ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Министерство культуры Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ»

Факультет медиатехнологий

Кафедра аудиовизуальных систем и технологий

Отзыв руководителя ВКР о работе обучающегося в период подготовки выпускной квалификационной работы

обучающегося Рысакова Никиты Владимировича

группа 3834

на тему: «Исследование динамических процессов в акустическом динамике»

1. Объем работы: количество страниц 62. Графическая часть 38 рисунков.

2. Цель и задачи дипломного исследования:

Цель исследования – исследование динамических процессов, происходящих в акустическом динамике с целью определения способов улучшения качества воспроизводимого звука.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих акустических динамиков и сравнительная оценка их свойств.
2. Моделирование системы звуковоспроизведения звука с учетом нелинейных процессов.
3. Исследование влияния различных параметров акустической системы на характер искажений звука.
4. Сравнительный анализ выходных сигналов построенных моделей..

3. Актуальность, теоретическая, практическая значимость темы исследования:

Актуальность выбранной темы определяется необходимостью повышения качества звука акустических звуковоспроизводящих систем. Акустические динамики представляют собой сложную нелинейную систему, в которой имеющиеся нелинейности приводят к искажениям звука. Исследование таких систем с целью компенсации нелинейных искажений является актуальной задачей.

Теоретическая значимость состоит в разработке нелинейной модели акустической системы на основе традиционной схемы замещения звукового динамика.

Практическая значимость заключается в создании на основе проведенных исследований новых звуковоспроизводящих систем с улучшенными звуковыми качествами.

4. Соответствие содержания работы заданию (полное или неполное): полное

5. Основные достоинства и недостатки дипломной работы: работа оригинальная, имеющая практическую направленность. Она является основой для создания новой звуковоспроизводящей аппаратуры.

6. Степень самостоятельности и способности выпускника к исследовательской работе: работа выполнена самостоятельно, при этом автор работы проявил способность творческого мышления и практические навыки.

7. Оценка деятельности выпускника в период выполнения выпускной квалификационной работы (степень добросовестности, работоспособности, ответственности, аккуратности и т.п.): в период выполнения дипломной работы автор проявил способность к творческой научной работе. Он проявил умение работать с большим количеством научных материалов, извлекая из них необходимые знания.

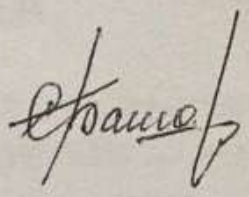
8. Достоинства и недостатки оформления текстовой части, графического, демонстрационного, иллюстративного, компьютерного и информационного материала. Соответствие оформления требованиям стандартов:

текстовая часть написана в соответствии с требованиями стандартов. В то же время в тексте работы встречаются опечатки.

9. Целесообразность и возможность внедрения результатов дипломного исследования: работа имеет практическую направленность, планируется ее дальнейшее продолжение. Основные результаты работы планируется использовать при создании новых акустических звуковоспроизводящих систем.

10. Общее заключение и предлагаемая оценка квалификационной работы:

Считаю, что выполненная обучающимся Рысаковым Никитой Владимировичем ВКР на тему «Исследование динамических процессов в акустическом динамике» показывает **базовый уровень** сформированности компетенций, соответствует требованиям СПбГИКиТ, предъявляемым к ВКР. ВКР может быть представлена к защите.

Руководитель:
профессор, д.т.н., профессор
кафедры аудиовизуальных систем и
технологий  С.А. Башарин

«____» _____ 2023 г

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

МИНИСТЕРСТВО КУЛЬТУРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ»

СПРАВКА

о результатах проверки текстовых документов на наличие неправомерных заимствований в системе «Антиплагиат.вуз»

В соответствии с требованиями предъявляемыми к выпускной квалификационной работе, была проведена проверка текста ВКР, с целью повышения качества научно-исследовательских работ, а также соблюдения законодательства Российской Федерации в части защиты прав интеллектуальной собственности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему:

Исследование динамических процессов в акустическом динамике

В соответствии с проведенным анализом итоговая оценка оригинальности текста составляет 79,69%

Распечатка результатов проверки прилагается

Проверку произвел _____ И.Ш.Кондыбаева
должность подпись

Заведующий кафедрой _____ А.И. Ходанович
должность подпись

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Санкт-Петербургский государственный
институт кино и телевидения

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Рысаков Н.В.
Самоцитирование рассчитано для: Рысаков Н.В.
Название работы: Исследование динамических процессов в акустическом динамике
Тип работы: Не указано
Подразделение: Кафедра аудиовизуальных систем и технологий

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ **ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ:** НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	20.31%	СОВПАДЕНИЯ	20.31%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	79.69%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	79.69%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 26.05.2023

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 26.05.2023 14:12

Структура документа: Проверенные разделы: титульный лист с.1-3, основная часть с.4, 6-43, 45-56, содержание с.5, 44, библиография с.57-62
Модули поиска: Цитирование; eLIBRARY.RU; Модуль поиска "СПбГИКиТ"; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Патенты СССР, РФ, СНГ; СМИ России и СНГ; Кольцо вузов

Работу проверил: Кондыбавева Ирина Шынгисовна

ФИО проверяющего

Дата подписи:

Подпись проверяющего

Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.

Решение об утверждении темы ВКР
на кафедре аудиовизуальных систем и технологий

ающийся: Рысаков Никита Владимирович
водитель: д.т.н., профессор Башарин Сергей Артемьевич
ВКР: Исследование динамических процессов в акустическом динамике
рмулировка задачи решаемой в ВКР: исследование динамических процессов в ической системе с целью оценки влияния параметров системы на качество .
ределение характера решаемой задачи: прикладная
туальность решения задачи для отрасли:
Необходимость решения задачи для отрасли: проведенные исследования ессов в динамике позволят создать систему воспроизведения звука шенного качества.
Почему задача не была решена ранее: подобные системы содержат ейности, которые усложняют процесс анализа. Появление новых ьютерных программ позволяет преодолеть эти трудности.

д: решение данной проблемы в рамках выпускной квалификационной работы тавляется актуальным. Подготовка и написание ВКР позволит сформировать ый уровень готовности к осуществлению профессиональной деятельности дством формирования в полном объеме компетенций, предусмотренных ОПОП рамках подготовки к защите и процедуры защиты ВКР

ующий кафедрой А.И. Ходанович

Выписка из протокола проведения предзащиты ВКР

Новизна решения: новизна исследований состоит в их проведении на базе нелинейной модели акустического динамика. Предлагаемое решение мулированной задачи в рамках Выпускной квалификационной работы обладает льностью, новизной и практической значимостью.
на ли поставленная задача: полностью решена.
ветствует ли название ВКР задаче, решаемой в работе: соответствует
мендации комиссии: рекомендовать к защите

седатель комиссии А.И. Ходанович

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

ФГБОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ»

Факультет мультимедийных технологий
Кафедра аудиовизуальных систем и технологий
Направление подготовки 11.03.01
«Радиотехника»

Утверждаю
Заведующий кафедрой
А.И. Ходанович
20.12. 2022 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

1. Обучающийся 3834 (№ группы) Рысаков Н.В. (ФИО)

2. Руководитель профессор (должность) Башарин С.А. (ФИО)

3. Форма ВКР дипломная работа
Дипломный проект или дипломная работа

4. Тема ВКР Исследование динамических процессов в акустическомдинамике

Тема утверждена приказом № 287-з от «19» декабря 2022

5. Исходные данные: Персональный компьютер, ПО Windows 10, Multisim 7

6. Содержание работы: Данная выпускная квалификационная работа направлена на исследование динамических процессов в акустическом динамике. Исследование проводится с помощью компьютерного моделирования электромеханических процессовдинамика.

7. Содержание графической части: в работе используются: 10 таблиц и 38 рисунков

Дата выдачи задания 20 декабря 2022г.

Руководитель

Обучающийся

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов ВКР	Сроки выполнения	Примеч.
Сравнительный анализ акустических звуковоспроизводящих систем.	Ноябрь 2022	
Изучение возможных путей улучшения качества звука путем оптимального выбора параметров системы.	Декабрь 2022	
Построение компьютерной модели системы с учетом нелинейностей.	Январь 2023	
Исследование построенных моделей с учетом изменения параметров.	Февраль 2023	
Сравнительный анализ сигналов, полученных на основе моделирования.	Март 2023	
Оформление текстовой части выпускной квалификационной работы.	Апрель 2023	
Оформление графической части выпускной квалификационной работы.	Май 2023	
Завершение оформления и представление ВКР к защите.	Июнь 2023	

Руководитель ВКР _____ /С.А. Башарин/
подпись

Обучающийся _____ И.В. Рысаков
подпись

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

МИНИСТЕРСТВО КУЛЬТУРЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ»

Факультет мультимедийных технологий
Кафедра аудиовизуальных систем и технологий

ДОПУЩЕНА К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой аудиовизуальных систем и технологий
_____ А.И. Ходанович
01.06. 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

а тему: Исследование динамических процессов в акустическом
инамике

по направлению подготовки 11.03.01 «Радиотехника»

уководитель Проф.каф.АВСиТ, д.т.н, профессор _____ /С.А.Башарин /
должность подпись

бучающийся 3834 _____ /Н.В.Рысаков/
группа подпись

Проверка на антиплагиат
Оригинальность 79,69 %
Ответственный
должность _____
_____ /Ш.Ш.Кондыбаева/
2023

ГИА
Оценка _____

Секретарь ГИА
_____ /Д.А.Соколов/

Санкт-Петербург
2023

Содержание

Введение..... 5
Глава 1. Критический анализ литературных и патентных источников.....6
1.1 Понятие и сущность акустических систем.....6
1.1.1 Основные параметры акустических систем.....7
1.1.2 Устройство и принцип работы громкоговорителя.....8
1.1.3 Низкочастотный громкоговоритель.....10
1.2 Обзор существующих моделей низкочастотных звуковоспроизводящих устройств..... 11
1.2.1 Динамическая головка «Visaton B 200/6».....11
1.2.2 Динамик «Wavecor SW178WA01-01».....12
1.2.3 Громкоговоритель «Fostex FW800HS».....15
1.2.4 Громкоговоритель « MAG M0830».....17
1.2.5 Динамик «BEYMA 12BR70».....19
1.2.6 Динамическая головка «НОЭМА 600ГДН14-8».....21
1.3 Выводы..... 24
Глава 2. Исследования динамических процессов в акустическом динамике.....25
2.1 Нелинейные искажения в акустических системах.....25
2.2 Метод электромеханических аналогий.....27
2.3 Обобщенная эквивалентная электрическая модель акустической системы (упрощенная).....29
2.4 Полная обобщенная эквивалентная электрическая модель низкочастотного громкоговорителя..... 33
2.5 Выбор программной среды для компьютерного моделирования.....34
2.6 Исследование линейной модели звуковоспроизводящего устройства.....35
2.7 Выводы..... 41
Глава 3. Постановка задачи исследования.....42
Глава 4. Расчетно-исследовательская часть.....44
4.1 Расчет основных параметров схемы замещения.....44
4.2 Расчет КПД акустической системы.....45
4.4 Нелинейная схема замещения звуковой системы.....46
4.5 Выводы..... 53
Глава 5. Управленческие и экологические аспекты проекта.....54
5.1 Управленческие аспекты проекта.....54
5.2 Экологические аспекты проекта.....54
Заключение..... 56
Список использованных источников.....58

Введение

Актуальность. С развитием цифровой индустрии и появлением новых акустических систем повышается значимость исследования качества звука в акустических системах. Усложнение музыкальных произведений и растущие требования к стандартам кинопоказа обуславливают актуальность этого вопроса.

В отечественной технической литературе звуковоспроизводящее устройство называется "акустической системой". В зависимости от области применения, она может обозначаться как "акустическая система", "акустический агрегат", "звуковая колонка", "аудиомонитор" или просто «громкоговоритель» или «динамик».

Данная выпускная квалификационная работа направлена на исследование динамических процессов в акустическом динамике.

Объект исследования - акустические системы.

Предмет исследования - динамические процессы в акустических системах.

Цель исследования состоит в исследовании динамических процессов в акустических системах.

Задачи:

1. Представить понятие и сущность акустических систем;
2. Провести обзор существующих моделей низкочастотных акустических систем;
3. Рассмотреть нелинейные искажения в акустических системах;
4. Рассмотреть метод электромеханических аналогий;
5. Изучить эквивалентные электрические модели акустических систем;
6. Рассчитать основные параметры схемы замещения;
7. Рассчитать КПД акустической системы;
8. Описать разработанный метод преобразования звука.

Теоретическая и практическая значимость состоит в определении факторов, влияющих на качество звука в акустическом динамике.

Таким образом, ВКР включает в себя введение, 5 глав, заключение и список источников, содержащий 53 наименования.

Глава 1. Критический анализ литературных и патентных источников

1.1 Понятие и сущность акустических систем

Акустическая система – это устройство воспроизведения звукового электрического сигнала, в звуковое акустическое оформления посредством встроенных частей динамических излучающих головок.

Акустическую систему можно разделить:

- по действенным принципам:
  - электродинамические;
  - электростатические;
  - пьезокерамические;
  - плазменные и др.
- по способу излучения:
  - прямого излучения;
  - рупорные.
- по количеству динамических головок:
  - однополосные;
  - многополосные.
- по полосе передаваемых частот динамических головок:
  - низкочастотные;
  - среднечастотные;
  - высокочастотные;
  - широкополосные.
- по акустическому оформлению:
  - фазоинверторные;
  - закрытые;
  - открытые;
  - пассивные.

- по области применения:
  - телевизионные;
  - автомобильные;
  - студийные и др.

Однополосная система не дает возможности выполнить качественное звучание из-за проблемы излучателя, который не может воспроизводить разночастотные сигналы.

Многополосные системы имеют больший спектр звуковых частот, которые может слышать человек, при этом разбивая их на несколько диапазонов, каждый из которых имеет свою динамическую головку со своими характеристиками в заданном диапазоне. Так достигается воспроизведение качественного частотного звучания 20-20000 Гц.

1.1.1 Основные параметры акустических систем

К наиболее важным параметрам АС можно отнести:

- Минимальная и максимальная подводимая мощность – показывает, на каких границах подаваемой мощности обеспечивается работа акустической системы внутри ее характеристик.
- Диапазон воспроизводимых частот – частотный диапазон, на котором акустическая система обеспечивает заданный уровень звукового давления.
- Максимальный уровень звукового давления - показывает предельное значение громкости АС без резкого ухудшения ее звуковых характеристик.
- Входная чувствительность – уровень звукового давления, развиваемого АС, измеренного на расстоянии 1 метр при подаче на нее мощности в 1 Ватт. Чем ниже это значение, тем более мощный усилитель требуется установить в систему.
- Неравномерность амплитудно-частотной характеристики – показывает степень приближения реальной характеристики АС к прямой линии. Абсолютно ровная характеристика принципиально недостижима. Чем более АЧХ ровная, тем

более правильно должна звучать акустическая система. Хорошая АС имеет неравномерность не более ± 4 дБ по частотной полосе 100 – 10 000 Герц [1].

- Входное сопротивление – показывает правильное согласование акустической системы с усилителем.

1.1.2 Устройство и принцип работы громкоговорителя

Основным функциональным элементом АС является динамическая головка. Электродинамическим громкоговорителем выступает прибор, который преобразует электрические колебания звука в акустические волны.

На рисунке 1 изображена упрощенная схема функционирования громкоговорителя.



Рисунок 1. Упрощенная схема функционирования громкоговорителя

В громкоговорителе присутствуют следующие подсистемы:

- ЭЛ – электрическая;
- ЭМ – электромеханическая;
- МА – механико-акустическая;
- АК – акустическая.

Подсистема электрического типа согласовывает входное сопротивление с входным сопротивлением усилителя в случае минимального согласования, либо вторичной обмотки трансформатора (повышающего) в использовании трансляционного усилителя.

Электромеханическая подсистема – это устройство, которое преобразует

электрический сигнал в механические колебания.

Механико-акустическая подсистема имеет функцию согласования механического импеданса звуковоспроизводящего устройства с частотно-зависимой компонентой сопротивления излучения, которая формируется излучателем.

Акустическая подсистема (излучатель) формирует сопротивление излучения, определяющее акустическую мощность излучателя и в конечном итоге коэффициент полезного действия громкоговорителя.

В подавляющем большинстве АС категории Hi-Fi (самые высококачественные АС) используют электродинамические диффузорные громкоговорители (остальные виды излучателей – электростатические, пьезо-пленочные, электретные и т.д. – используются гораздо реже).

Основы устройства конусного (диффузорного) электродинамического громкоговорителя прямого излучения со звуковой катушкой показаны на рисунке 2. Громкоговоритель состоит из трех основных частей: подвижной системы, магнитной цепи и диффузородержателя.

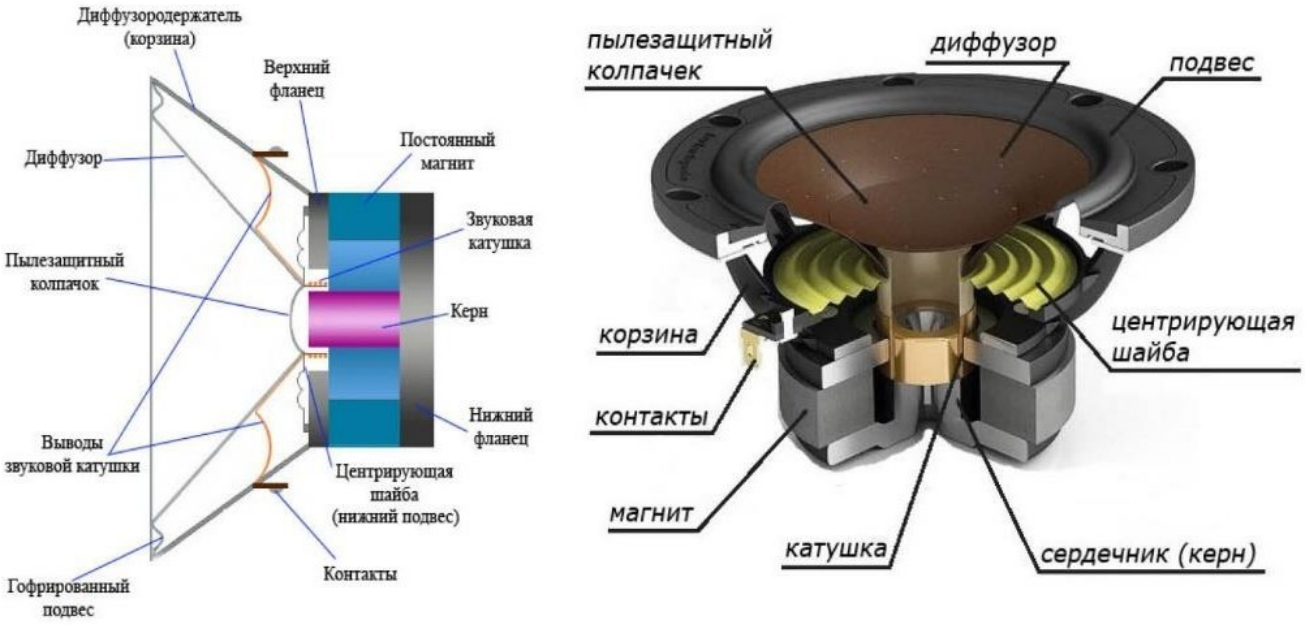


Рисунок 2. Основные элементы конструкции головки громкоговорителя

Краткое описание принципа работы громкоговорителя можно сформулировать следующим образом. При прохождении переменного электрического тока через

звуковую катушку громкоговорителя магнитное поле катушки взаимодействует с постоянным магнитным полем его магнитной системы. Это заставляет звуковую катушку либо втягиваться внутрь зазора при одном направлении тока в катушке, либо выталкиваться из него при другом. Механические колебания звуковой катушки передаются диффузору, который начинает колебаться в такт с частотой переменного тока, создавая при этом акустические волны.

1.1.3 Низкочастотный громкоговоритель

Низкочастотные акустические системы, в большинстве своем, обладают более низкой чувствительностью в сравнении в системами большей частоты ввиду более тяжелой подвижной системы. В данной связи для достижения требуемого звукового давления в области низких частот, они должны выдерживать мощность 200 и более Вт с сохранением механической и тепловой прочности.

АЧХ низкочастотного громкоговорителя показана на рисунке 3.

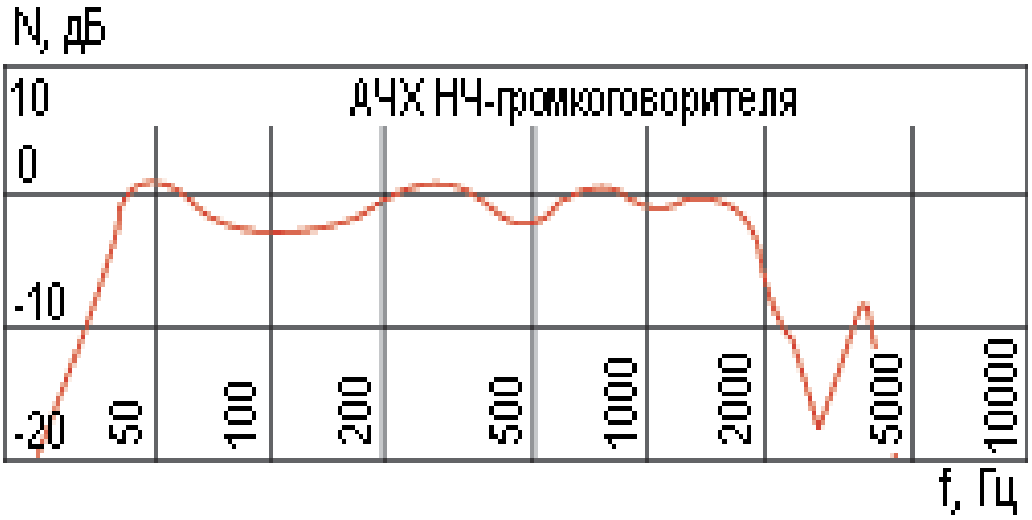


Рисунок3. АЧХ низкочастотного громкоговорителя

Для обеспечения расчетов параметров акустической системы с применением конкретного низкочастотного громкоговорителя обычно в каталогах указываются параметры Смолла-Тиле (Small-Thiele):

- резонансная частота громкоговорителя без оформления, Гц - (FreeAirResonanceFrequency);
- общая добротность (TotalQtsfactor) - электрическая и механическая добротность;

- КПД,% (RelativeEfficiency);
- максимально допустимое смещение звуковой катушки, мм (MaximumLinearExcursion).

1.2 Обзор существующих моделей низкочастотных звуковоспроизводящих устройств

1.2.1 Динамическая головка «Visaton B 200/6»

«Visaton B 200/6» – высококачественная широкополосная динамическая головка немецкой фирмы, отличающаяся высокой чувствительностью и сбалансированной частотной характеристикой. Это достигнуто благодаря использованию легкого бумажного диффузора, тканевого подвеса и оптимизированной каптоновой звуковой катушки диаметром 25 мм (остальные размеры показаны на рисунке 4). Литая алюминиевая корзина с отверстиями для вентиляции звуковой катушки позволяет уменьшить физические потери до минимума. Искажения приведены к очень низкому, равномерному уровню. B 200/6 идеально подходит для использования в высококачественных однополосных акустических системах. Номинальное звуковое давление 96 дБ (2,83 В /1 м) Максимальное смещение диффузора ±3,5мм.

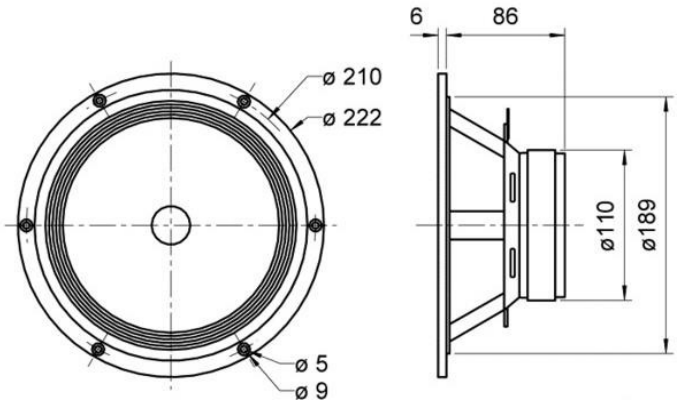


Рисунок 4. Основные размеры динамика «Visaton B 200/6»

Технические данные динамика «Visaton B 200/6» представлены в таблице 1.

Номинальная мощность	40 Вт
Пиковая мощность	70 Вт

Номинальный импеданс	6 Ом
Частотная характеристика	18000 Гц
Резонансная частота	40 Гц
Магнитный поток	1,2 Тл
Магнитная индукция	755 мкВб
Высота верхнего фланца	8 мм
Диаметр звуковой катушки	25 мм
Высота катушки	4 мм
Установочное отверстие	190 мм
Масса	2,16 кг
Сопротивление постоянному току Rdc	5,0 Ом
Механическая добротность Qms	8,39
Электрическая добротность Qes	0,83
Общая добротность Qts	0,75
Эквивалентный объем Vas	102 л
Площадь поршня Sd	214 $см^2$
Динамически движимая масса, mmd	9,7 г
Коэффициент электромеханической связи, Bxl	3,9 Тл*м
Индуктивность звуковой катушки	0,5 мГн

Таблица 1.Технические характеристики динамика «Visaton B 200/6»

АЧХ и импедансная характеристика динамика «Visaton B 200/6» изображены на рисунке 5.

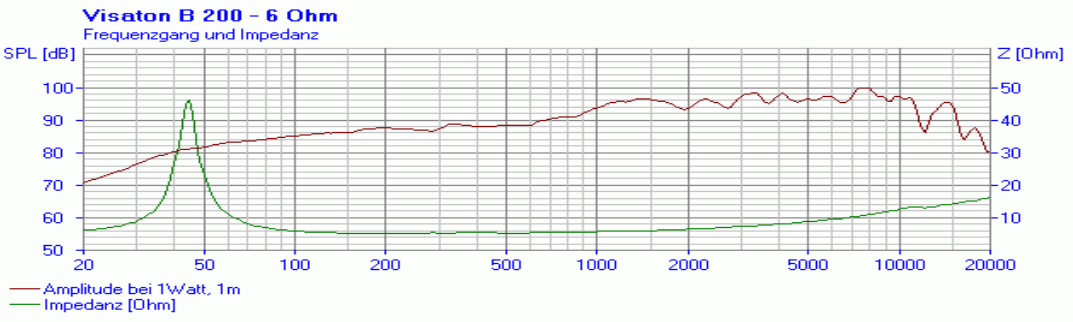


Рисунок 5. АЧХ и импедансная характеристика динамика «Visaton B 200/6»

1.2.2 Динамик «Wavecor SW178WA01-01»

Динамик «SW178WA01-01» китайского производителя Wavecor является низкочастотным громкоговорителем, спроектированным для качественного

воспроизведения низкочастотного сигнала. Он подходит для использования как в составе качественной стереосистемы, так и в составе домашнего кинотеатра. Жесткий алюминиевый конус, длинный линейный ход диффузора, качественная система вентиляции и специальная динамическая линеаризация позволили получить громкоговоритель, обладающий низкими искажениями даже на очень высоких уровнях сигнала.

Основные технические параметры динамика представлены в таблице 2

Диаметр динамика	2¾"
Номинальное сопротивление	4 Ом
Чувствительность	82 дБ
Резонансная частота "Fs"	108 Гц
Сопротивление звуковой катушки "Re"	3.2 Ом
Механическая добротность "Qms"	7
Электрическая добротность "Qes"	0.60
Полная добротность "Qts"	0.55
Площадь диффузора "Sd"	22 см²
Эквивалентный объём "Vas"	0.38 л
Индуктивность звуковой катушки "Le"	0.018 мГн
Масса подвижной системы "Mms"	4.0 г
Форс фактор "Bl"	3.8 Тл*м

Таблица 2.Технические характеристики динамика «SW178WA01-01»

Внешний вид и основные размеры динамика «SW178WA01-01» изображены на рисунке 6, а его АЧХ и импедансная характеристика – на рисунке 7.

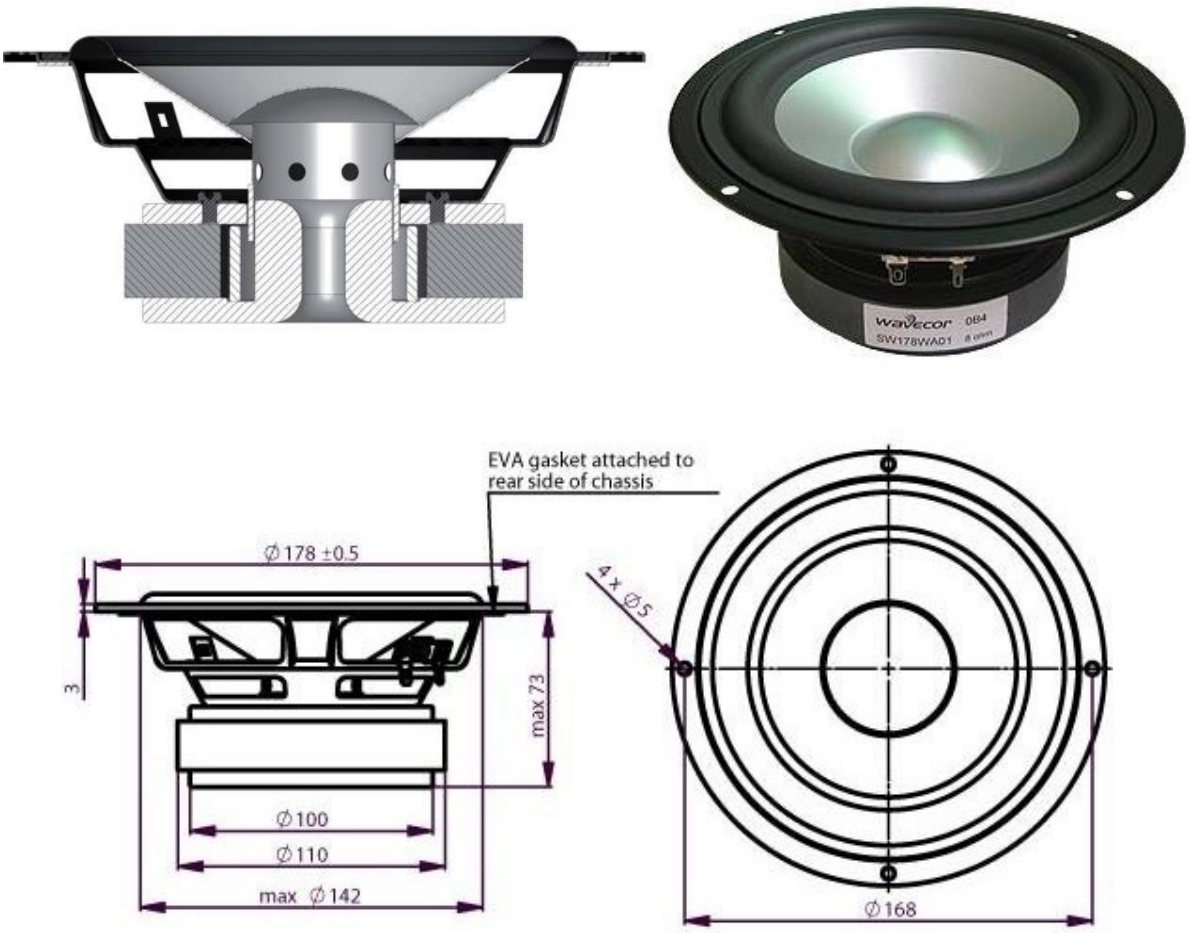


Рисунок 6. Внешний вид и основные размеры динамика «SW178WA01-01»

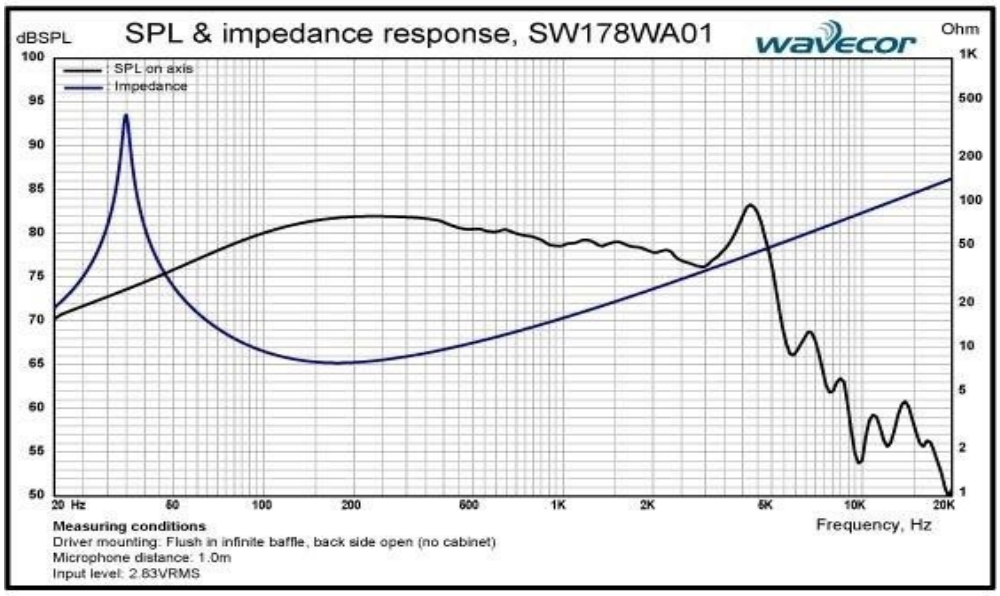


Рисунок 7. АЧХ и импедансная характеристика динамика «SW178WA01-01»

1.2.3 Громкоговоритель «Fostex FW800HS»

Динамик «FW800HS» представляет собой низкочастотный громкоговоритель японской компании Fostex с большим диаметром для воспроизведения сверхнизких частот.

Высокая жесткость диафрагмы достигнута благодаря специальной технологии производства и гибридным материалам, которые позволяют воспроизводить сверхнизкие частоты.

Внешний вид и основные размеры динамика «FW800HS» представлены на рисунке 8, а АЧХ и импедансная характеристика динамика – на рисунке 9.

Для реалистичного воспроизведения «FW800HS» содержит:

- износоустойчивые диафрагму и корпус;
- 4х-слойную звуковую катушку с высоким уровнем сигнала на входе;
- большой алюминиевый теплопоглотитель на магните;
- двойную паучковую центрирующую шайбу.

Акустические параметры «FW800HS» подобраны таким образом, что динамик имеет возможность работы с более мелким корпусом.

Основные технические параметры громкоговорителя указаны в таблице 3.

Размер	800 мм
Диаметр звуковой катушки	99,2 мм
Литой / штампованный	литой
Импеданс	8 Ом
Частотная характеристика	1,5 кГц
Уровень звукового давления	96 дБ / Вт
Номинальная мощность	150 Вт
Акустическая мощность музыкального сигнала	450 Вт
Материал магнита	феррит
Вес магнита	2,010 г

Таблица 3.Технические характеристики динамика «FW800HS»

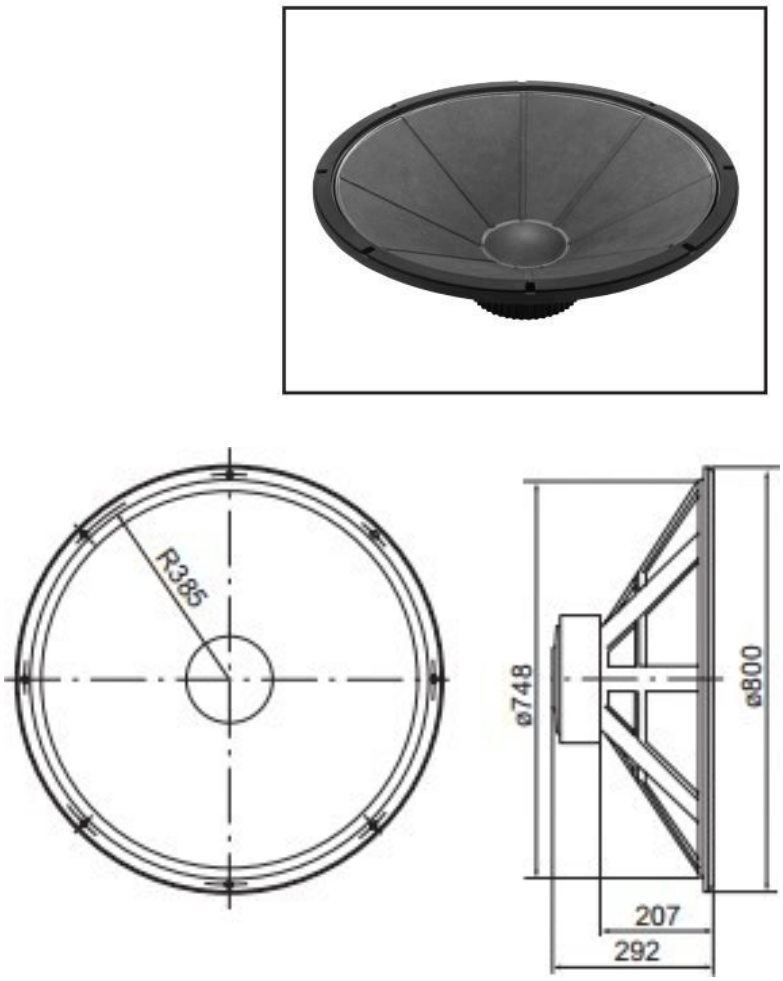


Рисунок 8.Внешний вид и основные размеры динамика «FW800HS»

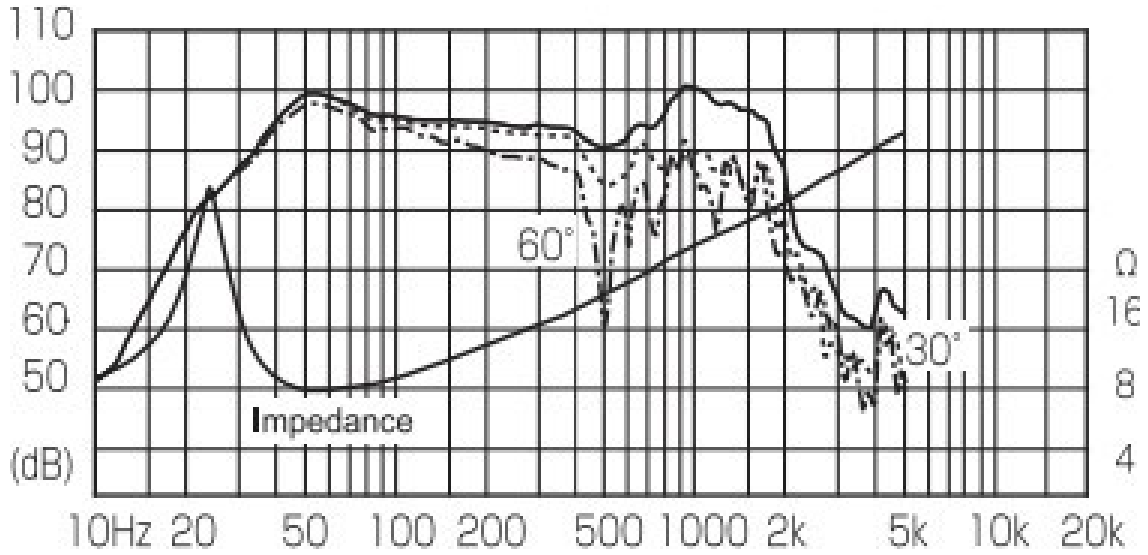


Рисунок 9. АЧХ и импедансная характеристика динамика «FW800HS»

1.2.4 Громкоговоритель « MAG M0830»

Динамик « MAG M0830» – низкочастотный динамик для компактных двухполосных и многополосных акустических систем, выпущенный компанией «Магнет» — крупнейшим в Украине производителем профессиональных динамических головок и акустических систем.

Конструктивные особенности «MAG M0830»:

- алюминиевый литой диффузородержатель с улучшенной вентиляцией звуковой катушки и малыми установочными размерами;

- съемная самоцентрирующаяся ферритовая магнитная система;

- звуковая катушка с двусторонней намоткой высокотемпературным проводом внутри и снаружи каркаса.

Характеристики динамика MAG M0830 представлены в таблице 4, а его внешний вид и АЧХ – на рисунках 10 и 11 соответственно.

Основные параметры	
Тип динамика:	НЧ динамик
Размер динамика:	200 мм
Номинальная мощность:	300 Вт
Музыкальная мощность:	600 Вт
Сопротивление R:	8 Ом
Полоса частот:	60 - 4000 Гц
Чувствительность:	94 дБ
Звуковая катушка	
Диаметр звуковой катушки:	64 мм
Материал звуковой катушки:	Алюмомедь
Материал каркаса звуковой катушки:	Стекловолокно
Высота намотки звуковой катушки:	16,3 мм
Магнитная система	
Высота магнитного зазора, h:	9 мм
Индукция в зазоре, T:	1,05 Тл
Параметры Тиля-Смолла	
Собственная резонансная частота динамика, Fs:	57,5 Гц
Сопротивление звуковой катушки по постоянному току, Re:	5,7 Ом
Минимальный импеданс, Zmin:	6,5 Ом (310 Гц)
Индуктивность звуковой катушки, Le:	0,91 мГн

Qms – добротность динамика для значения частоты Fs. Допускает только механические (неэлектромагнитные) потери:	6,3
Qes – добротность динамика для значения частоты Fs. Допускает только электромагнитные (не механические) потери или затухание колебаний:	0,315
Qts – добротность динамика для значения частоты Fs с учетом всех электромагнитных и механических потерь:	0,3
Sd – Площадь рабочей поверхности диффузора:	210 см²
Габаритные размеры	
Внешний диаметр (max):	208/255 мм
Высота:	109 мм
Вес нетто:	3,8 кг

Таблица 4. Технические характеристики динамика «MAG M0830»



Рисунок 10. Внешний вид динамика «MAG M0830»

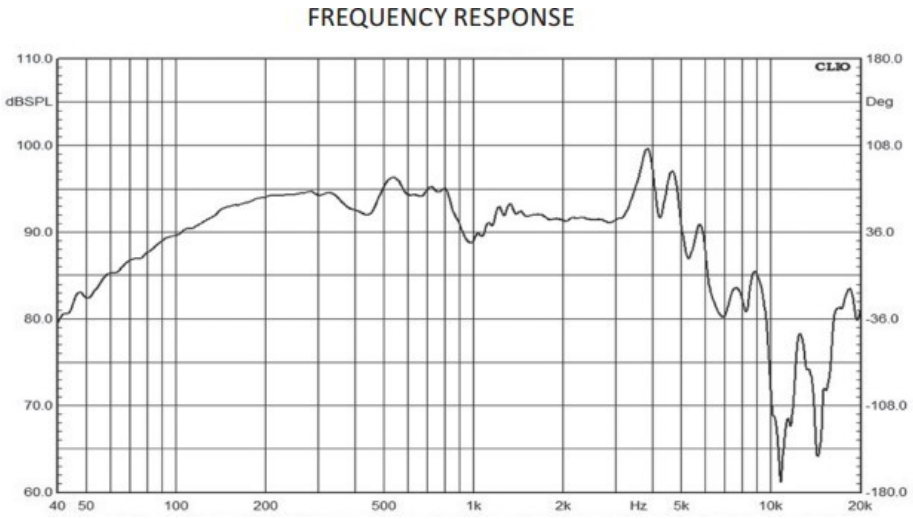


Рисунок 11. Амплитудно-частотная характеристика динамика «MAG M0830»

1.2.5 Динамик «BEYMA 12BR70»

Громкоговоритель «BEYMA 12BR70» – низкочастотный громкоговоритель, разработанный испанской компанией Acustica Beyma, для исключительного воспроизведения низких частот, с высокой чувствительностью и низким искажением. Он состоит из криволинейного диффузора, каучукового подвеса, чтобы обеспечить стабильность приостановки и позволять максимальную линейность отклонения. Комбинируя мощную магнитную конструкцию с алюминиевой рамой, динамик 12 BR70 достигает высокой мощности, и следовательно, способствуют уменьшению теплового сжатия.

Технические характеристики профессионального динамика «Beyma 12BR70» представлены в таблице 5, внешний вид и основные размеры – на рисунке 12, АЧХ и импедансная характеристика – на рисунке 13.

Резонансная частота "Fs"	31 Гц
Сопротивление звуковой катушки "Re"	5.6 Ом
Механическая добротность "Qms"	4.44
Электрическая добротность "Qes"	0.56
Полная добротность "Qts"	0.5
Площадь диффузора "Sd"	0.054 $м^2$
Эквивалентный объём "Vas"	142 л
Максимальный линейный ход "Xmax"	8 мм
Индуктивность звуковой катушки "Le"	0,85 мГн
Масса подвижной системы "Mms"	0.074 кг
Форс фактор "Bl"	12.1 Тл*м

Таблица 5.Технические характеристики динамика «Beyma 12BR70»

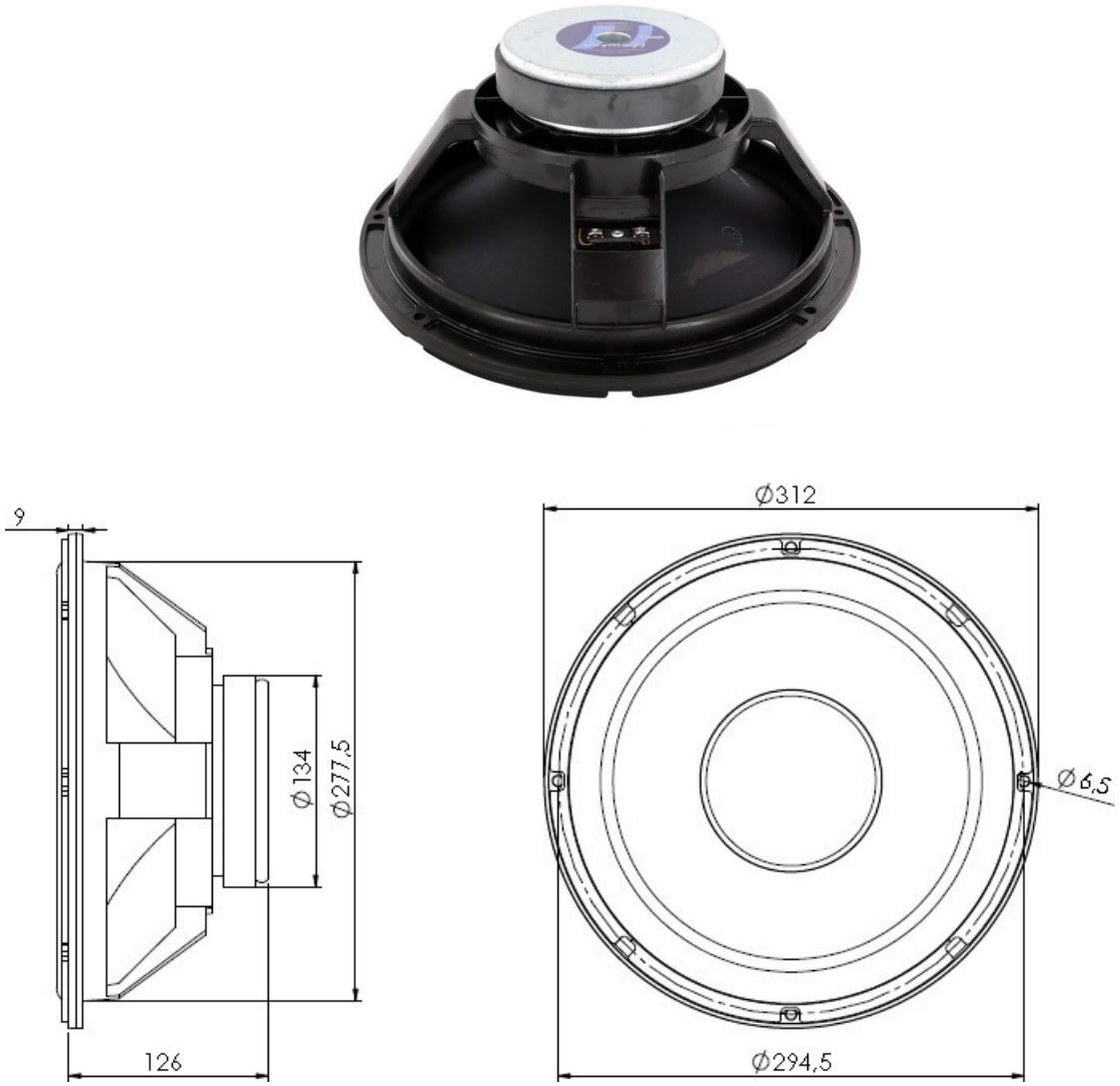


Рисунок 12. Внешний вид и основные размеры характеристика динамика «Beyma 12BR70»

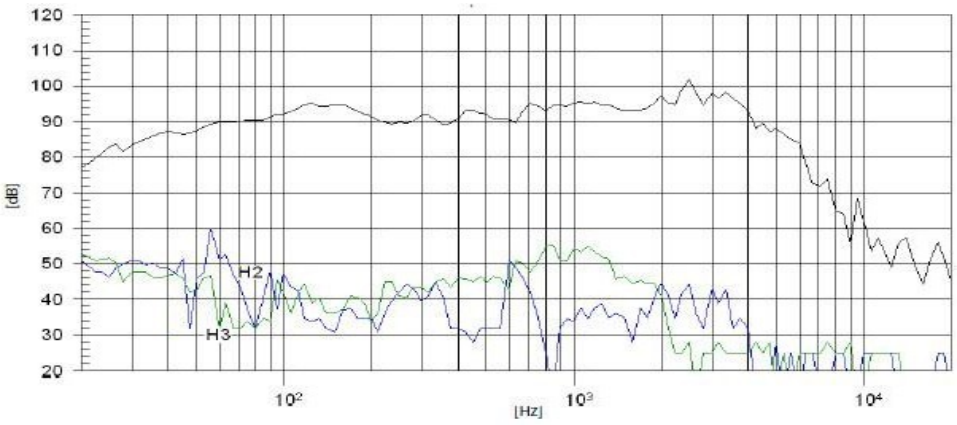


Рисунок 13. АЧХ и импедансная характеристика динамика «Beyma 12BR70»

1.2.6 Динамическая головка «НОЭМА 600ГДН14-8»

Громкоговоритель «600ГДН14-8» – профессиональная динамическая головка с длинным ходом. Она является детищем ЗАО "НОЭМА" – одного из старейших российских предприятий, основанного в 1929 году в г. Новосибирске.

Со дня основания его профильным направлением является звукомузыкальное.

«600 ГДН14» – сабвуферный динамик, мощностью 600 Вт, длиной катушки 24мм. Динамическая головка способна передавать глубину и прозрачность низких частот, естественность звуков природы, концертной музыки и современных спецэффектов.

Технические характеристики динамика «600 ГДН14» представлены в таблице 6, его внешний вид и размеры – на рисунке 14, его АЧХ – на рисунке 15.



Рисунок 14 .Внешний вид и основные размеры динамика «600 ГДН14»

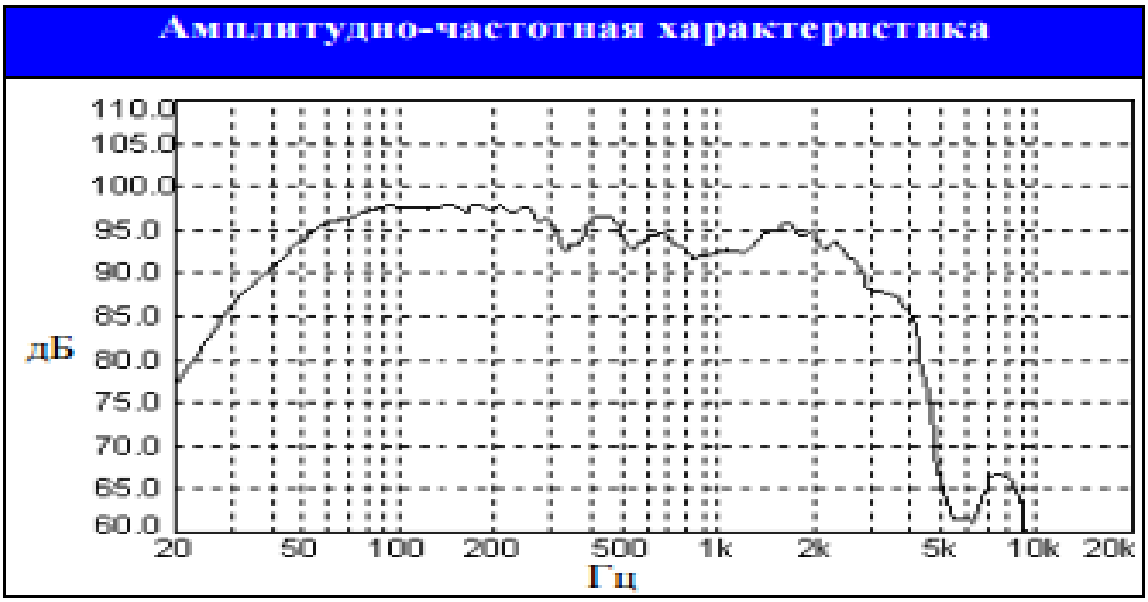


Рисунок 15. Амплитудно-частотная характеристика динамика «600 ГДН14»

Номинальный диаметр	18" (460 мм)
Номинальное сопротивление	8 Ом
Характеристическая чувствительность	98 дБ/Вт/м
Эффективно воспроизводимый диапазон частот	30 – 1500 Гц
Предельная шумовая мощность	600 Вт
Диаметр звуковой катушки	100 мм
Материал провода звуковой катушки	медь
Форма сечения звуковой катушки	круг
Количество слоев звуковой катушки	2
Каркас звуковой катушки	полиимид
Ширина намотки звуковой катушки (L)	25 мм
Высота верхнего фланца (H)	12 мм
Кольцевой магнит	220:110:22 мм
Индукция в зазоре	1,1 Тл
Объем вытесняемый динамической головкой	7 л
Материал диффузора	Композиционная целлюлоза
Форма/материал подвеса	Синусоид. 3-х-волновая/ткань х/б
Форма/материал центрирующей шайбы	Коробчатая/ткань NOMEX
Материал диффузодержателя	Алюминий (литье)
Параметры Тиля-Смолла	
Собственная резонансная частота динамика (Fs)	30 Гц
Сопротивление звуковой катушки по постоянному току (Re)	5,8 Ом

Добротность динамика для значения частоты Fs с учетом всех электромагнитных и механических потерь (Qts)	0,37
Добротность динамика для значения частоты Fs. Допускает только электромагнитные (немеханические) потери или затухания колебаний (Qes)	0,40
Добротность динамика для значения частоты Fs. Допускает только механические (неэлектромагнитные) потери (Qms)	5,84
Объем воздуха, имеющий упругость, эквивалентный упругости подвеса динамика (Vas)	327 л
Мощность электропривода динамика (BL)	21.6 Тл*м
Механическая масса диффузора с учетом аэродинамической нагрузки (Mms)	178 г
Гибкость подвеса подвижной системы динамика (Cms)	0.16 мм/Н
Индуктивность звуковой катушки (Le)	2 мГн
Максимальная пиковая линейная амплитуда колебаний звуковой катушки динамика (Xmas)	± 9 мм

Таблица 6.Технические характеристики динамика «600 ГДН14»

В таблице 7 представим сравнительную характеристику всех рассмотренных систем по основным критериям.

Название системы	Диаметр, мм	Мощность, Вт	Собственная резонансная частота, Гц	Добротность динамика, Qts	Индуктивность звуковой катушки, мГн
Visaton B 200/6	282	40	40	0,75	0,5
SW178WA01-01	180	100	108	0,55	0,018
FW800HS	400	150	25	0,69	0,163
MAG M0830	200	300	57,5	0,3	0,1
Beyma 12BR70	304	620	31	0,5	0,85
600 ГДН14	460	600	30	0,37	2

Таблица 7. Сравнительная характеристика рассмотренных систем

1.3 Выводы

Таким образом, в рамках главы изучены понятие и сущность акустических систем, определены основные характеристики громкоговорителей, проведен обзор и сравнительный анализ низкочастотных акустических систем.

Глава 2. Исследования динамических процессов в акустическом динамике

2.1 Нелинейные искажения в акустических системах

Основными причинами возникновения всех видов искажений являются нелинейные колебательные процессы в элементах подвижной системы (колпачках, шайбах, подвесах, диафрагмах и т.д.) и в узле «звуковая катушка – магнитная цепь». Искажения в этом узле возникают в процессе электромеханического преобразования энергии. Известно, что механическая сила F, действующая со стороны звуковой катушки, связана с током I, протекающим через нее, следующим соотношением:

$$F = BlI,$$

Где B – индукция в зазоре магнитной цепи;

l – длина проводника;

I – сила тока в звуковой катушке.

Связь силы тока с приложенным к громкоговорителю напряжением U описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$U = RI + \frac{LdI}{dl} + \frac{BIdw}{dl},$$

где R – сумма активных сопротивлений катушки и выходного сопротивления усилителя;

L – индуктивность звуковой катушки;

ω - смещение звуковой катушки.

Нелинейные искажения, возникающие в процессе электромеханического преобразования в громкоговорителях, обусловлены нелинейной зависимостью силы F от приложенного электрического напряжения U. Характер этой зависимости определяется тем, что магнитная индукция B в зазоре распределена неравномерно и несимметрично (рисунок 16). При смещении звуковой катушки вверх и вниз меняется плотность магнитного потока и соответственно величина F оказывается нелинейной функцией смещения.

В данной квалификационной работе была предпринята попытка смоделировать вышеописанные процессы с целью исследования звуковых искажений, неизбежно вызываемых ими.

В настоящее время существуют и развиваются методики численного расчета на ЭВМ распределения магнитных полей в различных конструкциях магнитных цепей и обусловленных этим нелинейных искажений. Такие методики дают возможность рассчитать влияние конфигурации магнитной цепи на распределение магнитной индукции *B* в ней и оценить коэффициент нелинейных искажений (КНИ), обусловленных этим распределением. Расчеты показывают, что несимметричность распределения магнитной индукции *B* в зазоре влияет на величину второй гармоники, а неоднородность — третьей. С целью симметризации распределения магнитной индукции *B* в зазоре в современных конструкциях громкоговорителей используют специальные конфигурации кернов и фланцев, принимают меры по оптимизации высоты намотки звуковых катушек и т. д. В Низкочастотных громкоговорителях обычно используют высоту намотки, примерно в 2-3 раза превышающую высоту зазора, что также позволяет уменьшить КНИ, обусловленный несимметричностью и неоднородностью распределения магнитной индукции.

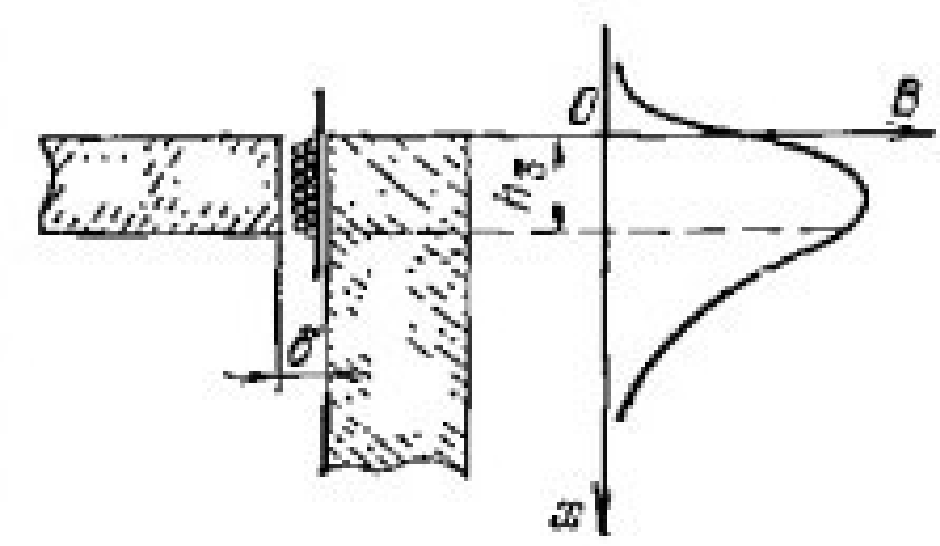


Рисунок 16.Распределение магнитной индукции в зазоре сердечника

2.2 Метод электромеханических аналогий

В области низких частот, где размеры громкоговорителей и акустических систем существенно меньше длины звуковой волны в воздухе (например, для частоты f = 50 Гц длина волны λ = 6,8 м), для анализа процессов преобразования сигнала в громкоговорителях и акустических системах используется метод электромеханических аналогий.

Несмотря на то, что идея этого метода была предложена в 30-е годы, теория его постоянно совершенствуется, разрабатываются прикладные приложения для расчета и проектирования электроакустических преобразователей (громкоговорителей, микрофонов, телефонов и т. д.) и акустических систем (теория Small-Thiele). На базе этого метода созданы различные компьютерные программы, широко применяемые в проектировании акустической аппаратуры.

В основе метода лежит сходство уравнений колебаний механических систем и электрических цепей, позволяющее установить соответствие между элементами электрической цепи и параметрами механической системы, если она может быть представлена системой с сосредоточенными параметрами, то есть с конечным числом степеней свободы. Поскольку электродинамический громкоговоритель представляет собой электро-механо-акустический преобразователь, можно считать, что в области низких частот он содержит три типа сосредоточенных элементов: акустические, механические, электрические. Поэтому для анализа его работы могут использоваться эквивалентные акустические, механические или электрические схемы, представляющие во всех случаях электрические цепи, элементы которых соответствуют определенному типу элементов громкоговорителя (они могут с помощью соответствующих коэффициентов переводиться друг в друга).

Можно составить следующую систему взаимных аналогов, представленную в таблице 8.

Механические параметры	Единицы измерения	Электрические аналоги	Единицы измерения
сила F	Н	э. д. с. (напряжение U)	В
скорость υ	м/с	сила тока I	А
смещение ξ	м	заряд q	Кл
масса m	кг	индуктивность L	Гн
гибкость Cm	м/Н	емкость C	Ф
коэффициент трения r	кг/с	активное сопротивление R	Ом
инерционное сопротивление ωm	кг/с	индуктивное сопротивление ωL	Ом
упругое сопротивление $\frac{1}{\omega Cm}$	кг/с	емкостное сопротивление $\frac{1}{\omega C}$	Ом
механический импеданс z	кг/с	электрический импеданс Z	Ом

Таблица 8.Пример системы взаимных механических и электрических аналогов.

Метод электромеханических аналогий широко используется при анализе различных механических систем, так как электромеханические аналогии отражают физическое соответствие процессов в механической системе и эквивалентной ей электрической цепи. Например, инерция массы препятствует мгновенному изменению скорости при воздействии (прекращении) силы, равно как индуктивность препятствует мгновенному изменению тока при включении (выключении) источника э. д. с. Подобно тому, как часть колебательной электрической энергии безвозвратно расходуется (превращается в тепловую энергию) на активном сопротивлении цепи, в механической системе благодаря трению часть энергии механических колебаний превращается в тепло.

В случаях сложных механических систем с произвольным числом степеней свободы схема аналогий имеет столько же замкнутых электрических контуров, сколько и степеней свободы; при этом элементы, содержащиеся в двух соседних замкнутых цепях, следует рассматривать как элементы связи.

2.3 Обобщенная эквивалентная электрическая модель акустической системы (упрощенная)

Для исследования влияния различных параметров на основные свойства звуковоспроизводящего устройства необходимо представить электромеханическое устройство в виде эквивалентной электрической схемы.

Обобщенная эквивалентная схема электроакустического преобразователя в упрощенном варианте строится в виде четырехполюсника с электрическим входом и механическим выходом (рисунок 17) . Четырехполюсник аналогичен трансформатору с коэффициентом трансформации 1:$B_e l_n$, где $B_e l_n$ – коэффициент электромеханической связи.

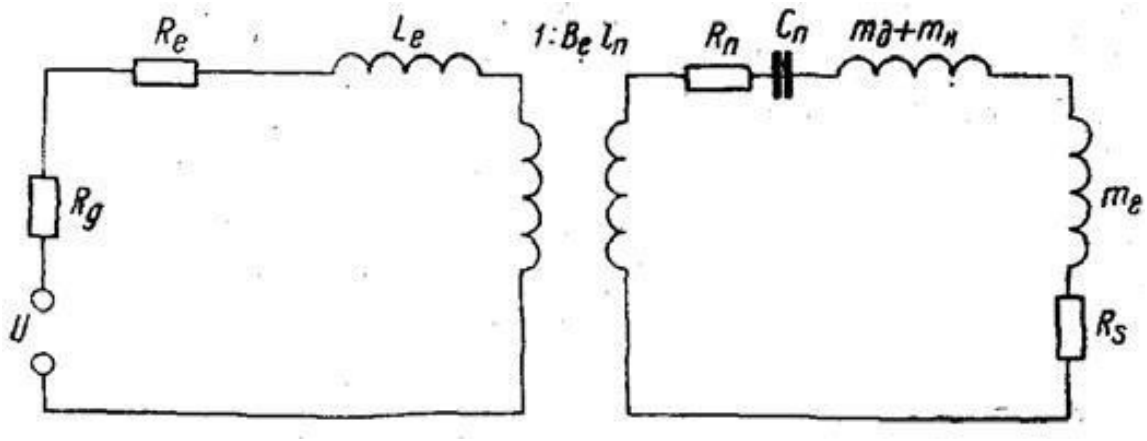


Рисунок 17. Общий вид схемы замещения электроакустического преобразователя

Первая часть схемы, изображенной на рис.17, эквивалентна электрической части звуковоспроизводящего устройства, а вторая часть – механической. Электрическая часть эквивалентной схемы содержит генератор электрического напряжения U с внутренним сопротивлением R_g и звуковую катушку с сопротивлением R_e и индуктивностью L_e.

Механическая часть содержит сопротивление механических потерь R_n, сопротивление излучения R_s, гибкость подвесов подвижной системы C_n, массу

подвижной системы m, состоящую из статической массы диффузора $m_д$, массы звуковой катушки $m_к$ и соколеблющейся массы воздуха $m_е$.

Частотная характеристика по звуковому давлению (рисунок 18) для схемы замещения, изображенной на рисунке 17, представляет собой зависимость звукового давления p, развиваемого звуковоспроизводящим устройством, от частоты в точке, находящейся на фиксированном расстоянии от устройства по его оси.

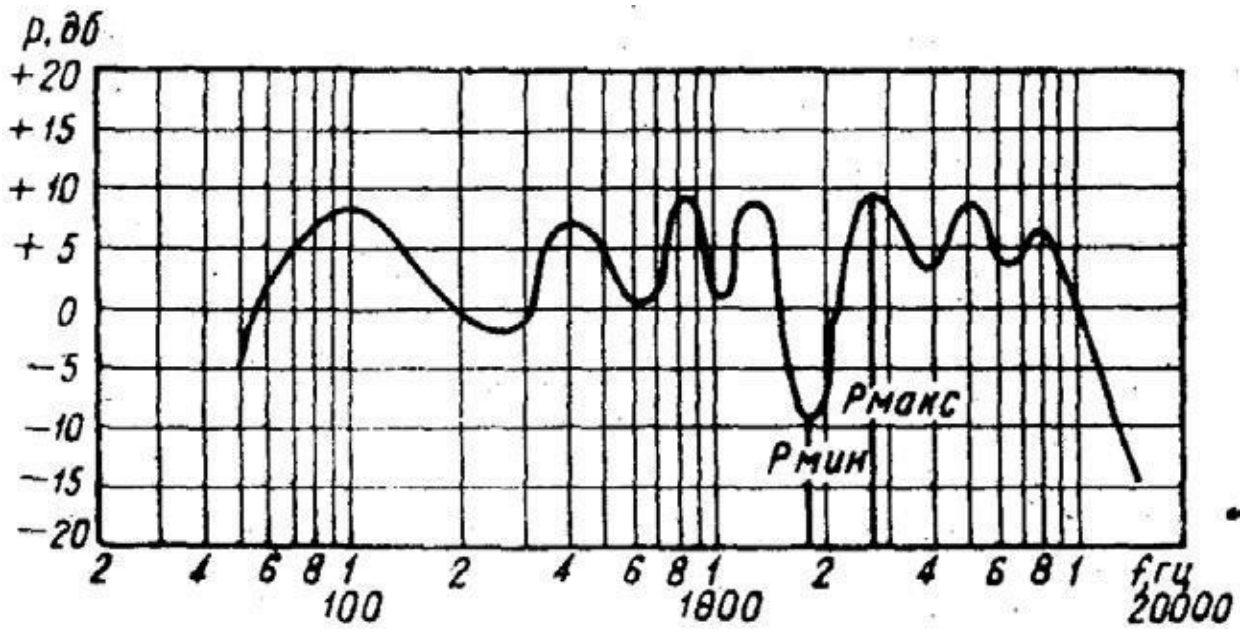


Рисунок 18.Реальная частотная характеристика по звуковому давлению.

По оси ординат откладывается уровень звукового давления p в децибелах, а по оси абсцисс - в логарифмическом масштабе частота в герцах. Частотные характеристики можно снимать при любой подводимой к громкоговорителю мощности. Но для сравнения различных громкоговорителей частотную характеристику условились снимать при напряжении, соответствующем мощности 0,1 ват, на частоте 1000 Гц; давление измеряют на расстоянии 1 м от громкоговорителя или приводят к 1 м при измерениях на других расстояниях. Эту величину принято называть стандартным звуковым давлением $p_{ст}$.

Неравномерность N частотной характеристики представляет собой отношение максимального звукового давления к минимальному и выражается в децибелах, т. е.

$$N = 20 \lg \frac{p_{\max}}{p_{\min}} [\,Дб]$$

Схема замещения идеального звуковоспроизводящего устройства должна иметь частотную характеристику, параллельную оси абсцисс. На практике удается получить только характеристику, близкую к идеальной. Такая частотная характеристика приведена на рисунке 19.

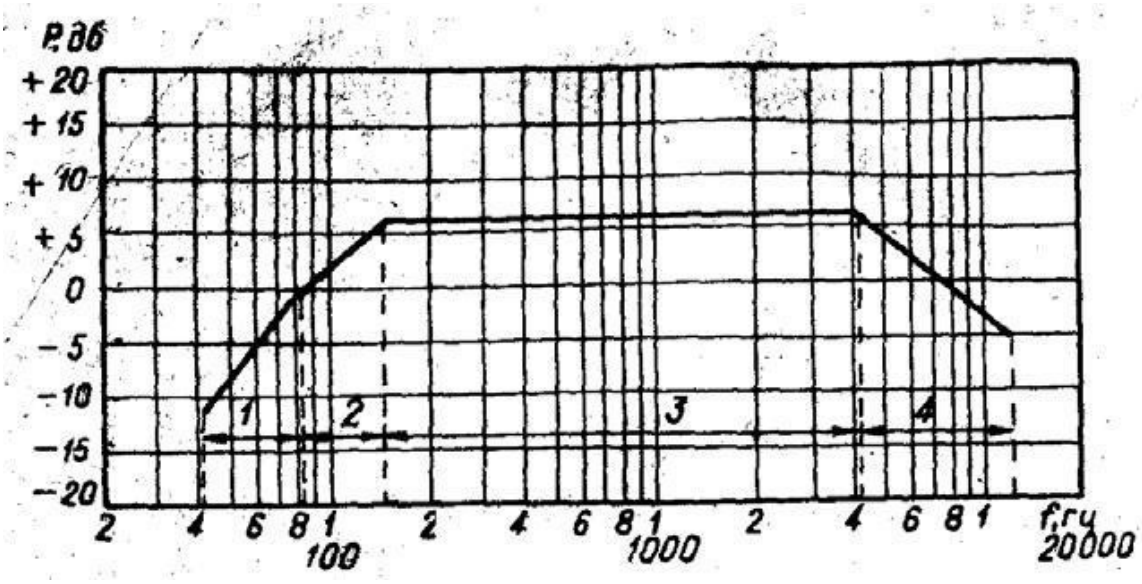


Рисунок 19. Идеальная частотная характеристика
по звуковому давлению

Частотным характеристикам присущи два вида искажений [5]:

а) ограничение полосы частот;

б) пики и провалы внутри воспроизводимого диапазона частот.

Для звуковоспроизводящей аппаратуры установлено четыре класса качества воспроизведения . Частотные диапазоны для этих классов приведены в таблице 9.

Класс качества	Диапазон частот, Гц
Высший	30-20000
Первый	50-10000
Второй	80-7000
Третий	150-4000

Таблица 9.Частотные диапазоны для разных классов качества воспроизведения звука

Исследования показали также допустимость применения для достаточно разборчивого воспроизведения с речи суженного частотного диапазона: 300÷500 Гц – 3000÷4000 Гц [5]. При ограниченном диапазоне частот наилучшее качество звучания достигается, когда частотная характеристика имеет П-образную или седлообразную (рисунок 20) форму с завалом на краях диапазона 18-24 дБ на октаву и с провалом в середине не более 8 дБ. При этом наибольшая верность воспроизведения получается, если произведение граничных частот диапазона находится в пределах 500 000-650 000 Гц^2 [5].

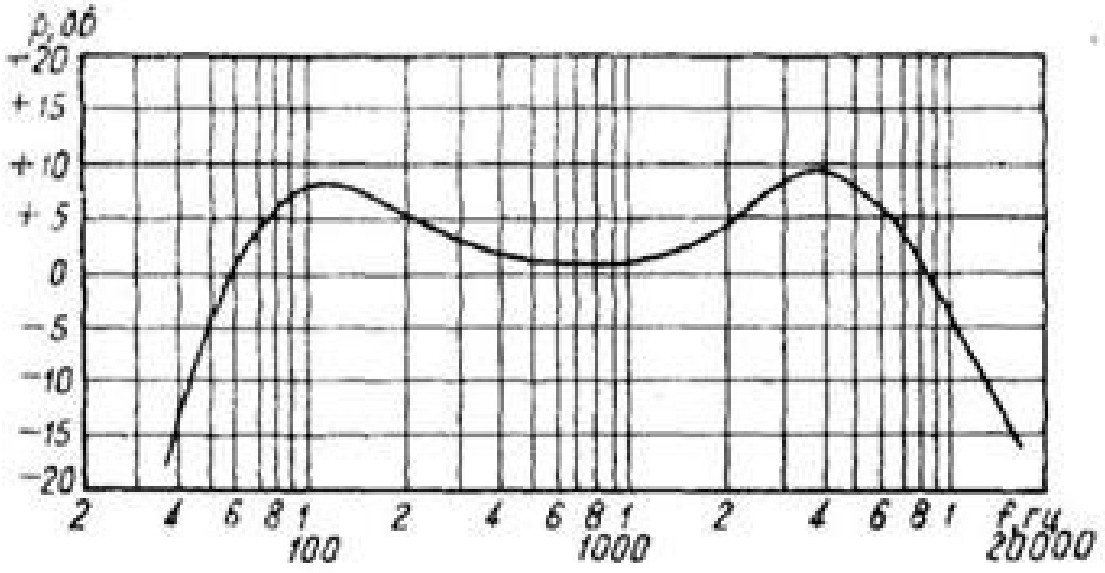


Рисунок 20. Предпочтительная форма частотной характеристики

Уменьшения частотных искажений, в особенности расширения полосы воспроизведения, можно достичь изменением параметров схемы замещения и, как следствие, изменением конструктивных или электрических параметров звуковоспроизводящего устройства, что в конечном итоге приводит к повышению качества звука. Исследование влияния изменения параметров звуковоспроизводящего устройства на уменьшение частотных искажений и есть главная цель настоящего исследования.

2.4 Полная обобщенная эквивалентная электрическая модель низкочастотного громкоговорителя

Для построения схемы, более соответствующей реальному громкоговорителю, необходимо включить в нее элементы, учитывающие дополнительные электрические и механические параметры.

В полном обобщенном виде эквивалентная электрическая модель акустической системы представлена на рисунке 21.

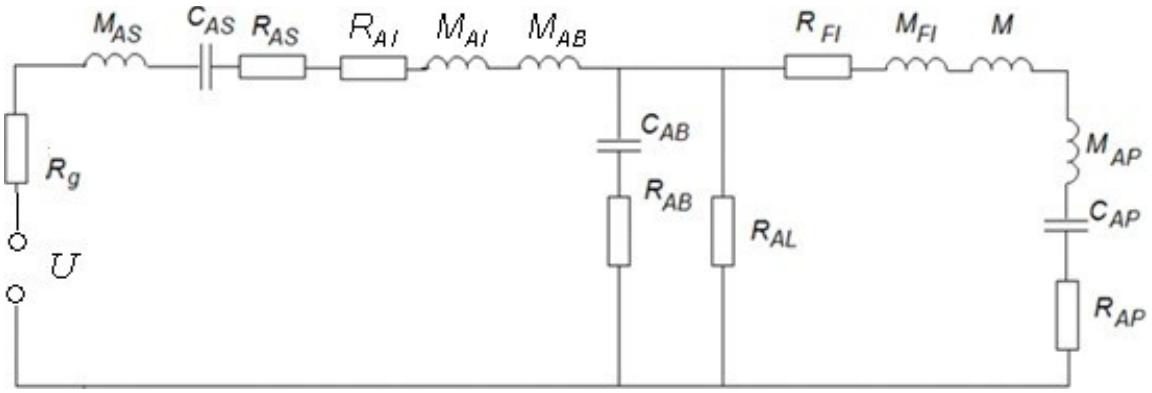


Рисунок 21. Полная обобщенная эквивалентная электрическая модель низкочастотного громкоговорителя

Схема содержит следующие элементы:

U – источник э.д.с;

Rg – выходное сопротивление источника э.д.с;

C_{AS} – акустическая гибкость подвесов подвижной системы;

M_{AS} – акустическая масса подвижной системы;

R_{AS} – акустическое сопротивление подвижной системы, характеризующее активные потери в подвесах;

R_{AI} – акустическое активное сопротивление излучения передней стороны диффузора;

M_{AI} – акустическая присоединенная масса воздуха, соколеблющегося с фронтальной частью подвижной системы;

M_{AB} – акустическая присоединенная масса с тыльной стороны диффузора;

C_{AB} – акустическая гибкость воздуха в корпусе;

R_{AB} – акустическое активное сопротивление корпуса, характеризующее потери за счет поглощения звука на стенках и в объеме корпуса;

R_{AL}, – акустическое сопротивление активных потерь за счет трения при колебаниях воздуха в отверстиях и щелях ящика;

R_{FI} – активная составляющая сопротивления излучения отверстия фазоинвертора или диафрагмы пассивного излучателя;

M_{FI} – реактивная составляющая сопротивления излучения отверстия фазоинвертора или диафрагмы пассивного излучателя;

M – масса воздуха, колеблющаяся одновременно с тыловой поверхностью диафрагмы пассивного излучателя;

M_{AP} – акустическая масса пассивного излучателя или воздуха в трубе фазоинвертора;

C_{AP} – акустическая гибкость подвеса пассивного излучателя;

R_{AP} – акустическое сопротивление, представляющее потери на трение при колебаниях воздуха в фазоинверсной трубе или подвесе пассивного излучателя.

2.5 Выбор программной среды для компьютерного моделирования

На данный момент разработано и функционирует большое количество компьютерных программ для моделирования и разработки электронных устройств акустических систем.

Наиболее распространенными считаются:

- NI Multisim;
- Proteus;
- OrCAD;
- Micro-Cap;
- LTSpice

Для моделирования эквивалентной схемы громкоговорителя была выбрана программа «Multisim 7», поскольку она обладает следующими характеристиками:

- использование компьютерных методов разработки;
- быстрое выполнение сложных и объемных работ;
- может применяться на предприятиях, в высших учебных заведениях, в домашних условиях (быту);
- высокая точность и глубокий анализ данных;
- применяется как замена дорогостоящего оборудования;
- содержит в себе большое количество моделей электронных устройств;
- программа проста в обращении и не требует глубоких знаний в компьютерной технике;
- имеет интуитивно понятный интерфейс;
- может работать с большим числом компьютерной периферии и имитировать ее работу;

«Multisim 7» - это компьютерная программа от разработчика National Instruments, предназначенная для моделирования и анализа работы электрических схем.

Особенностью данной программы является возможность использования контрольно-измерительных приборов, которые по своему виду и внутренним характеристикам приближены к их реально существующим аналогам. Программа проста в изучении и практична в работе.

2.6 Исследование линейной модели звуковоспроизводящего устройства

Анализ динамических процессов в схеме замещения удобно производить с помощью программной среды визуального программирования «Multisim 7». Эта среда позволяет моделировать разнообразные схемы и электрические цепи. На рисунке 22 представлена адекватная схема, включающая все основные элементы схемы замещения. Она позволяет производить анализ динамических процессов,

происходящих в звуковоспроизводящем устройстве. Представленный вариант схемы является линейной моделью и может быть использован только для предварительной оценки свойств реального устройства системы.

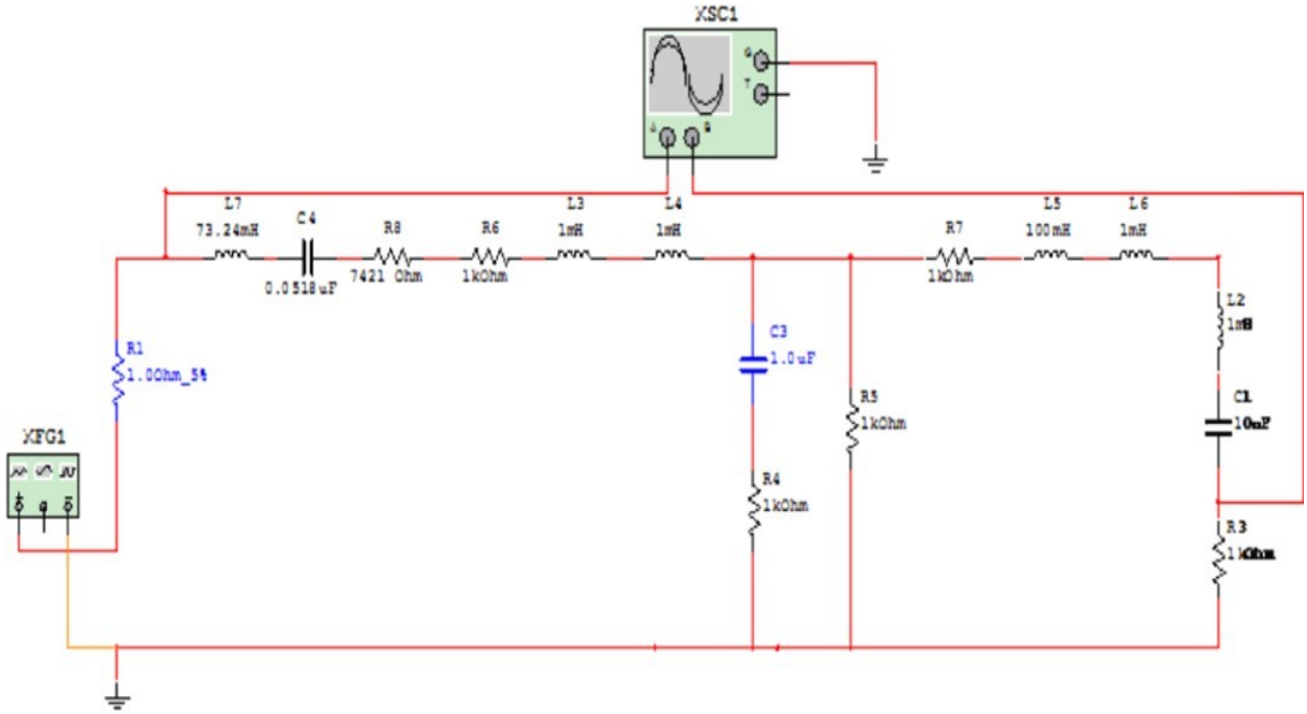
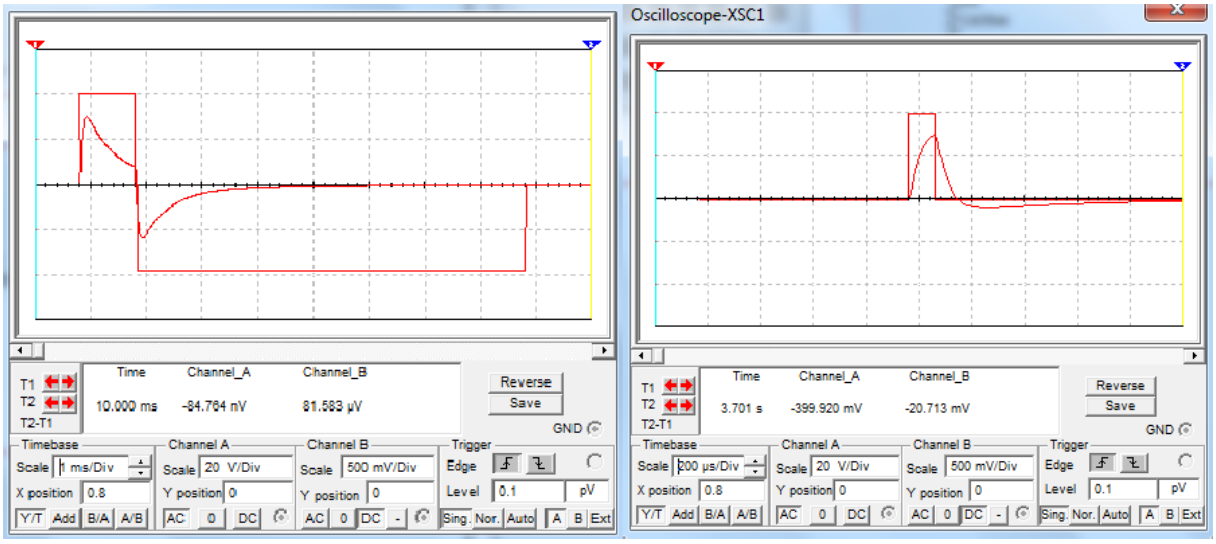


Рисунок 22. Линейная схема замещения механоакустической системы

На рисунке 23 приводятся осциллограммы импульсных характеристик, т.е. реакция схемы замещения на воздействие единичного прямоугольного импульса напряжения на входе цепи. На рисунке 23,а импульсная характеристика снята при частоте среза 10 Гц, а на рисунке 23,б – при частоте среза 100 Гц. Как видно из рисунка 23, искажения импульсной характеристики в районе частоты среза весьма заметны.



а) б)

Рисунок 23. Импульсная характеристика схемы замещения

Как видно из осциллограммы, импульсная характеристика отличается от воздействия, как по амплитуде, так и по форме импульса. Это говорит об искажениях сигналов при прохождении через звуковоспроизводящее устройство. Как следствие, это определяет серьезные искажения звука на выходе системы. Для того, чтобы звук воспроизводился без искажений, необходимо, чтобы отклик на импульс был максимально приближен к самому импульсу.

Об искажениях импульса при прохождении через линейную цепь можно судить по частотной характеристике. Уменьшение амплитуды импульса делает участок 4 частотной характеристики более пологим, а приближение формы выходного импульса к форме входного сигнала изменяет участки 1 и 2.

В полосе пропускания, которая для выбранных параметров схемы замещения располагается в диапазоне от 10 до 100 Гц, искажения импульсной характеристики будут минимальны (рисунок 24).

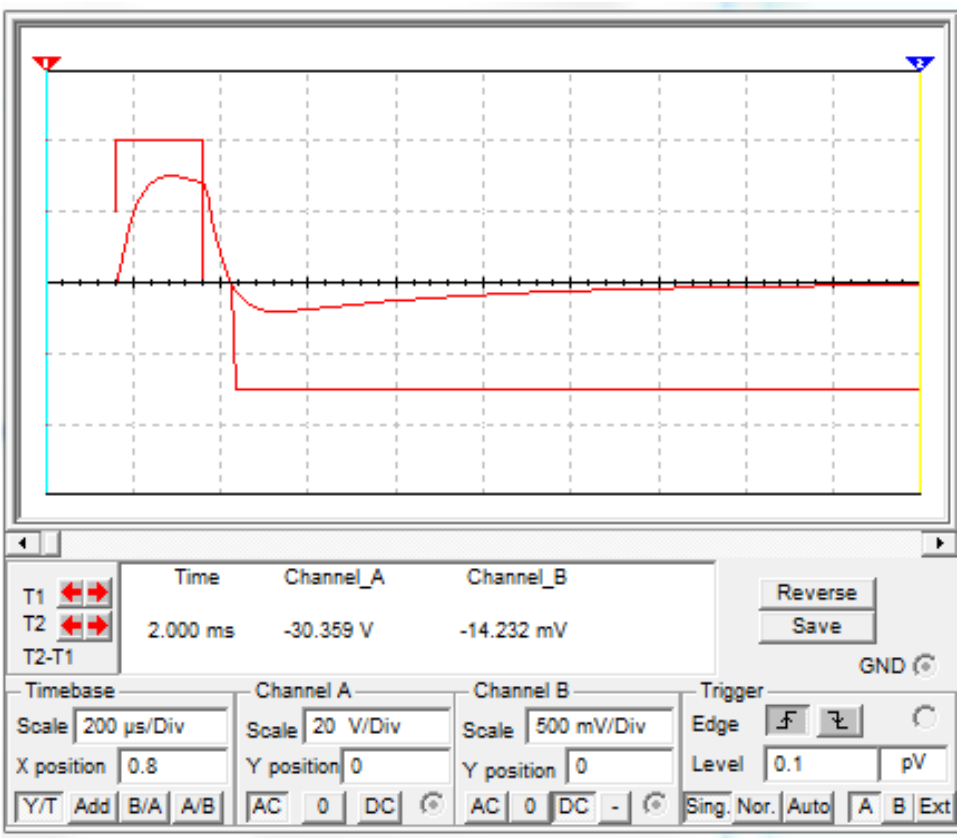


Рисунок 24. Импульсная характеристика в полосе пропускания при частоте 50 Гц

Уменьшение частотных искажений, в особенности расширение полосы пропускания, можно достичь изменением параметров схемы замещения и, как следствие, изменением конструктивных или электрических параметров звуковоспроизводящего устройства.

Промежуточные результаты проведенного исследования:

1) Изменение формы импульсной характеристики в результате изменения акустической гибкости подвесов подвижной системы.

При значении емкости конденсатора C_{AS}, имитирующего акустическую гибкость подвесов системы, равном 1 нФ, искажения сигнала на выходе системы будут весьма значительны (кривая 1 на рисунке 3.10). При увеличении акустической гибкости системы (C_{AS} =10 нФ) форма кривой выходного сигнала значительно улучшается, приближаясь к прямоугольной. Это влечет за собой улучшение качества воспроизведения звуков звуковой системой (кривая 2 на рисунке 25).

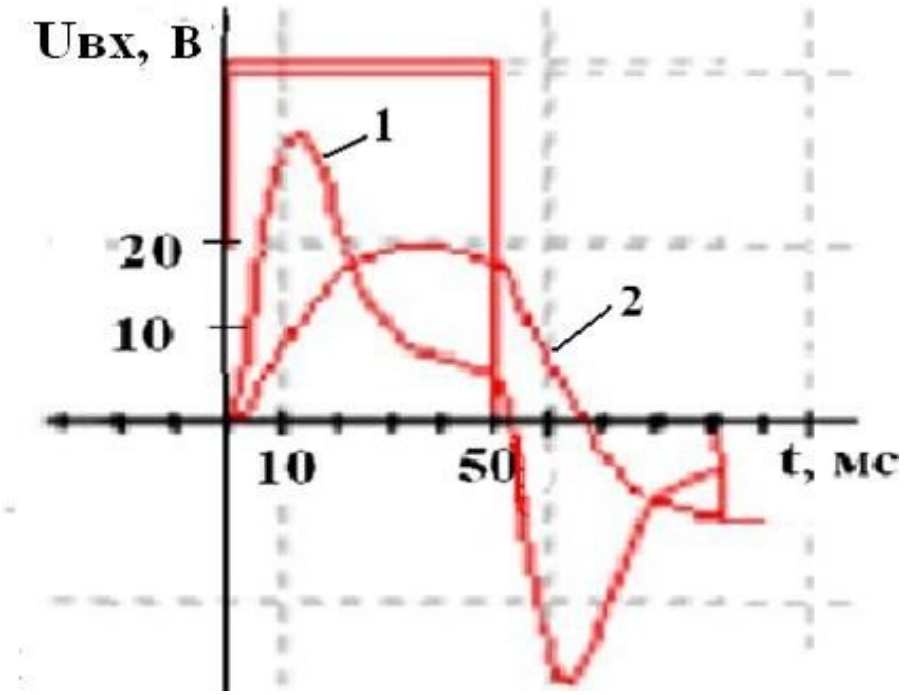


Рисунок 25. Изменение формы импульсной характеристики в результате изменения акустической гибкости

При дальнейшем увеличении величины емкости C_{AS} в схеме замещения форма кривой выходного сигнала резко ухудшается и звук на выходе звуковоспроизводящего устройства заметно ухудшается.

2) Изменение формы импульсной характеристики при изменении акустической массы подвижной системы.

В схеме замещения звуковоспроизводящего устройства, приведенной на рисунке 3.6, акустическая масса подвижной системы имитируется с помощью дросселя M_{AS}, включенного в цепь источника.

Если величина индуктивности дросселя M_{AS} составляет порядка 10 мГн (кривая 1 на рисунке 26), то искажения переднего и заднего фронта импульсной характеристики имеют ярко выраженный экспоненциальный характер. При значении индуктивности дросселя M_{AS} порядка 1 Гн происходит резкое сглаживание фронтов импульсной характеристики (кривая 2 на рисунке 26), что приводит в

конечном итоге к существенному искажению формы выходного импульса и, как следствие, к искажению звука.

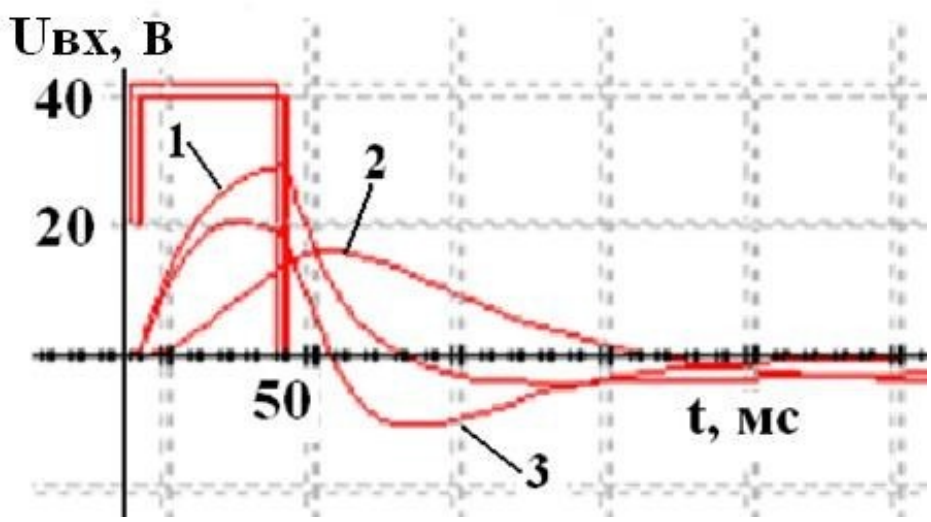


Рисунок 26. Изменение формы импульсной характеристики в результате изменения акустической массы подвижной системы

Для получения импульсной характеристики с наименьшими искажениями необходимо, чтобы значение индуктивности дросселя M_{AS} составляло 30 мГн (кривая 3 на рисунке 26). Как видно из рисунка 26, при этом значении индуктивности форма импульса наиболее приближена к прямоугольной, что свидетельствует о минимальных искажениях звука.

3) Изменение формы импульсной характеристики в результате изменения реактивной составляющей сопротивления диафрагмы пассивного излучателя.

Реактивная составляющая сопротивления диафрагмы пассивного излучателя имитируется посредством включения последовательно с нагрузкой индуктивности M_{FI}. При больших значениях этой индуктивности происходит демпфирующее воздействие на выходной сигнал, что приводит к заметному сглаживанию фронтов выходного импульса по экспоненциальному закону.

При уменьшении значения M_{FI} до нескольких миллигенри форма выходного импульса максимально приближается к идеальной (рисунок 27).

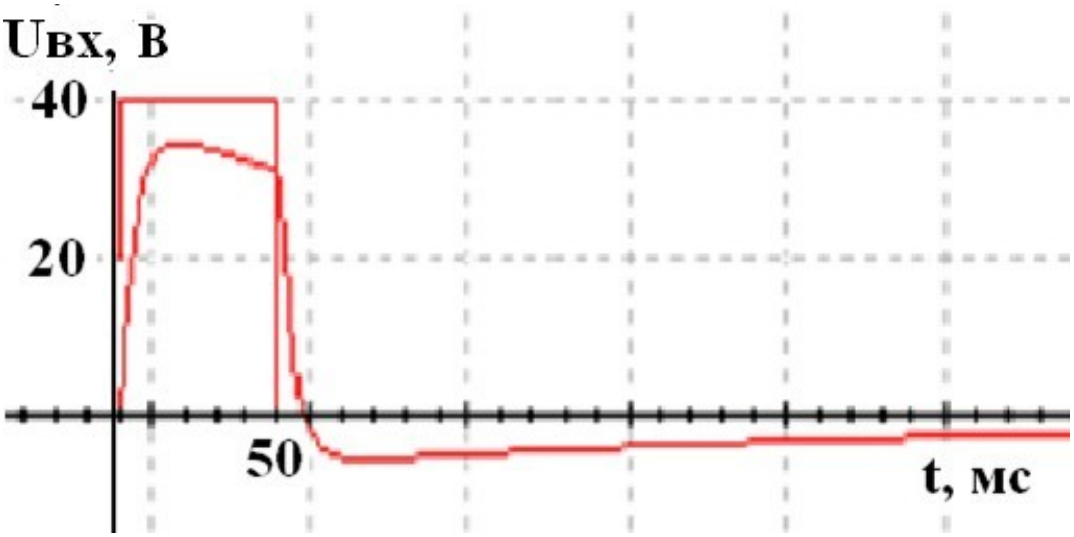


Рисунок 27. Форма выходного импульса при значении M_{FI} в несколько миллигенри

2.7 Выводы

В результате промежуточного этапа исследований можно сделать предварительный вывод, что наибольшее влияние на искажение выходного импульса оказывает реактивная составляющая сопротивления диафрагмы пассивного излучателя. Для получения высокого качества звука эту составляющую следует уменьшать.

Глава 3. Постановка задачи исследования

1 Наименование и область применения

Низкочастотный громкоговоритель, предназначенный для кинотеатральной аудиосистемы.

2 Основание для разработки

Задание по подготовке выпускной квалификационной работы, утвержденное кафедрой киновидеоаппаратуры.

3 Цель и назначение разработки

Целью разработки является исследование нелинейных процессов динамической головки с целью выявления влияния параметров системы на качество звуковоспроизведения.

В выпускной квалификационной работе предполагается выполнить:

1) обзор существующих моделей звуковоспроизводящих устройств,

2) выбор прикладной компьютерной программы для моделирования нелинейных процессов в звуковоспроизводящем устройстве,

3) построение нелинейной модели звуковоспроизводящего устройства для проведения исследований искажений импульсных звуковых сигналов,

4) исследование нелинейных искажений импульсных сигналов при прохождении через магнитную систему звуковоспроизводящего устройства,

5) Анализ результатов исследования, описание характера влияния различных параметров акустической системы на качество звука.

4 Источники разработки

4.1 Научные статьи в периодических изданиях по исследованию искажений звуковоспроизводящих систем.

4.2 Сайты производителей оборудования, предназначенного для кинопоказа в кинотеатрах и киноконцертных залах.

4.3 Литература и методические указания по данной тематике, выпущенные в СПбГИКиТ.

5 Технические требования

5.1 Требования к параметрам аудиосистемы:

5.1.1 Bl = 4, 79 Тм,

где B - плотность магнитного потока в зазоре магнитной цепи;

l -длина части звуковой катушки, находящейся в зазоре магнитной цепи,

5.1.2 f - частота входного сигнала - 81,7088 Гц;

5.1.3 M_{MS} - механическая масса подвижной части громкоговорителя - 1,108 кг;

5.1.4 C_{MS} – гибкость подвеса - 342,3888 м/Н;

5.1.5 R_{MS} – механические потери в подвесе - 1,1227 кг/с;

5.1.6 Qms - механическая добротность - 5,08.

Глава 4. Расчетно-исследовательская часть

4.1 Расчет основных параметров схемы замещения

Основными параметрами, рассчитываемыми для эквивалентной схемы АС любого типа оформления, являются:

- акустическая гибкость подвесов подвижной системы $C_{AS;}$
- акустическая масса подвижной системы M_{AS}
- акустическое сопротивление активных потерь в подвесах подвижной системы $R_{AS.}$

Акустическая гибкость подвесов подвижной системы находится по формуле:

$$C_{AS} = C_{MS} \bullet S_D^{\ 2} \qquad (1)$$

где C_{MS} – гибкость подвеса;

S_D – площадь диффузора.

По условиям (согласно техническому заданию) C_{MS} = 342,3888 м/Н,

$S_D^{\ 2}$ = 0,0123 м^2

Из формулы (1) получаем:

C_{AS} = 342,3888 • (0,0123)^2 = 0,0518 м^3/Н.

Акустическая масса подвижной системы определяется по формуле:

$$M_{AS} = \frac{M_{MS}}{S_D^2} \qquad (2)$$

где M_{MS} - механическая масса подвижной части громкоговорителя.

M_{MS} = 1,108 кг по условию.

Используя формулу (2), получим:

$$M_{AS} = \frac{1,108}{(0,0123)^2} = 7323,6829 \text{ кг/м}^2$$

Акустическое сопротивление активных потерь в подвесах подвижной системы R_{AS} находится по формуле:

$$R_{AS} = \overline{R_{MS}}\ S_D^2$$

(3)

где R_{MS} – механические потери в подвесе.

По условию R_{MS} = 1,1227 кг/с

Используя формулу (3), получим:

$$R_{AS} = \frac{1{,}1227}{(0{,}0123)^2} = 7421 \text{ кг/(с• м}^2\text{)}$$

Остальные параметры схемы являются частными случаями и рассчитываются в зависимости от типа оформления АС (закрытого типа, с фазоинвертором, с пассивным излучателем и т.д.).

4.2 Расчет КПД акустической системы

КПД в условиях свободного поля (т.е. звукового поля в гомогенной изотропной среде, влиянием границ которой на звуковые волны можно пренебречь) можно найти по формуле:

$$\eta_0 = \frac{\rho_0 \bullet B^2 \bullet l^2 \bullet S_D^2}{4\pi \bullet c \bullet R_E \bullet R_{MS}} \bullet 100\% \qquad (4)$$

где ρ_0 – плотность воздуха;

c – скорость звука;

R_E - сопротивление звуковой катушки постоянному току.

ρ_0 = 1,2 г/м^3, c = 340 м/с;

Согласно техническому заданию, R_E = 5,6 Ом.

Из формулы (4) получим:

$$\eta_0 = \frac{1{,}2 \bullet (4{,}79)^2 \bullet (0{,}0123)}{4 \bullet 3{,}14 \bullet 340 \bullet 5{,}6 \bullet (1{,}108)^2} \bullet 100\% = 0{,}1419\%$$

Следует отметить, что все электродинамические громкоговорители прямого излучения и, соответственно, акустические системы на их основе, имеют

чрезвычайно низкий КПД, меньше 1%. Причиной такой низкой эффективности является, во-первых, то, что громкоговорители излучают в воздушную среду с очень

низким сопротивлением (в воде КПД излучателей существенно выше); во-вторых, большие мощности рассеиваются на тепло в звуковой катушке (в мощных низкочастотных громкоговорителях при большой нагрузке температура, измеренная на звуковой катушке, может достигать 300 градусов), на трение в подвижной системе и т. д. Результаты расчетов вместе с исходными данными для удобства моделирования эквивалентной схемы сведены в таблицу 10.

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Значение	Единицы измерения
1	Частота резонанса	f_s	81,7088	Гц
2	Механическая добротность	Q_{ms}	5,08	
3	Мощность электропривода динамика	Bl	4,79	Т.м.
4	Гибкость подвеса	C_{ms}	342,3888	м/Н
5	Акустическая гибкость подвесов подвижной системы	C_{AS}	0,0518	$м^3$/Н
6	Коэффициент полезного действия	η_0	0,1419%	
7	Механическая масса подвижной части громкоговорителя	M_{MS}	1,108	кг
8	Акустическая масса подвижной системы	M_{AS}	7323,6829	Кг/$м^4$
9	Сопротивление звуковой катушки головки постоянному току	R_E	5,6	Ом
10	Площадь диффузора	S_D	0,0123	$м^2$
11	механические потери в подвесе	R_{mS}	1,1227	кг/с
12	Акустическое сопротивление потерь в подвижной системе	R_{AS}	7421	Ом

Таблица 10. Основные параметры эквивалентной схемы динамика

4.4 Нелинейная схема замещения звуковой системы

Для моделирования наиболее близкого к реальному нелинейного входного сигнала воздействие, которое подается на вход системы, следует рассматривать как нелинейную функцию, связанную с искажениями магнитного поля при

воспроизведении звуковых колебаний. Для исследований динамических процессов с учетом нелинейности входного воздействия следует в качестве объекта исследований использовать нелинейную схему замещения (рисунок 28).

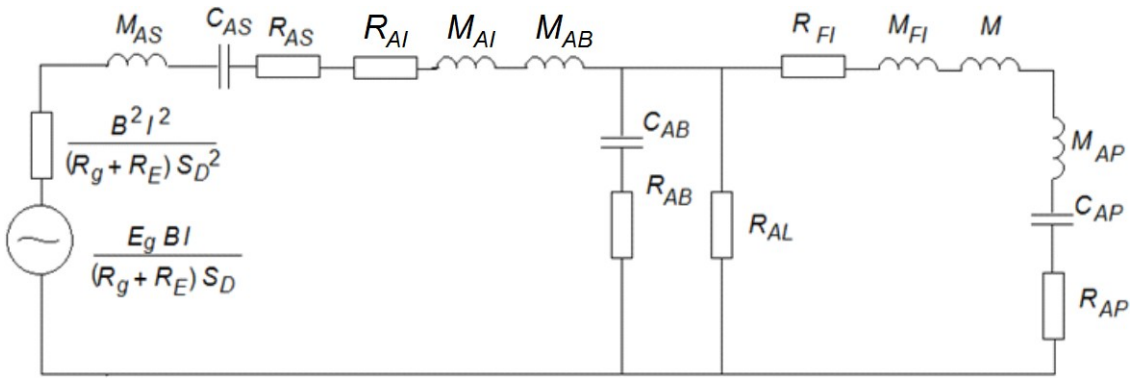


Рисунок 28. Полная обобщенная нелинейная схема замещения низкочастотного громкоговорителя

В этой схеме вместо прямоугольных импульсов на вход системы подается нелинейная функция в виде произведения двух изменяющихся параметров: индукции в сердечнике *B* и переменного напряжения *Eg*.

Eg – входное напряжение источника сигнала;

B – магнитная индукция в зазоре магнитной цепи;

l – длина части звуковой катушки, находящейся в зазоре магнитной цепи;

R_E – сопротивление звуковой катушки головки постоянному току;

S_D – эффективная площадь диффузора;

Остальные параметры схемы аналогичны параметрам схемы, представленной на рисунке 29.

Индукция в зазоре сердечника *B* меняется по нелинейному закону. Общая картина изменения *B* показана на рисунке 30.

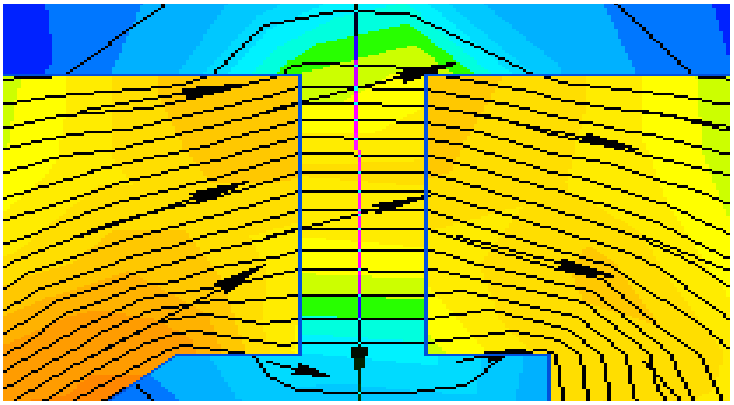


Рисунок 30. Общая картина изменения индукции в зазоре сердечника

График изменения индукции в зазоре магнитного сердечника приведен на рисунке 31

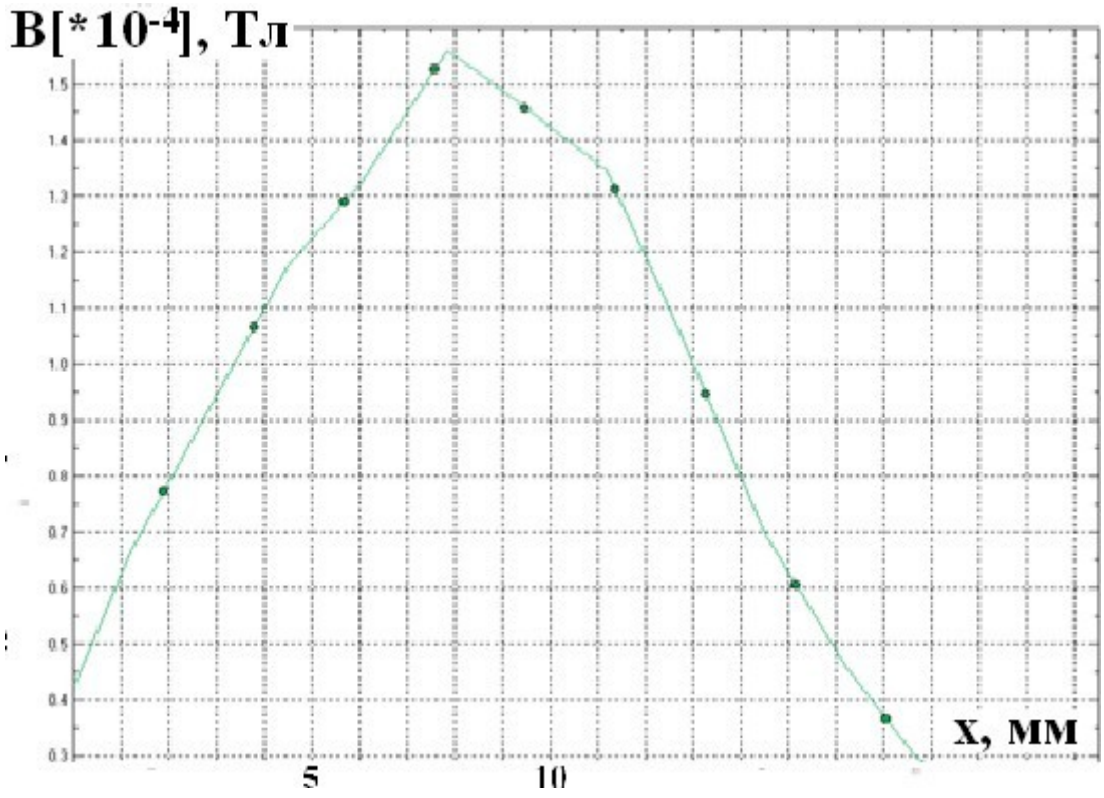


Рисунок 31.График изменения магнитной индукции в зазоре сердечника

Чтобы смоделировать магнитную индукцию в зазоре, применяется суммирование сигналов (прямоугольного и гармонического) с помощью элемента «сумматор». Реализация этого моделирования представлена фрагментом схемы замещения, изображенном на рисунке 32.

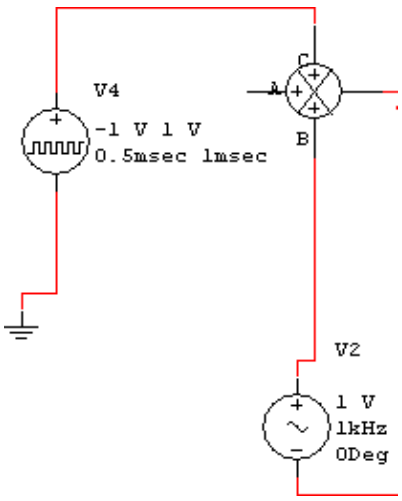


Рисунок 32. Фрагмент схемы замещения, реализующий суммирование двух сигналов.

Результатом моделирования суммы двух сигналов является график функции, показанный на рисунке 33. Как видно из рисунка 33, форма сигнала магнитной индукции адекватна полученному в результате суммирования сигналу.

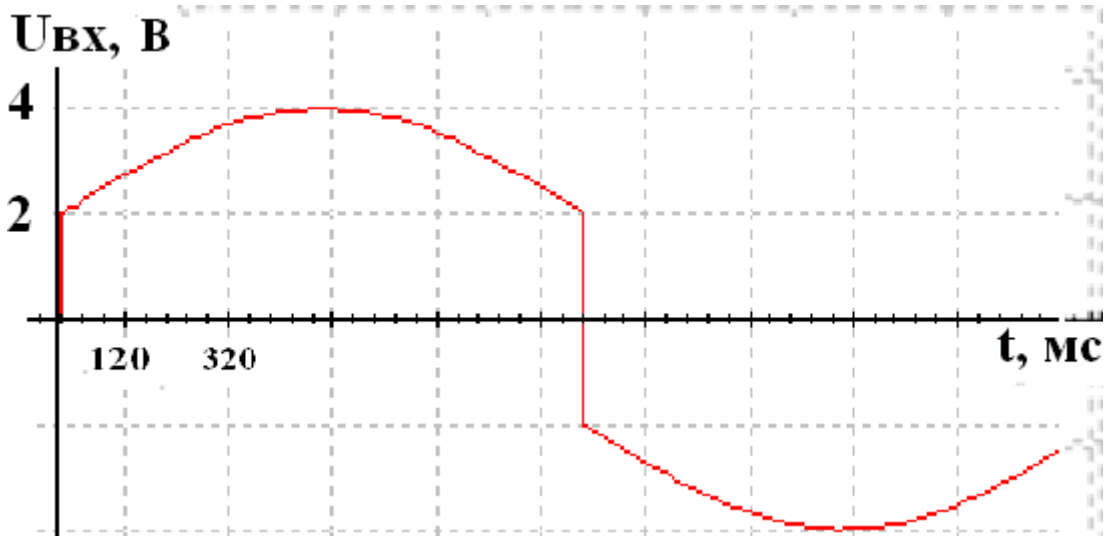


Рисунок 33.График результата суммирования двух сигналов

Затем нужно смоделировать сигнал переменного напряжения *Eg*. Из всех моделей источников сигнала, имеющихся в программе «Multisim 7», в данном случае для моделирования *Eg* лучше всего подходит источник частотно-модулированного сигнала (ЧМ). Выбор именно этого источника объясняется тем, что на вход реальной АС обычно подается переменное напряжение различной

амплитуды и переменной фазы. Переменную амплитуду конечного входного сигнала в компьютерной модели можно получить за счет перемножения сигналов (что будет сделано далее), а переменную фазу даст источник ЧМ-сигнала. Форма такого сигнала показана на рисунке 34.

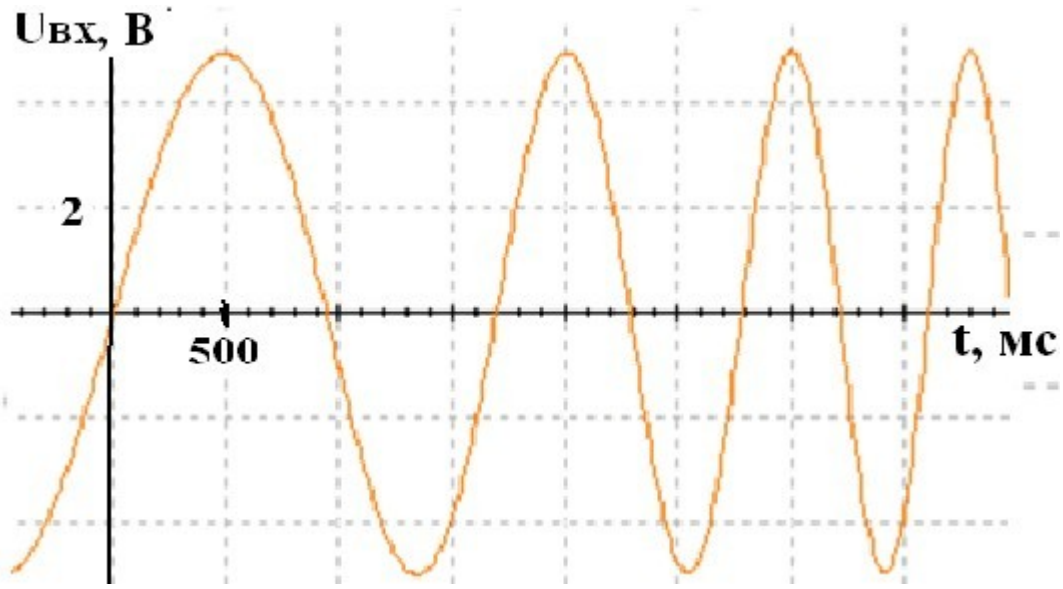


Рисунок 34 – Частотно-модулированный сигнал

Таким образом, первым из двух переменных сигналов (индукция *B*), поданных на вход системы, будет сигнал сумматора, а вторым (напряжение *Eg*) – функция ЧМ-сигнала.

Далее необходимо перемножить два смоделированных ранее сигнала. Функцию перемножения в схеме замещения будет выполнять мультиплексор (рисунок 35), на вход которого будут подаваться эти два сигнала.

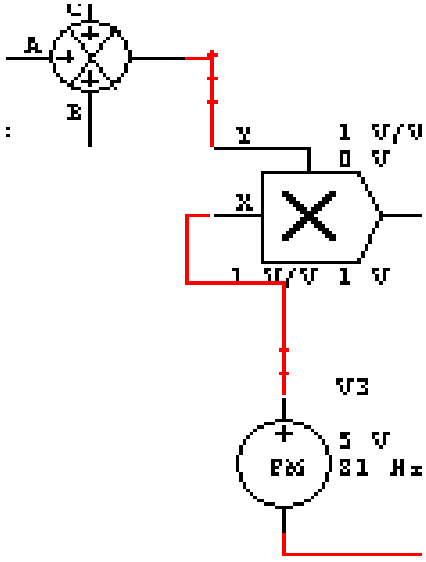


Рисунок 35. Мультиплексор с сумматором и частотно-модулированным источником сигнала

В компьютерной модели источник напряжения, величина которого определяется произведением двух функций, моделируется посредством источника напряжения, управляемого током (ИНУТ) (рисунок 36).

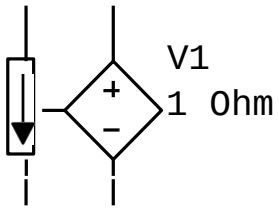


Рисунок 36. Источник напряжения управляемый током (ИНУТ)

Источник напряжения управляемый током позволяет моделировать входное воздействие в виде произведения двух стохастически изменяющихся сигналов – индукции в зазоре магнитопровода звуковоспроизводящей системы и тока в катушке. Произведение этих переменных величин определяет нелинейность воздействия, что позволяет более точно моделировать изменения входного сигнала при воспроизведении звука.

Конечный вариант эквивалентной схемы низкочастотного громкоговорителя показан на рисунке 37.

Данная усовершенствованная эквивалентная схема низкочастотного громкоговорителя, в отличие от традиционной, содержит нелинейный источник напряжения, смоделированный сигнал которого наиболее соответствует реальному сигналу на входе АС. Такое решение позволяет получить более адекватное представление о передаточной функции системы, чем в случае линейной схемы замещения.

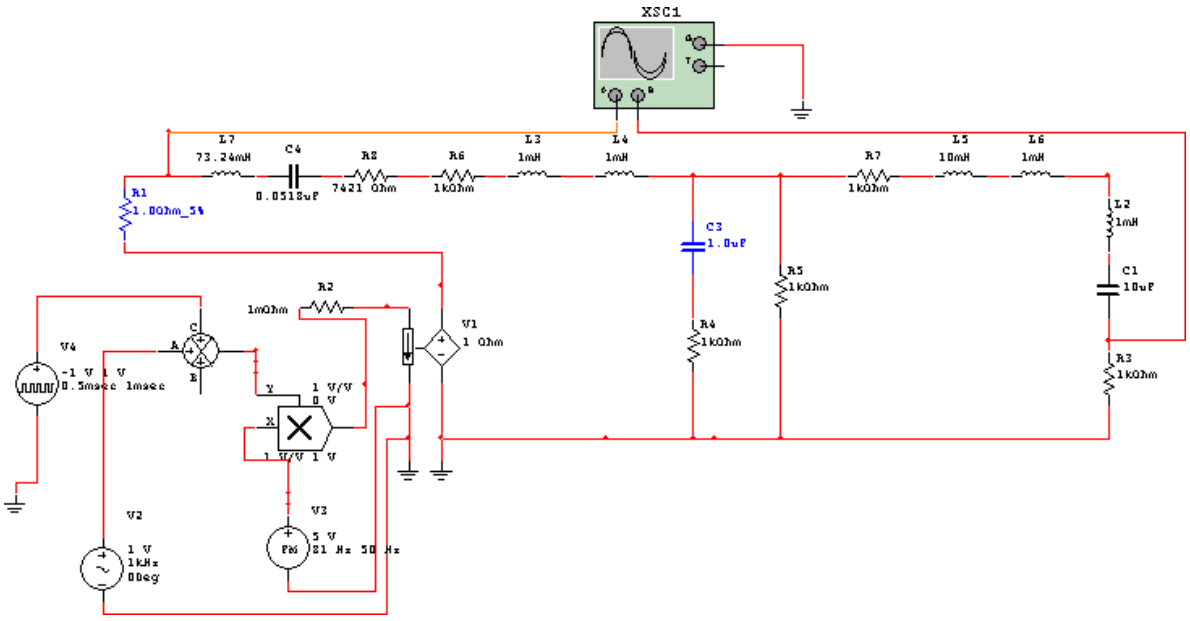


Рисунок 37. Нелинейная эквивалентная схема низкочастотного громкоговорителя

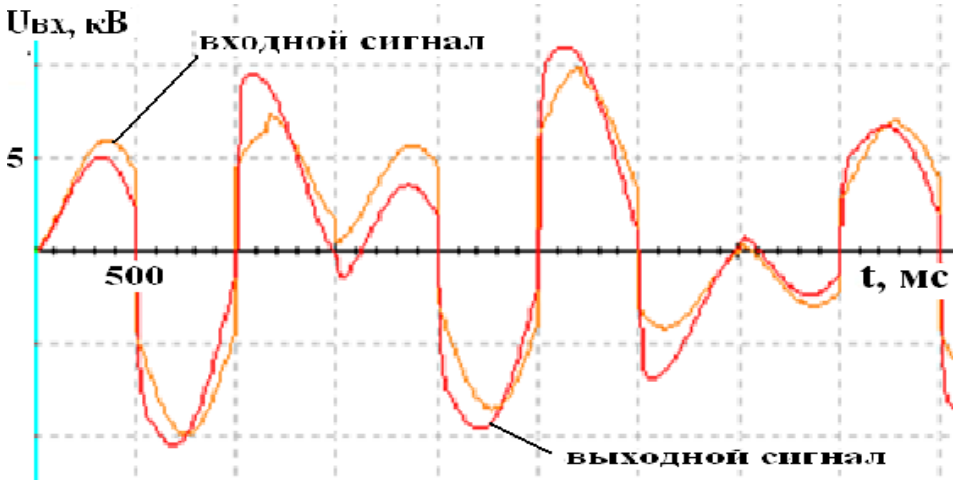


Рисунок 38 – Отклик модели акустической системы на входной сигнал

4.5 Выводы

Как видно из рисунка 38, являющегося результатом данного моделирования, отклик системы на входной сигнал практически совпадает по форме с входным сигналом. Это говорит о малом уровне искажений на выходе АС, чего и следует добиваться с целью увеличения качества звука.

Глава 5. Управленческие и экологические аспекты проекта

5.1 Управленческие аспекты проекта

Управленческие аспекты проекта по исследование динамических процессов в акустическом динамике связаны с организацией работы команды специалистов, учетом бюджета и сроков проекта, а также контролем качества продукта. Необходимо также обеспечить коммуникацию с клиентом и наладить процесс обратной связи для учета пожеланий и требований заказчика.

Управленческие аспекты проекта:

1. Определение целей и задач проекта: перед началом работы необходимо определить, какие конкретные цели и задачи должен решить проект, чтобы получить желаемый результат.
2. Планирование: разработка плана проекта — это важный этап, на котором определяются график работ, бюджет, перечень ресурсов, ответственных за выполнение задач.
3. Финансирование: исследование динамических процессов в акустическом динамике требует финансирования, поэтому необходимо определить источники финансирования проекта.
4. Команда проекта: для успешного реализации проекта необходима слаженная работа команды, состоящей из специалистов различных областей.
5. Контроль и оценка: следующий важный этап заключается в периодическом контроле и оценке выполнения проекта, что позволит своевременно вносить коррективы в работу.

5.2 Экологические аспекты проекта

Экологические аспекты проекта по исследование динамических процессов в акустическом динамике связаны с использованием экологически чистых материалов, сведением к минимуму потребления электроэнергии и негативного воздействия на окружающую среду, а также применением таких конструктивных решений, которые могут повысить эффективность использования динамиков и

снизить уровень шума. Кроме того, необходимо учитывать возможность переработки и утилизации динамиков после их использования.

Экологические аспекты проекта:

1. Разработка и применение эффективных методов и технологий, которые могут значительно снизить экологические риски и негативное воздействие проекта на окружающую среду. Использование экологически чистых материалов, сведением к минимуму потребления электроэнергии и негативного воздействия на окружающую среду

2. Внедрение проектов по сбору, переработке и утилизации отходов, который может снизить нагрузку на экосистему и уменьшить отрицательное воздействие на окружающую среду. Кроме того, необходимо учитывать возможность переработки и утилизации динамиков после их использования.

3. Мониторинг экологических параметров, который позволит определить существующие или потенциальные воздействия проекта на окружающую среду и принимать необходимые меры для их устранения.

4. Привлечение государственных и частных организаций к разработке и внедрению экологически устойчивых технологий и методов, которые могут значительно снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

5. Широкие консультации и диалог с местным сообществом, чтобы обеспечить поддержку проекта и учесть мнения жителей и экспертов в формировании экологически устойчивого проекта.

Заключение

В выпускной квалификационной работе были проведены исследования влияния нелинейных электромеханических процессов в низкочастотном динамике на качество воспроизведения звука. Их исследование производилось посредством компьютерного моделирования с использованием метода электромеханических аналогий. Компьютерное моделирование дает представление о параметрах моделируемого объекта, достаточно адекватные реальным параметрам этого объекта, и позволяет исследовать свойства объектов без затрат больших материальных и временных ресурсов.

Результаты исследования показали, что линейный вариант эквивалентной схемы динамика может быть использован только для предварительной оценки свойств системы. Традиционная схема замещения динамика не учитывала нелинейные процессы, являющиеся причиной наиболее существенных искажений сигнала на выходе акустической системы, поэтому схема была усовершенствована внесением в нее нелинейного источника напряжения. Характер этого напряжения в модели более адекватен характеру входного напряжения реальной акустической системы.

Экспериментальным путем было выяснено влияние изменения значений отдельных параметров схемы на характер выходного сигнала системы.

Полученное решение позволило получить модель системы с формой выходного сигнала, достаточно близкой к форме входного, что говорит о малом количестве искажений выходного сигнала. Исходя из уточненных параметров этой эквивалентной схемы динамика, можно рассчитать реальные параметры для его непосредственного изготовления, а из графика передаточной функции системы можно получить график АЧХ, позволяющий количественно оценить искажения звука воспроизводящей системы. Учет полученных результатов при проектировании и изготовлении акустических систем в конечном итоге повышает качество воспроизводимого звука.

Апробация

Результаты, полученные в рамках выпускной квалификационной работы, были представлены в докладе на VII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Наука. Творчество. Инновации» 13 декабря 2022 г., СПБГИКиТ. Тема «Построение схемы замещения акустического динамика».

Список использованных источников

Нормативные ссылки:

1. ГОСТ 7.32-2001 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».
2. ГОСТ 16122-87. Громкоговорители. Методы измерения электроакустических параметров.
3. ГОСТ 23262-88. Системы акустические бытовые. Общие технические условия.
4. ГОСТ 27418-87. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Термины и определения.
5. ГОСТ 9010-84. Головки громкоговорителей динамические прямого излучения. Общие технические условия.
6. ОСТ 4.383.001-85. Головки громкоговорителей динамические. Общие технические условия.
7. ГОСТ 161122-88 Соединители низкочастотные на напряжение до 1500 В цилиндрические. Основные параметры и размеры.
8. ГОСТ IEC 60065-2011 Аудио-, видео- и аналогичная электронная аппаратура. Требования безопасности.

Литературные источники:

9. Абросимова М.А., Вахитов Ш.Я., Смирнова Н.А. К вопросу о целесообразности и возможности формирования диффузного звукового поля в залах с системой звукоусиления //В сборнике: Инновационные технологии в медиаобразовании. материалы международной научно-практической конференции. 2016. С. 117-123.
10. Авдеев А.В., Вахитов Ш.Я. Исследование экспоненциальных и конических рупорных громкоговорителей и создание метода их проектирования//Мир техники кино. 2011. Т. 5. № 1 (19). С. 2-6.

11. Алдошина, И.А. Высококачественные акустические системы и излучатели/ И.А. Алдошина, А.Г.Войшвилло. - М.: Радио и связь, 1985. - 168 с.
12. Алябьев С. И. Радиовещание и электроакустика [Текст]: учебное пособие для вузов; под ред. Ю.А. Ковалгина. – М.: Радио и связь, 2000.
13. Анерт В., Стеффен Ф. – Техника звукоусиления, М.: Эра, 2003 г.
14. Пат. 43044, СССР, МПК: H04R 9/06. Электродинамический громкоговоритель/ Абрамович И.В (СССР). – №159537; заявл. 23.12.34; опубл. 31.05.35. – 2 с
15. Башарин С.А., Вахитов Ш.Я., Карельский В.Ю. Повышение качества звука акустических систем на основе учета нелинейных искажений магнитного поля//Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2016. № 1. С. 52-55.
16. Башарин С.А., Карельский В.Ю., Николаева С.А. Моделирование магнитного поля в звуковом динамике// В сборнике: Актуальные вопросы развития индустрии кино и телевидения в современной России. сборник научных трудов, посвященный Году российского кино : в 2 частях. А. Д. Евменов (отв. ред.). Санкт-Петербург, 2016. С. 28-35.
17. Башарин С.А., Карельский В.Ю., Николаева С.А. Построение имитационной модели для исследования свойств звукового динамика// В сборнике: Актуальные проблемы радио- и кинотехнологий. материалы II Международной научно-технической конференции. 2018. С. 96-104.
18. Башарин С.А., Кулебакин А.И. Построение нелинейной модели звукового динамика по заданной частотной характеристике// В книге: Инновационные технологии в медиаобразовании. материалы IV Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 18-21.
19. Башарин С.А., Федоров В.В. Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля//учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломиров. специалистов 64500 "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" / Москва, 2004. Сер. Высшее профессиональное образование. Электротехника

20. Башарин, С.А. Теоретические основы электротехники/ С.А. Башарин, В.В Федоров. – М.: Академия, 2013. – 94 с.
21. Вахитов Ш. Я., Ковалгин Ю. А., Фадеев А. А., Щевьев Ю. П. Акустика [Текст]: учебное пособие; под ред. профессора Ю. А. Ковалгина. –М .: Искусство – 2009.
22. Вахитов, Ш. Я. Электроакустика [Текст]: учеб. пособие – СПб.: СПбГИКиТ, 2015. – 210
23. Вахитов Ш.Я., Башарин С.А., Смирнова Н.А., Щитов И.Н. Аналитическая модель и способ расчета колебательной системы динамических преобразователей купольного типа//Фундаментальные исследования. 2015. № 7-3. С. 511-516.
24. Вахитов Ш.Я., Вахитов Я.Ш. Электромеханические преобразователи и динамические микрофоны//учеб. пособие / СПб., 2004.
25. Вахитов Ш.Я., Смирнова Н.А. Расчет и проектирование кинотеатральных громкоговорителей//Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию / Санкт-Петербург, 2000. Том Выпуск 1 Низкочастотные громкоговорители
26. Виноградова, Э. Л. Конструирование громкоговорителей со сглаженными частотными характеристиками/ Э.Л. Виноградова. – М: Энергия, 1978. – 48 с.
27. Володин А.А. Роль гармонического спектра в восприятии высоты и тембра звука. Музыкальное искусство и наука. М., 1970.
28. Выходец, А.В Радиовещание и электроакустика: Учебник для ВУЗов/ А.В. Выходец [и др.] – М.: Радио и связь 1989. – 432 с.
29. Гарбузов Н.А. Музыкальная акустика. М., 1954.
30. Заграй Н.П., Михралиева А.И., Строчан Т.П. Динамическая характеристика нелинейного взаимодействия в упругих средах//Технические проблемы освоения Мирового океана. 2015. Т. 6. С. 374-379.
31. Карельский В.Ю, Моделирование магнитного поля в звуковом динамике, в сб. науч. трудов, посвященных Году российского кино, часть 1/ В.Ю. Карельский, С.А. Николаева -. – Спб.: СПбГИКиТ, 2016. – С. 28-35.

32. Куценко, А.Н Методическое пособие по курсу «Электроакустика и звуковое вещание». Часть 1 «Громкоговорители»/ А.Н Куценко, М.А. Раскита – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 103 с.
33. Линкевич О.С., Гуревич В.Л. Акустика и звук. Аудиометрия как часть физиологической акустики//В сборнике: Приборостроение-2021. Материалы 14-й Международной научно-технической конференции. Минск, 2021. С. 102-104.
34. Литюк В.И., Литюк Л.В. Введение в основы цифрового формирования и записи/воспроизведения звуковых сигналов: Учеб. Пособие. - Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. - 53 с.
35. Меерзон Б. Я. Акустические основы звукорежиссуры [Текст] – М.: Аспект Пресс, 2004.
36. Павловская, В.И. Акустика и электроакустическая аппаратура/ В.И. Павловская, А.Н Качерович, А.П. Лукьянов – М.: Искусство, 1986. – 223 с.
37. Помпеи А., Сумбатян М.А., Тодоров Н.Ф. Компьютерные модели в акустике помещений: метод лучевых траекторий и алгоритмы аурализации//Акустический журнал. 2009. Т. 55. № 6. С. 760-771.
38. Римский-Корсаков, А.В. Электроакустика/ А.В. Римский-Корсаков. – М.: Связь, 1973. – 272 с.
39. Роберт Б., Эрик Ф., Сюань Ш. Акустическая система (изделие в целом) и корпус акустической системы (самостоятельная часть изделия)//Патент на промышленный образец RU 86375, 16.09.2013. Заявка № 2012502229 от 05.07.2012.
40. Сапожкова М. А. Справочник – Акустика. [Текст] - М.: Радио и связь; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989.
41. Смирнова Н.А., Уваров В.К. Акустические основы построения систем озвучивания. [Текст]: Учебное пособие. – СПб.: СПбГУКиТ, 2010
42. Спектор А. Звук в театре. – М.: Издательство АСТ, 2012.

43. Таранов Д.Д. Алгоритмы обработки и моделирования пространственно-временных музыкальных акустических сигналов в помещении// Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2013 г
44. Шлычков С.В. Исследование резонансных свойств акустических панелей // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=11560 (дата обращения: 25.05.2023).
45. Низкочастотные модели. Эквивалентные схемы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.studfiles.ru/preview/3200472/page:5/
46. Профессиональное звуковое оборудование [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://audiosila.com
47. Понятие линейного динамического звена [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://drive.ispu.ru/elib/lebedev/3.html
48. Звукорежиссер – профессиональное издание для звукорежиссеров: официальный сайт. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.audio-producer.ru/
49. James W. Beauchamp. The sound of music: analysis, synthesis, and perception of musical sounds, chapter Analysis and Synthesis of Musical Instrument Sounds, pages 1-89. Springer, New York, 2007.
50. John M. Hajda. The sound of music : analysis, synthesis, and perception of musical sounds, chapter The Effect of Dynamic Acoustical Features on Musical Timbre, pages 250-271. Springer, New York, 2007
51. Jeffress L.A. A place theory of sound localization. J. Сотр. Physiol. Psych. 61, pp. 468-486, 1978
52. Bodden M. Binaural Modeling and Auditory Scene Analysis. IEEE Signal Processing Society, 1995 Workshop on Appl. of Signal Processing to Au- dio and Acoustics, Mohonk Mountain House, New Paltz, NY, 1995.
53. Lewers T. A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics", Applied Acoustics, vol.38, pp. 161-178, 1993.