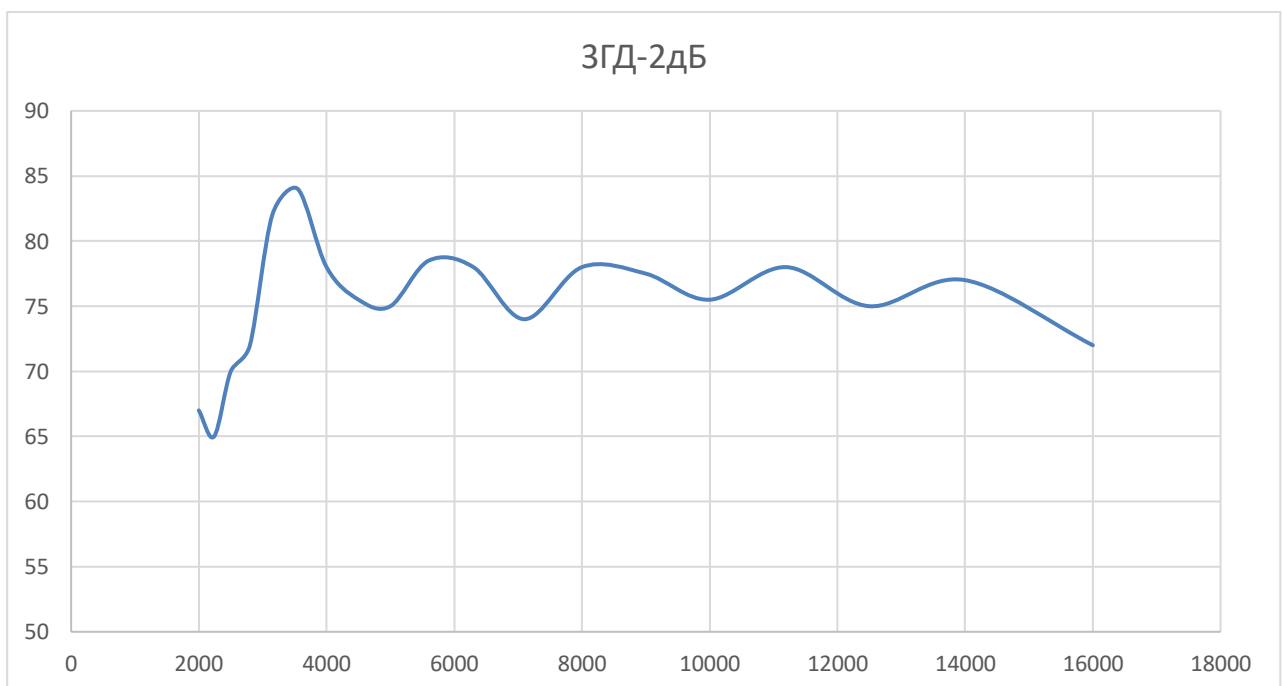


Рисунок 2.10 – АЧХ високочастотного гучномовця ЗГД-2

Таблиця 2.1 Результат АЧХ для твітера 3 ГД-2

Частота / Гучномовець	ЗГД-2дБ
2000	67
2240	65
2500	70
2800	72
3150	82
3550	84
4000	78
4500	75,5
5000	75
5600	78,5
6300	78
7100	74
8000	78
9000	77,5
10000	75,5
11200	78
12500	75
14000	77
16000	72

Після проведення дослідження АЧХ даного динаміка на частотах від 2000 до 16000 Гц побудовано графік згідно якого можна побачити, що даний гучномовець має відмінну частотну характеристику, характеристика досить плоска, серйозних провалів або відхилень вгору або вниз не спостерігається. Таким чином він є гарним варіантом для створення якісної акустичної системи.

2.6 Дослідження характеристик середньочастотного динаміка

Згідно ДСТУ 3990-2000, частоти на яких проходять вимірювання відносяться до третього переважного ряду в діапазоні від 200 Гц до 8000 Гц, оскільки даний діапазон є найбільш інформативним. [11]

Схожим чином, як і для високочастотного динаміка за допомогою стенду було знято АЧХ для середньочастотного динаміка. Отримано дані амплітуди звучання наведено в таблиці 2.2. Після проведення експерименту були встановлені результати дослідження значення звукового тиску в заданих точках гучномовця. Маючи проміжні значення за допомогою інтерполяційного поліному Лагранжа було побудовано АЧХ середньочастотного гучномовця, її зображено на рисунку 2.11. [12]

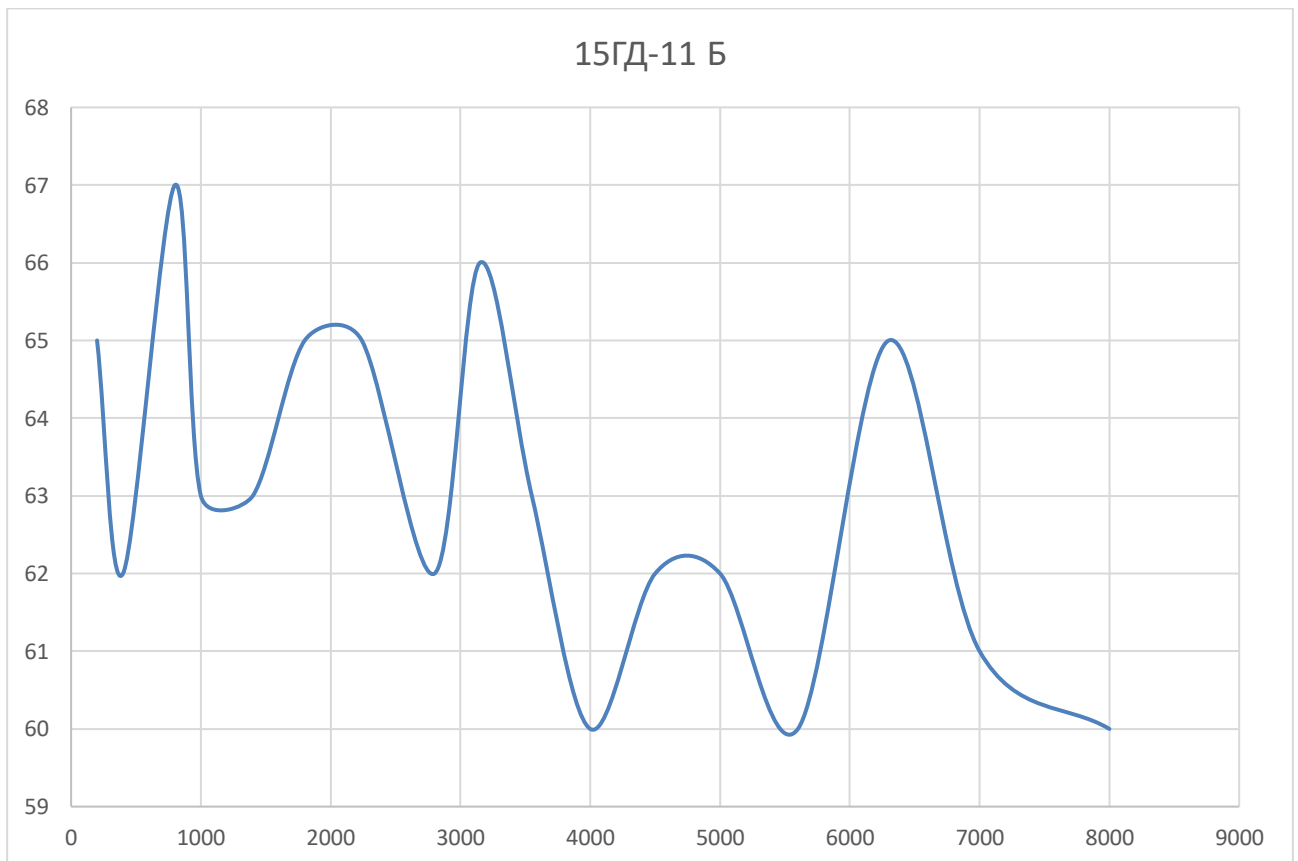


Рисунок 2.11 – АЧХ гучномовця 15ГД-11 Б

Таблиця 2.2 Результат АЧХ для 15ГД-11 Б

Частота / Гучномовець	15ГД-11 Б
200	65
400	62
800	67
1000	63
1400	63
1800	65
2240	65
2800	62
3150	66
3550	63
4000	60
4500	62
5000	62
5600	60
6300	65
7000	61
8000	60

У ході дослідження АЧХ середньочастотного динаміка 15ГД-11Б отримано наступні результати. На частотах від 2000 до 8000 Гц, динамік показує стабільний рівень звукового тиску, пропорційний до вхідної потужності. Вище 8000 Гц, рівень звукового тиску починає зменшуватися, що свідчить про зниження виходу динаміка в цьому діапазоні частот. Цей динамік демонструє хороші характеристики в середній частотній області, що робить його придатним для використання у звукових системах, які працюють в цьому діапазоні частот.

2.7. Висновок до роділу

Висновок стосовно високочастотного та середньочастотного динаміків полягає в їхній характеристиці та придатності для акустичних систем.

Високочастотний динамік відзначається пласкою частотною характеристикою без серйозних провалів або значних відхилень вгору чи вниз по частотах. Його характеристика дозволяє використовувати його як ефективний компонент для створення високоякісної акустичної системи. Завдяки стабільній відтворюваності звуку в широкому діапазоні високих частот, цей динамік може стати важливим елементом для деталізованого і якісного аудіо.

Щодо середньочастотного динаміка, варто відзначити його добрі характеристики в середньому частотному діапазоні. Це робить його відмінним вибором для використання в акустичних системах, що оптимально працюють в цьому спектрі частот. Зокрема, на частотах від 2000 до 8000 Гц, динамік показує стабільний рівень звукового тиску, що пропорційний до вхідної потужності. Однак вище 8000 Гц спостерігається зменшення рівня звукового тиску, що свідчить про обмеження відтворення звуку в цьому діапазоні частот.

Отже, обидва динаміки мають свої переваги та обмеження у відтворенні звуку на певних частотах, і тому врахування їхніх характеристик є важливим для вибору та подальшого створення аудіо систем відповідно до конкретних потреб та вимог користувача.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАСИВНОГО АКУСТИЧНОГО ФІЛЬТРА. ОТРИМАННЯ СПІЛЬНОЇ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГУЧНОМОВЦЯ І ПАСИВНОГО АКУСТИЧНОГО ФІЛЬТРА

3.1 Методи дослідження акустичних систем

Дослідження амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) акустичної системи є ключовим етапом у вивченні та аналізі звукової відповіді цієї системи. Це дозволяє зрозуміти, як система реагує на різні частоти звуку і які властивості має звук, що вона відтворює. Ось деякі методи дослідження АЧХ акустичної системи:

1. Метод частотного аналізу. Цей метод є найбільш поширеним і простим у використанні. При цьому методі система вимірюється з використанням частотного генератора та осцилографа, мікрофонів та аналізаторів спектра для вимірювання відгуку акустичної системи на різні частоти. Генератор створює сигнал із заданою частотою, мікрофон ловить отриманий звуковий сигнал та за допомогою осцилографа реєструється амплітуда сигналу на виході системи.[13]

2. Використання апаратури для вимірювання АЧХ: Наприклад, програми Room EQ Wizard (REW), SMAART, аналізатори спектра або спеціальна вимірювальна апаратура можуть допомогти виміряти та записати АЧХ акустичної системи.

3. Математичне моделювання: Використання програмного забезпечення для моделювання акустичних систем (наприклад, MATLAB, Simulink, Multisim або спеціалізовані програми для моделювання акустичних систем) для прогнозування АЧХ на основі параметрів системи.

4. Обчислення через фільтри та передавальні функції: Цей метод базується на математичних обчисленнях передавальних функцій окремих елементів акустичної системи та їх комбінації для отримання загальної АЧХ.

5. Застосування звукових тестових сигналів: Використання спеціально створених тестових сигналів (наприклад, сигналів зі змінюваною частотою або амплітудою) для вивчення відгуку системи на ці сигнали та визначення АЧХ.

6. Тестування в контрольованому середовищі: Проведення вимірювань та тестувань у контрольованому акустичному середовищі, такому як анекоїчна кімната або інший звукоізолюваний простір, для отримання більш точних результатів.

Ці методи можуть бути використані окремо або в поєднанні один з одним для отримання детального розуміння амплітудно-частотних характеристик акустичної системи. В даній роботі використовується декілька методів для оцінки звучання акустичної системи та її елементів. [15]

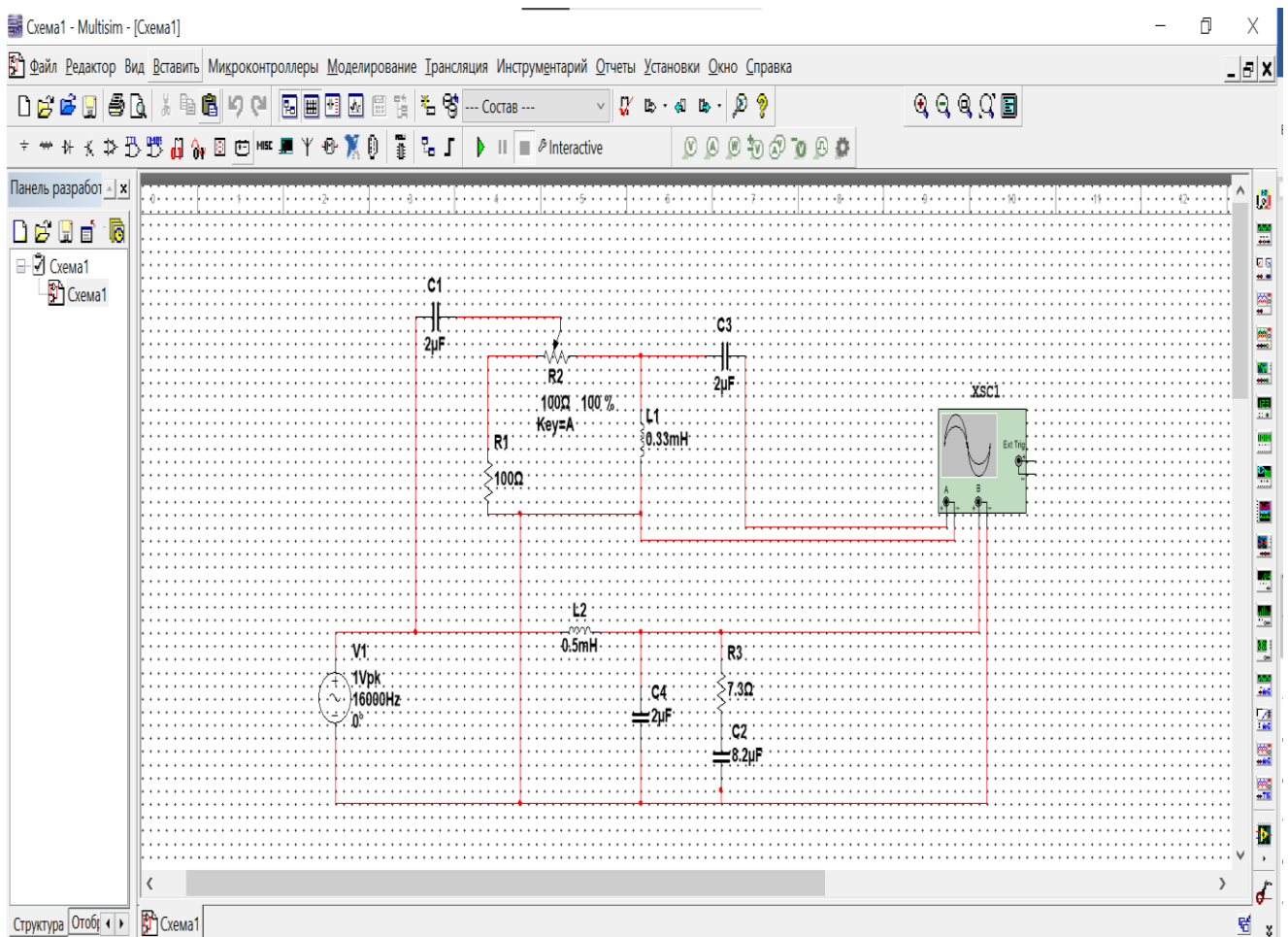


Рисунок 3.1 – Зображення вікна програми зі змодельованим фільтром

Для дослідження динаміків, що описано в другому розділі даної роботи, було використано метод частотного аналізу де за допомогою генератора частот створювали сигнал заданої частоти та подавався на динамік, далі за допомогою мікрофону та осцилографа уловлювали сигнал та оцінювали його потужність. Згідно отриманих даних було побудовано амплітудо частотні характеристики динаміків.

За рахунок того, що акустична система включає в себе не один тільки гучномовець, а і фільтр, який є не мало важливою складовою для отримання хорошого звучання акустики, потрібно провести його дослідження.

Для оцінки роботи акустичного фільтра можна також скористатися методом частотного аналізу, але уже з поєднанням методу моделювання за допомогою програмного забезпечення Multisim. Така програма надає можливість з мінімальними затратами отримати результат не гірший ніж при використанні реального вимірної стенду. [16]

Було обрано акустичний фільтр пасивного типу, що є досить популярним у різних акустичних системах, змодельована його схему в програмі та проведено імітацію роботи на різних частотах. Зображення програми моделювання можна побачити на рисунку 3.1.

3.2 Загальні принципи побудови активних фільтрів кросоверів багатосмугової акустичної системи та критерії якості

Використання активних кросоверів спрощує регулювання частот розділу та компенсування нерівностей участі головок акустичних систем, ніж це робиться у пасивних фільтрах. Нові головки можуть досягати лише 1% нелінійних спотворень під час роботи. Однак покращення звичайних головок за допомогою додаткових магнітів та фазових коректорів не значно покращує їхні параметри.[18]

Для зменшення нелінійних спотворень у динамічних головках рекомендується використання підсилювача у режимі джерела току, що керується

напругою (ДТКН). Впровадження цифрових методів теж дозволяє використовувати спеціальні звукові процесори, що ефективно застосовуються у сучасних багатоканальних ресиверах.

При виборі параметрів кросовера (частот розділу, порядку фільтрів та додаткових корекцій), важливо враховувати такі вимоги:

- Забезпечення мінімальної нерівномірності АЧХ та корекція діаграми направленості при використанні двох головок поблизу частоти розділу;
- Характеристики фільтрів повинні забезпечити придушення не менше, ніж на 20 дБ піків і провалів поза зоною роботи головок;
- Забезпечення допустимої вхідної електричної потужності, обмеженої максимальною амплітудою зміщення дифузора.

При цьому для гармонічних сигналів постійного рівня амплітуда зміщення збільшується на 12 дБ на октаву зі зниженням частоти. Це стає константним до резонансної частоти, нижче якої зміщення не залежить від частоти. Використання фільтрів з більшим порядком знижує амплітуду зміщення та, як результат, зменшує нелінійні спотворення.

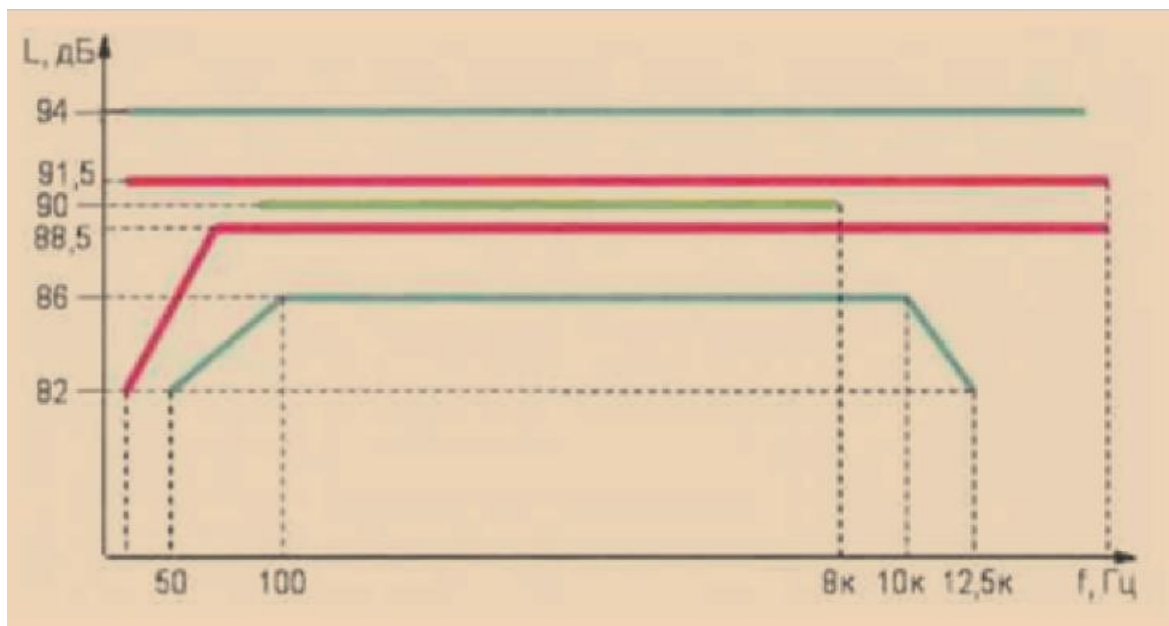


Рисунок 3.2.– Стандартні поля допусків з плоскою АЧХ

Також важливо забезпечити прийнятний рівень нелінійних спотворень, які виникають внаслідок ефекту Доплера. У випадку активних кросоверів, важливим критерієм якості є забезпечення рівномірної АЧХ для всієї акустичної системи. Пример такого рішення наведено на рисунку 3.2.

Розробники професійного обладнання припустили прояв взаємного посилення помітності спотворень синергію в системі параметрів, які вважалися параметрично незалежними. Збереження розпізнавальних ознак оцінюється за відхиленнями амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), а також критерієм - коефіцієнтом нелінійних спотворень. На рис. 3.3 показані поля допусків сумарного характеристичного коефіцієнта нелінійних гармонійних спотворень.

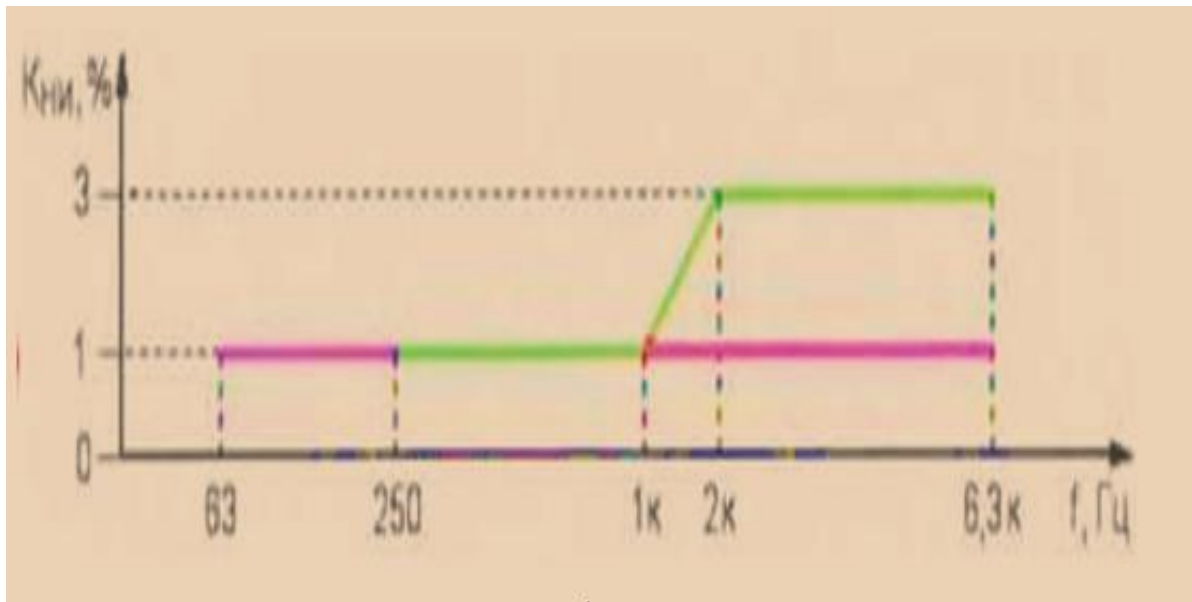


Рисунок 3.3 – Поля допусків коефіцієнта нелінійних спотворень

Ступінь спотворення сигналу оцінюється коефіцієнтом нелінійних спотворень - (формула 3.1), які представляють квадратний корінь з відношенням потужності всіх вищих гармонік вихідного сигналу до повної вихідної потужності:

$$k_H = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}}, \quad (3.1)$$

або близьким до нього коефіцієнтом гармонік - (формула 3.2):

$$k_H = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1}} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}}, \quad (3.2)$$

де U_1, U_2, U_n - діючі (або амплітудні) значення першої, другої і т.д. гармонік вихідної напруги при синусоїдальному сигналі на вході. Ці коефіцієнти вимірюються у %.

Також виникає проблема перетворення сигналів щодо часу. Гармонійне уявлення періодичних сигналів можливо тільки на сталих стадіях, а на перехідних стадіях спектр сигналів безперервний, динамічно переходячи в процесі встановлення до сукупності швидко мінливих в часі амплітуд частотного спектра з синхронними фазовими співвідношеннями.[19]

Усі ці проблеми не формалізовані та далеко не вивчені, тому в акустиці й існує фінальна стадія досліджень - експериментальні чи натурні випробовування. Так, якщо при фазових співвідношеннях сигналів з двох головок спостерігається зсув фаз близько до $\pm 180^\circ$ то для корекції іноді пропонується навіть включення головок у протифазному включенні.

3.3 Акустичний фільтр

Головна функція кроссовера полягає у розділенні вхідного аудіосигналу на окремі частотні діапазони, які потім надсилаються на відповідні динаміки в акустичній системі. Це дає можливість кожному динаміку спеціалізуватися на своїй частотній області і відтворювати звук оптимально.

При уважному розгляді амплітудно-частотних характеристик динаміків, видно, що у всіх їх крайові зони мають значні завали. Тому, як правило, використовують ту ділянку АЧХ, де нерівномірність найменша. При цьому виникає проблема поєднання характеристик таким чином, щоб при сумісному звуковідтворенні один динамік не спотворював би звуки інших. Для цього в акустиці використовують кросовери. Вони частіше усього бувають 2-х чи 3-х смуговими. Типова АЧХ для 3-х смугового кросовера наведена на рис. 3.4

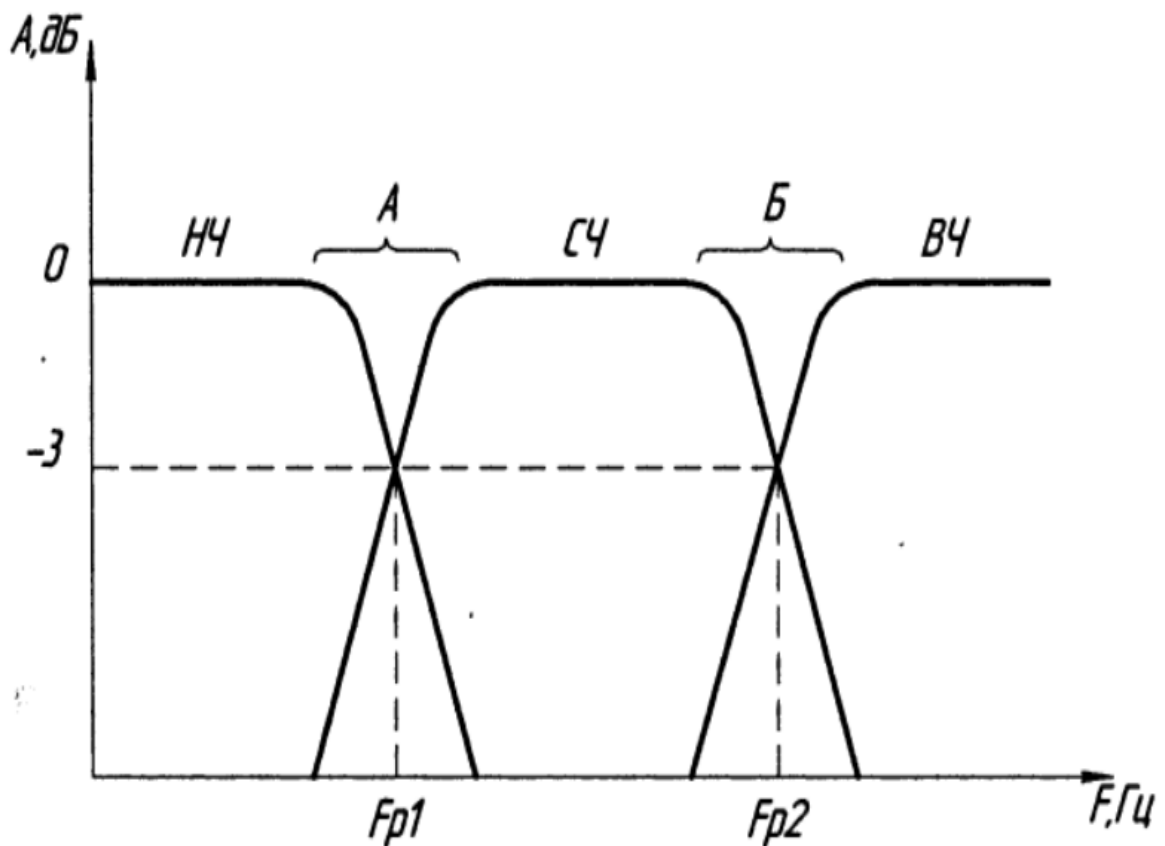


Рисунок 3.4 – АЧХ 3-х смугового кросовера

Для цього використовують фільтри. Схеми роздільних фільтрів можливо реалізувати як у вигляді пасивних LC-фільтрів різного порядку, так і у вигляді різноманітних складних активних фільтрів з використанням сучасних операційних підсилювачів. Однак, чим вище порядок фільтра, тим крутіше спад

його АЧХ, та складніше схема і налагодження. Приклад сполучення фільтрів різного порядку демонструють графіки на рис. 3.5

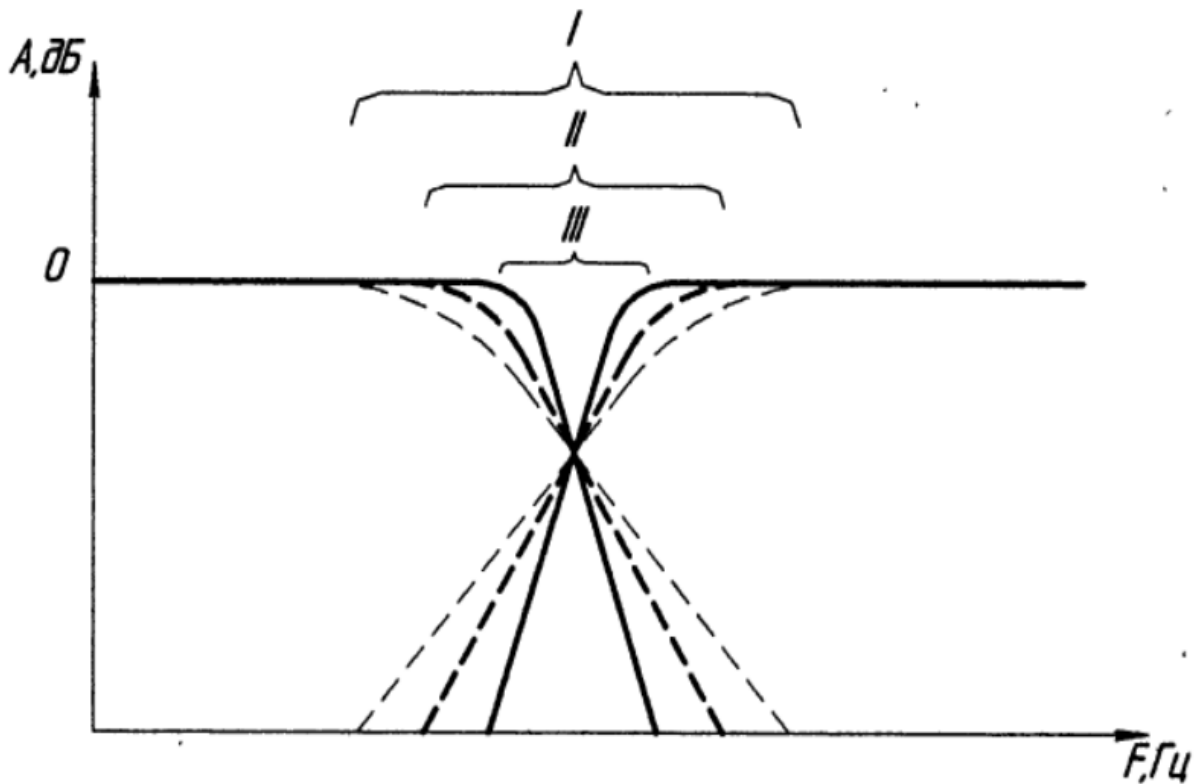


Рисунок 3.5 – Сполучення фільтрів різного порядку

Розглянемо варіант схеми активного кросовера. Для спрощення на схемі не будуть показані ланцюги власної корекції операційних підсилювачів (ОП) та джерел живлення. Також не показані додаткові буферні каскади, які іноді потрібні при побудові реальних практичних схем.

На рисунку 3.6 зображена схема кросовера де на ОП DA1 виконаний ФНЧ другого порядку з частотою зрізу 690 Гц, а на DA3 – ФВЧ другого порядку з частотою зрізу 4,2 кГц. Формування середньої частоти здійснюється за рахунок віднімання ВЧ - та НЧ-сигналів з вхідного сигналу за допомогою суматора на ОП DA2.

Різність фаз у 120° між смугами ВЧ та СЧ, СЧ та НЧ завдає клопоту розробникам акустичних систем для узгоджень роботи головок. Як недолік

такого фільтру слід відзначити – широка смуга сумісної роботи головок у суміжних полосах.

Також активні фільтри використовують активні компоненти, такі як підсилювачі, операційні підсилювачі тощо, для розділення сигналів. Це може призвести до більш точного розділення частот та більш точної корекції звуку, але їх конструкція може бути більш складною та вимагати більше елементів.

Пасивні фільтри, навпаки, використовують резистори, конденсатори, індуктивності та інші пасивні компоненти для фільтрації сигналів. Вони можуть мати меншу точність у порівнянні з активними фільтрами, але зазвичай їх конструкція є менш складною, дешевшою та менш вимогливою до додаткового живлення.

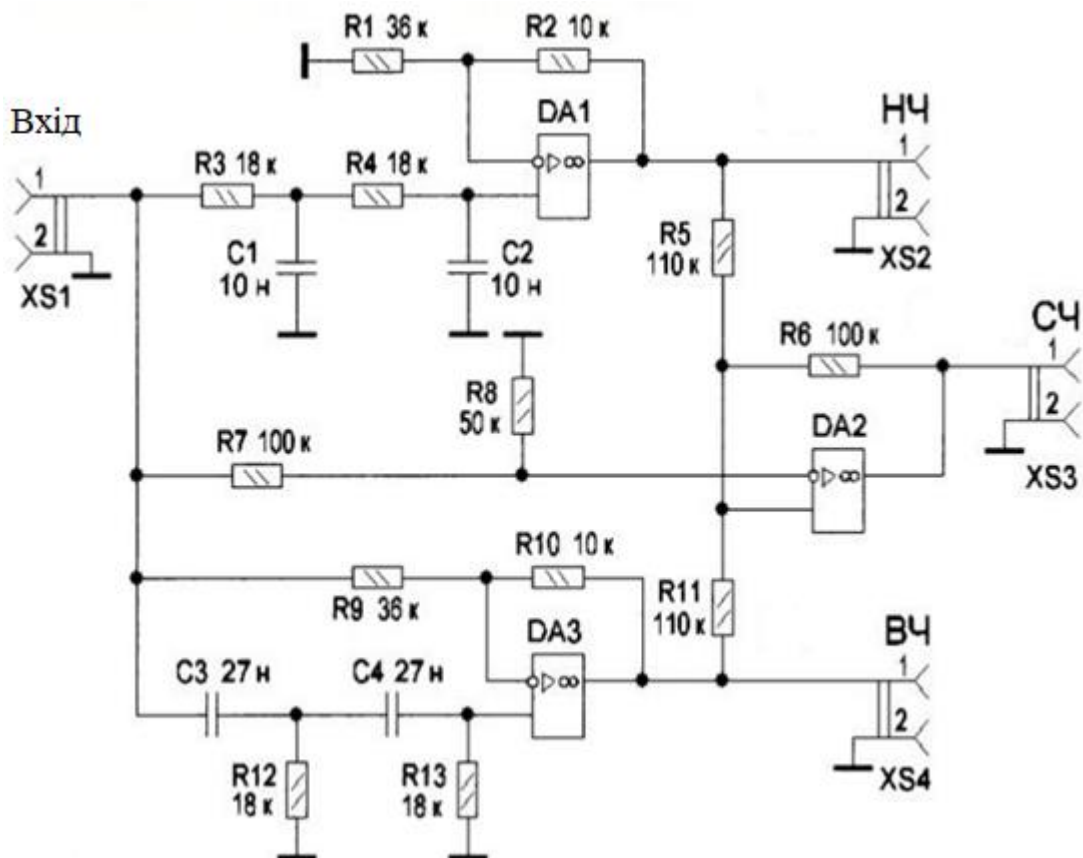


Рисунок 3.6 - Схема кросовера з фільтрами другого порядку

Тому у подальших дослідженнях буде використовуватись пасивний фільтр через їх простоту та відносну ефективність. Це дозволяє спростити експерименти та дослідження з розділення частот та інших параметрів без додаткового навантаження на аналіз складних активних фільтрів.

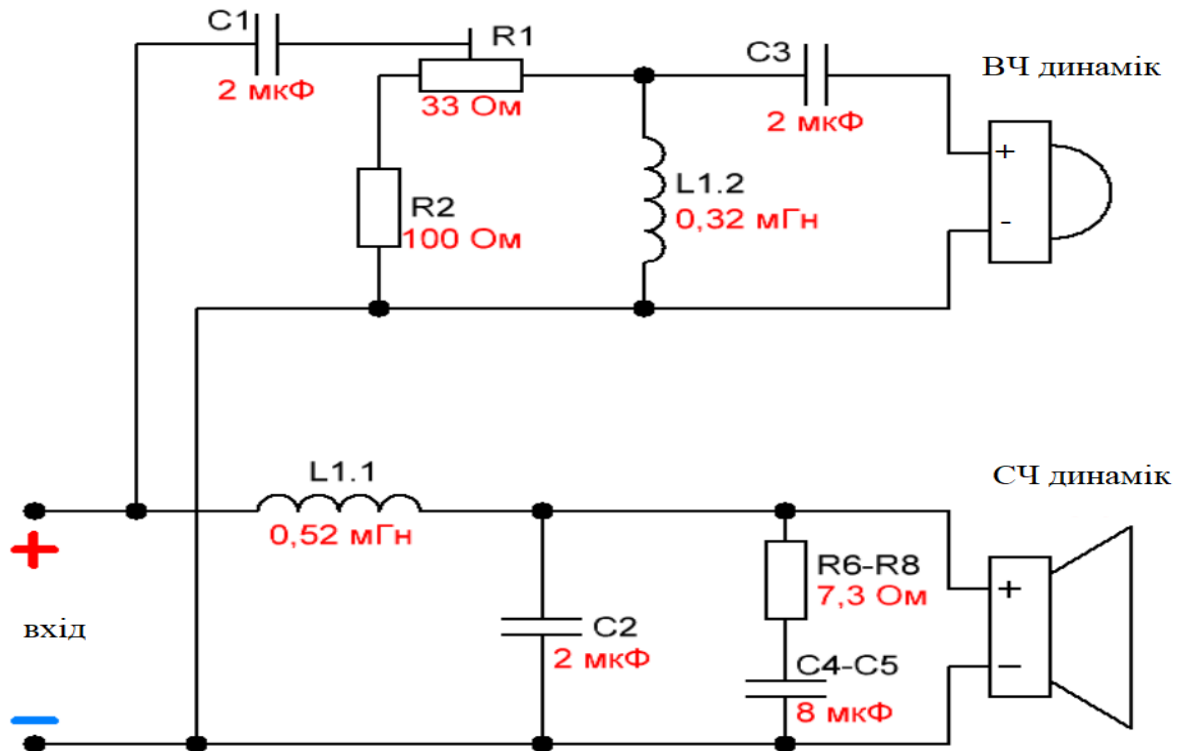


Рисунок 3.7 – Зображення схеми акустичного фільтра S-30

Щодо вибору порядку фільтра відомо, що фільтр першого порядку найбільш простий у конструкції й налагодженні. Його налагодження складається лише з варіації значення одного конденсатора та індуктивності однієї котушки. Фільтри першого порядку не мають коливальності, тому при перехідних процесах не виникає суттєвих спотворень сигналу.

Негативним наслідком цього є широка зона сумісної дії динаміків, що може призвести до провалів чи викидів у АЧХ з-за різних частотних і фазових характеристик динаміків й зіпсувати загальне сприйняття звукової сцени.

Наведемо приклад найбільш поширеного пасивного кросовера. Для 2-х смугової акустичної системи S-30 схему зображено на рисунку 3.7.

Розглянутий кросовер має 2 смуги. Високочастотний фільтр реалізований на компонентах C1, L1.2, C3, R2 . При наведених на схемі параметрах, частота розділу фільтру – 5000 Гц. Резистор R1 впливає на добротність характеристики фільтру, та виключає небажаний підйом АЧХ у зоні верхніх частот. Середньочастотний фільтр, реалізований на C2, L1.1, та C4-C5 – це смуговий фільтр з частотами зрізу 5000 Гц. Номінальна потужність даного типу 10Вт.[20]

3.4 Дослідження та імітація режимів роботи кросовера у програмі Multisim

Multisim – це зручне середовище для моделювання різного типу схем та аналізу їх роботи. Ця програма має велику кількість елементів та приборів для дослідження. В даному розділі проведено моделювання схеми кросовера. Для початку моделювання проводиться складання схеми акустичного фільтру в Multisim. З'єднуються всі елементи згідно схеми. На вхід підключається джерело сигналу, на виході кожного каналу даний сигнал вимірюється осцилографом. Схема не потребує додаткового живлення так як вона створена на пасивних елементах. Зібрана схема з усіма підключеними до неї джерела сигналу та пристроями його виміру зображено на рис. 3.8. [21]

Провівши моделювання схеми в програмі Multisim перейдемо до її аналізу. Потрібно отримати амплітудо частотну характеристику даного фільтру. Фільтри даного типу характеризуються тим, що мають максимально плоску амплітудно-частотну характеристику на початку координат, тому слід перевірити як даний фільтр веде себе на всіх можливих робочих частотах. В аудіотехніці рівномірність АЧХ у діапазоні відтворення є одним з важливих критеріїв якості апаратури. Зазвичай частоти відтворення знаходяться в діапазоні 20 – 20000 Гц. Для цього підключаємо на кожен канал кросовера осцилограф. На вхід схеми ставимо генератор сигналу (див. рис. 3.4.1). Дослідження проведено згідно

ДСТУ 12090-80, з нього ж були взяті опорні частоти знаходяться в діапазоні 20 – 20000 Гц для аналізу звукового фільтра, що представлено в табл. 3.1.

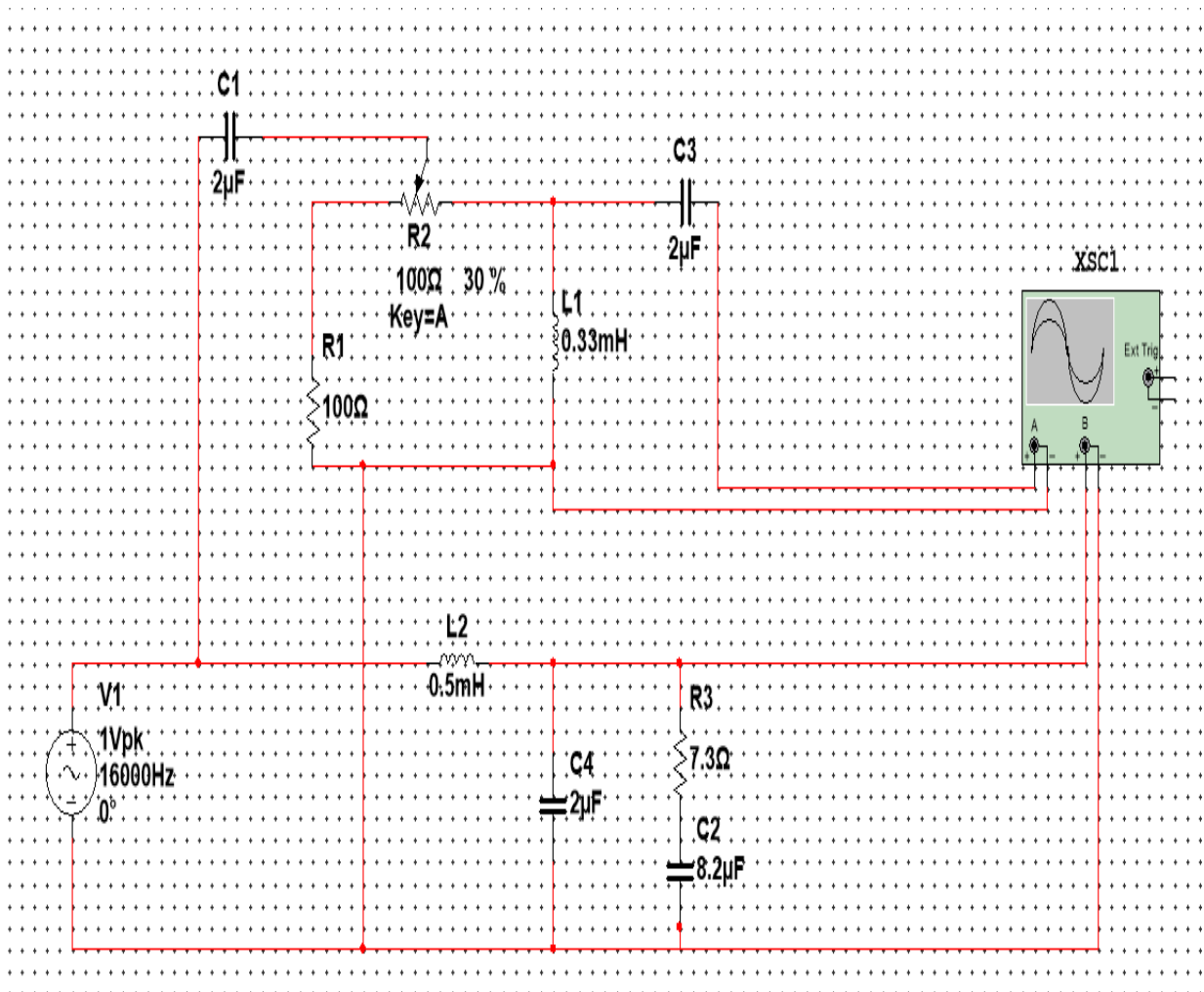


Рисунок 3.8 – Зображення побудованої схеми в програмі Multisim

Після дослідження фільтра отримано результати амплітуди звукового сигналу на виході (див. табл. 3.4.1). Кожен канал має свої частоти на яких він видає максимальну свою потужність, це в середньому біля 2 В. На частотах розділу відбувається зменшення амплітуди на одному каналі та її поступове збільшення на іншому каналі, що свідчить про правильну роботу кросовера. Для СЧ і ВЧ каналів розділ частот, як і зазначалося раніше, відбувається на межі в 5000 Гц. [22]

Таблиця 3.1 – Результат аналізу фільтра в заданому діапазоні частот.

Частота, Гц	СЧ канал	ВЧ канал
20	0,0002	0,0001
22,4	0,0005	0,0001
25	0,0006	0,0001
28	0,001	0,0001
31,5	0,0012	0,0001
35,5	0,0021	0,0001
40	0,003	0,0001
45	0,005	0,0001
50	0,008	0,00011
56	0,012	0,00011
63	0,02	0,00013
71	0,03	0,00015
80	0,05	0,0002
90	0,08	0,00021
100	0,11	0,00021
112	0,195	0,00024
125	0,26	0,00025
140	0,4	0,00025
160	0,5	0,00025
180	0,8	0,00028
200	1	0,0004
224	1,1	0,00058
250	1,25	0,0006
280	1,5	0,00076
315	1,9	0,0008
355	1,95	0,0011
400	2	0,00115
450	2	0,0015
500	2	0,00195
560	2	0,0036
630	2	0,004
710	2	0,0075
800	2	0,01
900	2	0,015

Продовження таблиці 3.1

Частота, Гц	СЧ канал	ВЧ канал
1000	2	0,0225
1120	2	0,04
1250	2	0,06
1400	2	0,09
1600	1,95	0,15
1800	1,9	0,25
2000	1,8	0,35
2240	1,5	0,45
2500	1,5	0,6
2800	1,1	0,84
3150	1	1,05
3550	0,75	1,2
4000	0,44	1,8
4500	0,36	1,8
5000	0,3	1,9
5600	0,16	2
6300	0,1	2
7100	0,05	2
8000	0,04	2
9000	0,03	2
10000	0,02	2
11200	0,01	2
12500	0,0075	2
14000	0,005	2
16000	0,003	2
20000	0,001	2

Згідно отриманих даних побудовано графіки відтворення звукових хвиль на різних каналах, а саме ВЧ і СЧ, що зображено на рисунках 3.9 та 3.10. По даних графіках можна отримати характеристику роботи даного фільтра. Дивлячись на типову характеристику, що зображена в попередньому підрозділі на рисунку 3.4, притаманну для кросоверів можна побачити те що отримана характеристика є досить схожою, тільки на отриманій немає середньочастотного каналу. Таким чином результат роботи даного фільтра є хорошим, тому що має

характеристику середньочастотного каналу та високочастотного близьку до типової АЧХ. Загальну амплітудно частотну характеристику зображено на рисунку 3.11.

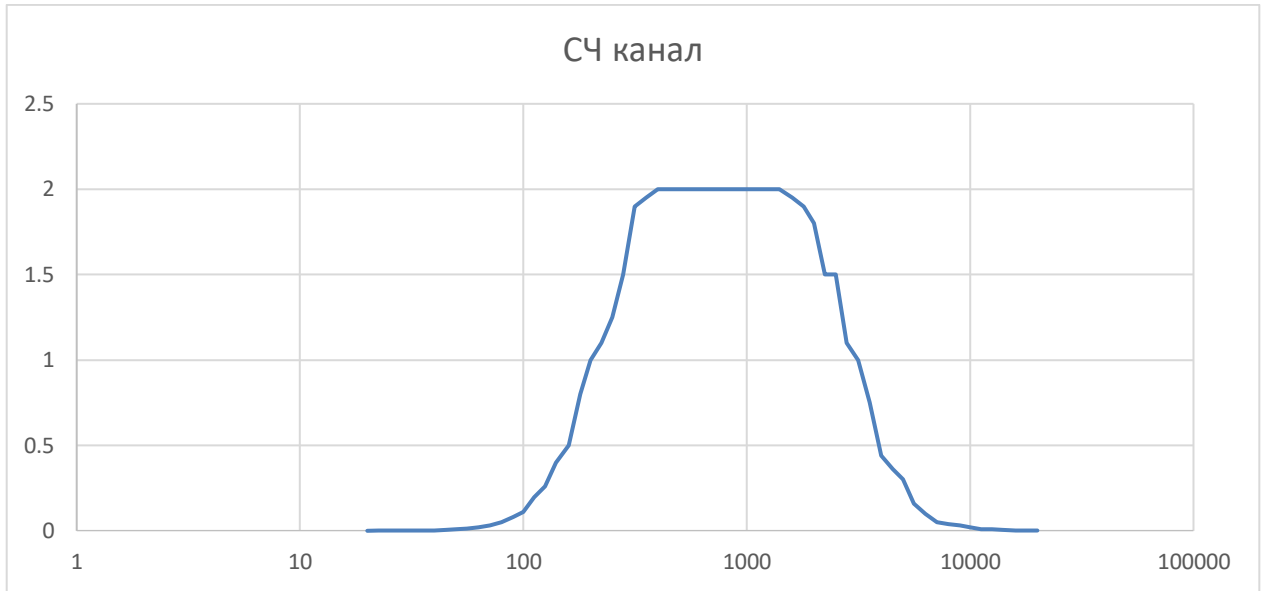


Рисунок 3.9 – Зображення АЧХ СЧ каналу фільтра

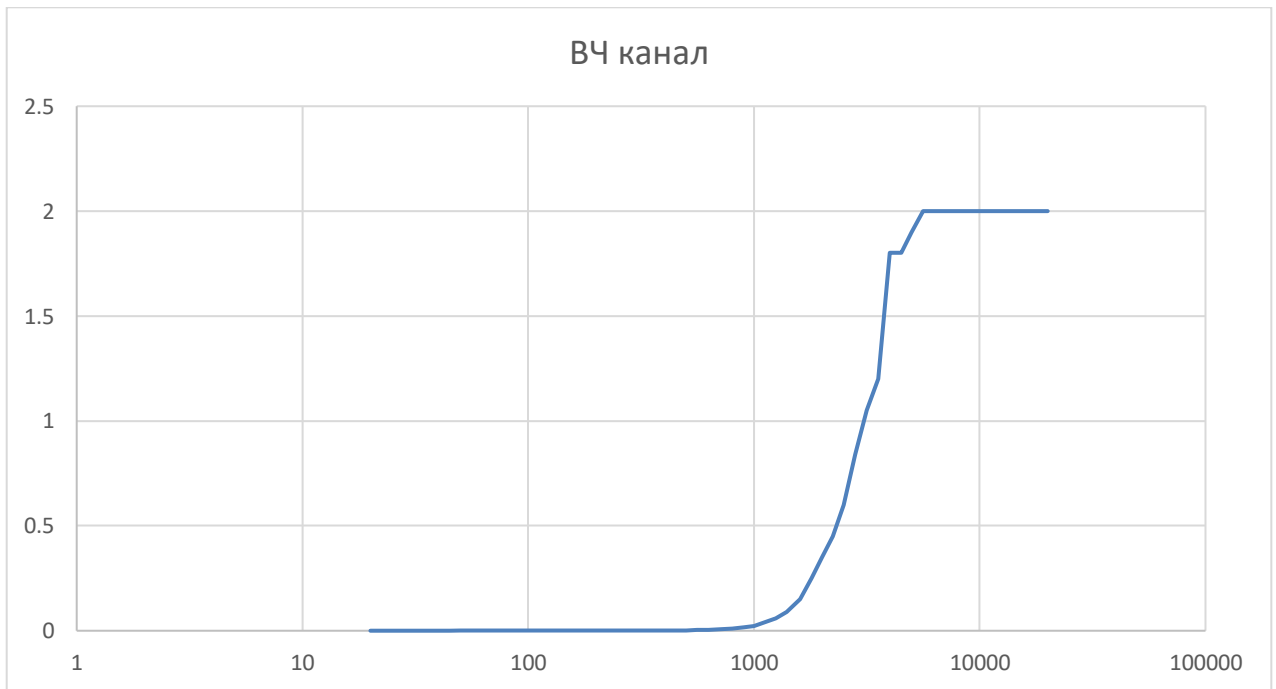


Рисунок 3.10 – Зображення АЧХ ВЧ каналу фільтра

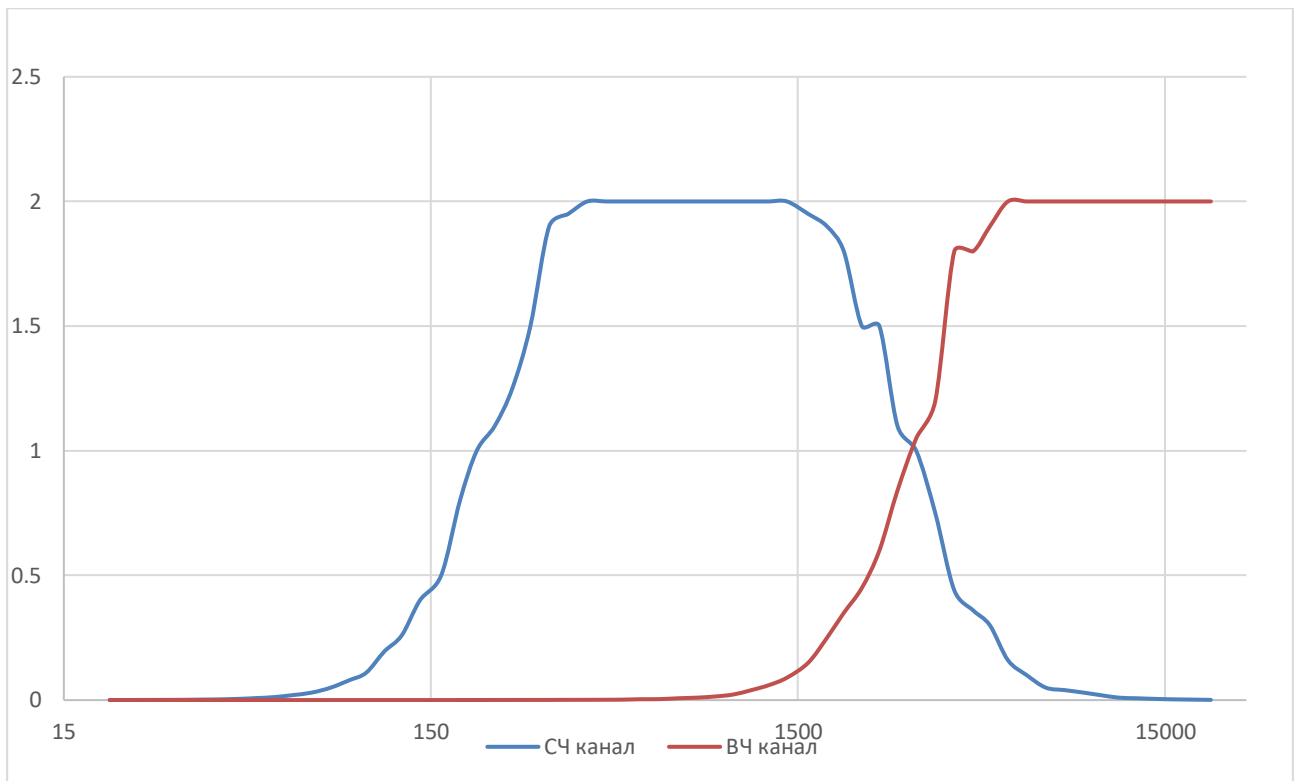


Рисунок 3.11 – Загальна АЧХ кросовера з зображенням СЧ та ВЧ каналів

3.5. Методи отримання спільної амплітудно частотної характеристики для акустичної системи.

Результатом виконаної роботи є те що ми отримали дані роботи динаміка та фільтра окремо один від одного. Фільтр має гарні параметри, він максимально відділяє середні частоти і високі, також формує рівнолінійну загальну характеристику для обох каналів. Метою роботи є отримання спільної амплітудно частотної характеристики акустичної системи, тобто в зв'язці динамік плюс фільтр. [22]

Існує кілька методів отримання спільної амплітудно-частотної характеристики акустичної системи, які дозволяють об'єднати вплив різних компонентів системи, таких як динаміки і фільтри для отримання загальної характеристики системи відгуку на різні частоти. Розглянемо декілька з них:

1. Метод множення амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) використовується для об'єднання характеристик різних елементів акустичної системи, наприклад, динаміків та фільтрів, для отримання загальної АЧХ цієї системи.

Цей метод базується на теорії передавальних функцій, що визначає, як система реагує на вхідний сигнал при різних частотах. Якщо ви маєте передавальні функції (або АЧХ) кожного окремого елемента системи, загальна АЧХ системи може бути отримана шляхом їх множення.

Наприклад, якщо ви маєте передавальні функції двох елементів системи (скажімо, динаміка і фільтра), позначимо їх передавальні функції як $H_1(f)$ для динаміка і $H_2(f)$ для фільтра, де f - частота. (див. форм. 3.3)

Загальна передавальна функція (і відповідно, загальна АЧХ) системи буде отримана як добуток передавальних функцій окремих елементів:

$$H_{\text{заг}}(f) = H_1(f) \times H_2(f) \quad (3.3)$$

Отже, для кожної конкретної частоти f , ви множите значення АЧХ динаміка на значення АЧХ фільтра, щоб отримати значення загальної АЧХ системи на цій частоті.

Цей метод може бути використаний для об'єднання впливу різних елементів системи на загальну амплітудно-частотну характеристику. Однак варто зазначити, що в деяких випадках цей метод може призвести до складних обчислень, особливо якщо АЧХ елементів системи змінюється від частоти чи має складні функції форми. [22]

2. Експериментальне вимірювання та об'єднання даних: Вимірювання амплітудно-частотних характеристик окремих компонентів системи за допомогою аналізаторів спектра, мікрофонів або спеціалізованої апаратури, після чого дані збираються та комбінуються для отримання загальної АЧХ.

Після того, як були проведені вимірювання амплітудно-частотних характеристик окремих компонентів системи за допомогою аналізаторів спектра,

мікрофонів або спеціалізованої вимірювальної апаратури, отримані дані можна об'єднати для отримання загальної АЧХ.

Далі можуть виконуватися такі кроки:

1. Збір і запис даних: Під час вимірювань можуть бути отримані дані про амплітуди звуку при різних частотах для кожного елемента системи. Ці дані вимірюються та записуються для кожного компонента системи.

2. Обробка та аналіз даних: Отримані дані підлягають обробці для видалення шумів, усереднення декількох вимірювань, корекції можливих артефактів або виправлення помилок. Далі може проводитися аналіз результатів для виявлення особливостей в АЧХ кожного елемента системи.

3. Комбінування даних для отримання загальної АЧХ: Після отримання та обробки даних для кожного компонента системи, ці дані можуть бути об'єднані для отримання загальної АЧХ. Це може включати сумування або множення значень АЧХ кожного компонента для отримання загального відгуку системи на різних частотах.

4. Перевірка та корекція: Отримана загальна АЧХ може бути перевірена на наявність аномалій, недоліків чи потребу в корекції. Це може включати перевірку на рівність фази, визначення частотних рівнів або виявлення можливих проблем у відгуку системи.

Цей процес вимірювання, обробки та об'єднання даних дозволяє отримати детальну амплітудно-частотну характеристику акустичної системи на основі вимірів окремих компонентів та їх подальшого об'єднання для отримання уявлення про загальну відповідь системи на різні частоти.

3. Математичне моделювання та симуляція - це метод використання комп'ютерних програм або спеціального програмного забезпечення для створення математичних моделей акустичних систем. Ці моделі відображають поведінку системи на різних частотах, амплітудах та фазах, дозволяючи аналізувати та передбачати їхню реакцію на різні звукові сигнали.[23]

Основні етапи методу включають:

1. Створення математичної моделі системи: Визначення математичних рівнянь та параметрів, які описують поведінку кожного елемента акустичної системи (наприклад, динаміка, фільтра тощо). Це може включати параметри, такі як частотна відповідь, фазовий зсув, амплітуда та інші характеристики.

2. Реалізація моделі у програмному забезпеченні: Використання спеціалізованих програмних засобів, таких як MATLAB, Simulink (приклад моделювання в Simulink наведено на рисунку 3.12) або інші програми для моделювання акустичних систем. Математичні рівняння, що описують кожен компонент системи, введені в програму для створення повної моделі.

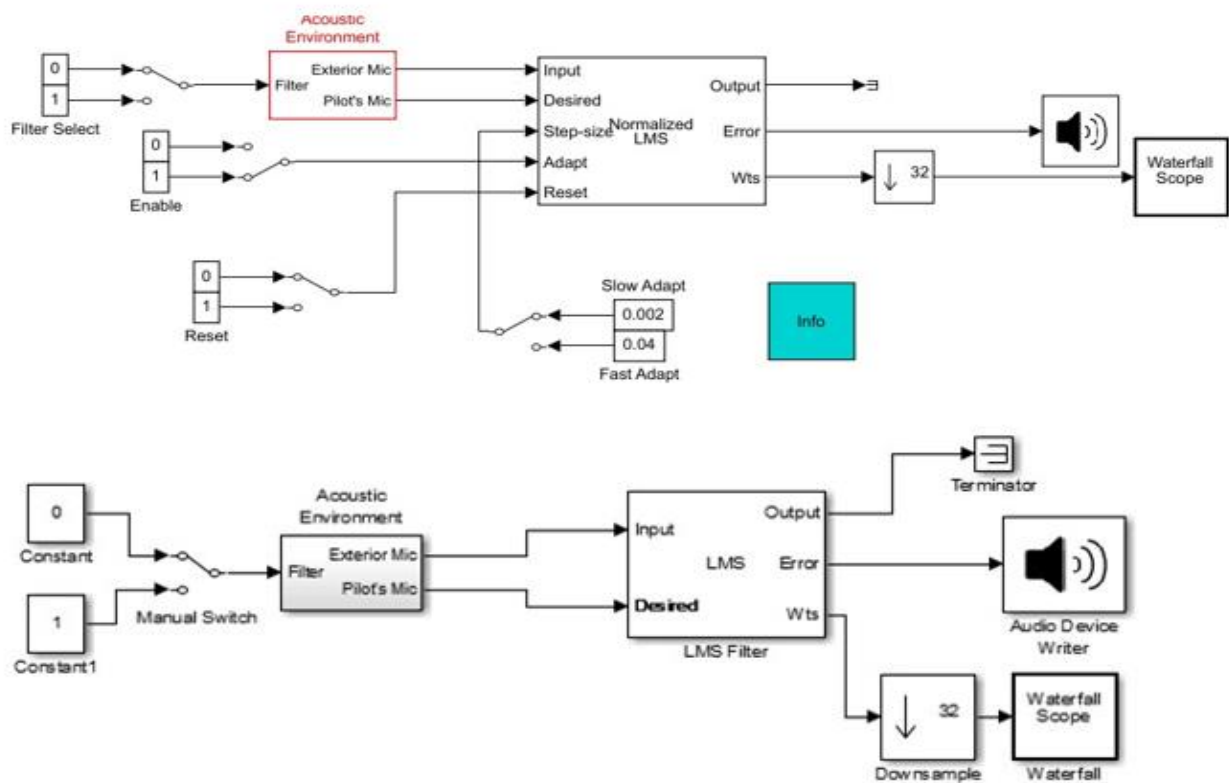


Рисунок 3.12 – Зображення моделювання в програмі Simulink

3. Симуляція та аналіз результатів: Запуск симуляцій та отримання відповідей моделі на різні звукові сигнали або вхідні стимули. Аналіз отриманих результатів для отримання відомостей про АЧХ, реакцію системи на різні частоти та визначення особливостей її роботи.

4. Корекція та оптимізація моделі: В процесі аналізу можуть виявлятися неточності чи неузгодженості з реальною системою. Оптимізація параметрів моделі для покращення узгодженості з експериментальними даними або реальною реакцією системи.

Математичне моделювання та симуляція дозволяють вивчати та передбачати характеристики акустичних систем без прямих фізичних вимірювань. Це важливий метод для розробки та налагодження акустичних систем, оскільки він дозволяє економити час та ресурси на експерименти та тестування.[24]

4. Фізичні експерименти в контрольованому середовищі є методом дослідження амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) акустичних систем через прямі вимірювання та спостереження їхньої реакції на різні звукові сигнали в спеціально підготовлених умовах. Такі умови можна побачити на рисунку 3.13 де видно як саме проводяться вимірювання, також можна побачити що дана кімната є досить підготовленою по тому, що є поглиначі звуку на стінах аби зменшити відбивання звукових хвиль від стін, що прямо впливає на точність вимірювання.

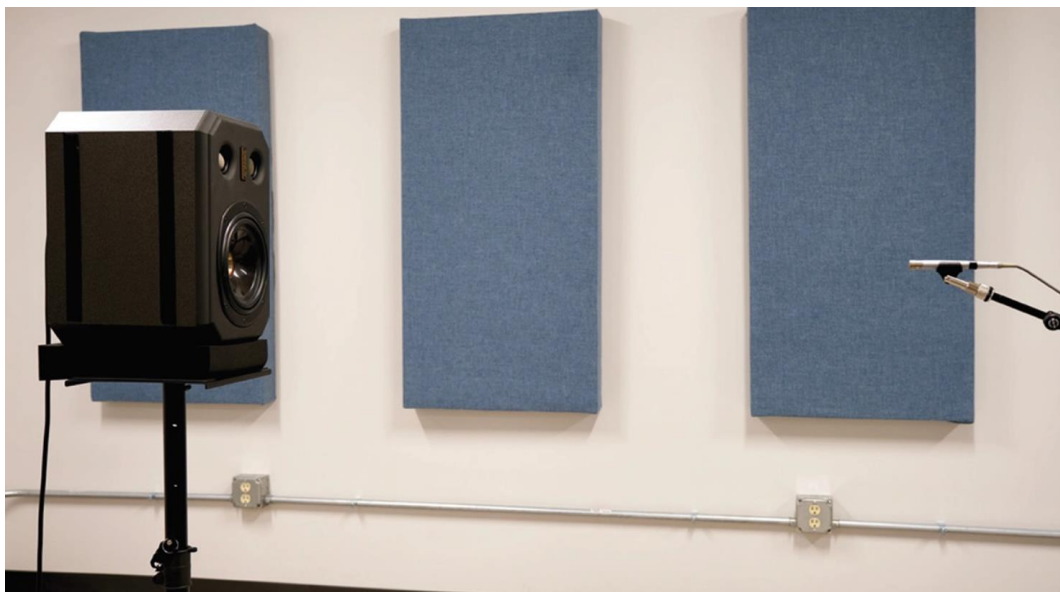


Рисунок 3.13 – Зображення акустичної кімнати

Основні кроки методу включають:

1. Підготовка експериментального середовища: Створення умов, де можна контролювати вхідні сигнали, шум, відбиття звуку та інші фактори, які можуть впливати на результати експерименту. Це може включати використання анекоїчних кімнат, акустичних лабораторій або спеціально обладнаних приміщень для забезпечення контрольованого середовища.

2. Вимірювання відгуку системи: Застосування звукових сигналів до акустичної системи та вимірювання її реакції за допомогою мікрофонів, аналізаторів спектра та інших вимірювальних приладів. Вимірюються амплітуди звуку та інші параметри відгуку системи на різних частотах.

3. Обробка та аналіз результатів: Отримані дані використовуються для створення графіків, діаграм, АЧХ та інших візуалізацій, що дозволяють аналізувати реакцію системи на звук на різних частотах.

4. Корекція та вдосконалення системи: Якщо під час експериментів виявлені аномалії або проблеми з реакцією системи на певні частоти, можливі корекції або оптимізація параметрів для поліпшення роботи системи.

Фізичні експерименти в контрольованому середовищі надають можливість безпосередньо спостерігати та вимірювати реальну реакцію акустичних систем на звук, що дає важливу інформацію для їхнього налаштування та вдосконалення. Цей метод є важливим, оскільки дозволяє отримати безпосередні дані про відгук системи у контрольованих умовах, що може бути важливим для покращення якості та ефективності акустичних систем.[25]

3.6 Утворення загальної амплітудо частотної характеристики акустичної системи

Акустична система – це пристрій або система пристроїв для відтворення звуку. Вона зазвичай складається з акустичного оформлення і вмонтованих у нього випромінюючих голівок та фільтра. Для її хорошого звучання потрібно

щоб певне сполучення кросовера та динаміків давало результат у вигляді амплітудної характеристики яка матиме мінімальні відхилення вниз чи вгору.

Загалом є три основних методи отримання загальної АЧХ акустичної системи, це може бути методи перемноження уже існуючих характеристик динаміків та фільтра, метод математичного моделювання та фізичні експерименти при створенні спеціальних умов та використанні спеціальної апаратури. В попередніх розділах було проведено дослідження якості звучання динаміків та акустичного фільтра, тому маємо їх параметри у вигляді таблиць та графіків. Таким чином доцільніше буде скористатися методом перемноження АЧХ акустичного фільтра та динаміка. Такий метод є простим і не вимагає спеціального обладнання чи програмного забезпечення. Тому перевага саме за цим методом.

Для зручності обчислень скористаємося програмою Microsoft Excel. програмний продукт, який використовується для створення електронних таблиць, обробки даних, аналізу, виконання різних обчислень та візуалізації інформації у вигляді графіків, діаграм та звітів.

Excel надає користувачам можливість організації даних у вигляді рядків та стовпців у табличній формі. Він має ряд потужних функцій, таких як математичні операції, функції фільтрації, сортування, підсумкові таблиці, робота з формулами та макросами, що дозволяють автоматизувати рутинні завдання та обробку великих обсягів даних.

Це програмне забезпечення використовується у багатьох сферах, включаючи бізнес, науку, освіту, фінанси та інші галузі, де обробка даних та робота з електронними таблицями є важливою частиною робочого процесу. Excel дозволяє користувачам ефективно працювати з інформацією та виконувати різноманітні завдання, пов'язані з обробкою та аналізом даних.[26]

Для побудови загальної картини звучання у вигляді амплітудо частотної характеристики потрібно мати спільні значення характеристик динаміків та акустичного фільтра. Для отримання цих даних скористаємося тими значеннями, що були отримані у ході попередніх досліджень характеристик акустичних

компонентів та методом перемноження частотних характеристик. Значення АЧХ динаміків та фільтра були отримані різними методами, тому і їхні значення мають різну величину виміру. Таким чином приведемо всі значення до однієї одиниці виміру Вольт і проведемо перемноження цих величин щоб отримати спільне значення АЧХ динаміка та фільтра, відповідно до каналу звучання. Отримані значення занесено до таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Значення АЧХ динаміка та фільтра, пронормовані дані до 1

Частота, Гц	СЧ канал + динамік	ВЧ канал + динамік	Норм СЧ	Норм ВЧ
200	2,8	0,00112	0,499949995	0,000150008
224	3,08	0,001624	0,549954995	0,000240012
250	3,5	0,00168	0,624962496	0,000250013
280	4,2	0,002128	0,749974997	0,000330017
315	5,32	0,00224	0,949994999	0,000350018
355	5,46	0,00308	0,9749975	0,000500025
400	5,6	0,00322	1	0,000525026
450	5,6	0,0042	1	0,000700035
500	5,6	0,00546	1	0,000925046
560	5,6	0,01008	1	0,001750088
630	5,6	0,0112	1	0,001950098
710	5,6	0,021	1	0,003700185
800	5,6	0,028	1	0,004950248
900	5,6	0,042	1	0,007450373
1000	5,6	0,063	1	0,01120056
1120	5,6	0,112	1	0,019950998
1250	5,6	0,168	1	0,029951498
1400	5,6	0,252	1	0,044952248
1600	5,46	0,42	0,9749975	0,074953748
1800	5,32	0,7	0,949994999	0,124956248
2000	5,04	0,98	0,899989999	0,174958748
2240	4,2	1,26	0,749974997	0,224961248
2500	4,2	1,68	0,749974997	0,299964998

Продовження таблиці 3.2

Частота, Гц	СЧ канал + динамік	ВЧ канал + динамік	Норм СЧ	Норм ВЧ
2800	3,08	2,352	0,549954995	0,419970999
3150	2,8	2,94	0,499949995	0,524976249
3550	2,1	3,36	0,374937494	0,599979999
4000	1,232	5,04	0,219921992	0,899995
4500	1,008	5,04	0,179917992	0,899995
5000	0,84	5,32	0,149914991	0,9499975
5600	0,448	5,6	0,079907991	1
6300	0,28	5,6	0,04990499	1
7100	0,14	5,6	0,02490249	1
8000	0,112	5,6	0,01990199	1
9000	0,084	5,6	0,01490149	1
10000	0,056	5,6	0,00990099	1
11200	0,028	5,6	0,00490049	1
12500	0,021	5,6	0,003650365	1
14000	0,014	5,6	0,00240024	1
16000	0,0084	5,6	0,00140014	1

Вимірювання характеристики фільтра проводилося згідно стандартів на всій полосі частот, фільтр який було обрано має два канали звучання, середньо та високо частотний, низькочастотну частину він не має в своїй схемі, тому значення амплітуди на низьких частотах можна відкинути бо вони близькі до нуля. Оберемо 200Гц як початкову частоту, така частота взята і для середньо частотного динаміка. Провівши перемноження амплітуд динаміка та фільтра маємо мінімальний та максимальний результат амплітуди від близької до 0 і до 5,6 В. Для отримання коректного результату у вигляді графіка АЧХ проведемо нормування даних до 1. Нормовані дані можна побачити в таблиці 3.2. В такому випадку максимальна амплітуда буде дорівнювати 1В.[27]

Побудуємо графік АЧХ згідно нормованих даних з таблиці 3.2. Зображення графіка на рисунку 3.14. Графіки амплітудно частотної характеристики схожі на графік, що було отримано від акустичного фільтра

окремо, таким чином можна зробити висновок, що даний фільтр добре працює в парі з обраними динаміками середніх та високих частот, відбувається правильний поділ за частотами відтворення з чіткою межею де середина біля 2500 Гц. Такий перехід є плавним з затуханням середньочастотного відтворення та починаючи високими частотами. Загалом як показали дослідження цей перехід відбувається поступово починаючи від 1600 Гц та закінчуючи біля 5000 Гц.

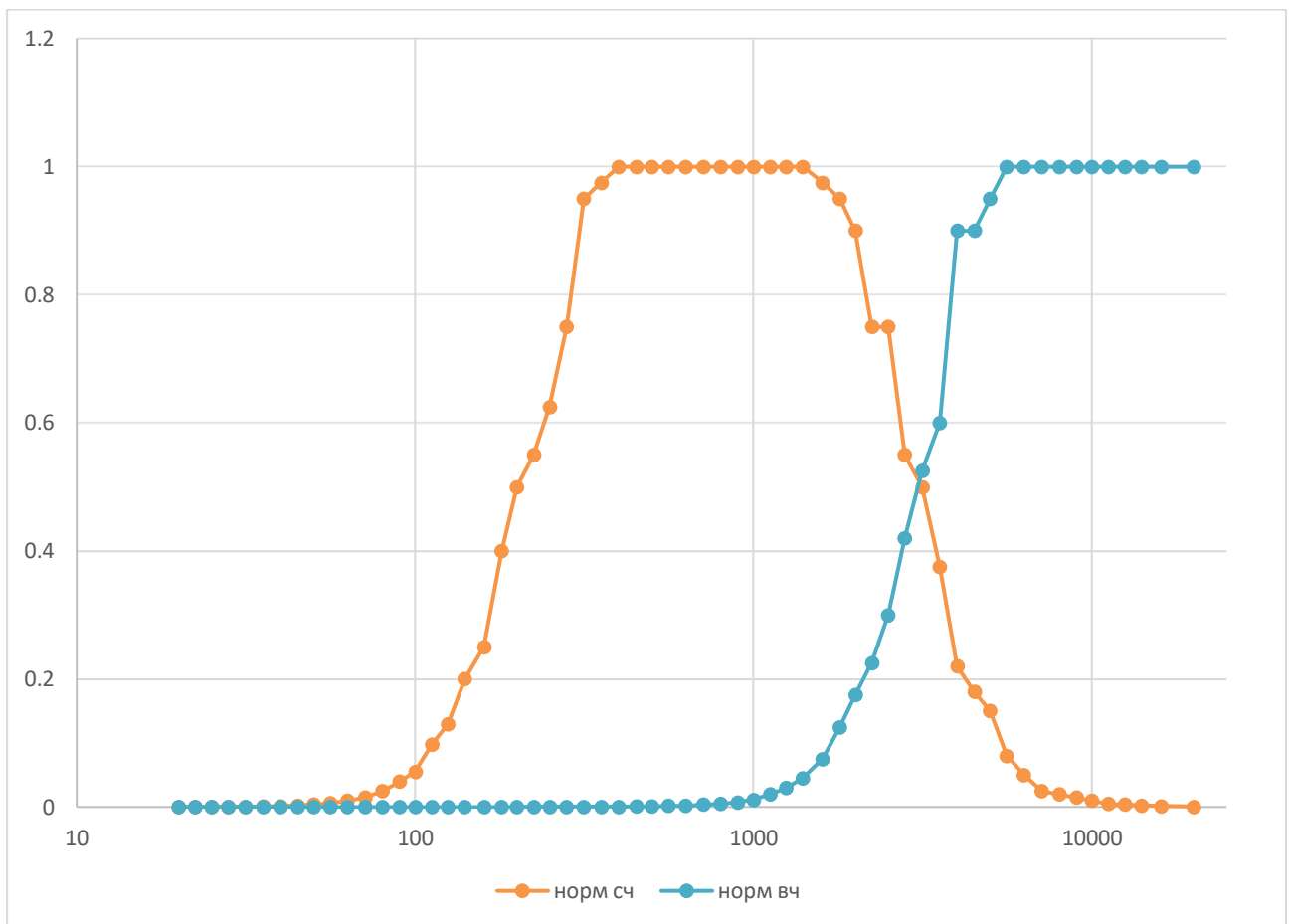


Рисунок 3.14 – Зображення графіків АЧХ СЧ і ВЧ каналів

Зображення зони поєднання ВЧ та СЧ каналів можна також побачити на двохканальному осцилографі в програмі Multisim, що показано на рисунку 3.15. На частоті в 3150 Гц коли амплітуди близькі дона до одної видно чітко цей

перхід, але його амплітуда дость невелика тому цю ступеньку на загальному графіку АЧХ майже не буде видно.

Для отримання загальної амплітудо частотної характеристики звучання середньочастотного та високочастотної ланок проведемо сумування амплітуд різних каналів і отримаємо криву що відображає загальну звукову картину отриманої акустичної системи в парі з фільтром та динаміками. Зображення загальної АЧХ можна побачити на рисунку 3.16.

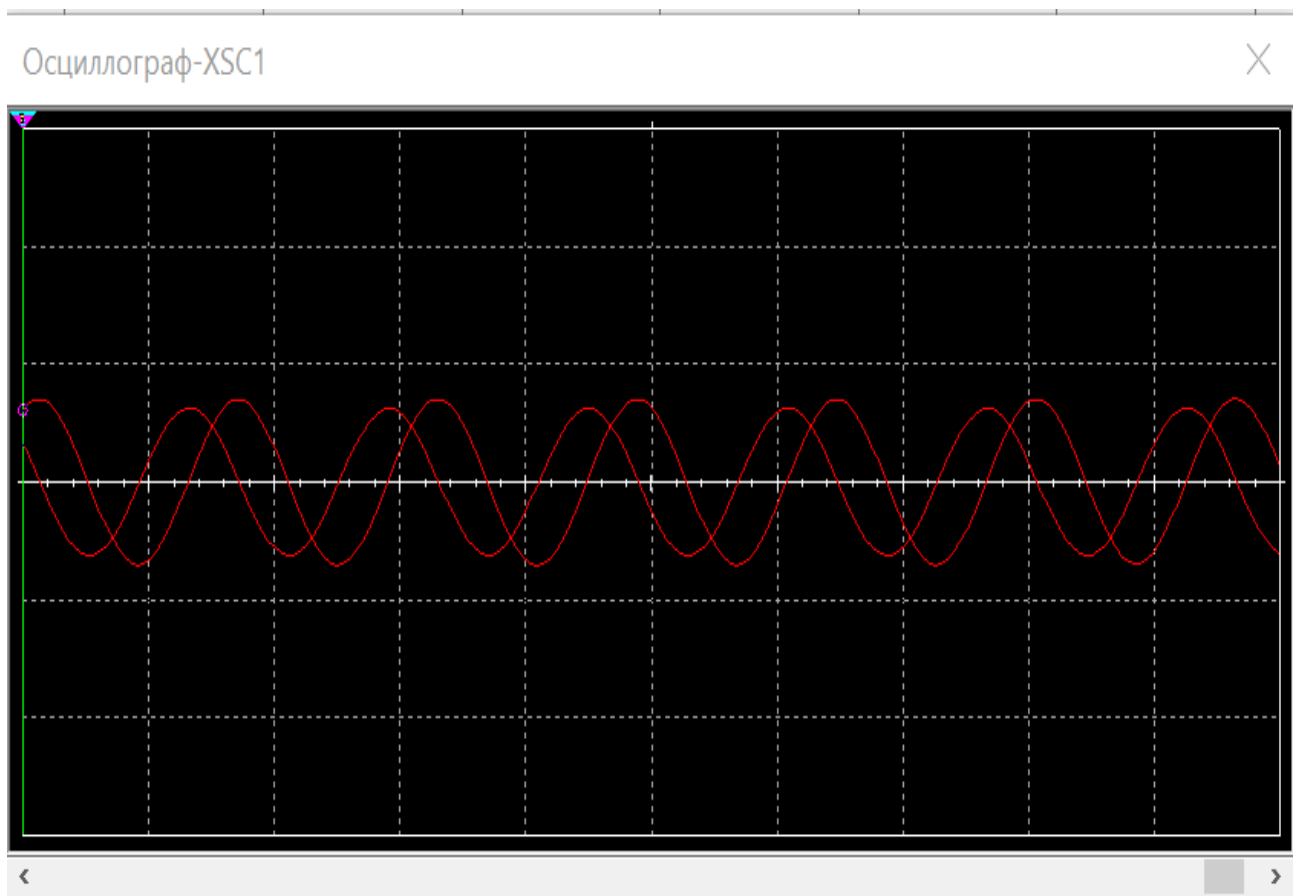


Рисунок 3.15 – Зображення осцилограми в межі розділу СЧ та ВЧ каналів

На зображенні видно, що АЧХ має прямолінійний характер. На частоті 2500 Гц видно середину поєднання СЧ та ВЧ каналів, але відхилення є досить незначні, що на звучання акустичної системи не вплине, такий перехід

«неозброєними вухами» не можливо почути, тому можна сказати, що отримано прямолінійну АЧХ, що є результатом хорошої акустичної системи. [27]

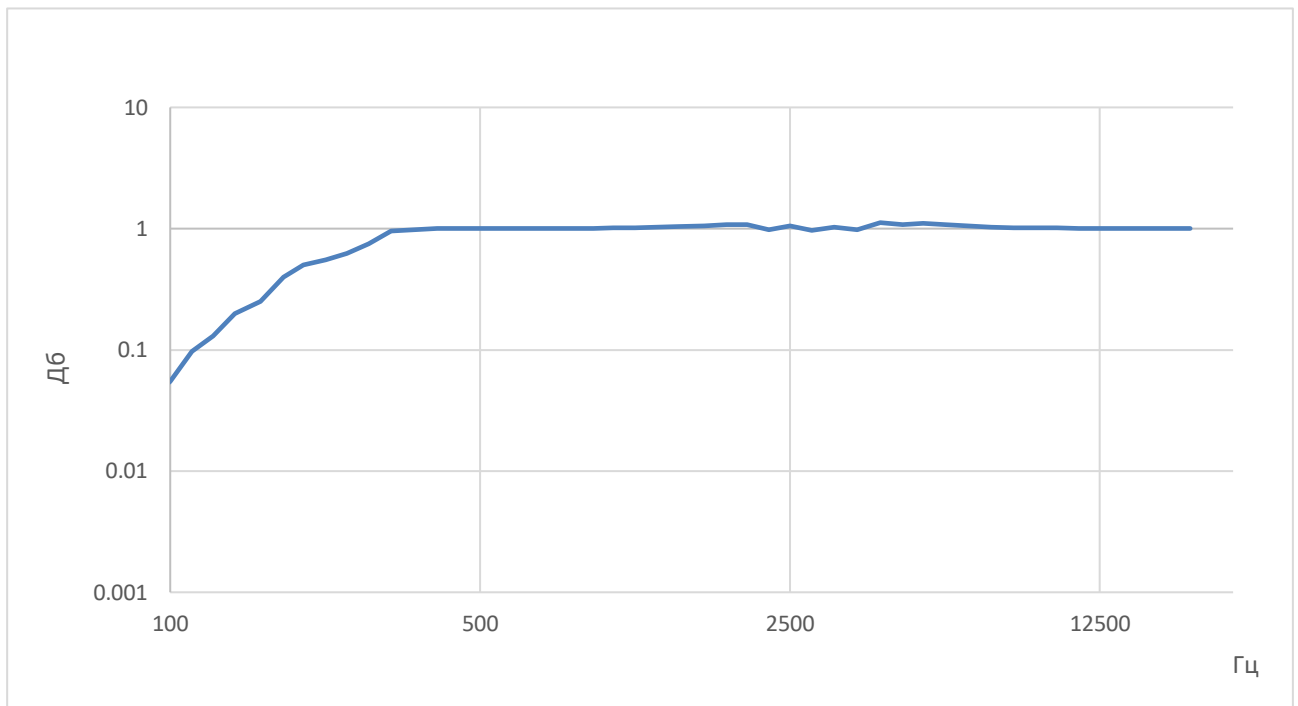


Рисунок 3.16 – Зображення загальної АЧХ в парі фільтра та динаміків

В ході дослідження була проведена оцінка характеристик акустичного фільтра у парі з середньочастотним та високочастотним динаміками. На підставі вимірювань було побудовано графіки амплітудно-частотних характеристик, які показали правильний поділ за частотами відтворення з чіткою межею навколо 2500 Гц. Загальна амплітудно-частотна характеристика вказує на прямолінійний характер, з мінімальними відхиленнями на важливих частотах. Це свідчить про високу якість акустичної системи та її здатність точно передавати звук у відповідності з заданими характеристиками.

3.7 Висновки до розділу

Аналізуючи отримані результати, виявлено, що характеристика досліджуваного фільтра відображає схожість з типовою характеристикою, що

зазвичай є притаманною для кросоверів. Це свідчить про те, що фільтр має високу якість відтворення звуку, що робить його доцільним у створенні якісної акустичної системи, особливо у сполученні з відповідними гучномовцями.

Метод накладання амплітудно-частотних характеристик динаміків та фільтра методом перемноження продемонстрував високу ефективність, утворивши прямолінійну сумарну амплітудно-частотну характеристику з мінімальними спотвореннями.

Графіки амплітудно-частотних характеристик, отримані на основі вимірювань, показали правильний поділ за частотами відтворення з чіткою межею навколо 2500 Гц. Загальна амплітудно-частотна характеристика свідчить про прямолінійний характер з мінімальними відхиленнями на важливих частотах. Це свідчить про високу якість акустичної системи та її здатність точно передавати звук з відповідними заданими характеристиками.

Такий результат має велике значення для створення акустичних систем високої якості звучання. Характеристика, що подібна до типової для кросоверів, свідчить про високу ефективність фільтрації звуку. Це означає, що фільтр спроможний точно розділяти частоти для різних динаміків, забезпечуючи оптимальне відтворення звуку на відповідних діапазонах.

Ефективність методу накладання амплітудно-частотних характеристик та висока точність у формуванні прямолінійної амплітудно-частотної характеристики є ключовими факторами для досягнення високої якості звучання. Це дозволяє створювати акустичні системи, які передають звук точно та відтворюють його з мінімальними спотвореннями.

Отримані характеристики є важливими для інженерів та дизайнерів аудіообладнання, оскільки вони надають інформацію про точність передачі звуку в акустичних системах. Це допомагає вибрати та оптимізувати компоненти для створення аудіообладнання з високою якістю звучання, що відповідає вимогам як аудіофілів, так і професійних аудіоінженерів у сфері студійного та концертного звуку.

4 СТВОРЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ НА ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОПОЛОСНИХ АКУСТИЧНИХ СИСТЕМ

4.1 Постановка задачі проекту

У цьому розділі проведено аналіз впровадження акустичної системи з рівномірною амплітудно частотною характеристикою акустичної системи. Ідея проекту – впровадження акустичної системи з оптимальною прямолінійною амплітудно частотною характеристикою її практичної реалізації.

Таблиця 4.1 – Зміст ідеї і можливі потенційні ринки

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Створення акустичної системи з рівномірною АЧХ	1. Домашнє використання	Застосування такої акустичної системи для повсякденних домашніх цілей.
	2. Професійне використання	Використання системи у більш вузькому професійному спектрі (кінозали, звукові кімнати і тп.).

Оцінка потенційних техніко-економічних переваг у порівнянні з пропозиціями конкурентів включає наступні кроки:

1. Визначення аспектів техніко-економічних властивостей і характеристик;
2. встановлення попереднього кола конкурентів або аналогічних та замінних товарів на ринку, а також збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для власної ідеї та проектів конкурентів;
3. здійснення порівняльного аналізу показників: для власної ідеї визначаються показники, що а) гірші (W, слабкі); б) подібні (N,

нейтральні); в) кращі (S, сильні) у порівнянні з аналогічними таблицями 4.2.

Таблиця 4.2 містить перелік слабких, сильних і нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційної пропозиції, який служить основою для формування її конкурентоздатності.

Таблиця 4.2 – Визначення характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристи ки ідеї	Потенційні товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Запроп онован ий метод	Загальн овживан ий й метод			
1.	Оптимізован а діаграма звучання	Дає змогу	Не дає змогу	–	Акустика, що існує на сьогодення	Рішення є більш ефективни м відносно інших
2.	Практична використову ваність	Дає змогу	Не дає змогу	–	Потребує перевірки на працездатніс ть з встановлени м графіком або періодом проведення тестування.	Можливіст ь використо вувати в будь яких цілях, як і професійн их так і домашніх

4.2 Оцінка технологічності ідеї проекту

Проведено аудит технології, яка може бути використана для втілення концепції проекту. Оцінка технологічної реалізації ідеї проекту включає наступний аналіз компонентів (див. табл. 4.3):

1. Вибір технології для виготовлення продукту відповідно до концепції проекту.
2. Оцінка наявних технологій та необхідності їх розробки або удосконалення.
3. Доступність цих технологій для авторів проекту.

Таблиця 4.4 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Портативність такої системи	Стандартизація до схожих типів таких систем	наявна	доступна
2	Відсутність необхідності перевірки на працездатність	Створення простої конструкції	наявна	доступна

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Оцінка ринкових можливостей, що можна використати при реалізації проекту на ринку, і визначення ринкових загроз, які можуть ускладнити його втілення, дозволяють зорієнтувати розвиток проекту, враховуючи ринкове

середовище, потреби потенційних клієнтів та конкурентні пропозиції. Початково проводиться аналіз попиту: його наявність, обсяг та динаміка ринку (див. табл. 4.4).

Для оцінки привабливості для входження на ринок порівнюється середня норма рентабельності в галузі (або на ринку) з банківським відсотком на вкладення. На основі попередньої оцінки ринок вважається привабливим для потенційного входження.[28]

Таблиця 4.4 - Попередня характеристика потенційного ринку для стартап-проекту.

№ п/п	Показник стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних конкурентів	5
2.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
3.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
4.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ, СТТУ, ТУУ
5.	Середня норма рентабельності в галузі або по ринку, %	88%

Подальше дослідження включає визначення потенційних груп клієнтів, їхніх характеристик і складання приблизного списку вимог до продукту для кожної з цих груп (див. табл. 4.5).

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища. Складаються таблиці факторів, які сприяють впровадженню проекту на ринок, і факторів, які ускладнюють цей процес (див. табл. № 4.6, 4.7). Фактори в таблицях розташовані в порядку зменшення їх важливості.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Аудіосистеми, які забезпечують рівномірне та однакове поширення звуку у приміщенні без явних перешкод або відмітних місць зі значними втратами звучання.	Звичайний користувач якому потрібна хороша якість звучання для власних потреб. Професіонали та аудіо-інженери, люди, які працюють у сфері аудіо- виробництва, звукозапису, аудіо- техніки або у сегменті відео- продакшену, де потрібна висока якість звуку.	особливостей купівлі та експлуатації товару немає	– надійність – мобільність – доступність – простота – зручність – якість

Таблиця 4.6 – Фактор загрози

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Неякісні компоненти для створення кінцевої продукції	Для підтвердження даного факту потрібно провести детальний аналіз	Перевірка продукції та надання гарантії на певний термін.

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Спонукає розробляти та виробляти нові продукти, знижувати витрати на них	Ускладнення структури та функціональної наповненості пропозиції
2.	Попит	Існування стійкого попиту означає, що більшість клієнтів зацікавлені в отриманні якісної акустики	Рекламна діяльність, просування товару в Інтернеті

Надалі проведений аналіз пропозиції: визначені загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Вказати тип конкуренції – олігополія	На ринку присутня невелика кількість підприємств, що займаються розробкою такого типу систем	Підвищувати якість за рахунок використання прогресивних технологій
Локальний	Попит на всій території країни	Окремий підхід до кожної локальної ділянки
Товарно-видова	Доступність потужних технічних ресурсів для впровадження покращеного інтерфейсу мережі.	За необхідності, використання обладнання схожого типу
Цінова	Можливість заощадити за допомогою ефективності звучання	Гнучка політика цін
За інтенсивністю – марочна	Дотримання всіх стандартів та вимог	Реклама товару, проведення тендерів

Після аналізу конкуренції проведено більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 4.9)[28].

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі

Назва	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Технологічні постачальники	Потреба в пошуку дистриб'юторів міжнародними зв'язками.	Залучення малопопулярних постачальників	Незалежність у прийнятті клієнтських рішень	Відданість більш авторитетним технологічним рішенням.
Висновки	Інтенсивність незначна	Можливість виходу на ринок	Постачальник указує цінову політику на обладнання	Клієнти говорять про вимоги до якості	Обмеження виникають лише, якщо відмовитися від приладу.

На основі здійсненого аналізу конкурентного оточення, викладеного у таблиці 4.9, враховуючи характеристики ідеї проекту (таблиця 4.2), вимоги споживачів до продукту (таблиця 4.5) та фактори маркетингового середовища (таблиці 4.6-4.7), визначено та обґрунтовано перелік факторів конкурентоспроможності, які представлені у таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Раціональна ціна	Раціональне використання ресурсів
2	Доступність	Значно нижча ціна ніж у конкурентів
3	Спектр застосувань	Використання для певного ряду потреб користувачів.

На основі виявлених факторів конкурентоспроможності (таблиця 4.10) здійснюється аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (таблиця 4.11).

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Раціональніший ціновий показник	19			+				
2	Доступність	20				+			
3	Спектр застосувань	18		+					

Фінальним етапом аналізу ринкових можливостей для впровадження проекту є розробка SWOT-аналізу (матриці, яка відображає сильні сторони (Strengths), слабкі сторони (Weaknesses), загрози (Threats) та можливості (Opportunities)) - (див. таблицю 4.12). Цей аналіз базується на виокремлених ринкових загрозах і можливостях, а також сильних та слабких сторонах (див. таблицю 4.11).

Список ринкових загроз та можливостей формується на основі аналізу факторів, що становлять загрози або можливості у маркетинговому середовищі. Ринкові загрози та можливості є передбачуваними результатами впливу факторів, які ще не реалізувалися на ринку, але мають певний потенціал здійснення. Наприклад, зменшення доходів потенційних споживачів є фактором загрози, що може привести до збільшення важливості цінових аспектів при виборі товару, створюючи тим самим конкурентну загрозу на ринку.

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту.

Сильні сторони: Створення такої акустичної системи, буде мати якісний показник звучання	Слабкі сторони: Правильність налаштування такої системи.
Можливості: створення рівномірної якісної картини звучання	Загрози: незацікавленість клієнтів, цінова конкуренція.

Розглянуті альтернативи оцінюються за критеріями строків та ймовірності отримання ресурсів (див. таблицю 4.13).

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Аналіз споживчої поведінки, пошук наукових джерел, розробка технічного обладнання, рекламні заходи та взаємодія з клієнтами для перевірки функціональності системи.	85%	8 міс
2.	Аналіз споживчої поведінки, пошук інвестицій, розробка наукових ресурсів, створення технічного обладнання та проведення його тестування	70 %	15 міс

Обрано перший варіант альтернативи.

На основі SWOT-аналізу формуються стратегії ринкової поведінки (перелік заходів), спрямованих на введення стартап-проекту на ринок, та орієнтованих на оптимальний час їхньої реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів (див. табл. 4.9 - аналіз потенційних конкурентів).

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

При створенні ринкової стратегії перший крок включає визначення стратегії охоплення ринку, що полягає у розробці опису цільових груп потенційних споживачів (див. табл. 4.14).

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Професіонали та аудіо-інженери	Готові	Високий	Середня	Середня
2.	Використання в домашніх цілях	Готові	Низький	Середня	Середня
Як цільову групу було обрано групу №1 та №2					

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Використання альтернативних технологій та обладнання	Встановлення нового стандарту якості та ціни	Мобільність та віддаленість роботи	Стратегія диференціації

Обрано стратегію диференціації. Далі йде вибір стратегії конкурентної поведінки (див. табл. 4.16).

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект "першим" на ринку?	Чи зможе компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи зможе компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Забирати існуючих та шукати нових	Так, основний функціонал	Наслідування лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та продукту (див. табл. 4.5), а також враховуючи обрану базову стратегію розвитку (див. табл. 4.15) та стратегію конкурентної поведінки (див. табл. 4.16), розробляється стратегія позиціонування (див. табл. 4.17). Ця стратегія передбачає створення ринкової позиції (комплексу асоціацій), яка дозволить споживачам ідентифікувати торгівельну марку чи проект.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Основна стратегія розвитку	Основні конкурентні переваги власного стартап-проекту.	Обирання ключових асоціацій, які сприятимуть формуванню комплексної позиції власного проекту.
1.	Висока якість послуг	Диферен - ціації	Гнучкість запропонованого рішення, його забезпечення якістю та ефективністю.	Якість, продуктивність, надійність

4.5 Розроблення маркетингової стратегії для стартап-проекту

На початку створюється концепція маркетингу товару, який залучить увагу споживача. Для цього в таблиці 4.18 представлені результати попереднього аналізу конкурентоспроможності продукту.

Таблиця 4.18 – Визначення основних переваг потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Якість	Висока якість, сервісність	Якість
2	Звучання	Висока рівень звучання	Створення рівномірної звукової картини

Далі працюється над трьохрівневою маркетинговою моделлю товару: уточнюється концепція продукту чи послуги, його фізичні складові та особливості процесу надання (див. табл. 4.19).

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумкою	Якісний товар та послуги, стандартизована якість послуг та системи		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Н м	Вр/Тх/Тл/ Е/Ор
	1. Вартість такої системи	М	
	2. Можливість використання в різних цілях	М М М	
	3. Висока надійність	М	
	4. Безпечність для користування		
Якість: стабільна робота та висока якість звукової картини			

Продовження таблиці 4.19

III. Товар із підкріпленням	До продажу – отримання високоякісної акустики
	Після продажу – комфортне використання системи
Яким чином планується захистити потенційний товар від копіювання: через захист інтелектуальної власності.	

Після створення маркетингової моделі продукту важливо визначити, чим саме проект буде захищений від копіювання. Цей захист може бути забезпечений за допомогою захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), використання ноу-хау або комплексного поєднання властивостей і характеристик, що вбудовані на другому та третьому рівнях продукту.

Далі, наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись під час встановлення ціни на майбутній продукт (остаточне визначення ціни здійснюється під час фінансово-економічного аналізу проекту). Цей етап включає аналіз цін на аналогічні товари або товари-замінники, а також оцінку рівня доходів цільової аудиторії споживачів (див. табл. 4.20). Аналіз проводиться методом експертної оцінки.[28]

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	10000-55000 грн.	–	Середній	Н. 10000 – В. 55000 грн(Товар)

Останнім етапом є визначення оптимальної системи збуту, в межах якої приймаються рішення. Це можуть бути інтернет магазини, сторінки в соціальних мережах і тому подібне. Використання інтернету для продажі є досить зручним та ефективним методом.

4.6 Висновки до розділу

Було виконано опис ідеї проекту, що полягає у створенні акустичної системи високої вірності відтворення з рівнолінійною амплітудою частотною характеристикою звучання. Побудова відбувалась за рахунок обрання найбільш оптимальних та підходящих систем для організації усієї роботи, застосування яких на сьогоднішній день є дуже перспективним напрямом розвитку. На сьогоднішній день на українському ринку є багато акустичних систем, але мало що вказується про якість звучання та відтворення звуку, тому дана система матиме високу конкурентну здатність.

Для успішного запуску стартапу рекомендується обрати альтернативу, яка включає аналіз споживчої поведінки, пошук наукових джерел, розробку необхідного технічного обладнання, встановлення зв'язків у рекламі, постійну взаємодію з покупцями для перевірки функціональності обладнання та отримання їхнього відгуку. Подальша реалізація стартап-проекту є доцільною.

ВИСНОВКИ

Дослідження та покращення акустичних систем залишаються актуальними завдяки потребі в високоякісному звуку в різних сферах, включаючи розваги, музику, телебачення та студійну роботу. Нові технології і матеріали сприяють розвитку динаміків та звукової передачі, вдосконалюючи аудіо-візуальний досвід користувачів. Популярність стрімінгу та онлайн-контенту вимагає якісних акустичних систем в домашніх умовах. Технологічні інновації, такі як бездротові системи та розвиток віртуальної реальності, потребують постійних досліджень для досягнення нових стандартів звуку в різних середовищах, задовольняючи потреби сучасного користувача.

Існує великий асортимент акустичних систем і динаміків, кожен з яких має свої унікальні особливості та можливості. Оскільки доступні широкі варіанти обладнання, вибір правильної моделі може бути складним завданням. Тому в даній роботі зображено чому потрібно і важливо для ефективного та оптимального використання акустичних систем і динаміків проводити додаткові дослідження їх технічних характеристик. Це допомагає краще зрозуміти їх можливості, обмеження та унікальні особливості. Аналіз параметрів, таких як частотний діапазон, чутливість, опір, потужність та інші, сприяє більш обґрунтованому вибору при розробці акустичних систем з урахуванням конкретних вимог та умов їх використання.

Правильна робота акустичного фільтра та динаміків є ключовою для забезпечення високоякісного звуку в аудіо-системах. Акустичні фільтри використовуються для розділення аудіосигналу на різні частотні діапазони, направляючи кожен діапазон на відповідний динамік. Це дозволяє забезпечити точне відтворення звуку готової акустичної системи.

Під час дослідження виявлено, що розглянутий високочастотний динамік відзначається пласкою частотною характеристикою без серйозних провалів або значних відхилень вгору чи вниз по частотах. Його характеристика дозволяє використовувати його як ефективний компонент для створення високоякісної

акустичної системи. Завдяки стабільній відтворюваності звуку в широкому діапазоні високих частот, цей динамік може стати важливим елементом для деталізованого і якісного аудіо.

Щодо середньочастотного динаміка, варто відзначити його добрі характеристики в середньому частотному діапазоні. Це робить його відмінним вибором для використання в акустичних системах, що оптимально працюють в цьому спектрі частот. Зокрема, на частотах від 2000 до 8000 Гц, динамік показує стабільний рівень звукового тиску, що пропорційний до вхідної потужності. Однак вище 8000 Гц спостерігається зменшення рівня звукового тиску, що свідчить про обмеження відтворення звуку в цьому діапазоні частот.

Таким чином, обидва динаміки мають свої переваги та обмеження у відтворенні звуку на певних частотах, і тому врахування їхніх характеристик є важливим для вибору та подальшого створення аудіо систем відповідно до конкретних потреб та вимог користувача.

Аналізуючи отримані результати, виявлено, що характеристика досліджуваного фільтра відображає схожість з типовою характеристикою, що зазвичай є притаманною для кросоверів. Це свідчить про те, що фільтр має високу якість відтворення звуку, що робить його доцільним у створенні якісної акустичної системи, особливо у сполученні з відповідними гучномовцями.

Графіки амплітудно-частотних характеристик, отримані на основі вимірювань, показали правильний поділ за частотами відтворення з чіткою межею навколо 2500 Гц. Загальна амплітудно-частотна характеристика свідчить про прямолінійний характер з мінімальними відхиленнями на розподільчих частотах. Це свідчить про високу якість акустичної системи та її здатність точно передавати звук з відповідними заданими характеристиками.

Такий результат має велике значення для створення акустичних систем високої якості звучання. Характеристика, що подібна до типової для кросоверів, свідчить про високу ефективність фільтрації звуку. Це означає, що фільтр спроможний точно розділяти частоти для різних динаміків, забезпечуючи оптимальне відтворення звуку на відповідних діапазонах.

Також у результаті проведеної роботи було досліджено амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) динаміків та акустичного фільтра на середньочастотних (СЧ) та високочастотних (ВЧ) каналах. Побудовані графіки АЧХ демонструють схожість до ідеальних характеристик, що свідчить про їхню високу якість та точність відтворення звуку.

У даній роботі було використано різноманітні методи дослідження для оцінки амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) акустичної системи та її компонентів. Зокрема, був використаний експериментальний метод, який включав проведення вимірювань та спостереження за реальною роботою системи для отримання даних про її функціонування у реальних умовах.

Також був використаний метод моделювання, що дозволив створити віртуальну модель фільтра для проведення комп'ютерних симуляцій та аналізу її характеристик у різних умовах та налаштуваннях.

Для математичного аналізу АЧХ були використані математичні методи, включаючи обчислення, моделювання функцій та обробку отриманих даних для розрахунку амплітуд та частотних характеристик.

Додатково, в роботі був використаний метод отримання загальної АЧХ шляхом перемноження амплітудних характеристик динаміків та фільтра. Цей метод дозволив отримати загальний результат для системи з урахуванням характеристик окремих компонентів та їх впливу на загальний відтворюваний звук.

Застосування цих різноманітних методів дослідження дозволило отримати комплексну АЧХ акустичної системи та динаміків. Зокрема графіки АЧХ динаміків та фільтра на СЧ та ВЧ каналах показали близькість до ідеальних параметрів, що свідчить про ефективну роботу акустичних компонентів. Крім того, загальний вигляд графіка АЧХ акустичної системи має прямолінійний характер, що підтверджує високу якість системи та її здатність точно передавати звуковий сигнал у широкому частотному діапазоні.

Отримані результати дослідження свідчать про оптимальну роботу акустичної системи та підтверджують високу якість амплітудно-частотних

характеристик, що є важливим для досягнення точності та якості відтворення звуку при створенні такої акустичної системи.

Тісна взаємодія між акустичним фільтром та динаміками дозволяє правильну роботу аудіо-системи, розділяючи частотні діапазони та надаючи кожному динаміку відповідні сигнали для відтворення. Правильно налаштовані та злагоджені акустичні фільтри разом з високоякісними динаміками забезпечують чистий, точний та приємний звуковий супровід для слухачів у різних областях, від розваг та музики до професійних аудіостудій.

Була розроблена концепція проекту, спрямована на створення аудіосистеми високої якості звучання, яка має рівномірну амплітудно-частотну характеристику. Побудова цієї системи відбувалась шляхом вибору найоптимальніших та найбільш підходящих компонентів для її реалізації. Використання цих компонентів є потенційно перспективним напрямком в сучасному розвитку.

На сьогоднішній день на українському ринку присутні численні акустичні системи, проте мало хто зосереджується на якості звучання та точності передачі звуку. Тому дослідження має великий потенціал конкурентоспроможності.

Для успішного запуску стартапу рекомендується вибрати альтернативний шлях, що включає аналіз споживчої поведінки, пошук інформації у наукових джерелах, розробку необхідного технічного обладнання, рекламування через встановлення зв'язків та постійну взаємодію з покупцями для оцінки функціональності обладнання та отримання їхнього відгуку. Подальша реалізація стартап-проекту має великий потенціал.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

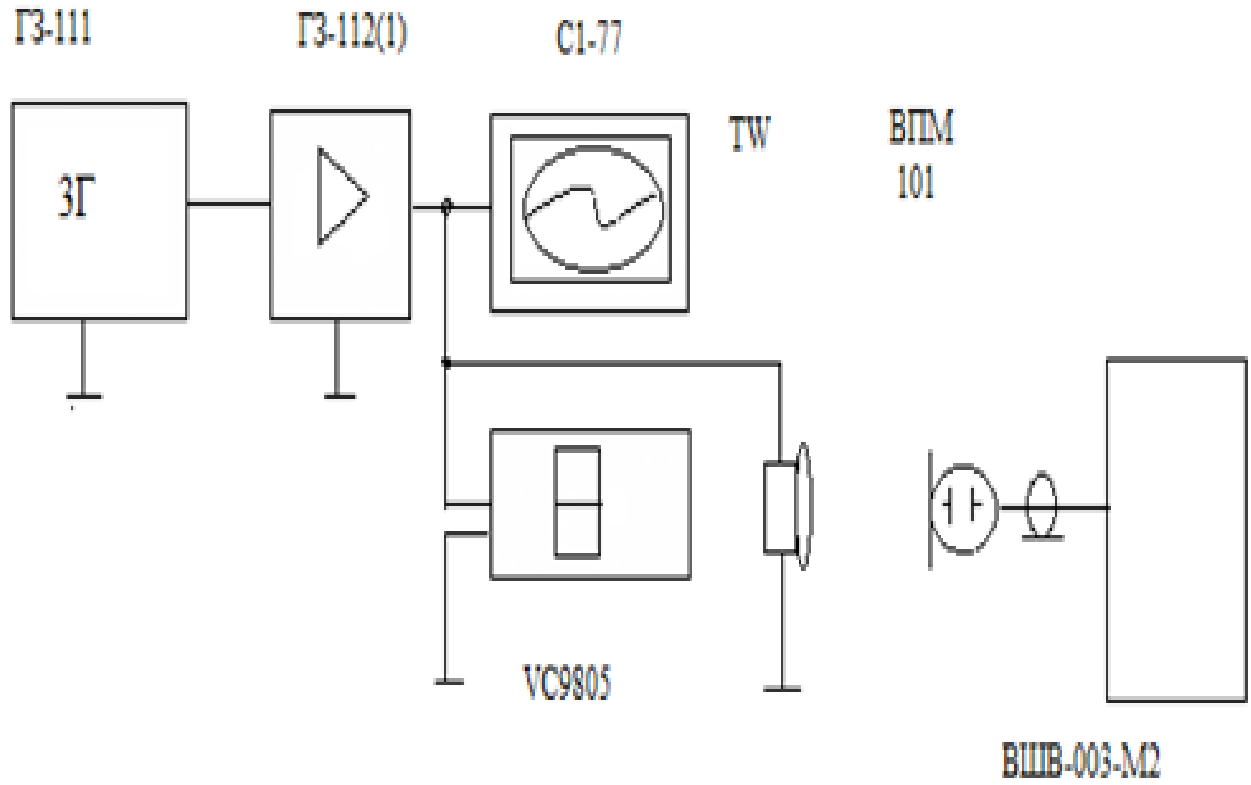
1. Конкіна Т. М. Звукові хвилі [Електронний ресурс] / Т. М. Конкіна // Фізика. Електронний довідник. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: http://fizyka.inf.ua/Topics/Mehanika/Mehanichni_koluvannya_i_hvuli/4.html.(25.10.2023)
2. Акустические системы: активные и пассивны [Електронний ресурс] // 3. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://pop-music.ru/articles/akusticheskie-sistemy-aktivnye-i-passivnye>. (28.10.2023)
3. Акустика. Типы акустических систем [Електронний ресурс] // 8. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.avclub.pro/articles/akustika-tipy-akusticheskikh-sistem>. (01.11.2023)
4. Иофе В. К. Побутові акустичні системи: Підручник. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. - 96 с
5. Основы акустики. Интернет ресурс «baseacoustica.ru». – Режим доступу: <https://baseacoustica.ru/razmyshlenija/146-kontraperturnaja-akustika>. (03.11.2023)
6. Акустические системы: типы динамиков (часть 3) [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.audiomania.ru/content/akusticheskie-sistemi-tipi-dinamikov-chast-3/>. (03.11.2023)
7. Борщ А.А., Мушкет А.В., Олійник В.М. Дослідження просторових характеристик високочастотної ланки акустичної системи з акустичною лінзою. – IV Міжнародна наукова-практична конференція «Інформармаційні системи та технології в медицині» (ІСМ-2021) [Текст]: зб. наук.пр. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2020. – с. 209-210.
8. 6 ГДВ-1-16 (3 ГД-2) [Електронний ресурс] // ldsound. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <https://ldsound.info/6-gdv-1-16-3-gd-2/>.(10.11.2023)

9. 20 ГДС-1Л-8 (15 ГД-11Б) [Электронный ресурс] // ldsound. – 2010. – Режим доступа до ресурсу: <https://ldsound.info/20-gds-11-8-15-gd-11b/>.(10.11.2023)
10. ГОСТ 12090-80. Государственный стандарт. Частоты для акустических измерений. Предпочтительные ряды. Введен с 01.01.1981. – 364 с.
11. ДСТУ 3990-2000. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань звукового тиску в повітряному середовищі (61356) – Київ: ДЕРЖСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2000. – 232 с. – (Відділ поліграфії науково-технічних видань УкрНДІССІ).
12. Алдошина И. А. Приттс Р. Музыкальная акустика. Учебник для высших учебных заведений / Ирина Аркадьевна Алдошина. – Санкт-Петербург, 2009. – 720 с. – (Композитор).
13. Вичислювальні методи в проектуванні радіоелектронної апаратури Попов А. В., Васильєва І. К. - Навчальний посібник. - Харків: Національний аерокосмічний університет, 2011. - 90с.
14. Зайцева Ж. И., Неделяева А. В., Кирилов И. С. Исследование низкочастотных и высокочастотных порогов звуковосприятия в разновозрастных группах // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1.;
15. Григорьев Л. А. Цифрове формування діаграм спрямованості / Григорьев Л. А. 2010 – 144с.
16. Байда В. В. Дослідження апаратних та програмних методів вимірювання акустичних шумів та звукових характеристик приміщень / В. В. Байда, В. В. Бражний, В. В. Куцак – Вінниця: ВНТУ, 2014 р.
17. Байда В. В. Комп'ютерні методи вимірювання психофотометричних шумів та акустичних параметрів приміщень / В. В. Байда – 2015 р. – Режим доступу: [<http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2015/initki/txt/bayda-axarov.pdf>]
18. Гапоненко С. В. Акустические системы своими руками / Гапоненко С. В.. – Санкт-Петербург, 2013. – 240 с. – (Наука и Техника).

19. Алдошина И.А. Высококачественные акустические системы и излучатели / Алдошина И.А., Войшвилло А.Г. – Санкт-Петербург: Радио и связь, 1985. – 168 с.
20. АС-315 «Radiotekhnika S-30» [Электронный ресурс] // ldsound. – 2010. – Режим доступа до ресурсу: <https://ldsound.info/10-as-315-radiotekhnika-s-30b/>.(25.11.2023)
21. NI Multisim [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.multisim.com/>.(25.11.2023)
22. Пирожков Д. Амплитудно-частотная характеристика [Электронный ресурс] / Д. Пирожков // Основы акустики. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: <https://baseacoustica.ru/jenciklopedija/276-amplitudnochastotnaja-harakteristika>. (28.11.2023)
23. Беранек А. П. Акустические измерения / А. П. Беранек — М.: ИИЛ – 1952 – 626с.
24. Попов О. Б. Цифровая обработка сигналов в трактах звукового вещания: учеб. пособие для вузов / О. Б. Попов, С. Г. Рихтер. – М.: Горячая линияТелеком, 2007. – 341 с. – ISBN 5-93517-296-8.
25. Обробка сигналів електронних та акустичних систем: Конспект лекцій [Электронный ресурс]: навч. посіб. для здобувачів освіти рівня доктор філософії спеціальності 171 «Електроніка» / уклад.: А. М. Продеус; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 12,2 Мбайт). - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 249 с
26. Microsoft Excel [Электронный ресурс] // Microsoft. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.microsoft.com/uk-ua/microsoft-365/excel>. (29.11.2023)
27. Макаренко В. В. ВСТУП ДО ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАНЬ / В. В. Макаренко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 224 с.
28. М. Портер // Конкурентна перевага. Як досягати стабільно високих результатів – 2019р.

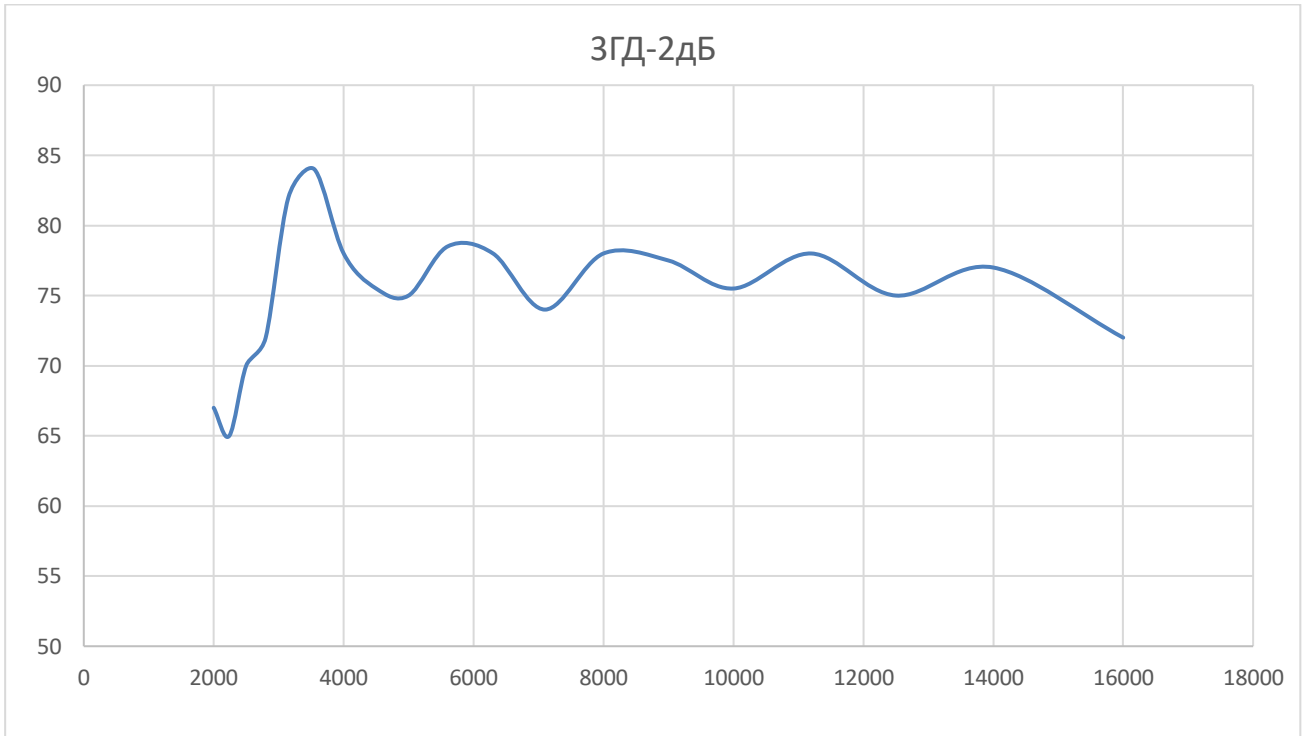
ДОДАТОК А

Структурна схема вимірювального станду



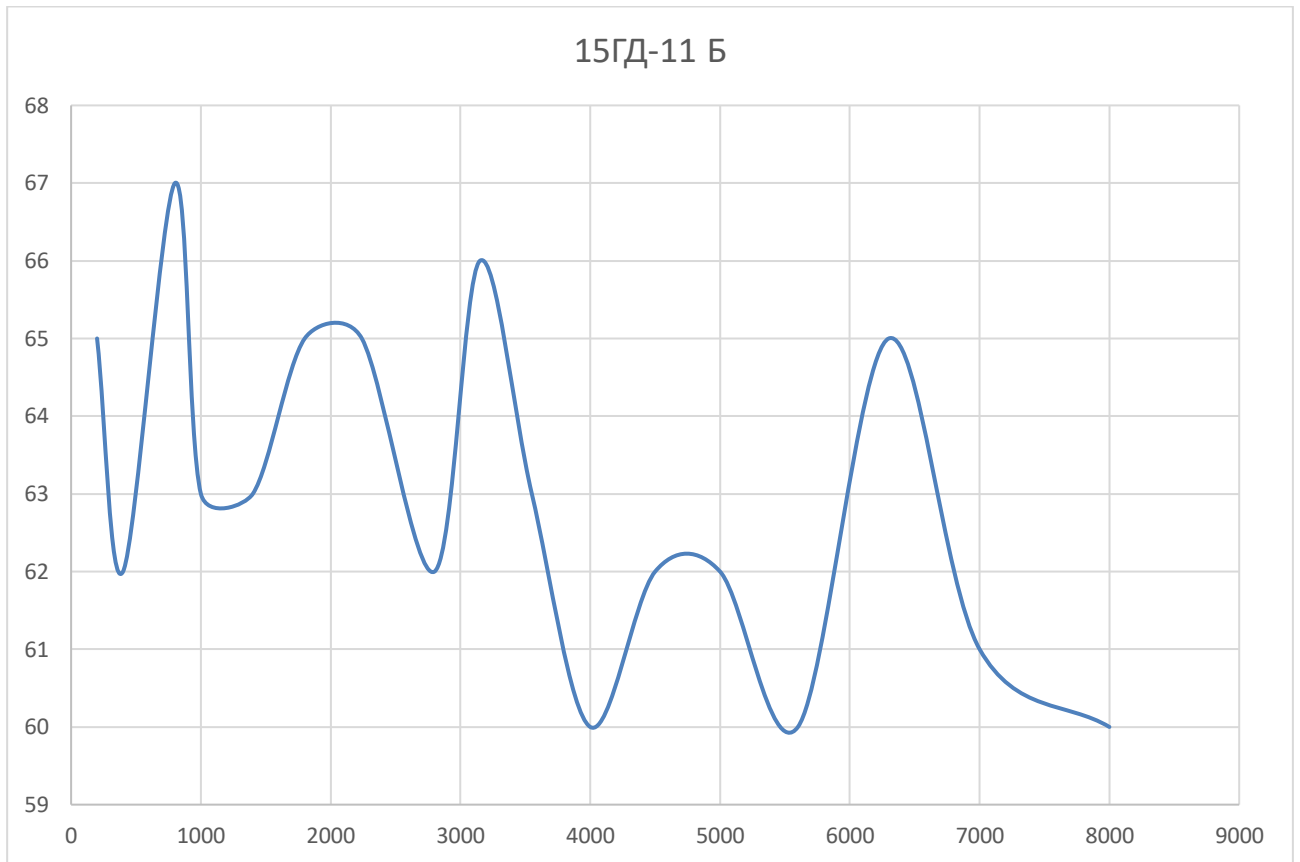
ДОДАТОК Б

Амплітудно-частотна характеристика високочастотного гучномовця



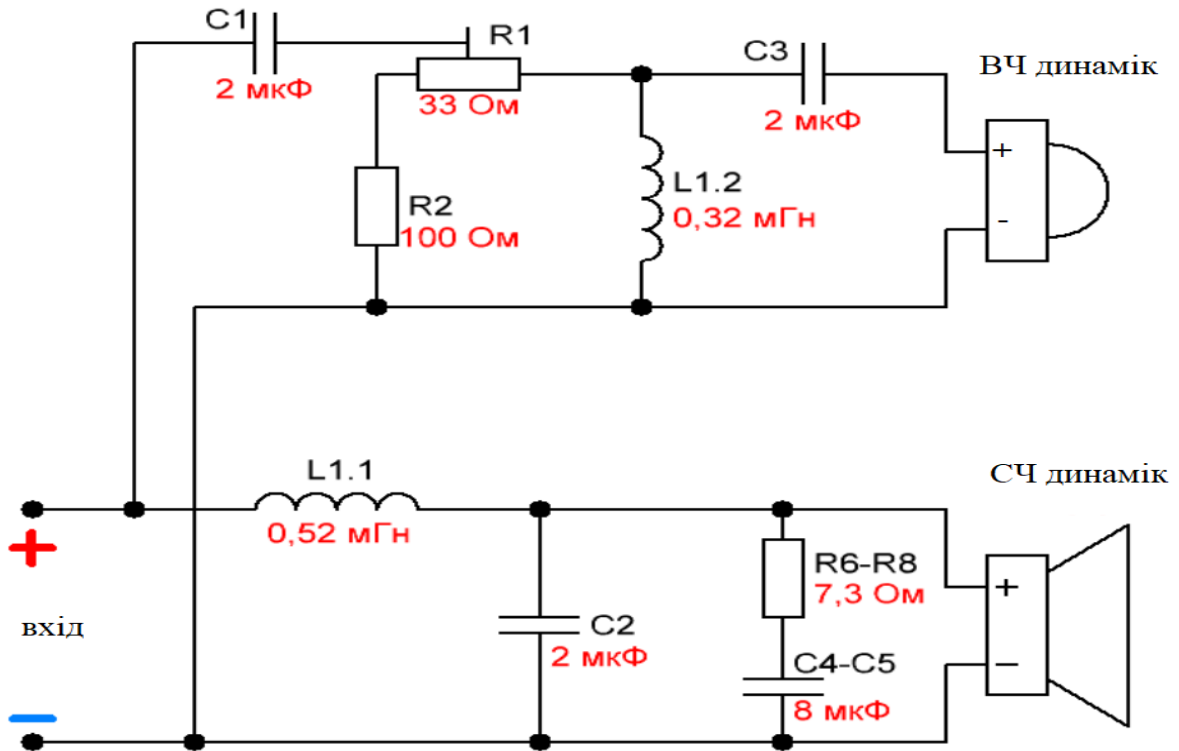
ДОДАТОК В

Амплітудно-частотна характеристика середньочастотного гучномовця



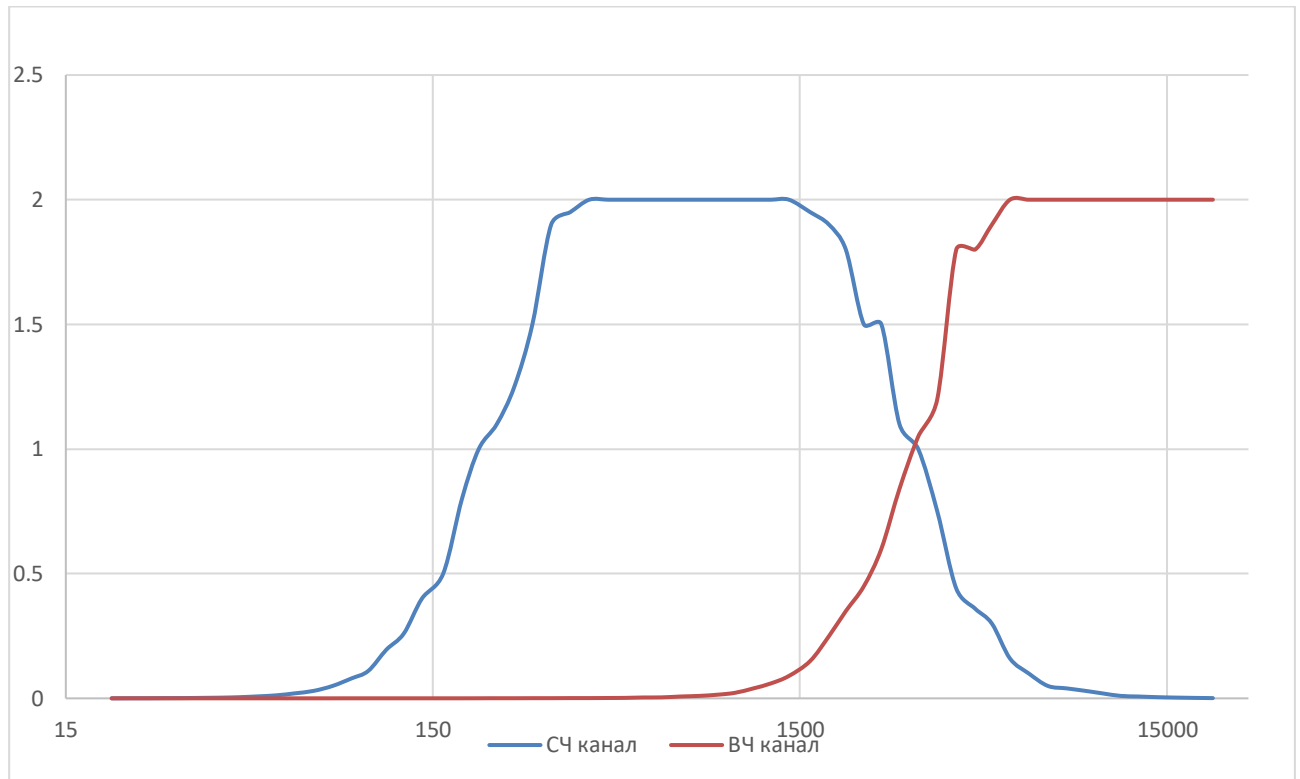
ДОДАТОК Г

Структурна схема акустичного фільтра



ДОДАТОК Д

Амплітудно-частотна характеристика акустичного фільтра



ДОДАТОК Е

Сумарна амплітудно-частотна характеристика акустичного фільтра і високо- та середньочастотних гучномовців

