

**Куценко Александр Николаевич
Раскита Максим Анатольевич**

**Методическое пособие
по курсу
Электроакустика и звуковое вещание
Часть 1
Громкоговорители**

Ответственный за выпуск
Редактор
Корректор

Куценко А.Н.
Чиканенко Л.В.
Селезнева Н.И.

ЛР №020565 от 23.06.1997 г. Подписано к печати _____. 2006 г.
Формат 60x84 1/16.

Печать офсетная. Бумага офсетная.
Усл. п. л. – 2,4 Уч.-изд.л. – 2,3.
Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, пер. Некрасовский, 44
Типография Технологического института
Южного федерального университета.
ГСП 17А, Таганрог, Энгельса, 1



**КАФЕДРА ЭЛЕКТРОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ
И МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ**

№

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Технологический институт
Федерального государственного образовательного
учреждения высшего профессионального
образования
«Южный федеральный университет»
**ПРИОРИТЕТНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ
«ОБРАЗОВАНИЕ»**
(2006-2007 гг.)

**Методическое пособие
по курсу
ЭЛЕКТРОАКУСТИКА
И ЗВУКОВОЕ ВЕЩАНИЕ
Часть 1
ГРОМКОГОВОРТЕЛИ**



для специальностей
201100 – Радиосвязь, радиовещание и телевидение
200105 – Акустические приборы и системы

Таганрог 2007

УДК . . .

Составители: Куценко А.Н., Раскита М.А.

Методическое пособие по курсу «Электроакустика и звуковое вещание». Часть 1 «Громкоговорители». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 103 с.

В данном методическом пособии сделана попытка собрать все многообразие существующих на сегодняшний день громкоговорителей, классифицировать их, описать вкратце физические принципы их работы. Кроме того, в работе изложены методы расчета и проектирования динамических диффузорных громкоговорителей, освещены особенности их изготовления. Методическое пособие рассчитано для студентов специальностей 200105 «Акустические приборы и системы», 201100 «Радиосвязь, радиовещание и телевидение».

Методическое пособие содержит разделы «Классификация громкоговорителей» и «Электродинамические громкоговорители» а также список рекомендуемой литературы по курсу.

Ил. 72. Библиогр.: 9 назв.

Рецензент Г.Б. Тарасова, канд. техн. наук, доцент кафедры ЭГА и МТ ТТИ ЮФУ.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Классификация громкоговорителей.....	4
1.1 Электродинамические громкоговорители.....	6
1.1.1 Электродинамические катушечные громкоговорители.....	7
1.1.2 Электродинамические ленточные громкоговорители.....	8
1.2 Изодинамические громкоговорители.....	11
1.3 Электромагнитные громкоговорители.....	16
1.4 Электростатический и электретные громкоговорители.....	21
1.5 Пьезокерамические и пьезопленочные громкоговорители.....	25
1.6 Плазменные (плазмотроны, ионофоны) громкоговорители.....	28
1.7 Громкоговорители пневматического типа.....	29
2. Электродинамические громкоговорители.....	30
2.1 История развития электродинамических излучателей.....	30
2.2 Классификация динамических диффузорных громкоговорителей.....	32
2.3 Конструкции динамических диффузорных громкоговорителей.....	33
2.4 Основные характеристики динамического диффузорного громкоговорителя.....	57
2.4.1. Полное электрическое сопротивление.....	60
2.4.2. Частотная характеристика громкоговорителя по звуковому давлению.....	62
2.4.3. Характеристика направленности.....	68
2.4.4. Нелинейные искажения.....	70
2.4.5. Коэффициент полезного действия.....	74
2.5. Расчет элементов динамического диффузорного громкоговорителя.....	74
2.5.1 Диффузор.....	74
2.5.2. Центрирующие шайбы.....	83
2.5.3. Звуковая катушка.....	86
2.5.4. Магнитная цепь.....	92
2.5.5. Диффузордержатель.....	98
2.5.6. Конструкция подвижной системы.....	99
Библиографический список.....	102

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алдошина И.А. Электродинамические громкоговорители. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.
2. Шифман Д.Х. Громкоговорители. – М.: «Энергия», 1965. – 248 с.
3. Фурдуев А.А. Электроакустика – М.: ОГИЗ-ГИТТЛ, 1948 – 517 с.
4. М.М. Эфрусси Громкоговорители и их применение 2 – М.: «Энергия», 1971. – 96 с.
5. МакЛаклен Громкоговорители – М.: «Государственное издательство по вопросам радио», 1938. – 200 с.
6. Павловская В.И., Качерович А.Н., Лукьянов А.П. Акустика и электроакустическая аппаратура – М.: «Искусство», 1986. – 223 с.
7. Выходец А.В., Гитлиц М.В., Ковалгин Ю.А. и др. Радиовещание и электроакустика: Учебник для ВУЗов. – М.: «Радио и связь» 1989 – 432 с.
8. Алдошина И.А. Нетрадиционные излучатели 2. Излучатель Хейла// АудиоМагазин №1 2001 г. с. 173-175
9. Плоткин Е., Каратаев Б., Прютц В. Звуковоспроизводящий агрегат с ионофоном // Радио №12 с. 18-22

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в технике звукозаписи и звуковоспроизведения произошли существенные изменения: наряду со значительным увеличением объемов выпуска и числа моделей появилось поколение аппаратуры, использующей цифровые методы обработки сигналов (цифровая студийная техника, цифровые лазерные проигрыватели, магнитофоны и т. д.), что позволило значительно улучшить объективные характеристики и качество звучания звукопередающих трактов. Соответственно неизмеримо возросли требования к качеству звучания и параметрам звуковоспроизводящей аппаратуры, где основным звеном, в значительной степени определяющим ее характеристики, являются громкоговорители.

В настоящее время наибольшее распространения получили динамические громкоговорители производство которых в настоящее время достигает сотен миллионов штук в год, в Японии примерно 150 млн., в США – 100 млн. и т. д. Число выпускаемых моделей электродинамических громкоговорителей достигает нескольких тысяч и отличается большим диапазоном изменения конструктивных и электроакустических параметров, например, диаметры 40-500 мм, мощности 0,1-300 Вт и т. д. Однако в последнее время в акустических системах все интенсивней начинают применять «нетрадиционные громкоговорители» - громкоговорители с плоскими мембранами типа «Ортофаз», «Блатхаллер», электромагнитные и пьезоэлектрические громкоговорители, ионофоны и т.д.

В данном методическом пособии сделана попытка собрать все многообразие существующих на сегодняшний день громкоговорителей, классифицировать их, описать вкратце физические принципы их работы. Кроме того, в работе изложены методы расчета и проектирования динамических диффузорных громкоговорителей, освещены особенности их изготовления. Методическое пособие рассчитано для студентов специальностей 200105 «Акустические приборы и системы», 201100 «Радиосвязь, радиовещание и телевидение».

Авторы с благодарностью примут отзывы и замечания.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

В современном Международном электротехническом словаре [1] термин «громкоговоритель» («loudspeaker») определяется как «преобразователь, позволяющий получить акустические волны из электрических колебаний и предназначенный для излучения акустической мощности в окружающую среду». Там же указано, что он может применяться как к единичным громкоговорителям (loudspeaker unit), так и к акустическим системам. Под «единичным громкоговорителем» понимается электроакустический преобразователь без какого-либо оформления. Под «акустической системой» понимается устройство, состоящее из акустического оформления (корпуса), одного или нескольких единичных громкоговорителей и других соответствующих устройств, таких, как фильтры, трансформаторы и другие пассивные элементы. В отечественной технической литературе [2] обычно использовался термин «громкоговоритель» (в зависимости от способа преобразования с определением — электродинамический, электростатический и др.) для единичных излучателей, для многополосных громкоговорителей применялось определение «акустическая система», «звуковая колонка», «студийный контрольный агрегат» и т. д. В последние годы в ГОСТ 16122-87 [3] введен для единичного громкоговорителя еще один термин «головка громкоговорителя». Далее термин «громкоговоритель» (ГГ) будет использоваться для единичного громкоговорителя (т. е. «головки громкоговорителя»), а для многополосных громкоговорителей в зависимости от назначения — «акустическая система», «звуковая колонка» и др.

Классификация громкоговорителей может быть произведена по различным признакам. Остановимся на основных из них.

1. Принцип действия (т. е. способ преобразования электрической энергии в акустическую):

- 1.1. Электродинамические громкоговорители
- 1.2. Изодинамические громкоговорители
- 1.3. Электромагнитные громкоговорители
- 1.4. Электростатические громкоговорители
- 1.5. Электретные громкоговорители

$$C_n = \frac{1}{40 f_0^2 m} \text{ [М/Н]}. \quad (82)$$

Обозначив $C_o/C_u = \mu$, получим следующие выражения для гибкости подвеса диффузора:

$$C_o = C_n(1 + \mu) \text{ [М/Н]} \quad (83)$$

и гибкости центрирующей шайбы:

$$C_u = C_n \left(\frac{1 + \mu}{\mu} \right) \text{ [М/Н]}. \quad (84)$$

Прочное соединение элементов подвижной системы является необходимым условием хорошей работы громкоговорителя. Оно обеспечивается приклейкой звуковой катушки к внутренней части шейки диффузора, а центрирующей шайбы — к наружной части шейки.

Если центрирующая шайба изготовлена из хлопчатобумажной ткани, пропитанной бакелитовым лаком, то ее приклеивают к шейке при помощи клея БФ. Для бумажных шайб применяют клей типа 115.

Для припайки гибких проводников 2 к выводам 1 звуковой катушки (см. рис. 72) применяют пустотелые латунные заклепки 3, прикрепляемые к конической части диффузора. В некоторых случаях выводы звуковой катушки непосредственно припаивают к гибким проводникам. Место спая либо приклеивается к конической части диффузора (в маломощных громкоговорителях), либо закрепляется скобочкой.

Выводы звуковой катушки прочно приклеивают к конической части диффузора.

2.5.6. Конструкция подвижной системы

Подвижная система громкоговорителя состоит из диффузора, центрирующей шайбы, звуковой катушки и выводов (рис. 72).

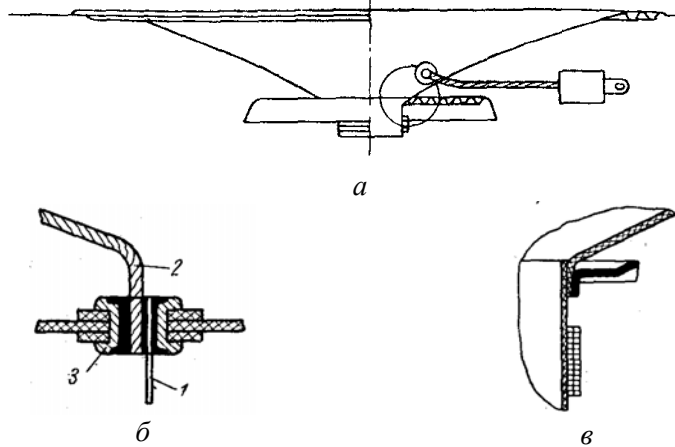


Рис. 72. Конструкция подвижной системы: *a* – подвижная система; *б* – соединение выводов; *в* – соединение диффузора, центрирующей шайбы и звуковой катушки.

Как механический элемент, подвижная система характеризуется массой и гибкостью. Масса подвижной системы в основном складывается из массы звуковой катушки m_k , статической массы диффузора m_d и колеблющейся массы воздуха.

$$m_e = 0.435D_d^3 \text{ [кг]}. \quad (79)$$

$$m = m_k + m_d + m_e \text{ [кг]}. \quad (80)$$

Гибкость подвижной системы C_n определяется гибкостью подвеса диффузора C_d и гибкостью центрирующей шайбы $C_{ш}$.

$$C_n = \frac{C_d C_{ш}}{C_d + C_{ш}} \text{ [м/Н]}. \quad (81)$$

Гибкость центрирующей шайбы обычно выбирается меньшей гибкости подвеса диффузора, чтобы обеспечить надежную центровку звуковой катушки в зазоре магнитной цепи.

Гибкость подвижной системы в целом рассчитывают по формуле

- 1.6. Пьезокерамические громкоговорители
- 1.7. Пьезопленочные громкоговорители
- 1.8. Плазменные громкоговорители
- 1.9. Пневматические громкоговорители
- 1.10. Магнитострикционные громкоговорители и т.д.

2. Способ трансформации акустической энергии:

- 2.1. Громкоговорители прямого излучения (громкоговоритель, у которого поверхность диафрагмы излучает звук непосредственно в окружающую среду);
- 2.2. Громкоговорители нагруженного типа (если диафрагма излучает звук, например, в предрупорную камеру, где происходит трансформация скорости звукового давления).

3. Полоса передаваемых частот (способ конструирования и производства громкоговорителей существенно различается в зависимости от того, в какой полосе частот он предназначен работать).

3.1. Широкополосные громкоговорители (50÷100)...(16÷20)×10³ Гц.

3.2. Низкочастотные громкоговорители (20÷40)...(500÷1000) Гц.

3.3. Среднечастотные громкоговорители (300÷500)...(5÷8)×10³ Гц.

3.4. Высокочастотные громкоговорители (1÷5)...(16÷30) кГц.

4. Форма диафрагмы

- 4.1. Конусные (диффузорные) громкоговорители
- 4.2. купольные громкоговорители
- 4.3. Плоские громкоговорители
- 4.4. Кольцевые громкоговорители и т.д.

5. Тип акустического оформления

6. Область применения

- 6.1. Массовые громкоговорители – массовая радиотехническая аппаратура (приемники, телевизоры, магнитофоны и др.);
- 6.2. Hi-Fi громкоговорители – высококачественная (категории HI-FI) бытовая акустическая аппаратура;
- 6.3. Студийные громкоговорители – студийные контрольные агрегаты, концертно-театральная и кинотеатральная аппаратура;
- 6.4. Кинотеатральные громкоговорители – аппаратура для озвучения (звуковые колонки, специальные акустические системы);
- 6.5. Абонентские громкоговорители – телефоны и др.

1.1 Электродинамические громкоговорители

Наибольшее промышленное распространение на сегодняшний день имеют *электродинамические громкоговорители*, которые в Международном словаре определяются как «громкоговорители, действие которых основано на движении в постоянном магнитном поле проводника или катушки, питаемых переменным током». Электродинамические громкоговорители могут быть реализованы в нескольких вариантах:

1. Катушечном, в котором соединенная с излучающей диафрагмой цилиндрическая катушка с намотанным в несколько слоев проводником помещена в кольцевой зазор магнитной цепи, где с помощью постоянного магнита создается радиальное, магнитное поле. Громкоговорители такого типа серийно выпускаются отечественной и зарубежной промышленностью.
2. Ленточном, в котором тонкая металлическая гофрированная ленточка помещена в магнитное поле между полюсами магнита и служит одновременно и проводником тока, и излучающим элементом. Ленточные громкоговорители серийно выпускаются зарубежными фирмами (более 30 моделей), однако широкого распространения они не имеют из-за большой массы магнитов и низкого сопротивления ленточки, требующего

Диффузордержатели изготавливают преимущественно из стали глубокой вытяжки, силумина, твердых сортов алюминия и его сплавов или из пластмассы.

В громкоговорителях с диаметром диффузора выше 250 мм применяют стали толщиной 1-1,2 мм: в громкоговорителях с диаметром диффузора ниже 250 мм – 1-0,8 мм. Для громкоговорителей, устанавливаемых в переносных приемниках, несмотря на их небольшой диаметр и малый вес магнитной цепи, для обеспечения необходимой механической прочности применяют стали толщиной 0,7-0,8 мм.

Литые диффузордержатели, преимущественно из силумина, как правило, применяют для мощных громкоговорителей, так как штамповка больших диффузордержателей связана с технологическими затруднениями. Диффузордержатели из пластмассы более трудоемки; они дороже стали и менее стойки.

В диффузордержателях должна быть обеспечена параллельность между всеми плоскостями, к которым приклеиваются воротник диффузора, центрирующая шайба и прикрепляется верхний фланец.

Диффузордержатель прикрепляют к верхнему фланцу при помощи сварки или винтами, заклепками и пуклями.

При сварке достигается большая механическая прочность, но не обеспечивается точная установка диффузордержателя. Кроме того, нарушается антикоррозийное покрытие в месте сварки. Прикрепление при помощи винтов не всегда обеспечивает неизменность положения диффузордержателя, особенно при эксплуатации и транспортировке, что нарушает центровку. Более прочное соединение достигается при помощи заклепок, но из-за относительно большой трудоемкости этот способ имеет ограниченное применение. Широкое распространение получил способ прикрепления при помощи пуклей. Он очень производителен и обеспечивает, наряду с большой механической прочностью, точную установку диффузордержателя, которая не нарушается в любых условиях эксплуатации и транспортировки.

Установочные размеры диффузордержателей в целях унификации оговорены в ГОСТ 9010-59.

магниты из наиболее дешевых материалов: сплава ЮНД4, феррит-бария типа 2БА и 3БА. Для малогабаритных громкоговорителей, а также для громкоговорителей с малыми внешними магнитными полями рассеяния применяют более дорогие магниты из сплавов с кобальтовой присадкой типа ЮНДК24 (АНК.04).

Из магнитомягких материалов для магнитопровода следует применять малоуглеродистые конструкционные стали, так как они более дешевы, технологичны и меньше изменяют свои свойства при механической обработке, особенно при штамповке и рихтовке.

2.5.5. Диффузордержатель

Диффузордержатель предназначен для установки диффузора, элементов подвижной системы и крепления громкоговорителя к экранной доске. Диффузордержатель должен обладать достаточной механической прочностью и не деформироваться в процессе работы громкоговорителя и при транспортировке, поэтому ему придают форму усеченного конуса, по образующей которого делают окна. Для придания большей жесткости конической части, ослабленной из-за окон, делают специальные зиги или ужесточения. На рис. 71 показаны различные конструкции применяемых диффузоро-держателей.

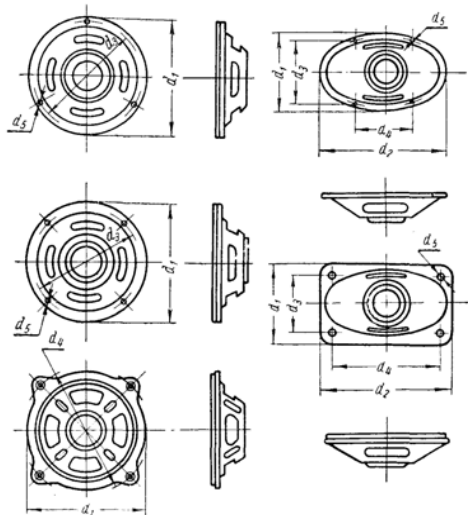


Рис. 71. Конструкции диффузордержателей.

- использования согласующих трансформаторов;
3. Изодинамические или магнепланары (ортодинамические и излучатели Хейла) громкоговорители в которых в качестве излучающего элемента применяется тонкая мембрана из диэлектрической пленки, на которую (методом напыления или травления) наносится проводник в виде прямоугольной или круглой спирали.

1.1.1 Электродинамические катушечные громкоговорители

Принцип работы электродинамической головки громкоговорителя основан на взаимодействии магнитного поля проводника с током и постоянного магнитного поля. Заключается он в следующем: если в магнитное поле, образованное полюсами магнита, помещен проводник, по которому проходит электрический ток (рис. 1), то на проводник будет действовать механическая сила, называемая электродинамической. Эта сила стремится вытолкнуть проводник из магнитного поля в направлении, перпендикулярном силовым линиям поля и направлению тока (правило левой руки).

При указанном на рис. 1 направлении тока силовые линии магнитных полей проводника и магнита направлены над проводником в противоположные стороны, а под ним совпадают по направлению. При этом над проводником магнитное поле ослаблено, а под проводником усилено, что приводит к появлению силы, стремящейся сместить проводник вверх, в зону ослабления магнитного поля. Если протекающий по проводнику ток будет переменным, то сила, выталкивающая проводник, будет изменять свое направление с частотой переменного тока и проводник будет совершать колебания в магнитном поле с той же частотой.

Основные элементы конструкции электродинамических катушечных громкоговорителей приведены на рис.2. Излучателем звука является бумажный конус (диффузор) 1, усеченная вершина которого прочно склеена с цилиндрической бумажной гильзой, на которой в несколько слоев уложены витки проволоки, образующие звуковую катушку 2. Конус с катушкой подвешен следующим образом: во-первых, с помощью вырезной центрирующей шайбы 3 обеспечивается центральное положение катушки внутри

кольцеобразного зазора, причем за счет податливости шайбы звуковая катушка имеет возможность перемещаться в одну и другую сторону в направлении оси конуса; во-вторых, внешний край конуса несет гофрированное кольцо 4 прижимаемое прокладкой 5 к ободу диффузородержателя 6. Магнитные силовые линии проходят в радиальных направлениях между керном 9 и пластиной 7, называемой передним фланцем магнитной системы. Керн связывается с передним фланцем скобой 8; магнитные силовые линии возбуждаются при пропускании постоянного тока через катушку возбуждения 10, надетую на керн.

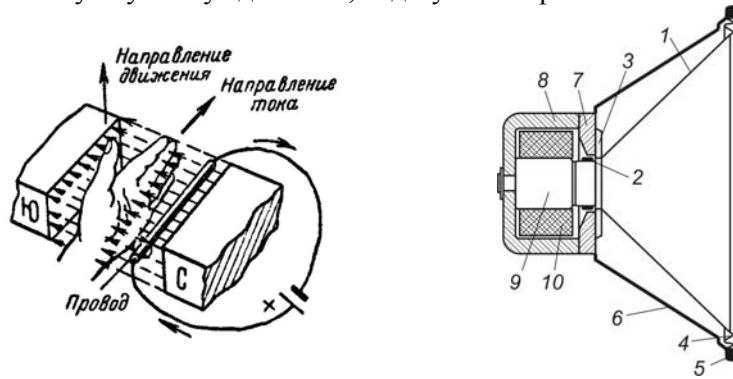
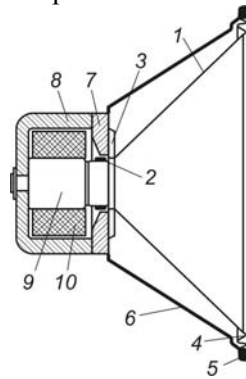


Рис. 1. Схема возникновения электродинамической силы

При подведении к звуковой катушке переменного тока от окончного каскада усилителя на витки катушки, пронизываемые магнитными линиями, действуют электродинамические силы, приводящие катушку в колебания; вместе с катушкой колеблется и склеенный с ней конус, излучающий в окружающее пространства звуковые волны.

Преимуществом электродинамических катушечных громкоговорителей является их эксплуатационная надежность. Они допускают значительные перегрузки, могут работать в широком диапазоне температур и влажностей, обладают значительной механической прочностью. Эти достоинства и обуславливают их применение.

Рис. 2. Схема устройства конусного электродинамического громкоговорителя



$$G = G_e + G_1 + G_2 + G_3 \text{ [Вб/А]}. \quad (74)$$

Далее, пользуясь известным соотношением

$$\frac{B}{H} = \frac{l_m}{S_m} G \text{ [Гн/А]}, \quad (75)$$

находим рабочую точку на кривой размагничивания, соответствующую индукции в нейтрали B . Для облегчения ее нахождения на одном графике с кривой размагничивания наносится кривая $B/H = f(H)$.

Индукция в зазоре магнитной цепи определяется по формуле:

$$B_e = BS_m \frac{\mu_0}{l_3 G} \text{ [Вб/м}^2\text{]}. \quad (76)$$

Если рассчитанная таким образом индукция в рабочем зазоре окажется значительно ниже заданной, то следует изменить форму магнитной цепи и произвести ее поворочный расчет. При этом размеры магнита следует выбирать на основании следующих соображений. При положении рабочей точки ниже точки максимальной энергии необходимо увеличить высоту магнита и соответственно уменьшить его сечение. При положении рабочей точки выше точки максимальной энергии – наоборот, уменьшить высоту и увеличить сечение.

Для случая, когда магнитная цепь состоит из двух магнитов, расчет производится для каждого магнита отдельно. При этом задаются величиной магнитного потока в зазоре от каждого магнита, а объем каждого из них определяют по следующей формуле:

$$V_m = \frac{\Phi_i^2 G_e}{B_d H_d \eta_m \mu_0} \text{ [м}^3\text{]}. \quad (77)$$

Индукция в рабочем зазоре определяется выражением:

$$B_e = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{\pi d_{кр} h_3} \text{ [Вб/м}^2\text{]}. \quad (78)$$

При выборе материалов для магнитной цепи следует руководствоваться следующими соображениями.

Для массовых типов громкоговорителей следует применять

Если расчетная величина индукции превышает допустимую, то следует применить фланец или kern переменного сечения. Такой kern вытачивается из сплошного материала, изготавливается методом горячей штамповки, или делается из двух частей.

Затем необходимо проверить оптимальность рассчитанных конструктивных размеров магнитной цепи, т. е. найти положение рабочей точки на кривой размагничивания. С этой целью вычисляют магнитную проводимость воздушных участков магнитной цепи (рис. 70).

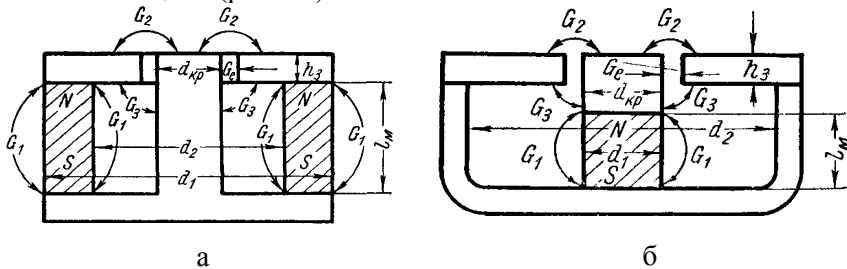


Рис. 70. Распределение магнитных потоков в магнитных цепях громкоговорителей с постоянными магнитами: а – с кольцевым магнитом; б – с кернавым магнитом.

Проводимость рабочего зазора магнитной цепи:

$$G_e = \frac{\pi d_{kp} h_3}{l_3} \mu_0 \text{ [Вб/А]}. \quad (70)$$

Проводимость для потоков рассеяния по длине магнита:

$$G_1 = 2,5 \sqrt{l_m P_m} \mu_0 \text{ [Вб/А]}. \quad (71)$$

Проводимость потоков рассеяния между торцом керна и наружной поверхностью верхнего фланца:

$$G_2 = d_{kp} \ln 4 \left(\frac{d_{kp}}{l_3} \right)^2 \mu_0 \text{ [Вб/А]}. \quad (72)$$

Проводимость потоков рассеяния между поверхностью керна и внутренней поверхностью верхнего фланца:

$$G_3 = \sqrt{2} d_{kp} \ln 4 \left(\frac{d_{kp}}{l_3} \right)^2 \mu_0 \text{ [Вб/А]}. \quad (73)$$

Полная проводимость магнитной цепи

1.1.2 Электродинамические ленточные громкоговорители

Вторая разновидность электродинамического громкоговорителя – ленточный громкоговоритель был предложен Герляхом и Шотки (1924 был запатентован преобразователь типа «Riffellautsprecher»). В этом громкоговорителе подвижной проводник 1 (рис. 3) в виде тонкой гофрированной алюминиевой ленточки является в то же время и излучателем. Ленточка расположена в зазоре между двумя полюсными башмаками 2 электромагнита 3.

Легко усмотреть крупный недостаток такого устройства – увеличение поверхности ленточки излучателя за счет увеличения ее ширины, вызывающее соответственное увеличение зазора. КПД одной из первых моделей составлял $\approx 21,5\%$. Однако распространения этот тип громкоговорителей не получил.

Следующий, более совершенный тип громкоговорителя – это громкоговоритель с волнистым диффузором. В этом приборе прямой проводник в виде ленты помещен в зазор между башмаками электромагнита 3 (рис. 4).

Лента связана с алюминиевым диффузором, состоящим из двух половинок 4, напоминающих крышки книжного переплета, к корешку которого прикреплена лента. Внешние края обеих половинок диффузора мягко закреплены в раме 5. Поверхность диффузора в целях увеличения его жесткости снабжена поперечными волнами (гофрировкой), откуда и происходит название этого типа.

Очевидно, что в этой системе отсутствует вышеуказанный недостаток ленточного громкоговорителя; функции излучателя и подвижного проводника не совмещаются в одном элементе, а потому выполнение каждой из этих функций может быть обеспечено надлежащим конструированием соответствующих органов.

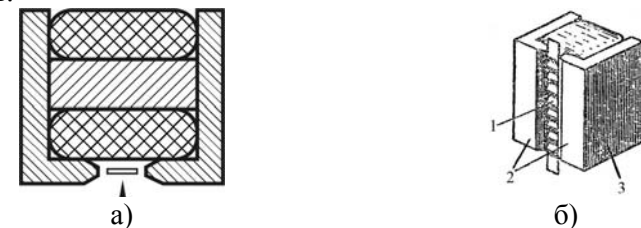


Рис. 3. Схема устройства ленточного громкоговорителя

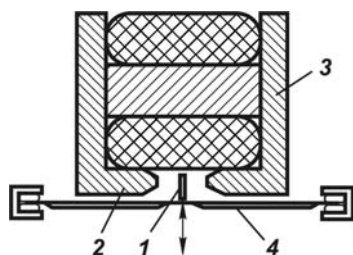


Рис. 4. Схема устройства «громкоговорителя с волнистым диффузором».

Лента поставлена по отношению к диффузору на ребро; а потому величина зазора может быть сделана очень небольшой, поскольку она определяется толщиной ленты, а не шириной ее, как в ленточном громкоговорителе. Благодаря очень небольшому размеру диффузора в плоскости изгиба (ширина каждой половинки), а также благодаря значительному увеличению жесткости за счет гофрировки – воспроизведение высоких частот получается весьма удовлетворительным.

Нужно отметить интересную конструктивную подробность: в целях упрощения конструкции в некоторых моделях подобных громкоговорителей подвижный проводник не представляет собою отдельной ленты, а образуется из материала самого диффузора при соединении обеих половинок в фалец. Это могло бы показаться невыгодным, так как ток, вместо того, чтобы идти по фальцу, растекается по всему диффузору, не производя при этом никакого действия. Однако это не так, потому что: 1) толщина фальца значительно больше толщины материала диффузора; 2) длина пути тока по гофрированной части больше и 3) главным образом потому, что диффузор подразделен на несколько частей, разделенных небольшими промежутками; в этих местах все линии тока вынуждены собираться и проходить через фалец, вследствие чего рассеяние тока сильно уменьшается. В результате потери не настолько велики, чтобы не окупиться несомненным и значительным упрощением конструкции.

Ленточные громкоговорители выпускают сейчас 12 фирм (30 моделей). Параметры ленточного громкоговорителя РТ-85 фирмы Pioneer, например, следующие: диапазон частот 10-120 кГц,

$$d_1 = \sqrt{\frac{4S_m}{\pi}} \text{ [м]}, \quad (68)$$

а внутренний диаметр стакана – по формуле (66).

Чтобы индукция магнита оставалась постоянной по его длине, применяют магнит с переменным сечением (конусообразной или ступенчатой формы). При этом расчетным сечением магнита считается нижнее основание конуса, прилегающее к нижнему фланцу или к основанию скобы или стакана. Это позволяет сэкономить 15-20% объема магнита, не уменьшая индукцию в зазоре.

Далее рассчитывают сечение магнитопровода, исходя из величины допустимой индукции для применяемого материала (табл. 7).

Таблица 7

Материал	Марка	Химический состав, % к чистому железу, не более					Допуст. индукция γ , Вб/м ³
		C	Si	Mn	S	P	
Сталь низкоуглеродистая электротехническая	Э	0,04	0,29	0,02	0,03	0,025	20
То же	ЭА	0,04	0,02	0,02	0,03	0,025	20
То же	ЭА	0,04	0,02	0,02	0,03	0,025	20
Прутки электротехнической стали	А и Э	0,035	0,03	0,03	0,025	0,015	20
Сталь качественная электротехническая отожженная	0,5	0,05	0,03	0,02	-	0,025	18
То же	0,8	0,05-0,12	0,2	0,25-0,5	0,04	0,04	18
То же	10	0,05-0,15	0,07-0,37	0,35-0,65	0,04	0,045	18
То же, не отожженная	0,15	0,07-0,15	0,17-0,35	0,35-0,65	0,04	0,04	18

Поскольку наибольшая индукция наблюдается в нижнем фланце и керне, сечение магнитопровода следует рассчитывать по допустимой индукции в указанных сечениях на основании формулы:

$$S_{mn} = \frac{\Phi}{R} \text{ [м}^2\text{]}. \quad (69)$$

Величины магнитной индукции и напряженности поля, соответствующие максимальной энергии, называются соответственно экономичной индукцией B_d , Вб/м², и экономичной напряженностью поля H_d , А/м.

При расчете магнитной цепи исходными являются следующие величины: индукция в зазоре магнитной цепи B_e , диаметр керна $d_{кр}$, ширина зазора l_3 , высота зазора h_3 .

Расчет производят в следующей последовательности. Определяют объем магнита:

$$V_m = \frac{\pi d_{кр} h_3 l_3 B_e^2}{B_d H_d \eta'_m \mu_0} \text{ [м}^3\text{]}, \quad (62)$$

где η_m – коэффициент использования магнита, равный 0,4-0,6.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [Гн/м]}. \quad (63)$$

Определяют длину магнита:

$$l_m = \sqrt{\frac{V_m B_d \eta_m}{G_e H_d}} \text{ [м]}, \quad (64)$$

где G_e – магнитная проводимость рабочего зазора.

Сечение магнита:

$$S_m = \frac{V_m}{l_m} \text{ [м}^2\text{]}. \quad (65)$$

Для кольцевого магнита внутренний его диаметр определяют по формуле:

$$d_2 = d_{кр} e^{\frac{2l_3 l_3}{k_s d_{кр} h_3}} \text{ [м]}, \quad (66)$$

где k_s – коэффициент, изменяющийся от 0,2 до 0,4. При расчете кольцевых магнитов из феррит-бария следует принимать наибольшее значение коэффициента k_s , а для магнитов из магнитных сплавов – его наименьшее значение.

Внешний диаметр кольцевого магнита

$$d_1 = \sqrt{\frac{4S_m}{\pi} + d_2^2} \text{ [м]}. \quad (67)$$

Для керна магнита диаметр его определяется по формуле:

паспортная мощность 80 Вт, чувствительность 94 дБ, габаритные размеры 87×63,5×144 мм. Наряду с таким преимуществом, как малые переходные искажения, ленточные громкоговорителя имеют ряд недостатков: большой вес магнитов, малое сопротивление ленточки, требующее согласующих трансформаторов (которые во избежание больших потерь в подводящих ток проводниках монтируются обычно непосредственно на самом громкоговорителе) и др.

1.2 Изодинамические громкоговорители

В 1924 году немецким физиком Риггером был предложен ортодинамический преобразователь, который он назвал блатхеллером («Blatthaller» - вольный перевод: «громкоговоритель с плоской излучающей поверхностью»). В основном конструкция блатхаллера такова: к большому плоскому прямоугольному диффузору 1 прикреплен поставленная на ребро изогнутая зигзагом металлическая лента 2, являющаяся подвижным проводником. Прямолинейные элементы ленты входят в соответствующие зазоры сложной магнитной цепи 3. При этом нужно обратить внимание на то, что так как в двух соседних элементах ленты ток имеет противоположное направление, то для того, чтобы действующая на эти элементы сила имела одинаковое направление, необходимо, чтобы поле в двух соседних зазорах имело противоположное направление, что и достигается, как показано стрелками в изображенной на рис. 5 конструкции. При таком устройстве рассеяние магнитного потока довольно велико, вследствие чего получение больших напряженностей поля затруднительно. В целях уменьшения рассеяния в новейших моделях применено совершенно своеобразное устройство магнитной цепи: катушки возбуждения насажены на участки магнитной цепи с наибольшим магнитным сопротивлением, т. е. охватывают самые воздушные зазоры (рис. 6). При этом диффузор располагается внутри катушек и последние отчасти экранируют в акустическом смысле диффузор; для ослабления этого эффекта катушки выполняются в виде сравнительно плоских галет, промежутки между которыми оставляют достаточную свободную поверхность диффузора.

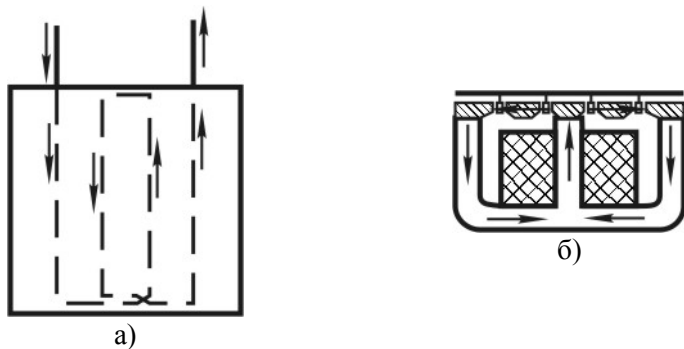


Рис. 5. Схема устройства «блатхаллера».

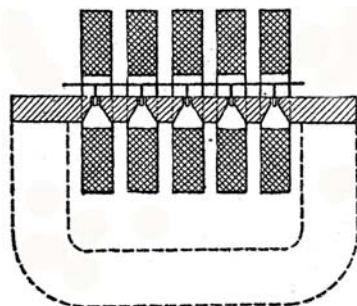


Рис. 6. Схема щелевого возбуждения

Такая система носит название «щелевого возбуждения» в отличие от ранее применявшегося «ярмового возбуждения» и позволяет получить значительно большие поля. Диффузор блатхаллера делался в первых образцах из пертиакса, а в последующих из алюминия; при этом поверхность диффузора делается волнистой. Волны располагаются перпендикулярно к направлению рабочих элементов ленты, а потому вся подвижная система обладает значительной жесткостью. Блатхаллеры достигают, огромных размеров; достаточно сказать, что к одной из моделей 1930 г. подводится мощность (звуковой частоты) 800 ватт; ток большого «блатхаллера» в ленте достигает при этом 120 ампер.

В настоящее время ортодинамические громкоговорители выпускаются серийно как рядом зарубежных фирм (Magnepan (США, Foster (Япония), Matsushita (Япония) и др), так и

$$l_3 = \Delta_k + 2l'_3 \text{ [м].} \quad (60)$$

Высота рабочего зазора, обеспечивающая минимальные нелинейные искажения, определяется по формуле

$$h_3 = 0,8 \div 0,9 h_k \text{ [м].} \quad (61)$$

Задача конструирования и расчета магнитной цепи сводится к выбору такой ее конфигурации, при которой заданная индукция в рабочем зазоре создается магнитом минимального объема и наименьшей стоимости.

Магнитные свойства постоянного магнита характеризуются кривой размагничивания, представляющей собой зависимость индукции в нейтрали магнита B от величины размагничивающего поля H . Точка пересечения кривой размагничивания с осью ординат соответствует остаточной индукции постоянного магнита B_r , а точка пересечения кривой с осью абсцисс – коэрцитивной силе H_c (рис 58). Кроме этих параметров, магнит характеризуется величиной магнитной энергии, представляющей собой произведение (BH) . Зависимость магнитной энергии от напряженности размагничивающего поля представлена на рис. 69.

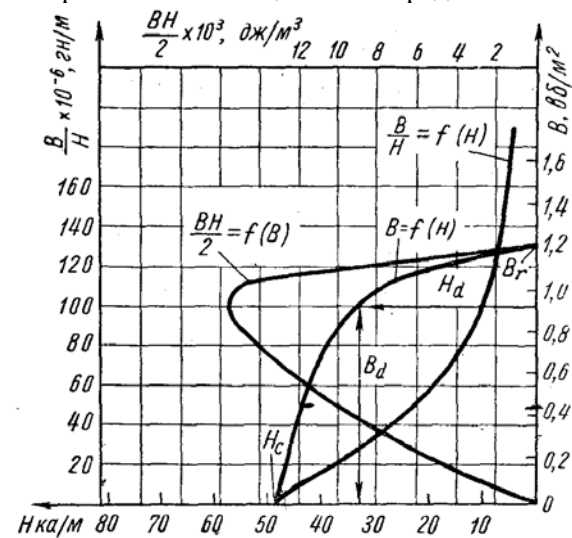


Рис. 69. Кривые размагничивания, максимальной энергии и отношения B/H постоянного магнита.

диаметр керна. К недостаткам микропроводов следует отнести большую толщину стеклянной изоляции, что уменьшает коэффициент использования зазора магнитной цепи.

Для уменьшения индуктивности можно использовать короткозамкнутый виток, намотанный непосредственно на катушку, а также неразрезной металлический каркас или центрирующее кольцо, расположенное вблизи катушки.

Для подведения напряжения к выводам звуковой катушки применяют специальные гибкие проводники, которые должны быть очень прочными, так как они несут большую механическую нагрузку (многожильные провода типа ПШС, АТСДИ, мишурный провод, медная пленка, намотанная на шелковую нитку или плетенка из тонкого медного провода, внутри которой протянута шелковая или хлопчатобумажная нитка).

2.5.4. Магнитная цепь

Магнитная цепь является важным конструктивным элементом громкоговорителя, определяющим в значительной степени трудоемкость его изготовления, габариты, вес и стоимость. Основным параметром магнитной цепи – индукция в рабочем зазоре, влияющая на форму частотной характеристики громкоговорителя и его стандартное звуковое давление.

Индукция в рабочем зазоре может быть определена из следующего выражения:

$$B_e = \frac{2\pi p_n m}{l_n S_o} \sqrt{\frac{Z_{em}}{P_e}} \quad [\text{Вб/м}^2]. \quad (59)$$

Основные конструктивные размеры рабочего зазора показаны на рис. 68.

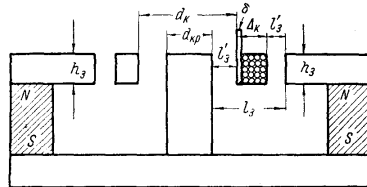


Рис. 68. Основные конструктивные размеры рабочего зазора магнитной цепи.

Ширина рабочего воздушного зазора

отечественной промышленностью (например модель 10ГИ-1). Параметры отечественного серийно выпускаемого громкоговорителя (10ГИ-1) следующие: воспроизводимый диапазон частот 2,0 ... 30 кГц, чувствительность 87 дБ, номинальная мощность 10 Вт, габариты 105×120×35 мм.

Разновидностью изодинамического громкоговорителя является излучатель Хейла.

В 1973 году в США известным физиком Оскаром Хейлом (Oscar Neil), был запатентован излучатель нового типа. Над созданием этого преобразователя ученый работал несколько лет (первая его работа по этому вопросу была опубликована в 1964 году), пытаясь добиться, чтобы при малых размерах излучатель обеспечивал большой уровень звукового давления, то есть имел КПД больше, чем обычный электродинамический громкоговоритель (КПД которого меньше 1%). В результате был создан громкоговоритель принципиально новой конструкции, получивший название "трансформатор скорости воздуха" (Air Velocity Transformer, АТМ), или излучатель Хейла.

Излучающий элемент представляет собой прямоугольную мембрану, изготовленную из тонкой тефлоновой (или майларовой) пленки толщиной ~10 мкм. Методом напыления на нее наносятся прямоугольные полосы алюминия, выполняющие роль проводника (рис. 1). Затем мембрана гофрируется в продольном направлении (расположение проводника на гофрированной мембране показано на рис. 3) и закрепляется в прямоугольной рамке. Рамка с мембраной помещается в сильное магнитное поле между полюсами магнитов. Общая конструкция магнитной цепи (выполняющей также роль акустической линзы) показана на рис. 2: цепь состоит из четырех прямоугольных ферритовых магнитов (1), наборных магнитопроводов (2), уголкового магнитопровода (3), рамы-корпуса (4) и воздушного зазора (5), куда вставляется рамка с гофрированной мембраной.

Как известно, на проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует механическая сила $F = BIL$, где B – индукция в зазоре магнитной цепи, L – длина проводника с током, I – сила тока. Направление действия силы F зависит от направления магнитных силовых линий и от направления тока (знаменитое

"правило буравчика"). В случае гофрированной мембраны (рис. 3) механическая сила будет воздействовать на каждый гофр с противоположных направлений, то есть сжимать и разжимать мембрану. При этом происходит всасывание и выталкивание воздуха (на рис. 3 стрелками показано направление движения воздуха при работе диафрагмы). За счет такого выталкивания скорость воздуха по отношению к скорости мембраны возрастает до соотношения 5:1, что позволяет увеличить КПД громкоговорителя, так как излучаемая акустическая мощность пропорциональна сопротивлению среды и колебательной скорости. Использование гофрированной мембраны позволило существенно уменьшить размеры излучающей поверхности, обеспечив тем самым расширение характеристики направленности на высоких частотах. Кроме того, поскольку вес тонкой пленочной диафрагмы много меньше, чем вес подвижной системы обычного громкоговорителя, то и уровень переходных искажений в ней значительно ниже (благодаря меньшей инерционности), чем в диффузорных громкоговорителях.

После того как излучатель был запатентован, фирма "ESS", основанная в начале 1970-х годов в США, получила лицензию и с 1973 года освоила выпуск акустических систем с таким излучателем, где излучатель Хейла использовался в качестве высокочастотного звена. Этот излучатель имеет следующие параметры: частотный диапазон – 1-25 кГц, неравномерность АЧХ ± 3 дБ, чувствительность — 98 дБ, полное электрическое сопротивление – 3,6 Ом, суммарный коэффициент гармонических искажений – 1%. Прослушивания показали, что он действительно создает чистый и прозрачный звук.

В 1977 году была разработана акустическая система "Transor ATD", полностью сконструированную на излучателях Хейла; они использовались в качестве низко-, средне- и высокочастотного звеньев. Однако дальнейшего развития эта идея не получила, так как магнитные системы для НЧ- и СЧ-звеньев оказались слишком дорогими. И интерес к производству излучателей этого типа был утрачен. Очевидно, причина заключалась в том, что при несомненных преимуществах: высокой чувствительности, низких переходных и нелинейных искажениях и других, для работы

для высокоомных – 4 и больше), находят толщину звуковой катушки:

$$\Delta_k = \tau d_n + \delta \text{ [м]}, \quad (55)$$

где δ – толщина каркаса.

Число витков звуковой катушки:

$$n = 2 \frac{h_k}{d_n} Q, \quad (56)$$

где Q – коэффициент заполнения, равный 0,9-0,95.

Масса звуковой катушки

$$m_k = l_n s_n \gamma \text{ [кг]}, \quad (57)$$

где γ – плотность материала провода, кг/м³; $l_n = \pi d_k n$ – длина провода, м.

Диаметр керна

$$d_{kp} = d_k - 2l'_s \text{ [м]}. \quad (58)$$

Если подсчитанный диаметр керна отличается от номиналов ГОСТ 9010-51, то необходимо выбрать ближайший номинал по ГОСТ и произвести соответствующий пересчет размеров звуковой катушки.

Величина полного электрического сопротивления звуковой катушки оговаривается ГОСТ 9010-51 и должна иметь один из следующих номиналов: 2; 4; 5; 6,5; 10; 20 Ом.

В громкоговорителях, используемых в усилителях с бестрансформаторным выходом, применяют высокоомные звуковые катушки. Такие катушки наматывают из тонкого провода с эмалевой изоляцией или из микропровода со стеклянной изоляцией.

Намотка катушек из тонкого провода представляет большие технологические трудности, а большое число витков увеличивает индуктивность звуковой катушки, что ухудшает воспроизведение высоких частот и увеличивает коэффициент нелинейных искажений в усилительном тракте.

К преимуществам микропроводов со стеклянной изоляцией следует отнести то, что они допускают значительно большие нагрузки, что позволяет увеличить допустимую плотность тока до $200 \cdot 10^6$ А/м². Благодаря этому можно значительно уменьшить

Диаметр провода

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{1,75d_k^2 10^{-7}}{Z_{em} K_k}} \text{ [м]}. \quad (53)$$

Полученное значение диаметра провода проверяется по допустимой плотности тока обычным образом.

Плотность тока в звуковой катушке равна

$$j = \frac{\sqrt{\frac{P_e}{Z_{em}}}}{s_n} \text{ [А/м}^2\text{]}. \quad (54)$$

Благодаря тому, что звуковые катушки содержат два слоя витков и имеют хороший теплоотвод, допускаются большие плотности тока – от 30 до $90 \cdot 10^6$ А/м². На рисунке 67 приведен график зависимости допустимой плотности тока от температуры окружающего воздуха.

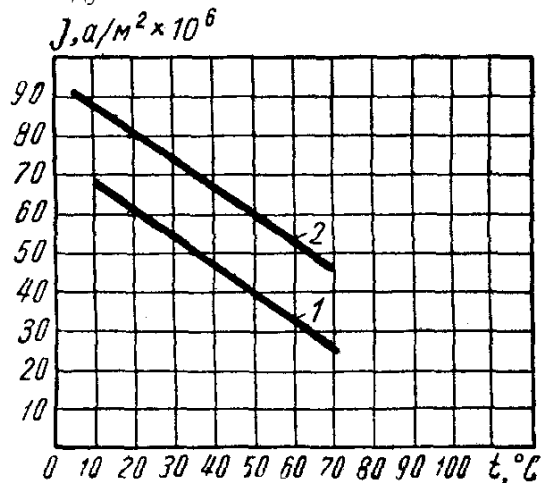


Рис. 67. Зависимость допустимой плотности тока от температуры окружающего воздуха: 1 – для широкополосных и низкочастотных громкоговорителей; 2 – для высокочастотных громкоговорителей.

Задавая число слоев звуковой катушки τ , которое обязательно должно быть четным (для низкоомных звуковых катушек число слоев выбирают равным в большинстве случаев 2, а

излучателей требовались мощные и дорогие магнитные цепи. Однако в последние годы, с появлением новых материалов и технологий, интерес к преобразователю Хейла резко возрос: модернизацией и производством излучателя занялись многие фирмы. "Precide SA" (Швейцария) в течение нескольких лет выпускает АС "Aulos" и "Kithara", а также головные телефоны с излучателями Хейла; "Cerwin-Vega" (США) разработала и начала производство новой линейки АС с таким высокочастотным излучателем (недавно ею была запатентована новая конструкция излучателя с подвижным креплением мембраны в рамке, что позволяет уменьшить искажения при больших уровнях сигнала); фирма "Orchid Precision Audio" недавно представила новую двухполосную акустическую систему "LWO" с излучателем Хейла.

В 1998 году на 106-м конгрессе AES фирма "A.D.A.M." (Германия) представила доклад на эту тему и показала образцы разработанных ею новых излучателей, использующих принцип преобразователя Хейла. Излучатель получил название "A.R.T." (Accelerated Ribbon Technology), изменения коснулись в первую очередь материала диафрагмы и технологии ее изготовления. Диафрагма изготовлена из каптона, на нее методом горячего прессования нанесен проводник из алюминия. Такая диафрагма выдерживает температуру до 400°, что позволяет увеличить паспортную мощность громкоговорителя. Применение глубокой гофрировки значительно увеличивает эффективную площадь диафрагмы по сравнению с обычным купольным громкоговорителем. В качестве магнита применяется новый высокоэффективный материал – неодим, что дает возможность существенно уменьшить габариты магнитной цепи. Излучатель обеспечивает диапазон частот 1-25 кГц, быстрый спад переходных процессов (30 дБ за 0,5 мс), низкий уровень нелинейных искажений 0,2% выше 2 кГц, чувствительность – 93 дБ/Вт/м. С использованием аналогичных диафрагм был разработан среднечастотный громкоговоритель, имеющий чувствительность 89 дБ/Вт/м; он нашел применение в студийном контрольном агрегате, где для него был предусмотрен специальный отдельный хорошо задемпфированный корпус.

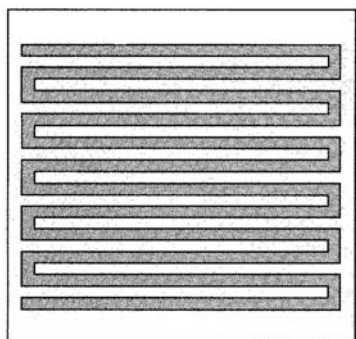


Рис. 7. Пленка с нанесенным проводником

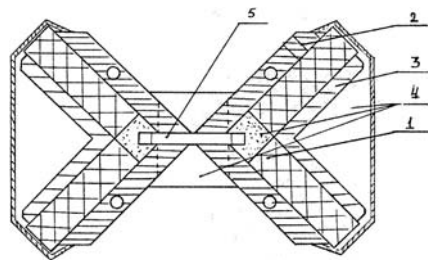


Рис. 8. Конструкция магнитной цепи

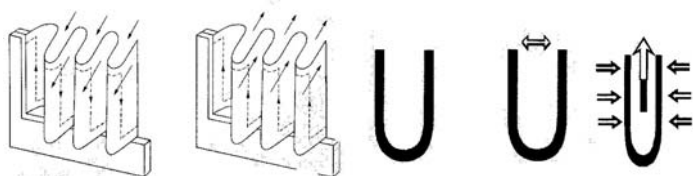


Рис. 9. Расположение проводника на гофрированной пленке и процесс выталкивания воздуха

1.3 Электромагнитные громкоговорители

Широкое распространение в 20-40-е годы имели электромагнитные громкоговорители [4].

Устройство простейшего электромагнитного механизма с железным якорем, применяемого, например, в наушных телефонах, показано схематически на рис. 10.

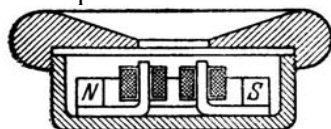


Рис. 10. Электромагнитный громкоговоритель

Здесь якорем является железная пластинка (не совсем правильно называемая мембраной), пронизываемая магнитным

Для определения всех конструктивных данных звуковых катушек следует прежде всего установить величину свободного воздушного зазора l'_3 , которая зависит от максимальной амплитуды колебаний подвижной системы. Эта экспериментальная зависимость, полученная из опыта конструирования громкоговорителей, приведена на рис. 66.

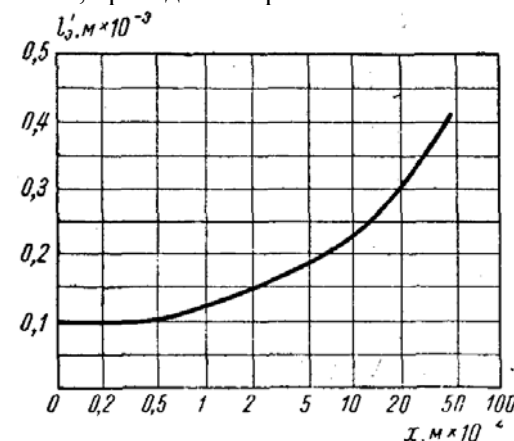


Рис. 66. Зависимость величины свободного воздушного зазора от амплитуды колебаний подвижной системы.

Определив величину свободного воздушного зазора, находим по кривым рис. 65 удельную тепловую нагрузку P_t и вычисляем боковую поверхность звуковой катушки:

$$S_{\sigma} = \frac{P_t}{P_i} [m^2]. \quad (50)$$

Задавшись отношением диаметра звуковой катушки к ее высоте $K_K = d_K/h_K$, определяем высоту и диаметр звуковой катушки по формулам

$$d_K = \sqrt{\frac{S_{\sigma} K_K}{\pi}} [m], \quad (51)$$

$$h_K = \frac{d_K}{K_K} [m]. \quad (52)$$

Для маломощных громкоговорителей $K_K = 3-4$; для мощных – 4-6.

прочностью. Под тепловой прочностью звуковой катушки понимается та предельная тепловая нагрузка, при которой звуковая катушка, вследствие нагрева не меняет своей формы и не выходит из строя во время работы громкоговорителя.

Тепловой режим звуковой катушки обеспечивается отводом тепла через тонкий слой воздуха свободного воздушного зазора к магнитной системе и рассеиванием его в окружающем пространстве. Поэтому теплоотдача зависит от толщины свободного воздушного зазора, размеров катушки и магнитной цепи, а также от материала каркаса и пропиточных лаков.

Мощность, вызывающая нагрев катушки:

$$P_e = j^2 \rho_e S_0 l_n \text{ [Вт]}, \quad (49)$$

где j – плотность тока, А/м^2 ; ρ_e – удельное сопротивление провода, $\text{Ом}\cdot\text{м}$; S_0 – боковая поверхность катушки, м^2 ; l_n – длина провода катушки, м .

Отношение P_e/S_0 называется удельной тепловой нагрузкой. Эта величина определяет температурный перепад.

На рис. 65 приведены экспериментальные кривые зависимости удельной тепловой нагрузки звуковой катушки от величины свободного воздушного зазора при температуре окружающей среды 20 и 40°C.

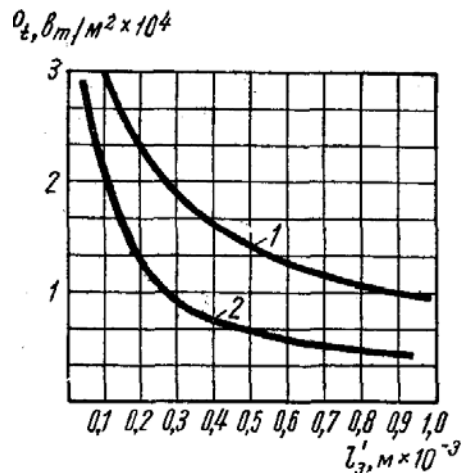


Рис. 65. Зависимость удельной тепловой нагрузки звуковой катушки от толщины свободного воздушного зазора при различной

потоком; одна из слагающих потока создаётся постоянным магнитом, другая - током звуковой частоты, протекающим через обмотку на полюсных наконечниках. В отсутствии тока пластинка притягивается к полюсным наконечникам с некоторой силой, зависящей от квадрата потока, создаваемого постоянным магнитом. Если через обмотки протекает синусоидальный ток, то в те полупериоды, когда переменная слагающая потока совпадает по направлению с постоянной, сила притяжения возрастает; в те полупериоды, когда переменный поток направлен навстречу постоянному, эта сила убывает. Таким образом, действующая на пластинку сила содержит переменную слагающую, меняющуюся с частотой тока; эта переменная сила вынуждает колебания пластинки. Очевидным недостатком такого устройства является, во-первых, значительное рассеяние магнитного потока и, во-вторых, малые величины магнитной индукции; это происходит от того, что переменная составляющая потока замыкается через тело постоянного магнита с небольшой проницаемостью. Поэтому в электромагнитных громкоговорителях (и во многих других преобразователях электромагнитного типа) применяются системы с разделением потоков – так называемые дифференциальные системы. Два типа дифференциальных систем схематически изображены на рис. 11. Для обоих типов характерно то, что переменный поток, сцепленный с током, замыкается через ярмо, набранное (с целью уменьшения потерь на вихревые токи) из пластинок мягкого железа. Термин «дифференциальные системы» имеет своё объяснение в том, что переменная сила, приложенная к концу ярка (к одному на рис. 11, а или к обоим на рис. 11, б), определяется разностью двух сил, действующих на ярко со стороны полюсных наконечников, между которыми он может колебаться. Действие дифференциальных систем ясно из приводимых схем. В простой дифференциальной системе (рис. 11, а) конец ярка находится в отсутствии тока под действием двух равных и противоположно направленных сил и, следовательно, уравновешен. При наличии тока в обмотках переменный поток в одном из зазоров складывается с потоком постоянного магнита, а в другом – вычитается из него (обратим внимание на направление намотки по обе стороны от ярка); равновесие нарушается, и ярко

отклоняется в сторону того зазора, где оба потока имеют одинаковое направление. В двойной дифференциальной системе (рис. 11, б) якорь может поворачиваться вокруг оси, проходящей через его середину; концы якоря находятся между полюсными наконечниками наборного ярма, состоящего из двух половин. В отсутствии тока на каждый из концов якоря действует по две равные и противоположно направленные силы; якорь находится в состоянии равновесия. Ток в катушке, охватывающей якорь, создаёт магнитный поток, который в одной паре накрест лежащих зазоров складывается с потоками постоянного магнита, а в другой паре – вычитается из него; при этом на якорь действует пара сил, поворачивающая его в сторону сложения потоков. Необходимо сейчас же отметить очень важное обстоятельство, характерное для всех рассмотренных выше типов электромагнитных механизмов. Как уже упоминалось, в отсутствии тока якорь находится в состоянии равновесия; однако если рассматривать одни только магнитные силы, зависящие от положения якоря, то это равновесие оказывается неустойчивым: очевидно, что при малом смещении якоря в ту или другую сторону возникает магнитная смещающая сила, направленная в сторону произошедшего смещения и, следовательно, стремящаяся увеличить это смещение вплоть до прикосновения якоря к соответствующему наконечнику. По этой причине якорь выполняется в форме системы с достаточно большой упругостью; обусловленная ею возвращающая сила должна быть настолько велика, чтобы при любом положении якоря она преобладала над магнитной смещающей силой и тем самым гарантировала устойчивость равновесного состояния системы.

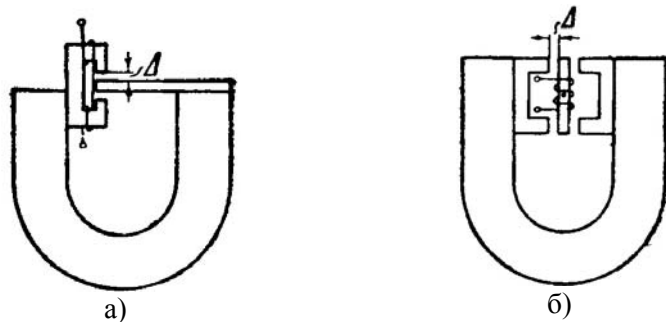


Рис. 11. Дифференциальные системы

провода. Ленточные провода обеспечивают лучшее заполнение катушки, но более дороги; изготовление катушек при этом технологически сложнее.

Каркас звуковой катушки для маломощных громкоговорителей делается из плотных сортов бумаги (типа кабельной бумаги толщиной $0,08-0,12 \cdot 10^{-3}$ м); для мощных громкоговорителей он изготавливается также из алюминия, бронзы или пластмассы. Каркас должен быть жестким и устойчивым к климатическим воздействиям. Обмотка располагается на одном конце каркаса, второй конец каркаса, именуемый шейкой, предназначен для приклейки звуковой катушки к диффузору. Для придания шейке большей жесткости в некоторых случаях ее делают толще (многослойной).

Обмотка обычно помещается поверх каркаса, но известны конструкции, в которых обмотка звуковой катушки располагается по обе стороны каркаса. Различные конструкции звуковых катушек показаны на рис. 64.

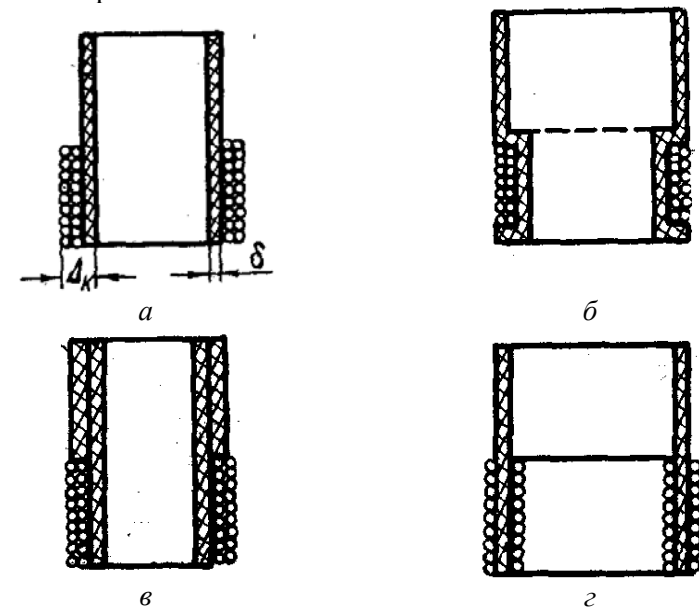


Рис. 64. Различные конструкции звуковых катушек. Звуковая катушка должна обладать также тепловой

маи, миткаля и т. п. Предпочтение следует отдавать менее плотным материалам, так как в этом случае устраняются нелинейные искажения, обусловленные упругостью объема воздуха между центрирующей шайбой и диффузородержателем. Для пропитки применяют бакелитовую смолу, растворенную в спирте с касторовым маслом, служащим пластификатором.

Иногда применяют центрирующие шайбы, в которых в качестве пропиточного материала используется цапонлак. Технология изготовления таких шайб проще, но температуростойкость их меньше.

Гофрированные центрирующие шайбы рассчитывают по тем же формулам, что и гофрированные подвесы диффузоров. Расчетные формулы дают приближенные данные, которые в дальнейшем экспериментально уточняются.

Формула для определения гибкости центрирующей шайбы имеет вид

$$C_{ш} = \frac{(1 - \sigma^2)b_{ш}^3}{\pi E h^3 (b_{ш} + d_k) \alpha_1 \alpha_2} \quad [\text{м/Н}], \quad (46)$$

где d_k – диаметр звуковой катушки.

Ширина воротника центрирующей шайбы

$$b_{ш} \approx 1,1 h \sqrt[3]{\frac{2\pi E C_{ш} d_k \alpha_1 \alpha_2}{1 - \sigma^2}} \quad [\text{м}]. \quad (47)$$

Задаваясь числом гофров n , можно определить шаг гофра:

$$l = \frac{b_{ш}}{n} \quad [\text{м}]. \quad (48)$$

2.5.3. Звуковая катушка

Звуковая катушка динамического громкоговорителя представляет собой обмотку из медного или алюминиевого провода, намотанного на цилиндрический каркас плотно виток к витку.

Для обеспечения механической прочности намотки и исключения сползания витков в процессе работы громкоговорителя, витки склеивают между собой и приклеивают к каркасу специальным лаком. Применяют обычные круглые провода с оксидной или эмалевой изоляцией или специальные ленточные

Электромагнитные громкоговорители с подвижным железом имеют в настоящее время очень ограниченную область применения, так как по своим качественным показателям они значительно уступают электродинамическим громкоговорителям. По чисто экономическим соображениям электромагнитные громкоговорители применяются в сетях проводного вещания, будучи дешевле электродинамических приборов с постоянными магнитами и удовлетворяя своей небольшой мощностью предъявляемым здесь требованиям. Все эти громкоговорители представляют собой дифференциальные системы (простые или двойные); в качестве примеров на рис. 12 и 13 изображены две формы их конструктивного выполнения. Устройство и действие этих электромагнитных механизмов не требуют специальных разъяснений, так как они в принципе не отличаются от схем, представленных на рис. 11. Обе формы сходны друг с другом в том отношении, что при движении якоря воздушные зазоры между якорем и полюсными наконечниками меняют свою величину; поэтому к этим конструкциям применяется термин «громкоговорители с переменным зазором».

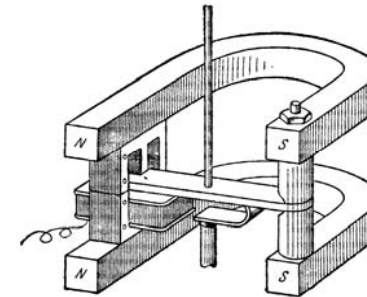


Рис. 12. Конструктивное выполнение

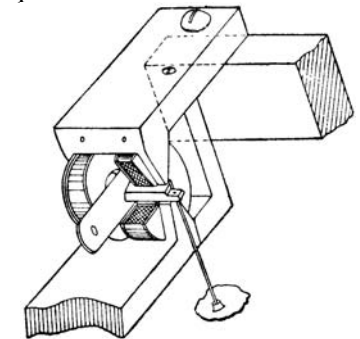


Рис. 13. Конструктивное выполнение

Обратим внимание на то обстоятельство, что колебательное движение сообщается коническому диффузору через посредство рычажной передачи. По конструктивным причинам игла, связывающая диффузор с якорем, не может быть прикреплена к якорю в точке приложения движущей силы, т. е. между полюсными наконечниками; фактически имеющееся устройство приводится к

схеме рычага второго рода, осуществляющего трансформацию сил и скоростей. Две применяющиеся схемы рычажной передачи показаны на рис. 14.

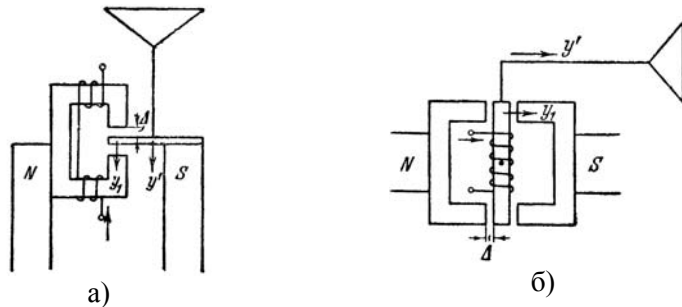


Рис. 14. Схемы рычажной передачи

Одна из наиболее распространённых (и своё время) форм выполнения электромагнитного механизма с постоянным зазором изображена схематически на рис. 15 (система «Фарранд»). Здесь имеется два якоря А-А, расположенные между зазорами ярма и жёстко связанные между собой; устройство подвеса таково, что якоря могут перемещаться только в направлении соединяющего их стержня (пунктирная линия). Якоря несколько выдвинуты из зазоров наружу, примерно на 60% своей длины. В отсутствии тока через обмотки каждый из якорей втягивается в зазор с некоторой силой, компенсируемой реакцией стержня, и система находится в равновесии. Устойчивость равновесия существенно зависит от степени выдвигания якорей из зазора; опыт показывает, что при небольшом выдвигании (< 70% длины якоря) равновесие устойчиво; при большем сдвиге (~<80%) по обе стороны от среднего устойчивого положения появляются положения неустойчивого равновесия; при сдвиге свыше 100% длины якоря среднее равновесное положение неустойчиво. Электромагнитные громкоговорители с постоянным зазором давали чувствительность того же порядка величины, как и громкоговорители с переменным зазором при значительно лучшей частотной характеристике. Однако они не получили широкого распространения вследствие того, что их сборка требует высокой точности, которую очень нелегко обеспечить в условиях массового производства.

упругости материала, Н/м².

Гофрированная центрирующая шайба (рис. 63) состоит из гофрированной части, внешнего края в виде плоского воротника или краевого гофра для приклейки к диффузородержателю или центрирующему мостику, и шейки для более прочной приклейки звуковой катушки и диффузора.

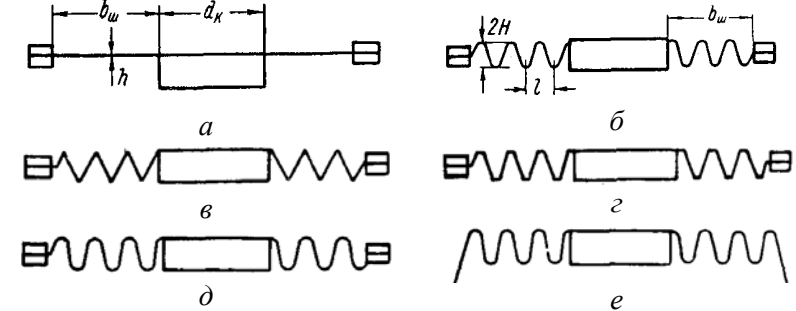


Рис. 63. Гофрированные центрирующие шайбы: а – плоская; б – синусоидальная; в – пильчатая; г – трапециевидная; д – круговая; е – с краевым гофром.

Гофрированные центрирующие шайбы находят преимущественное применение, так как они обеспечивают большую гибкость в аксиальном направлении и большую жесткость в радиальном и линейны в широком диапазоне амплитуд смещения. При их помощи достигается прочное крепление и фиксирование положения звуковой катушки в зазоре магнитной цепи и затрудняется расцентровка катушки.

Гофрированные центрирующие шайбы так же, как и диффузоры, могут иметь гофры с одинаковыми или разными профилями (пильчатые, синусоидальные, трапециевидные и круговые).

Шайба с краевым гофром (рис. 63 е) обладает большой гибкостью и обеспечивает удобство сборки громкоговорителя. При изготовлении шайб из бумажной массы следует применять наиболее прочные сорта целлюлозы, например, сульфат-целлюлозу и гигроскопическую вату. Еще большей механической прочностью, линейностью и стойкостью к изменению климатических условий обладают центрирующие шайбы из пропитанной лаками хлопчатобумажной или шелковой ткани – марли, чалмы, канвы,

изготавливаются штамповкой из тонкого текстолита. Для приклейки звуковой катушки или шейки диффузора в центральной части шайбы путем горячей вытяжки делается специальный бортик с шейкой.

Различают две конструкции «паучковых» центрирующих шайб (рис. 62): внутреннюю и внешнюю.

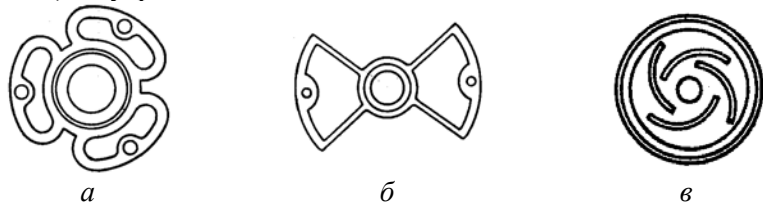


Рис. 62. Конструкции паучковых центрирующих шайб: *a* и *б* – внешние; *в* – внутренняя.

Внутренняя центрирующая шайба помещается внутри конуса и прикрепляется своей центральной частью к керну магнитной цепи. Внешняя центрирующая шайба с одной стороны прикрепляется к наружной части вершины диффузора, а с другой либо к магнитной цепи, либо к диффузородержателю при помощи специального центрирующего мостика. Такое закрепление позволяет регулировать положение звуковой катушки, но снижает эксплуатационную надежность громкоговорителя. Для ее повышения приходится увеличивать зазор магнитной цепи, что, в свою очередь, приводит к возрастанию веса магнита. К недостаткам внешних шайб относится также и то, что они имеют собственный резонанс с малым затуханием, вследствие чего появляются призвуки при воспроизведении.

К достоинствам «паучковых» центрирующих шайб относятся их высокая механическая прочность и то, что их гибкость практически не изменяется при длительной эксплуатации в различных климатических условиях.

Гибкость «паучковой» центрирующей шайбы рассчитывают по формуле:

$$C = \frac{6l^3}{6h^3En} \text{ [м/Н]}, \quad (45)$$

где l – длина балочки или стрелы паучка, м; b – ширина балочки, м; h – толщина балочки, м; n – число балочек в паучке; E – модуль

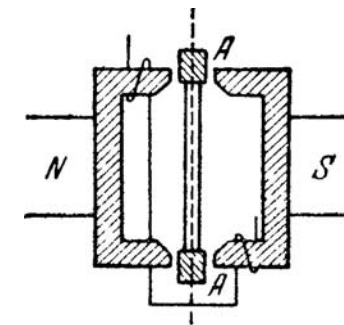


Рис. 15. Система «Фарранд»

1.4 Электростатический и электретные громкоговорители

Наиболее распространенным типом среди нединамических излучателей является электростатический громкоговоритель [5]. Принцип работы электростатического излучателя показан на рис. 16. Излучающим элементом является тонкая металлизированная пленка, как правило, из лавсана толщиной 10 мкм или плёнка Mylar, помещенная на небольшом расстоянии (0,3-0,5 мкм) между двумя перфорированными электродами из металлизированного диэлектрика, называемыми «статиками». Между мембраной и электродами приложено постоянное поляризующее напряжение (достигающее нескольких тысяч вольт), которое значительно выше максимального напряжения сигнала, что уменьшает нелинейные искажения (менее 5 %). Переменное звуковое напряжение подается через обмотку повышающего трансформатора к неподвижным электродам. Конструктивно широкополосный электростатический излучатель состоит из набора кольцевых или прямоугольных пластин, количество которых определяет уровень звукового давления и воспроизводимый диапазон частот. Хотя принцип электростатического преобразования известен давно (первая конструкция была продемонстрирована в 1926 г. на Берлинской выставке), серийный выпуск их начался только в конце 50-х годов. Причиной этого явилась необходимость решения ряда сложных технологических задач: выбор и нанесение электроизоляционных покрытий, выбор материала электродов и т. д.

Преимущества электростатических громкоговорителей в том, что они возбуждаются по всей поверхности подвижного электрода, благодаря чему все его точки колеблются синфазно, т. е. поршнеобразно, и он излучает всей поверхностью, что особенно важно при излучении высоких частот. Поэтому частотная характеристика электростатических громкоговорителей – весьма протяженна в сторону высоких частот по сравнению с характеристиками громкоговорителей, построенных на других видах преобразования.

Недостатками электростатических громкоговорителей являются прежде всего специфические для них виды нелинейных искажений по второй гармонике, возникающие из-за того, что сила электростатического притяжения пропорциональна не приложенному к электродам напряжению, а его квадрату. Эти искажения могут быть сильно уменьшены путем применения напряжения поляризации и так называемой дифференциальной конструкции. Но последняя дает необходимый эффект только при высокой степени симметрии расположения подвижного электрода между неподвижными. Само собой разумеется, что должна соблюдаться и электрическая симметрия, т. е. равенство подаваемых в оба неподвижных электрода напряжений.

Не всегда удобно и то, что электростатический громкоговоритель для воспроизведения широкого частотного диапазона должен иметь большую излучающую поверхность. Это, кроме конструктивных неудобств, приводит к тому, что характеристика направленности такого громкоговорителя зависит от частоты, сильно обостряясь с ее повышением. Правда, с этим борются, составляя громкоговоритель из отдельных сравнительно узких панелей, располагаемых в горизонтальной плоскости (например, по дуге окружности).

Существенный недостаток электростатических громкоговорителей так же в том, что они являются для питающих их усилителей емкостной нагрузкой, сопротивление которой падает с частотой.

Довольно неудобна также во многих случаях необходимость в дополнительном источнике постоянного напряжения. Все это усложняет построение усилителя и требует применения

модуль упругости. Например, если увеличить концентрацию цапонлака при пропитке бумажного подвеса диффузора с 0,4% до 0,8% сухого остатка, то упругость возрастет в 2-3 раза.

Приведенная формула для расчета гибкости подвеса диффузора дает только приближенные результаты, которые должны уточняться экспериментально.

Для изготовления диффузоров применяются следующие материалы: сульфат-целлюлоза; сульфит-целлюлоза; соломенная целлюлоза; древесная масса; хлопок-линтер или гигроскопическая вата; фильц, шерсть или микрофонный войлок; льняное волокно.

В каждом случае композицию бумажной массы определяют экспериментально.

Для низкочастотных диффузоров применяют следующие композиции бумажной массы: микрофонный войлок 40-60% и сульфит-целлюлоза 60-40%; местеризованная сульфит-целлюлоза 50% и сульфат-целлюлоза 50%. Бумажная масса имеет жирность размола 20-25° по ШР.

При изготовлении диффузоров, предназначенных для воспроизведения частот в диапазоне 80-8000 Гц, применяются следующие композиции бумажной массы: сульфат-целлюлоза 20-50% и сульфит-целлюлоза 80-50%; сульфит-целлюлоза 25-50% и гигроскопическая вата 20-50%; местеризованная сульфит-целлюлоза 40-50% и сульфат-целлюлоза 60-50%; древесная масса 40-60% и сульфат-целлюлоза 60-40%; древесная масса 20-40% и сульфит-целлюлоза 80-60%.

Для малогабаритных громкоговорителей с ограниченным диапазоном частот (200-4000 Гц) диффузоры изготавливают из бумажной массы, состоящей из одной компоненты: соломенной целлюлозы, сульфит или сульфат-целлюлозы с жирностью размола 25-30° по ШР.

2.5.2. Центрирующие шайбы

Центрирующая шайба в динамическом громкоговорителе предназначена для фиксации положения звуковой катушки в зазоре и обеспечения строго аксиального ее перемещения.

Так называемые «паучковые» центрирующие шайбы выполняются в виде ряда параллельных изогнутых балочек. Они

Таблица 4

Профиль гофра	значения коэффициента α_1
Плоский	1
Трапецидальный	2
Пильчатый	3
Синусоидальный	4

Таблица 5

H/l	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
Значения коэффициента α_2	1	1,5	2,6	3,4	3,7	4,2

Ширину подвеса можно также вычислить по формуле, аналогичной (41):

$$b_0 \approx 1,1h_3 \sqrt{\frac{2\pi EC_0 D_0 \alpha_1 \alpha_2}{1 - \sigma^2}} \text{ [м]}. \quad (43)$$

Задаваясь числом гофров n , можно определить шаг гофра:

$$l = \frac{b_0}{n} \text{ [м]}. \quad (44)$$

Значения модулей упругости материалов, применяемых для изготовления подвесов, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Тип материала	Модуль упругости, Н/м ²	Плотность, кг/м ³
Бумага диффузорная с канифольно-парафиновой проклейкой	$3,0 \cdot 10^8$	$0,6 \cdot 10^3$
Диффузор из бумажной массы, пропитанной цапонлаком с сухим остатком 0,4%	$1,5 \cdot 10^7$	$0,4 \cdot 10^3$
Текстолит листовой	$3,0 \cdot 10^9$	$0,8 \cdot 10^3$
Марля или канва, пропитанные в растворе 15%-ного бакелитового лака	$3,5 \cdot 10^8$	$0,22 \cdot 10^3$
Шифон или миткаль, пропитанные в растворе 15%-ного бакелитового лака	$1,5 \cdot 10^8$	$0,46 \cdot 10^3$

Чем выше концентрация пропитывающего лака, тем больше

специальных схем. Пример такой схемы питания электростатического громкоговорителя напряжениями поляризации и звуковой частоты представлен на рис. 17.

Еще одним недостатком электростатических громкоговорителей и является сравнительно низкая чувствительность, обусловленная ограниченной электрической прочностью воздуха, не позволяющей повышать действующие между электродами напряжения сигнала и поляризующее. Вместе с тем электростатические громкоговорители и телефоны обеспечивают очень высокое качество звучания, лишенное какой-либо окраски. Это обусловлено чрезвычайно малыми переходными искажениями легкой диафрагмы.

Основными задачами при проектировании электростатических громкоговорителей являются в настоящее время: расширение характеристики направленности и увеличение динамического диапазона. Поскольку излучатели такого типа высоко ценят за «чистоту» и «прозрачность» звучания, объем производства продолжает интенсивно расти.

На рис. 16а приведена схематическая конструкция конденсаторного однотактного громкоговорителя. На ребристом полуцилиндре с помощью винта 3 натянута тонкая металлическая фольга 2, с внутренней стороны облицованная диэлектриком, или полимерная пленка, покрытия металлом снаружи. Поверхности полуцилиндра и фольга служат электродами конденсатора. Обычно однотактные громкоговорители являются высокочастотными, так как отклонения подвижного электрода незначительны. При этом механический резонанс громкоговорителя весьма высок и располагается на частоте около 10 кГц. Эти громкоговорители пригодны для высокочастотного звукового диапазона и для излучения ультразвука.

Пушпульный вариант конструкции громкоговорителя допускает большие отклонения подвижного электрода, и его применяют в средне- и низкочастотных преобразователях. Для воспроизведения низких частот (100 Гц) требуется пластина площадью $S = 0,5 \text{ м}^2$. Эти громкоговорители применяют в высококачественных АС, контрольных студийных агрегатах и т. д.

Электретные излучатели отличаются от электростатических

отсутствием блока поляризации и использованием вместо него поляризованного диэлектрика (электрета). В качестве электрета используют различные полимерные материалы, способные сохранять длительное время заряд на поверхности после поляризации в коронном разряде. Существуют конструкции излучателей, где электретный материал можно использовать в качестве излучающей мембраны (биполярный, моноэлектрет) или наносить на электроды (массивный электрет). Отсутствие необходимости использовать поляризующее напряжение является преимуществом таких излучателей, однако трудности в обеспечении стабильности поверхностных зарядов на большей площади ограничивают возможности их широкого применения в излучателях с излучающим элементом в виде тонкой металлизированной пленки толщиной порядка 6... 10 мкм, помещенной между перфорированными электродами из металлизированного диэлектрика. Между мембраной и электродами приложено постоянное поляризующее напряжение. Переменное звуковое напряжение, под действием которого мембрана колеблется и излучает звук, подводится через повышающий трансформатор к неподвижным электродам. В настоящее время выпускаются несколько десятков моделей такого типа громкоговорителей, в том числе отечественная серийная модель широкополосного электростатического громкоговорителя 25АСЭ-101.

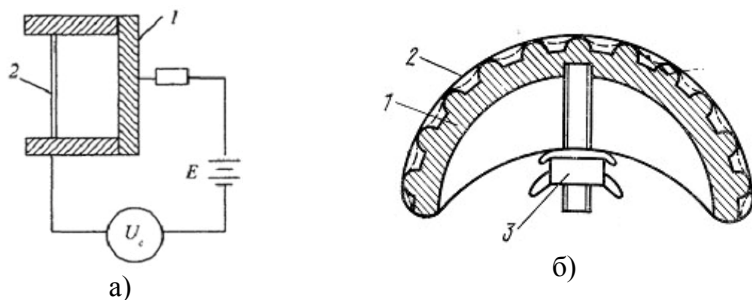


Рис. 16. Однотактный электростатический громкоговоритель: 1 - неподвижные электроды; 2 - гибкий электрод с изоляцией (излучающая мембрана); 3 - натягивающий винт

моделях, подвес диффузора выполняют в виде гофрированного кольца и отливают из бумажной массы вместе с конической частью диффузора. В некоторых случаях гофрированный подвес изготавливают отдельно и приклеивают к конической части. Гофрированный подвес (см. рис. 60) характеризуется геометрическими параметрами: шагом гофра l , толщиной h , высотой гофра H , шириной подвеса b_0 и числом гофров n . Применяют следующие профили гофров: синусоидальный, пильчатый, трапецидальный или круговой. Наибольшей линейностью обладают пильчатый и синусоидальный гофры, меньшей – трапецидальный. Изготовить высоту гофра больше чем $1/2$ его шага практически невозможно, поэтому пределом высоты является $1/2$ шага гофра.

Гофрированные подвесы состоят из одного или нескольких гофров. Гофры могут иметь одинаковые или разные профили. Применение подвеса с различным профилем гофров улучшает частотную характеристику громкоговорителя в области резонансной частоты подвеса. Частотные искажения в этой области уменьшаются также, если подвес изготовлен из другого материала и приклеивается к конусу диффузора. Однако оба эти способа усложняют производство, что несколько ограничивает их применение.

Гофрированный подвес эллиптических диффузоров для обеспечения одинаковой гибкости по всему основанию диффузора выполняют так, чтобы его ширина по большой оси превосходила ширину по малой оси.

Гибкость гофрированного подвеса рассчитывают по формуле, аналогичной (40):

$$C_0 = \frac{(1 - \sigma)^2 b_0^3}{\pi E h^3 (b_0 + D_0) \alpha_1 \alpha_2} \text{ [м/Н]}. \quad (42)$$

Коэффициент α_1 характеризует профиль гофра, коэффициент α_2 – его высоту. Примерные значения коэффициентов α_1 и α_2 приведены ниже:

образующую, то ее радиус кривизны должен изменяться прямо пропорционально радиус-вектору эллипса:

$$\rho_i = \frac{R_i}{a} \rho \text{ [м]}. \quad (38)$$

Здесь R_i – радиус-вектор эллипса, определяемый из выражения

$$R_i = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}} \text{ [м]}, \quad (39)$$

где φ – угол между большой осью и радиус-вектором, град; ρ – радиус кривизны образующей при $\varphi = 0$, м.

Диффузор, отлитый из бумажной массы, обычно имеет неравномерную толщину и плотность по образующей – вершина его толще, а основание тоньше.

Толщину диффузоров выбирают в зависимости от мощности громкоговорителя:

Таблица 3

Номинальная мощность громкоговорителя, Вт	0,1	1	2	5	10
Толщина диффузора в средней части образующей, м·10 ⁻³	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4

Гибкость подвеса в виде кольца (см. рис. 47) определяется из выражения

$$C_\delta = \frac{(1 - \sigma^2)b_\delta^3}{\pi E h^3 (b_\delta + D_\delta)} \text{ [м/Н]}. \quad (40)$$

Здесь b_δ – ширина воротника, м; h – толщина подвеса, м; E – модуль упругости материала, Н/м²; σ – коэффициент Пуассона ($\sigma = 0,25-0,3$).

При конструировании подвеса должна быть рассчитана в первую очередь его ширина b_δ . Толщину и материал подвеса выбирают из условия обеспечения необходимой механической прочности. Ширину подвеса подсчитывают по приближенной формуле:

$$b_\delta \approx 1,1h\sqrt[3]{\frac{2\pi EC_\delta D_\delta}{1 - \sigma^2}} \text{ [м]}. \quad (41)$$

В современных громкоговорителях, особенно в массовых

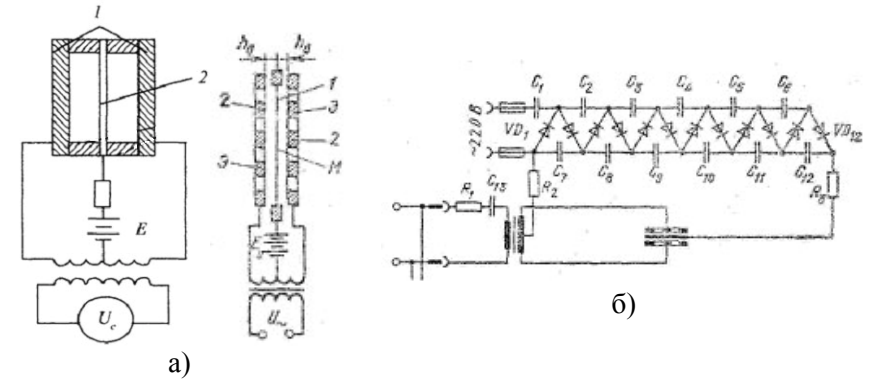


Рис. 17 Двухтактный (уравновешенный, пушпульный - push-pull) электростатический громкоговоритель: а – конструкция: 1 – диафрагма (мембрана) М, 2 – неподвижные электроды Э, E_0 – источник поляризующего напряжения, h_0 – расстояние между диафрагмой М и неподвижным электродом Э; б – пример схемы устройства его питания и поляризации: $C_1=C_2\dots=C_{12}=33$ пФ, $C_{13}=100$ мкФ, $R_1=1$ МОм, $R_2=470$ кОм, $R_3=10$ МОм. Диоды: VD1–VD12

1.5 Пьезокерамические и пьезопленочные громкоговорители

Довольно широкое распространение получили модели пьезокерамических громкоговорителей, в основном в качестве высокочастотных излучателей в акустических системах. В качестве возбуждающего элемента в них используется биморфный элемент, полученный путем соединения двух пластин из пьезокерамики (цирконата титана, титаната бария и др.). Биморфный элемент закрепляется с двух сторон, при подведении электрического сигнала в нем происходят изгибные деформации, которые передаются соединенной с ним излучающей диафрагме.

Конструкция одного из образцов громкоговорителей показана на рис. 18. Пьезокристалл выполнен в виде биморфной пластинки 1, зажатой в трёх точках (рис. 18); свободный угол связан с конической диафрагмой 2. Объём между диафрагмой и крышкой с отверстиями выполняет роль передней камеры. При рациональном подборе акустических параметров системы удаётся получить

вполне удовлетворительную частотную характеристику громкоговорителя, как это видно из рис. 19. Отметим, что существенную роль играет выбор омического сопротивления, присоединяемого последовательно с кристаллом. Чувствительность пьезотелефонов доходит до величины порядка 8-10 бар/вольт; подаваемое эффективное напряжение может достигать нескольких вольт.

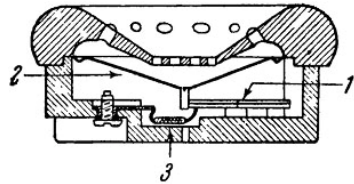


Рис. 18 Конструкция пьезокерамического громкоговорителя

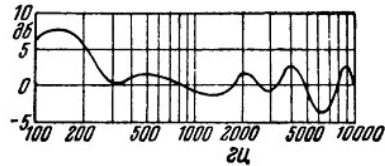


Рис. 19 Частотная характеристика пьезокерамического громкоговорителя

Рупорные пьезоэлектрические громкоговорители нашли применение в качестве высокочастотных звеньев громкоговорящего агрегата. В одном из приборов этого типа диафрагма выполнена из четырёх биморфных пластинок, закрепляемых в трёх точках; пластинки склеены рёбрами таким образом, что свободные углы совмещаются в центре квадрата, составленного из четырёх биморфов. В результате получается квадратная диафрагма, центральная точка которой колеблется с наибольшей амплитудой; по мере приближения к краям амплитуда постепенно убывает. Диафрагма нагружается на высокочастотный рупор через посредство предрупорной камеры, как это видно на схеме устройства громкоговорителя (рис. 20, а). При постоянстве напряжения, подаваемого на обкладки биморфа, диафрагма колеблется с постоянной амплитудой, причём её скорость растёт с частотой; это вызывает возрастание акустической мощности в сторону высоких частот (вплоть до резонансной частоты диафрагмы). Для коррекции частотной характеристики используется индуктивность, включаемая последовательно с ёмкостью биморфа с таким расчётом, чтобы резонанс контура имел место на частоте, лежащей ниже собственной частоты диафрагмы.

колебаний подвижной системы громкоговорителя.

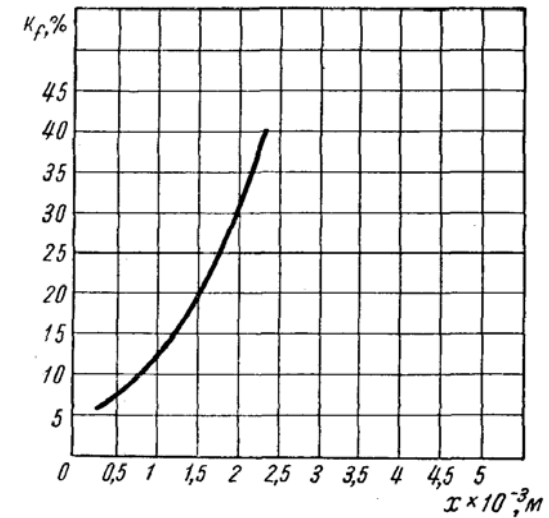


Рис. 61. Зависимость коэффициента нелинейных искажений от амплитуды колебаний подвижной системы громкоговорителя.

При расчете низкочастотных громкоговорителей следует учитывать допустимый завал N частотной характеристики на низких частотах. В этом случае звуковое давление

$$p'_n = p_n \cdot 10^{-0,05N} \text{ [Н/м}^2\text{]}. \quad (34)$$

Если диффузор круглый, то диаметр излучающей поверхности

$$D_o = \sqrt{\frac{4S_o}{\pi}} \text{ [м]}. \quad (35)$$

Для эллиптических диффузоров размеры малой и большой полуосей вычисляют по формулам

$$b = \sqrt{\frac{S_o}{\pi\tau}} \text{ [м]}, \quad (36)$$

$$a = \sqrt{\frac{S_o\tau}{\pi}} \text{ [м]}, \quad (37)$$

где τ – отношение полуосей, которое выбирают равным одному из следующих значений: 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0.

Если эллиптический диффузор имеет криволинейную

В области средних частот на частотах ниже $f_i = \frac{2}{\sqrt{m_i C_i}}$, где

m_i – масса кольца, C_i – гибкость гофра, – обе части диффузора, разделенные гофром, колеблются синфазно, благодаря чему в частотной характеристике не появятся пики и провалы, присущие этой области.

Если боковая поверхность конуса выполняется гофрированной, то благодаря наличию большого количества гофров, в области средних частот отключаются те участки диффузора, которые создают субгармонические нелинейные искажения.

Гибкость гофра рассчитывают по формуле

$$C_i = \frac{\pi R_i^3}{4EI} \quad [\text{м/Н}], \quad (31)$$

где E – модуль упругости материала гофра, Н/м²; I – момент инерции гофра, м⁴; b – длина окружности гофра, м; h – толщина материала, м; R_i – радиус кривизны гофра, м.

Если ширина гофра мала по сравнению с его глубиной, гибкость можно определить по формуле

$$C_i \approx \frac{l^3}{3EI} \quad [\text{м/Н}], \quad (32)$$

где l – длина двойной глубины гофрировки, м.

За излучающую поверхность диффузора принимают площадь основания его конуса. Ее определяют из условий получения необходимого звукового давления, при котором нелинейные искажения не превышают заданной величины.

Излучающую поверхность диффузора найдём из выражения

$$S_o = 0,128 \frac{P'_n}{x f^2} \quad [\text{м}^2]. \quad (33)$$

где x – амплитуда колебаний подвижной системы и, соответственно, диффузора.

Амплитуду колебаний подвижной системы выбирают из условия допустимого коэффициента нелинейных искажений. На рис. 61 приведена усредненная экспериментальная кривая зависимости коэффициента нелинейных искажений от амплитуды

В качестве этой индуктивности может быть использована индуктивность рассеяния трансформатора. Получающаяся коррекция иллюстрируется частотной характеристикой электроакустической отдачи (рис. 21); отметим, что средняя отдача составляет 14%. Теряемая мощность распределяется следующим образом: на электрические потери приходится 32%, на механические — 54%.

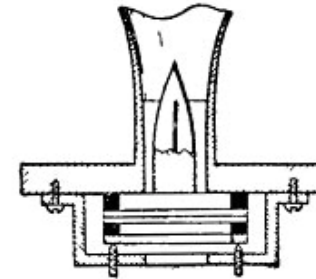


Рис. 20 Конструкция рупорного пьезокерамического громкоговорителя

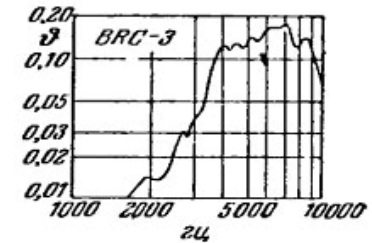


Рис. 21 Частотная характеристика пьезокерамического громкоговорителя после коррекции

Разновидностью пьезокерамических громкоговорителей являются пьезопленочные излучатели. Родоначальником пьезопленочных излучателей является японский физик Kawai, который в 1969 г. открыл пьезоэффект у поливинилиденфторидной пленки (ПВДФ). После этого открытия начались работы по применению ее в электроакустических преобразователях. Процесс, который придает высокополимерным материалам пьезоэлектрические свойства включает следующие операции: вытягивание пленки в одном или двух направлениях в 4-6 раз при температуре 60-100°C; напыление на обе стороны алюминия, поляризацию ориентированной пленки в постоянном электрическом поле. Если обработанную таким образом пленку изогнуть и закрепить ее концы, то при приложении переменного напряжения в направлении, перпендикулярном поверхности пленки она начинает пульсировать и излучать звук. Первые конструкции высокочастотных пьезопленочных громкоговорителей

представляли собой жесткие перфорированные цилиндры, на которые натягивалась пленка из ПВДФ вместе с мягкой подложкой из поролона. Конструкция такого излучателя показана на рис. 22. Фирма Pioneer выпустила целую линейку Щ с использованием пьезопленочных излучателей такого типа НРМ-100, НРМ-2ДО и др. В 1982 г. фирма Audax (Франция) представила образец высокочастотного пьезопленочного излучателя купольной конструкции из двусосно ориентированной пленки (толщина пленки 25 мк, масса подвижной системы 100 мг, диапазон воспроизводимых частот 7-50 кГц). Сравнительная простота конструкции отсутствие постоянных магнитов являются преимуществами данного типа излучателей.

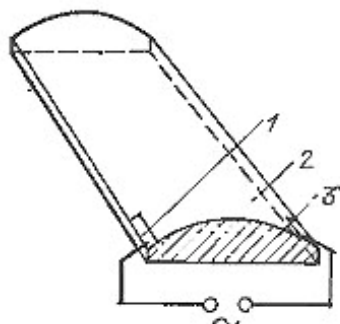


Рис. 22 Конструкция пьезопленочного громкоговорителя: 1 – контакты, 2 – пьезопленочная мембрана, 3 – подложка.

1.6. Плазменные (плазмотроны, ионофоны) громкоговорители

Схематично ионофон показан на рис. 23. При подаче на коронирующий электрод высокочастотного напряжения у свободного конца электрода создается большая напряженность поля, вызывающая ионизацию молекул окружающего воздуха, и коронирующий электрод оказывается окруженным облачком ионов. Температура внутри этого облачка достигает 1700° С. Ионизированное облачко занимает объем, зависящий от величины высокочастотного напряжения. Если высокочастотное напряжение промодулировать по амплитуде, то объем облачка ионизированного воздуха будет меняться с частотой модулирующего напряжения. Изменение объема облачка ионов приводит к изменению давления

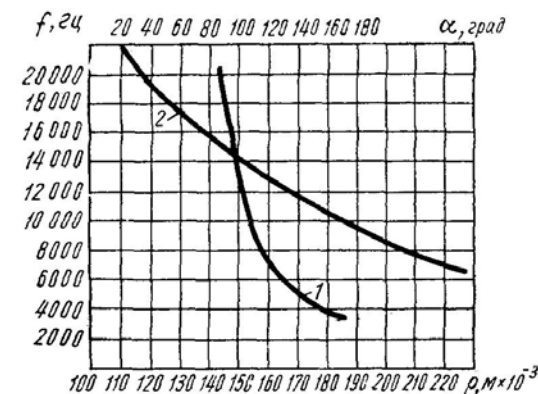


Рис. 59. Зависимость границы воспроизведения верхних частот: 1 – от угла раствора диффузора α ; 2 – от радиуса кривизны ρ .

Жесткость конической части диффузора можно увеличить благодаря применению более жестких сортов целлюлозы с высоким градусом размола и последующей пропитке вершины конической части диффузора специальными лаками.

Расширить границу воспроизведения высоких частот можно также разделяя коническую часть диффузора при помощи гофра или складки (рис. 60). В этом случае гофр отключает часть диффузора на высоких частотах, что уменьшает массу подвижной системы и улучшает эффективность воспроизведения высоких частот. Но при помощи гофра можно, например, срезать высокие частоты, располагая его у вершины диффузора вблизи звуковой катушки.

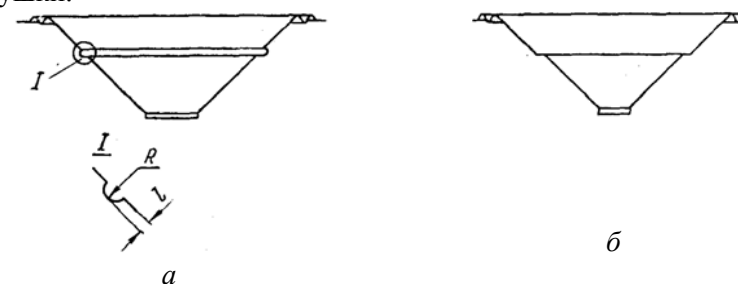


Рис. 60. Коническая часть диффузора, разделённая: а – гофром; б – складкой.

Резонансная частота диффузора определяется выражением:

$$f_{0o} = \frac{1}{2\pi\sqrt{m_o C_o}} \text{ [Гц]}. \quad (28)$$

Для снижения резонансной частоты можно увеличить либо массу конической части диффузора, либо гибкость его подвеса. Первое приводит к уменьшению звукового давления, поэтому данный способ применяют с известным ограничением. Более рациональным путем является увеличение гибкости подвеса, что достигается его утоньшением, применением более эластичных материалов или смазкой подвеса специальными пластификаторами. Утоньшение подвеса должно быть плавным, во избежание резкого перепада толщин на границе раздела подвеса и конической части диффузора, иначе могут образоваться провалы в частотной характеристике, вызванные отражением изгибных волн от границы раздела.

Рассмотрим влияние параметров диффузора на звуковое давление в той части диапазона, где диффузор еще колеблется как поршень. Примем, что масса подвижной системы равна статической массе диффузора:

$$m_o = \frac{S_o \Delta \gamma}{\sin(\alpha/2)} \text{ [кг]}, \quad (29)$$

где Δ – толщина диффузора, м; γ – плотность бумаги, кг/м³; α – угол раствора конуса, град.

Тогда звуковое давление, развиваемое громкоговорителем на частотах выше резонансной частоты диффузора:

$$p = \frac{B_e I_n U \rho_o \sin(\alpha/2)}{2\pi r (R_g + R_e) \Delta \gamma} \text{ [Н/м}^2\text{]}. \quad (30)$$

Из этого выражения следует, что чем больше угол раствора конуса и меньше плотность диффузора, тем больше звуковое давление. Однако при малом угле раствора уменьшается жесткость диффузора, что приводит к ухудшению воспроизведения высоких частот. Для эффективного воспроизведения высоких частот диффузор должен иметь достаточную жесткость, определяемую углом раствора конуса или радиусом кривизны его образующей. На рис. 59 приведены соответствующие экспериментальные кривые.

в окружающей среде с частотой модуляции. Если генератор модулировать напряжением звуковой частоты, то, очевидно, в окружающей среде появятся звуковые колебания. Ввиду того, что масса ионного облака ничтожно мала по сравнению с массой твердых механических колебательных систем даже лучших современных громкоговорителей, ионофон способен воспроизводить без заметных частотных и переходных искажений колебания не только высших звуковых частот, но и ультразвуковые колебания.

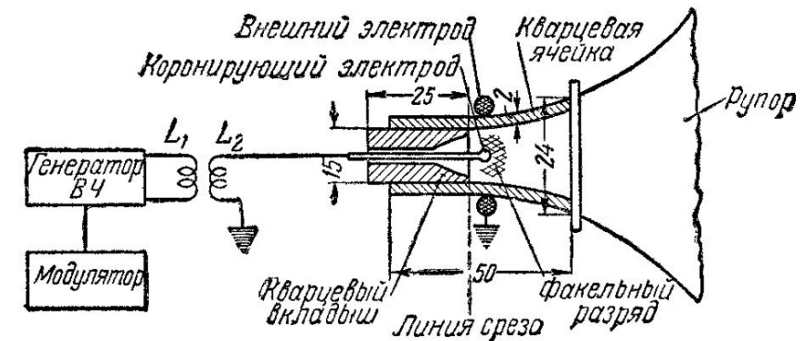


Рис. 23 Конструкция ионофона

Объем ионного облака очень мал, и для более эффективной передачи колебаний в окружающую среду используется согласующий экспоненциальный рупор, являющийся продолжением кварцевой ячейки.

При использовании ионофона в многополосных акустических агрегатах необходимо учитывать, что развиваемое им акустическое давление и коэффициент гармоник пропорциональны глубине модуляции высокочастотного генератора.

Основным преимуществом таких громкоговорителей является практически безинерционное воспроизведение звука (т. е. отсутствие переходных искажений). В настоящее время такие модели выпускаются фирмами Magnat (ФРГ), Plasmatronic (США) и др.

1.7. Громкоговорители пневматического типа

Простейший вид пневматического излучателя – это роторная сирена, прототипом которой является сирена Гельмгольца. Конструктивно более рациональным является модулятор с отверстиями, расположенными на боковой поверхности цилиндрического ротора, вращающегося с малым зазором в цилиндрическом корпусе (рис. 24 а). В этом случае отсутствует постоянное давление, прижимающее ротор к статору. Это позволяет уменьшить зазор между ними и снизить утечку воздуха. Подача воздуха может осуществляться и внутрь ротора, а излучающий рупор забирает модулированный поток с наружной поверхности статора. Такое расположение удобно, если необходимо излучать звук равномерно во все стороны, расположив несколько рупоров по окружности модулятора (рис. 24 б). Пневмоакустический КПД может достигать величины $\sim 0,35$. В одном из образцов мощного сигнального аппарата на принципе такой пневматической сирены оказалось возможным достичь КПД 0,27. Излучатель рассчитан на диапазон частот 50-500 Гц, при числе оборотов ротора в минуту от 375 до 3750 и восьми отверстиях на нем. Сечение горла рупора $19,6 \text{ см}^2$, расход воздуха при $P=1,5 \text{ атм}$ составляет $1,4 \text{ м}^3/\text{с}$. При помощи такого излучателя удается получить до 4 кВт акустической мощности. Располагая восемь рупоров вокруг такого модулятора, можно получить мощность около 30 кВт. Расчет дальности слышимости сигнала излучателя с учетом направленности действия рупора в вертикальной плоскости, затухания и температурной рефракции звука в атмосфере показывает, что излучатель может быть услышан при тихой погоде на расстоянии до 8-10 км.

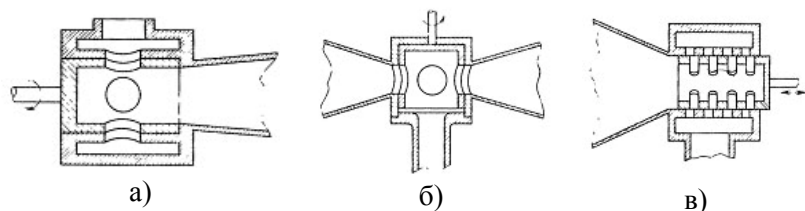


Рис. 24 Пневматические сирены: а – роторная сирена с подачей воздуха из внешней стороны ротора; б – то же, с подачей воздуха с внутренней стороны; в – то же, со скользящим

воротника из замши, поролона и других малоупругих материалов, либо в виде концентрических гофров и заканчивается плоским воротником 4 для приклейки к диффузордержателю.

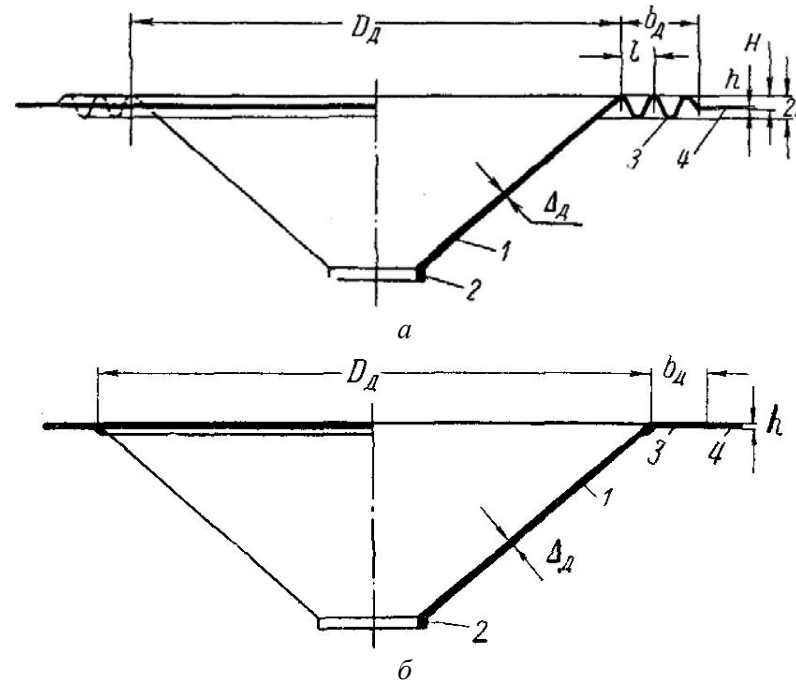


Рис. 58. Конструкции диффузоров: а – с гофрированным подвесом; б – с плоским воротником

Применяют два типа диффузоров – круглые и овальные (эллиптические); к вершине конуса овал переходит в круг.

Основные электроакустические характеристики громкоговорителя в значительной степени зависят от параметров диффузора.

Определим параметры диффузора, влияющие на эффективное воспроизведение низких частот.

Эффективное воспроизведение начинается с резонансной частоты подвижной системы. В обычных конструкциях громкоговорителей резонансная частота диффузора составляет 0,8-0,9 резонансной частоты подвижной системы.

2.4.5. Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия динамического, диффузорного громкоговорителя представляет отношение излучаемой акустической мощности к подводимой электрической и определяется выражением

$$\eta = 3 \cdot 10^{-1} \frac{P_{cm}^2}{\Omega} \% . \quad (26)$$

Здесь Ω – коэффициент осевой концентрации, представляющий собой отношение излучаемой мощности ненаправленного источника к мощности направленного, при одном и том же осевом звуковом давлении.

Коэффициент полезного действия можно выразить также следующей приближенной формулой, в зависимости от конструктивных параметров громкоговорителя:

$$\eta = 5,9 \cdot 10^{-4} \frac{B_e^2 V_0 S_D^2}{\rho_e m^2} \% . \quad (27)$$

Здесь V_0 – объем провода звуковой катушки, м³; B_e – удельное сопротивление проводника звуковой катушки, Ом·м.

Измерение коэффициента полезного действия связано с большими трудностями, поэтому эффективность громкоговорителя оценивают по стандартному звуковому давлению или среднему стандартному звуковому давлению.

Среднее стандартное звуковое давление $P_{cm,cp}$ представляет собой среднюю арифметическую сумму ординат частотной характеристики стандартного звукового давления.

2.5. Расчет элементов динамического диффузорного громкоговорителя

2.5.1 Диффузор

Диффузор динамического громкоговорителя является его излучающим элементом и обычно имеет коническую форму (рис. 58). Диффузор штампуют из цельных листов бумаги или отливают из бумажной массы на сетках. Вершина конуса 1 заканчивается шейкой 2, предназначенной для более прочной приклейки звуковой катушки; основание конуса имеет подвес 3 в виде плоского

2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ГРОМКОГОВОРТЕЛИ

2.1. История развития электродинамических излучателей

История развития электродинамических громкоговорителей начинается с конца XIX века. Первый патент, в котором описывался «магнитоэлектрический аппарат для получения механического движения электрической катушки в результате протекания через нее электрического тока», был опубликован в 1874 г. В 1877 г. был заявлен еще один патент, в котором были описаны основные элементы устройства электродинамического преобразователя, в частности усеченная коническая диафрагма. Некоторые важные структурные элементы ГГ были запатентованы позднее: центрирующая шайба в 1909 г., немагнитные фланцы для создания воздушного зазора и гофрированный подвес – в 1923 г. и др.

В период 20-х годов стали активно развиваться методы расчета электродинамических преобразователей как полосовых фильтров на основе аналогии между механическими системами и электрическими цепями. Основные элементы и принцип устройства электродинамического громкоговорителя промышленного типа были описаны в патентах W. C. Rice, E. W. Kellogg (Великобритания) в 1925-1926 гг. Эти работы считаются базовыми для всего последующего развития серийных моделей ГГ. В результате их исследований была создана первая промышленная модель громкоговорителя Radiola Loudspeaker-104, и хотя с этого периода появились сотни патентов, касающихся усовершенствования отдельных элементов ГГ, принцип его устройства остался неизменным.

Отечественная промышленность по производству ГГ начала развиваться с начала 20-х годов. Первой серийной моделью был электромагнитный громкоговоритель «Рекорд» (в меньшем количестве «Пионер»). В нем использовался, в частности, клееный бумажный диффузор с замшевым плоским подвесом. К концу 30-х и началу 40-х гг. были созданы первые образцы электродинамических громкоговорителей с литыми диффузорами, с этого периода объем их промышленного выпуска постоянно возрастает. Теория расчета и проектирования стала активно развиваться в эти же годы, ей были посвящены специальные

монографии, а также много внимания уделялось в курсах по электроакустике.

2.2. Классификация динамических диффузорных громкоговорителей

Динамические громкоговорители классифицируют по электроакустическим, конструктивным и эксплуатационным признакам.

По электроакустическим признакам громкоговорители делят:

- в зависимости от полосы эффективно воспроизводимых частот, - на узкополосные (низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные) и широкополосные;
- по номинальной электрической мощности— в соответствии с ГОСТ 9010-59;
- по электрическому сопротивлению звуковой катушки, - на низкоомные (до 20 Ом) и высокоомные (выше 20 Ом).

По конструктивным признакам принято различать:

- в зависимости от устройства подвижной системы, - простые громкоговорители, имеющие подвижную систему, состоящую из одной звуковой катушки и одного диффузора, и сложные, подвижная система которых содержит либо несколько катушек, либо несколько диффузоров; к сложным следует отнести также агрегаты из нескольких простых громкоговорителей, выполненных в виде единой конструкции, например, системы коаксиальных громкоговорителей;
- в зависимости от формы диффузора – громкоговорители с круглыми, овальными или эллиптическими диффузорами;
- по конструкции магнитной цепи – громкоговорители с кольцевыми или керновыми постоянными магнитами и громкоговорители с подмагничиванием.

По эксплуатационным признакам громкоговорители разделяются на:

- нормальные, предназначенные для эксплуатации в комнатных условиях при температуре от 15° С до 35° С и относительной влажности до 85%;
- влагостойкие, для работы при температуре от 20° С до 60° С

Теперь при повторном действии на стержень силы F он прогнется вниз, перейдя в положение III. Если же сила F изменяется по гармоническому закону с частотой f , то стержень будет колебаться с частотой $f/2$.

Силу, действующую на диффузор, можно разложить на две составляющих: направленную вдоль образующей диффузора и перпендикулярную ей (рис. 57, б). Субгармонические колебания возникают только от действия продольной составляющей.

Нелинейные искажения громкоговорителя определяют его номинальную мощность.

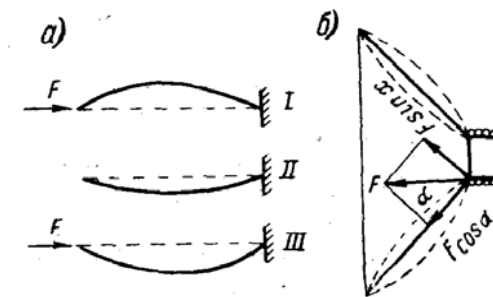


Рис. 57. Механизм образования субгармонических нелинейных искажений: а – колебания стержня; б – распределение сил в диффузоре.

Под номинальной мощностью громкоговорителя понимается максимальная подводимая электрическая мощность, при которой коэффициент нелинейных искажений не выходит за пределы норм, допустимых для данного типа громкоговорителя, и при длительной эксплуатации на которой громкоговоритель не выходит из строя.

Номинальной мощности соответствует номинальное звуковое давление, которое связано со стандартным звуковым соотношением $p_n = p_{cm} \sqrt{10 P_e}$.

Таблица 2

Частота, Гц	Максимальный коэффициент нелинейных искажений, %			
	Диапазон частот громкоговорителя, Гц			
	30-20 000	50-10 000	80-7 000	150-4 000
До 50	20	-	-	-
До 100	10	10	-	-
100-200	5	5	7	-
200-4000	3	5	5	7
Свыше 4000	2	3	-	-

Модуляционные искажения возникают при подведении к звуковой катушке напряжений: низкочастотного (100—200 Гц) и высокочастотного (3000—4000 Гц), одновременно приводящих в движение подвижную систему громкоговорителя. Излучаемые при этом высокочастотные акустические колебания модулируются низкочастотными. Результирующие частотно-модулированные звуковые колебания состоят из колебаний несущей частоты с двумя боковыми полосами. Модуляционные искажения проявляются в виде хрипа и неприятного жесткого тембра. Величина их определяется по формуле:

$$K_M = \frac{4,5 \cdot 10^{-1} f_2 \sqrt{P_A}}{f_1^2 R_D^2} \% , \quad (25)$$

где K_M – отношение среднеквадратичной мощности, заключенной в спектре боковых полос, ко всей излучаемой мощности, %; f_1 – модулирующая частота, Гц; f_2 – модулированная частота, Гц; P_A – акустическая мощность на заданной частоте, Вт.

Субгармонические нелинейные искажения возникают вследствие колебаний отдельных частей диффузора с половинной частотой подводимого напряжения.

Для пояснения этого явления рассмотрим стержень, полужестко заделанный одним концом (рис. 57, а).

Допустим, что под действием некоторой силы F он прогнется вверх и займет положение I. Если прекратить действие силы, то вследствие инерции стержень примет положение II.

и влажности до 93%,

– тропикоустойчивые – приспособленные к работе в условиях тропического климата.

Громкоговорителям придают условные обозначения, состоящие из цифр и букв. Согласно ГОСТ 9010-59, первая цифра обозначает номинальную мощность громкоговорителя в ваттах; первая буква Г – «громкоговоритель»; вторая Д обозначает тип громкоговорителя – «динамический» и последняя цифра – номер разработки. Например, обозначение диффузорного громкоговорителя 10ГД5 расшифровывается так: «Громкоговоритель 10 ваттный, динамический, пятой разработки».

В обозначениях тропикоустойчивых громкоговорителей добавляется буква Т. Например, 10ГД5Т.

2.3. Конструкции динамических диффузорных громкоговорителей

Основы устройства конусного (диффузорного) электродинамического громкоговорителя прямого излучения со звуковой катушкой показаны на рисунке 25. Громкоговоритель состоит из трех основных частей: подвижной системы, магнитной цепи и диффузордержателя. В свою очередь подвижная система включает в себя гофрированный подвес, диафрагму, центрирующую шайбу, пылезащитный колпачок, звуковую катушку и выводы. Магнитная цепь состоит из магнита (кольцевого или кернового), верхнего и нижнего фланцев и керна. В зависимости от назначения головки громкоговорителя конструкция и технология изготовления всех этих элементов различается очень значительно.

Низкочастотный громкоговоритель (woofer)

При проектировании низкочастотных громкоговорителей, как всей конструкции в целом, так и ее отдельных элементов, исходят из специальных требований.

Низкочастотные громкоговорители, как правило, имеют более низкую чувствительность по сравнению со средне- и высокочастотными (из-за более тяжелой подвижной системы). В связи с этим, для обеспечения необходимого звукового давления в

области низких частот, они должны выдерживать значительные мощностные нагрузки (200 Вт и более) при сохранении тепловой и механической прочности.

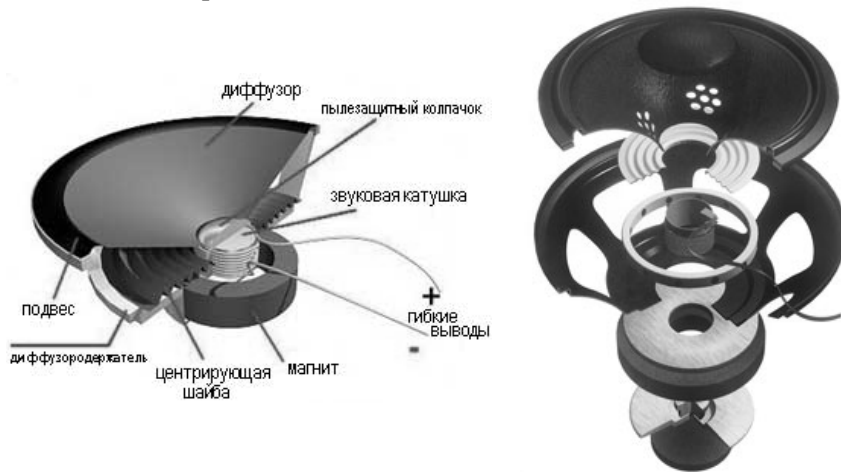


Рис.25 Основные элементы конструкции головки громкоговорителя

Сравнительно низкая резонансная частота (16-30 Гц), необходимая для обеспечения эффективного воспроизведения низкочастотных составляющих сигнала, требует высокой линейности упругих характеристик гибких элементов (подвеса и шайбы), вплоть до больших смещений подвижной системы (до $\pm 12-15$ мм).

С точки зрения обеспечения неокрашенности звучания НЧ-громкоговорители должны иметь, помимо малых уровней гармонических искажений, как можно более гладкую (т.е. без ярко выраженных резонансов), амплитудно-частотную характеристику звукового давления, вплоть до верхней границы воспроизводимого ими диапазона частот (как правило 1500..3000 Гц). В результате экспериментов было установлено, что для того, чтобы НЧ-громкоговоритель не вносил слышимой окраски в звучание в верхней части воспроизводимого им диапазона, резонансные пики на его АЧХ должны быть не менее чем на 20 дБ ниже среднего уровня звукового давления, создаваемого акустической системой в этой области частот (после фильтрации).

На рис. 56 представлена частотная характеристика коэффициента гармонических нелинейных искажений.

Одним из источников гармонических нелинейных искажений является нелинейность гибкости подвесов подвижной системы, вызывающая при больших амплитудах появление третьей гармоники. Второй источник нелинейных искажений - осевая неоднородность магнитного поля в рабочем зазоре магнитной цепи. При больших амплитудах она приводит к появлению второй гармоники. Третий источник нелинейных искажений, приводящий к появлению второй гармоники, - нелинейность упругости воздуха в замкнутом задиффузорном объеме или в замкнутом объеме под центрирующей гофрированной шайбой.

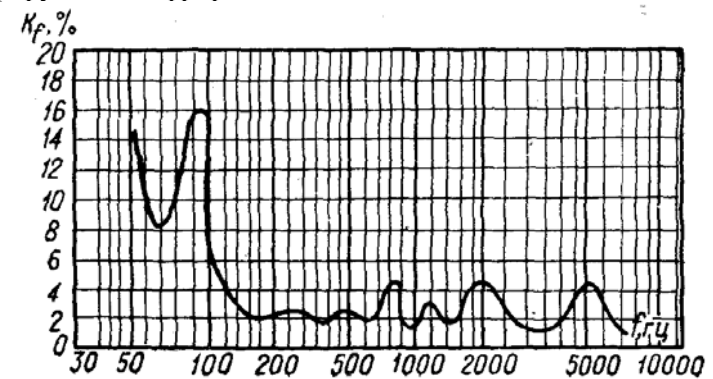


Рис. 56. Частотная характеристика коэффициента гармонических нелинейных искажений

Исследования показали, что значения допустимых нелинейных искажений зависят от диапазона воспроизводимых частот; при более широком диапазоне допустимы меньшие значения нелинейных искажений. Было также установлено, что на низких частотах допустимы большие нелинейные искажения, чем на высоких, и что нелинейные искажения в узкой полосе частот, характерные для динамических громкоговорителей, менее ощутимы, чем нелинейные искажения во всем частотном диапазоне, характерные для электронных устройств.

В табл. 2 приведены нормы допустимых нелинейных искажений.

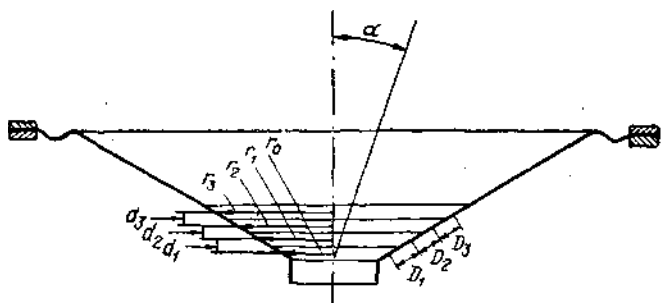


Рис. 55. Диффузор, разделенный на ряд усеченных конусов

Из выражения (20) следует, что характеристика направленности громкоговорителя зависит от частоты и с повышением ее становится острее. Кроме того, характеристика направленности расширяется с увеличением угла раствора диффузора и с уменьшением скорости распространения звука в материале диффузора, т. е. с уменьшением его плотности.

2.4.4. Нелинейные искажения

Нелинейными искажениями громкоговорителя называют такие искажения, которые приводят к появлению при воспроизведении дополнительных составляющих, отсутствовавших в электрическом сигнале. Различают гармонические, субгармонические и модуляционные нелинейные искажения.

Гармонические нелинейные искажения вызывают появление обертонов.

Коэффициент гармонических нелинейных искажений определяется как

$$K_f = \frac{\sqrt{p_2^2 + p_3^2 + \dots + p_n^2}}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots + p_n^2}} 100\%, \quad (24)$$

где p_1 - звуковое давление основной частоты; $p_2, p_3 \dots p_n$ - звуковые давления высших гармоник.

Нелинейные гармонические искажения появляются в громкоговорителях, как правило, на низших частотах, а также вблизи резонансных частот подвижной системы или ее элементов.

Для удовлетворения этим требованиям при проектировании НЧ-громкоговорителей уделяется большое внимание конструктивной и технологической разработке всех его элементов: подвеса, шайбы, диффузора, пылезащитного колпачка, звуковой катушки, гибких выводов звуковой катушки, магнитной цепи и диффузородержателя.

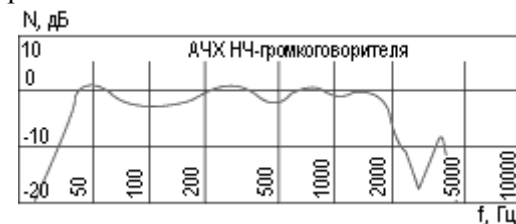


Рис.26. Типовая АЧХ низкочастотного громкоговорителя

Остановимся более подробно на конструктивных особенностях основных элементов НЧ-громкоговорителей.

Гофрированный гибкий подвес должен обеспечивать низкую резонансную частоту (иметь высокую гибкость), плоскопараллельный характер движения (т.е. отсутствие крутильных и других видов колебаний) всей подвижной системы в обе стороны от положения равновесия, вплоть до больших амплитуд смещений, и эффективное поглощение энергии собственных резонансных колебаний подвижной системы. Кроме того, подвес должен сохранять свою форму и свойства во времени и под воздействием климатических факторов внешней среды. С точки зрения конфигурации (формы профиля), значительно влияющей на все указанные свойства, наибольшее распространение имеют полутороидальные, синусоидальные и S-образные подвесы.

В качестве материалов для подвесов применяют натуральные резины, пенополиуретаны (поролон), прорезиненные ткани, натуральные и синтетические ткани со специальными демпфирующими покрытиями. Эти конфигурации и материалы позволяют получить удовлетворительную линейность упругих характеристик и требуемое, в зависимости от вида низкочастотного акустического оформления, значение гибкости подвеса. Например, для закрытых корпусов акустических систем компрессионного типа

должны выбираться подвесы с гибкостью (в корпусе) $\text{Сподв/Своздуха} > 3$.

Диафрагма (диффузор) предназначена для излучения звука при обеспечении поршневого характера колебаний (до возникновения собственных резонансных колебаний) в возможно более широком диапазоне частот. Эффективное демпфирование этих резонансов на тех частотах, где они появились, достигается выбором соответствующих конфигурации диафрагмы и материала, из которого она изготовлена.

Диафрагмы НЧ-динамиков, с целью повышения конструктивной жесткости, часто изготавливаются в виде криволинейных конусообразных фигур с образующей, меняющейся по радиусу или по гиперболе, или в виде дуг окружностей - одной или нескольких, плавно переходящих одна в другую. Иногда, для уменьшения амплитуд резонансных колебаний диафрагмы (в первую очередь с кольцевыми узловыми линиями), используют радиальные и кольцевые ребра жесткости на ее поверхности, или краевое ребро по наружному краю.

В настоящее время диафрагмы низкочастотных динамиков изготавливаются из различных сложных композиций на основе натуральной длинноволокнистой целлюлозы с различными добавками, повышающими ее прочность, жесткость и демпфирующие свойства, например, волокна шерсти, льна, углестекловолокна, графитовые чешуйки, металлические волокна, влагозащитные и демпфирующие пропитки. О степени сложности таких композиций можно судить по тому, что в них используется до 10-15 составляющих.

Однако, наряду с композициями из натуральных целлюлоз, многими фирмами для диафрагм громкоговорителей применялись и применяются различные композиционные материалы, как правило, разработанные ранее для аэрокосмической и военной техники. К таким материалам можно отнести: многослойные сотовые и вспененные металлы и др.

В настоящее время для диафрагм все шире применяются синтетические пленочные композиции на основе полиолефинов (полипропилена и полиэтилена) (их используют в своих динамиках фирмы Jamo, KEF, Cabasse, Tannoy и др.) и композиционные

где l_a - большая ось эллипса; l_b - малая ось эллипса; α - угол между направлением на точку наблюдения и осью громкоговорителя в плоскости большой оси эллипса, перпендикулярной внешней поверхности диффузора; β - угол между направлением на точку наблюдения и осью громкоговорителя в плоскости малой оси эллипса, перпендикулярной внешней поверхности диффузора.

Характеристика направленности в плоскости малой оси шире, чем в плоскости большой оси.

Более точное выражение для характеристики направленности конического диффузорного громкоговорителя можно получить, если разбить диффузор (рис. 55) на ряд усеченных конусов и каждый конус рассматривать как кольцевой излучатель. Высоты конусов выбирают так, чтобы их образующие были значительно меньше длины волны. Тогда выражение для характеристики направленности примет вид

$$R_\alpha = \frac{\sum_{k=0}^n A_k \cos \theta_k - j \sum_{k=0}^n A_k \sin \theta_k}{\sum_{k=0}^n A_k}, \quad (23)$$

где A_k - амплитуда колебаний k -го кольца, равная $A_k = 2\pi r_k D_k J_0 \left(\frac{2\pi r_k}{\lambda_0} \sin \alpha \right)$; J_0 - функция Бесселя нулевого

порядка; λ_0 - длина звуковой волны в воздухе; θ_k - фаза колебаний k -го кольца, определяемая выражением

$$\theta_k = 2\pi \left(\frac{d_1 + d_2 + \dots + d_k}{\lambda_0} + \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_k}{\lambda_D} \right) \cos \alpha; \quad l_D - \text{длина}$$

звуковой волны в диффузоре.

Остальные величины показаны на рис. 55.

2.4.3. Характеристика направленности

Характеристика направленности громкоговорителя есть зависимость развиваемого им на данной частоте звукового давления в точке наблюдения, находящейся на фиксированном расстоянии от центра внешней поверхности диффузора, от угла α между осью громкоговорителя и направлением на данную точку. Характеристика направленности графически изображается в полярных координатах.

В первом приближении диффузор можно рассматривать как поршневую диафрагму, характеристика направленности которой определяется выражением

$$R_\alpha = \frac{2J_1\left(\frac{\pi D_d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi D_d}{\lambda} \sin \alpha}, \quad (21)$$

где λ – длина волны; D_d – диаметр поршня; J_1 – функция Бесселя первого порядка.

Вычисленная по формуле (21) характеристика направленности для поршня диаметром 200 мм представлена на рис. 54.

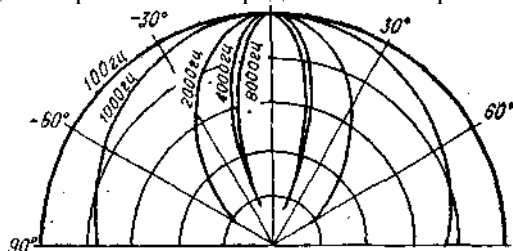


Рис. 54. Характеристика направленности поршня, помещенного в бесконечном экране.

Для диффузоров эллиптической или овальной формы характеристика направленности может быть приближенно вычислена по формуле для прямоугольного поршня:

$$R_{\alpha,\beta} = \frac{\sin(\pi l_a \sin \alpha)}{\frac{\pi l_a}{\lambda} \sin \alpha} \cdot \frac{\sin(\pi l_b \sin \beta)}{\frac{\pi l_b}{\lambda} \sin \beta}, \quad (22)$$

материалы на основе высокомодульной ткани "кевлар" (фирмы B&W, Audix и т.д.) Применение таких диафрагм позволяет обеспечить в лучших моделях громкоговорителей гладкие АЧХ до 1500ч варьируется от 5 до 11). Однако, в некоторых моделях встречаются шайбы более сложных конфигураций, (например, тангенциальные), обеспечивающие большую линейность упругих характеристик, стабильность формы и т. п.

В качестве материалов для шайб применяют натуральные ткани (типа миткаля, бязи и т.п.), пропитанные бакелитовым лаком, синтетические ткани на основе полиамидов, полиэстера, нейлона и др. В некоторых динамиках применяются шайбы, в материал которых вплетаются металлические (алюминиевые, медные) нити, обеспечивающие повышенный теплоотвод от теплопроводящего каркаса звуковой катушки к массивному металлическому диффузородержателю.

Звуковые катушки – важнейшая часть громкоговорителя. Конструкции звуковых катушек НЧ-громкоговорителей разрабатываются с учетом необходимости рассеивания значительного количества тепла, выделяющегося в них при работе динамиков от мощных усилителей (100 Вт и более). Расчеты и опыт разработок позволили установить количественную связь между диаметром катушки и рассеиваемой ею тепловой энергией. Так, например, звуковые катушки диаметром 25 мм способны без применения особо термостойких и теплоотводящих материалов выдерживать долговременную электрическую мощность до 25 Вт, а катушки диаметром 50 мм – до 100 Вт.

С целью увеличения термической прочности звуковых катушек применяются как термостойкие материалы (клеи, изоляция проводов, каркасы), так и различные конструктивные меры для более эффективного отвода выделяющегося тепла в окружающую среду. К ним относятся вентиляционные отверстия в каркасах катушек и магнитных цепях, улучшающие циркуляцию воздуха в зоне расположения звуковой катушки, тепловые трубки, теплопроводящие каркасы, и даже полупроводниковые холодильники.

Для снижения нелинейных гармонических искажений, возникающих в громкоговорителях, в частности, за счет

нелинейности и несимметричности магнитного поля в магнитной цепи, часто применяются звуковые катушки с длиной намотки, в 2...2,5 раза превышающей высоту рабочего зазора магнитной цепи (длину верхнего фланца цепи). Число применяемых слоев намотки звуковой катушки обычно равно двум, хотя встречаются катушки с четырьмя слоями.

В современных динамиках применяют провода для намотки звуковых катушек, различные по форме сечения: традиционные круглые, квадратные и плоские. Последние две формы обеспечивают более высокую плотность заполнения рабочего зазора проводом, что повышает эффективность громкоговорителя.

Магнитные цепи обычно состоят из магнита, керна, нижнего и верхнего фланцев.

Для магнитных цепей высококачественных громкоговорителей характерно применение различных конструктивных решений для снижения нелинейных искажений, возникающих за счет несимметричности и неоднородности магнитного поля в рабочем зазоре.

Это керны Т-образной формы, симметрирующие магнитное поле за пределами рабочего зазора; фланцы и керны с многослойными вставками, уменьшающими влияние переменного магнитного поля от звуковой катушки на постоянное магнитное поле цепи; "короткозамкнутые витки" - колпачки или кольца на керне и на внутренней поверхности верхнего фланца; специальные профили рабочего зазора, уменьшающие неоднородность магнитного поля и т. п.

Кроме того, для снижения гармонических искажений за счет сжатий подколпачкового объема при больших смещениях подвижной системы, используют керны с вентиляционными отверстиями - большая часть воздуха выходит из под колпачка, минуя рабочий зазор. Ранее эти отверстия делались в центре керна, но теперь появились модели НЧ-громкоговорителей, в которых отверстия стали использоваться для направления значительных воздушных потоков, возникающих в зазоре, непосредственно через рабочий зазор - по желобам вокруг звуковой катушки, что значительно снижает температуру ее нагрева.

В последние годы в современных низкочастотных

проведены значительные исследования для установления допустимых частотных искажений, в зависимости от класса качества воспроизведения.

Для звуковоспроизводящей аппаратуры установлено четыре класса качества воспроизведения. Частотные диапазоны для этих классов приведены ниже:

Таблица 1

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

Исследования показали также допустимость применения для достаточно разборчивого воспроизведения с речи суженного частотного диапазона: 300÷500 Гц – 3000÷4000 Гц. При ограниченном диапазоне частот наилучшее качество звучания достигается, когда частотная характеристика имеет П-образную или седлообразную (рис. 53) 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 Гц². Что же касается частотных искажений в виде узких пиков и провалов, шириной менее $\frac{1}{8}$ октавы, то они практически слушателями не ощущаются.

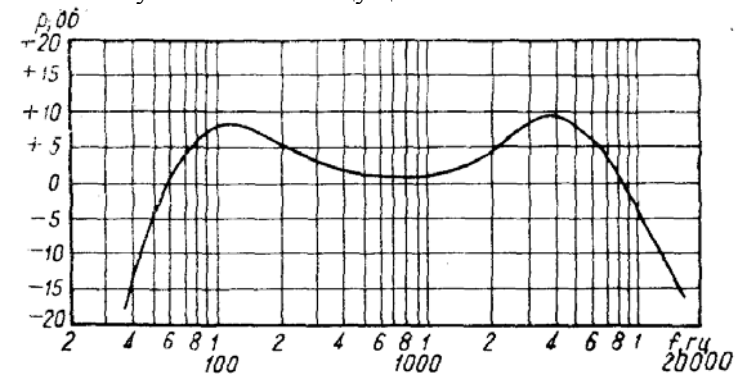


Рис. 53. Предпочтительная форма частотной характеристики

колебаний диффузора с диаметром излучающей части 180 мм и углом раствора 118° . Как видно из рисунка, на частотах 420, 500 и 650 Гц возникают радиальные узлы; на частотах 940-1100 Гц - круговые узловые линии, при которых подвес диффузора и его коническая часть колеблются в противофазе. Это вызывает значительный провал в частотной характеристике. На частоте 2150 Гц возникают радиальные и круговые узловые линии. На частотах 2800 и 3800 Гц в конической части диффузора возникает множество круговых узловых линий, колеблющихся в противофазе. Наконец; на самых высоких частотах колеблется только часть конуса, расположенного вблизи звуковой катушки.

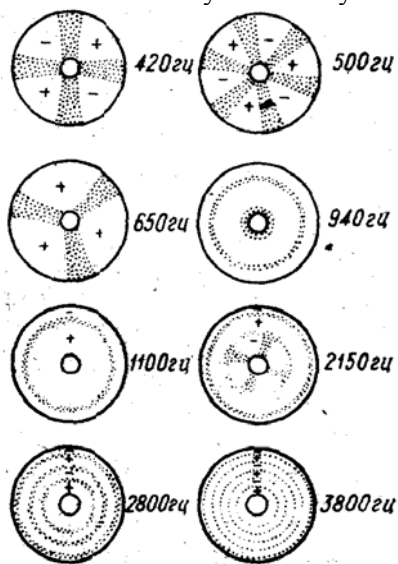


Рис. 52. Характер колебаний диффузора.

Реальная частотная характеристика громкоговорителя приведена на рис. 50. Как видно из рисунка, частотным характеристикам присущи два вида искажений: а) ограничение полосы частот; б) пики и провалы внутри воспроизводимого диапазона частот.

Уменьшение частотных искажений, в особенности расширение полосы воспроизведения, достигается ценой усложнения и удорожания конструкции громкоговорителя. Поэтому были

громкоговорителях для отвода тепла и повышения демпфирования звуковой катушки начали широко использоваться специальные ферромагнитные жидкости. Они были созданы в начале 90-х, однако применялись только в высокочастотных громкоговорителях, так как при больших зазорах в НЧ-громкоговорителях не удавалось предотвратить их вытекание. Сейчас целый ряд фирм выпускает НЧ-громкоговорители с зазором, заполненным ферромагнитной жидкостью (рис.27).

Ферромагнитная жидкость представляет собой вязкую суспензию, в которой находятся магнитные частицы (рис.28). При заполнении зазора жидкостью положение этих частиц симметрируется в направлении силовых линий постоянного магнитного поля, что позволяет удерживать жидкость в зазоре, не давая ей вытекать. Поскольку магнитная жидкость имеет теплопроводность почти в пять раз большую, чем воздух, это позволяет быстрее отводить тепло от катушки, и соответственно увеличить подводимую мощность к громкоговорителю. Кроме того, наличие жидкости в зазоре увеличивает механическое демпфирование движения катушки, что уменьшает искажения, особенно эффект температурной компрессии мощности.

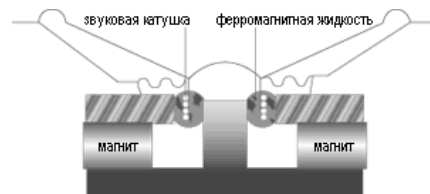


Рис.27 Громкоговоритель с магнитной жидкостью



Рис.28 Структура магнитной жидкости

В качестве магнитных материалов в современных моделях в НЧ-громкоговорителях, помимо традиционных феррит-бария (в виде колец различной толщины и диаметров) или более дорогих кобальтосодержащих сплавов, применяется новый высокоэффективный магнитотвердый материал на основе сплава неодим-железо-бор Nd-Fe-B (отечественное название таких сплавов - "неомакс"), который начал использоваться в конце 80-х -

начале 90-х годов.

Этот сплав обладает магнитной энергией 30...35 МгсЭ, что на порядок выше чем у обычных магнитов (2,5...3,2 МгсЭ). Это позволяет конструировать магнитные цепи, обеспечивающие требуемую магнитную индукцию в зазоре при значительно меньших габаритах и весе самого магнита. Все большее количество акустических систем, выпускаемых для применения совместно с телевидеоаппаратурой (например, для систем "домашний кинотеатр"), требует применения НЧ-громкоговорителей с надежным экранированием магнитных полей рассеивания. Экранирование должно быть особенно эффективными для НЧ-громкоговорителей, применяемых в системах центрального и фронтальных каналов, а также для низкочастотных блоков (subwoofer), располагаемых вблизи телевизионных приемников. Для снижения полей рассеивания или вся магнитная цепь помещается в экранирующий стакан из металла, или позади основного магнита дополнительно устанавливают второй магнит, имеющий противоположную намагниченность, что фокусирует поля рассеивания в рабочий зазор магнитной цепи.

В целом узел "магнитная цепь - звуковая катушка" проектируется таким образом, чтобы обеспечить максимальное значение КПД громкоговорителя и снижение уровня его нелинейных искажений.

Диффузордержатель наши инженеры иногда называют полужаргонно "корзиной", хотя в английском basket для этого элемента конструкции - название официальное. Существенное значение для НЧ-громкоговорителя имеет жесткость и прочность диффузордержателя. Диффузордержатель служит для поддержания и соединения элементов подвижной системы и магнитной цепи, а также для закрепления громкоговорителя в корпусе. Его конструкция должна обеспечивать не только устойчивость громкоговорителя к механическим воздействиям (ударам, тряске), не допуская смещения массивной магнитной цепи от оси симметрии громкоговорителя, но и, по возможности, устранять резонансы самого держателя, которые могут иметь место в области рабочих частот НЧ-громкоговорителя (200-600 Гц).

Как правило, диффузордержатели изготавливают из

$$p_3 = \frac{B_e I_n U S_d \rho_0}{2\pi r (R_g + R_e) m} \text{ [Н/м}^2\text{]}. \quad (19)$$

В этой области, простирающейся до высоких частот, на которых уже нельзя пренебрегать индуктивным сопротивлением звуковой катушки, звуковое давление не зависит от частоты.

4. Если предположить, что $\omega L_e \ll R_g + R_e$, то выражение (10) примет вид

$$p_4 = \frac{B_e I_n U S_d \rho_0}{4\pi^2 r f L_e m} \text{ [Н/м}^2\text{]}. \quad (20)$$

Следовательно, в этом случае звуковое давление с ростом частоты уменьшается. Ход идеальной частотной характеристики громкоговорителя показан на рис. 51.

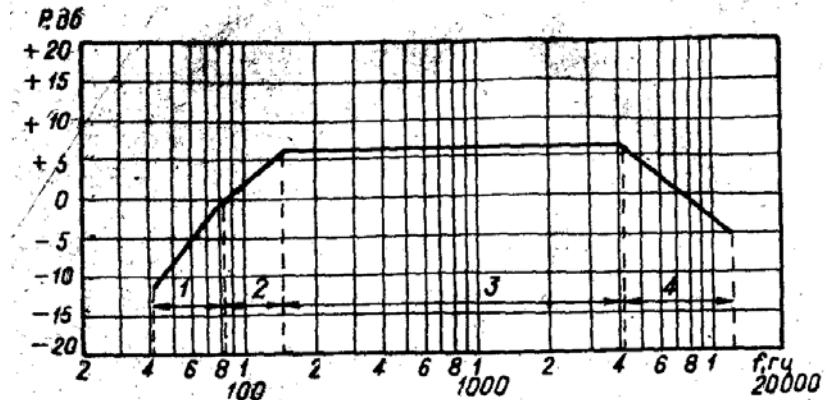


Рис. 51. Идеальная частотная характеристика громкоговорителями звуковому давлению.

В реальных условиях диффузор колеблется как поршень только до своей критической частоты $f_{кр} = \frac{c_0}{2\pi R_d}$ [Гц].

На частотах выше критической фазы колебаний отдельных участков диффузора различны, вследствие чего появляются пики и провалы в частотной характеристике. На рис. 52 показан характер

$$F = \frac{B_e I_n U}{\sqrt{(R_g + R_e)^2 + (\omega L_e)^2}} \text{ [Н]}. \quad (15)$$

Учитывая (3), получим

$$p = \frac{B_e I_n U S_d f \rho_0}{r \sqrt{(R_g + R_e)^2 + (\omega L_e)^2} \cdot \sqrt{(R_n + R_s)^2 + \left(\omega m - \frac{1}{\omega C_n}\right)^2}} \text{ [Н/м}^2\text{]}. \quad (16)$$

Полученное выражение представляет собой частотную характеристику громкоговорителя по звуковому давлению.

Рассмотрим четыре режима работы громкоговорителя.

1. На частотах, лежащих ниже частоты механического резонанса подвижной системы, подвижная система громкоговорителя управляется гибкостью подвесов. При этом можно пренебречь членами: ωL_e ; $(R_n + R_s)$ и ωm , и выражение (16) принимает вид

$$p_1 = \frac{2\pi B_e I_n U S_d f^2 \rho_0 C_n}{r(R_g - R_e)} \text{ [Н/м}^2\text{]}. \quad (17)$$

В этом случае звуковое давление изменяется пропорционально квадрату частоты.

2. При механическом резонансе подвижной системы громкоговорителя, т. е. при $\omega_0 m = \frac{1}{\omega_0 C_n}$,

$$p_2 = \frac{B_e I_n U S_d f \rho_0}{r(R_g + R_e)(R_n + R_s)} \text{ [Н/м}^2\text{]}. \quad (18)$$

В этой области звуковое давление пропорционально частоте.

3. На частотах выше резонансной, когда система управляется массой, можно пренебречь членами $\frac{1}{\omega C_n}$, $(R_n + R_s)$, ωL_e . Тогда уравнение частотной характеристики примет вид

алюминиевых сплавов литьем под давлением, при этом для снижения массы их делают сравнительно тонкими, но с ребрами жесткости. Для НЧ-громкоговорителя небольшой мощности и с небольшими магнитными цепями диффузордержатели могут изготавливаться из стального листа толщиной 0,8-1,5 мм методом штамповки. Кроме этого, конструкция диффузордержателя должна обеспечить достаточный размер "окон" между ребрами с целью предотвращения появления "воздушной подушки" позади диффузора.

Гибкие выводы, обеспечивающие подведение электрических сигналов от клемм к звуковой катушке, являются одним из наименее надежных элементов громкоговорителя. Клеммы, как правило, закрепляются через изолирующие прокладки прямо на диффузордержателе или на специальной планке. Контактные выводы громкоговорителя, помимо воздействий больших электрических токов, непрерывно испытывают значительные переменные механические нагрузки. При этом их гибкость должна превышать гибкость подвеса и центрирующей шайбы, чтобы не влиять на резонанс громкоговорителя. Кроме того, гибкие выводы могут являться источником призывков. Поэтому выбору материалов для них и конструкции крепления к клеммам и диффузору уделяется серьезное внимание.

В качестве материалов для выводов применяются многожильные провода из тонких медных или серебряных нитей, в которые вплетаются основы – хлопчатобумажные или синтетические нити. Типы плетений нитей в этих проводах могут быть самыми разнообразными. Способы крепления гибких выводов к диффузору применяют также различные: от пришивания нитками до подпайки к металлическим заклепкам на диффузоре. Места соприкосновения с диффузором заливают различными вибродемпфирующими материалами, например, натуральными латексами. Места пайки гибких выводов к клеммам, во избежание обламывания, как правило, стараются защитить с помощью амортизаторов различных конструкций.

Громкоговорители с круглыми диффузорами просты в производстве, и потому получили широкое распространение. Применяют также громкоговорители с овальными или

эллиптическими диффузорами, обладающие более широкой диаграммой направленности в плоскости малой оси. Они удобны для размещения в радиоприемниках и особенно в телевизорах и проигрывателях и позволяют уменьшить габариты последних.

В громкоговорителях с эллиптическими диффузорами, применяющихся в телевизорах; используют магнитные цепи с керовыми магнитами, обладающие малыми полями рассеяния, благодаря экранирующему действию магнитопровода, из магнитомягкого материала.

Конструкция динамического громкоговорителя с керовым магнитом и эллиптическим диффузором показана на рис. 29. Магнитная цепь состоит из керового магнита 1, скобы или стакана 2, круглого полюсного наконечника 3 и верхнего фланца 4.

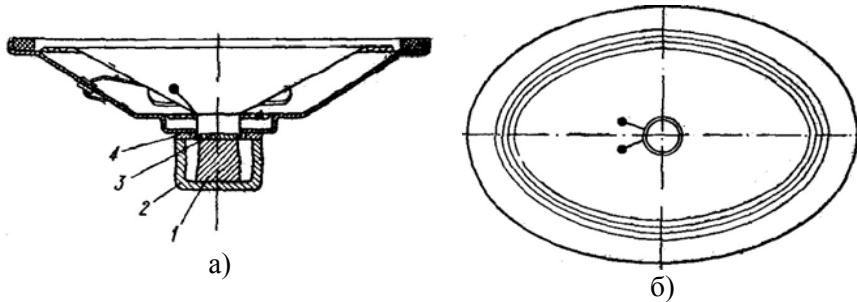


Рис. 29. Динамический громкоговоритель с эллиптическим диффузором и керовым магнитом.

Для получения более компактной конструкции в этих магнитных цепях обычно применяют постоянные магниты с наиболее высокой удельной магнитной энергией из сплавов с кобальтовой присадкой типа ЮНДКА 24 (АНК04), ЮНДКА 25А. Широко распространяются громкоговорители с диффузорами, имеющими криволинейную образующую (рис. 30). Применение такого диффузора значительно уменьшает субгармонические искажения в области средних частот, возникающие вследствие прогиба диффузора, и увеличивает жесткость вершины диффузора. Это способствует более эффективному воспроизведению высоких частот.

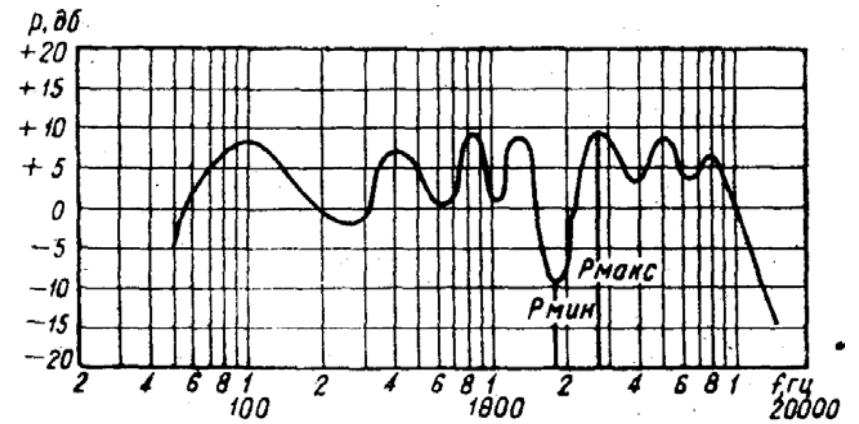


Рис. 50. Реальная частотная характеристика динамического диффузорного громкоговорителя по звуковому давлению.

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

$$N = 20 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \text{ [дБ]}. \quad (13)$$

Для упрощения вывода уравнения частотной характеристики примем что: а) диффузор в рассматриваемом диапазоне частот колеблется как поршень и является ненаправленным источником; б) громкоговоритель помещен в бесконечный экран; в) расстояние r настолько велико, что точка наблюдения находится в дальнем поле.

При этом звуковое давление, развиваемое громкоговорителем, равно:

$$p = \frac{\dot{x} \cdot S_d \cdot f \cdot \rho_0}{r} \text{ [Н/м}^2\text{]}. \quad (14)$$

Подставим вместо \dot{x} его значение $\dot{x} = \frac{F}{|Z_M|}$ [м/сек], в котором

F определяется выражением

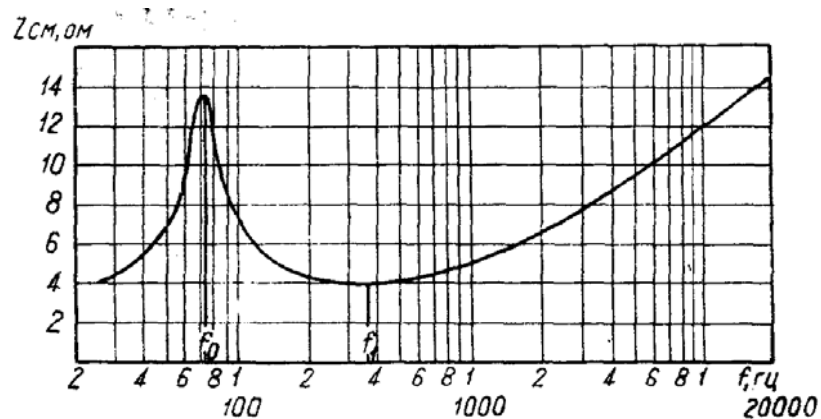


Рис. 49. Частотная характеристика полного сопротивления.

2.4.2. Частотная характеристика громкоговорителя по звуковому давлению

Частотная характеристика громкоговорителя по звуковому давлению есть зависимость звукового давления p , развиваемого громкоговорителем, от частоты, в точке, находящейся на фиксированном расстоянии от громкоговорителя по его оси, при постоянстве напряжения, подводимого к громкоговорителю.

Частотная характеристика изображена на рис. 50. 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_{cm} .

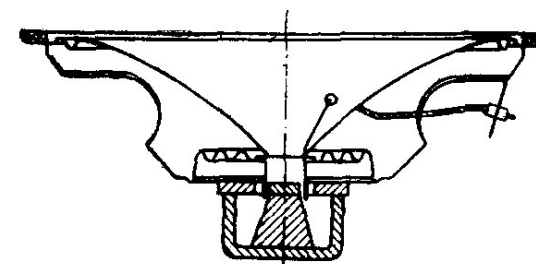


Рис. 30. Динамический громкоговоритель с диффузором, имеющим криволинейную образующую

Криволинейная образующая представляет собой либо участок экспоненциальной кривой, либо дугу окружности определенного радиуса. В эллиптических диффузорах кривизна образующей не остается постоянной, а изменяется пропорционально радиусу-вектору эллипса.

Для получения плоской конструкции динамического громкоговорителя в некоторых моделях магнитную цепь помещают внутри конической части диффузора (рис. 31). Эта конструкция удобна для размещения в переносных радиоприемниках и проигрывателях, но более сложна в изготовлении и в области средних и высоких частот создает пики и провалы в частотной характеристике. Поэтому такие конструкции громкоговорителей мало распространены.

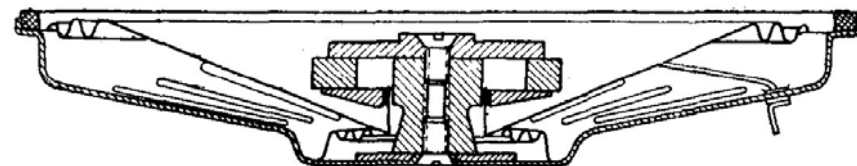


Рис. 31. Динамический громкоговоритель с магнитной цепью, расположенной внутри диффузора.

Благодаря применению магнитов из феррит-бария созданы такие плоские конструкции магнитных цепей с кольцевыми магнитами, высота которых намного больше, чем у громкоговорителей с магнитной цепью расположенной внутри диффузора.

Для исключения внешних магнитных полей рассеяния применяют конструкции громкоговорителей с магнитной цепью из двух ферритобариевых магнитов (рис. 32).

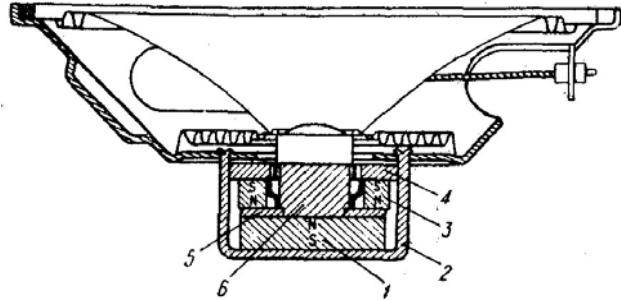


Рис. 32. Динамический громкоговоритель с магнитной цепью из двух ферритобариевых магнитов.

Магнитная цепь состоит из стакана 2, верхнего фланца 4 и двух магнитов: нижнего 1 в виде сплошного цилиндра и верхнего 3 кольцевого. На нижний, цилиндрический магнит наложен круглый фланец 5, в котором запрессован kern 6. На kern надет кольцевой магнит, одним полюсом соприкасающийся с нижним, а вторым - с верхним фланцами. В зазоре магнитные потоки от обоих магнитов складываются.

В другой конструкции громкоговорителя с малыми внешними магнитными полями рассеяния (рис. 33), магнитная цепь с кольцевым магнитом из феррит-бария располагается внутри диффузордержателя, прикрепленного к нижнему фланцу.

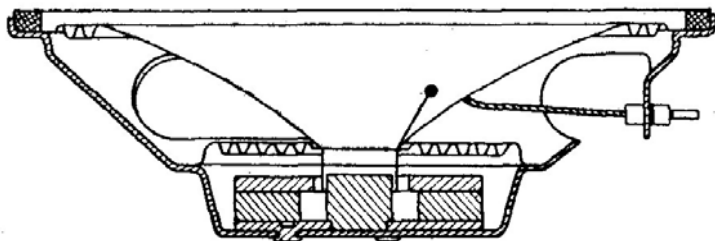


Рис. 33. Динамический громкоговоритель с магнитной цепью, расположенной внутри диффузордержателя. Магнитная цепь громкоговорителя с подмагничиванием (рис.

Если резонанс подвижной системы наступит в области низких частот, членами $\omega_0 L_e$ и R_s можно пренебречь и выражение (9) упростится:

$$Z_{eM_0} = R_e + \frac{B_e^2 l_n^2}{R_n} [\text{Ом}]. \quad (10)$$

Но так как $\frac{B_e^2 l_n^2}{R_n} \ll R_e$, то приближенно на круговой частоте

ω_0

$$Z_{eM_0} \approx \frac{B_e^2 l_n^2}{R_n} [\text{Ом}]. \quad (11)$$

На более высоких частотах можно пренебречь сопротивлениями гибкости и механических потерь, так как они значительно меньше инерционного сопротивления. Тогда

$$Z_{eM} = R_e + j \left(\omega L_e - \frac{B_e^2 l_n^2}{\omega m} \right) [\text{Ом}]. \quad (12)$$

При $\omega_1 L_e = \frac{B_e^2 l_n^2}{\omega_1 m}$ — полное электрическое сопротивление

получится равным омическому сопротивлению. Эту частоту f_1 принято называть частотой электромеханического резонанса громкоговорителя. На более высоких частотах сопротивление увеличивается благодаря влиянию индуктивности звуковой катушки и вследствие уменьшения вносимого сопротивления. Поэтому на высоких частотах полное электрическое сопротивление $Z_{eM} \approx Z_e$.

Зависимость полного электрического сопротивления динамического диффузорного громкоговорителя от частоты показана на рис. 49.

Из полученных выражений следует, что полное сопротивление электрической цепи равно сопротивлению заторможенной катушки плюс внесенное сопротивление, а полное сопротивление механической цепи равно механическому сопротивлению подвижной системы плюс внесенное сопротивление электрической цепи громкоговорителя. Соответствующие эквивалентные схемы, справедливые для случая, когда диффузор громкоговорителя работает в области поршневого участка, изображены на рис. 48.

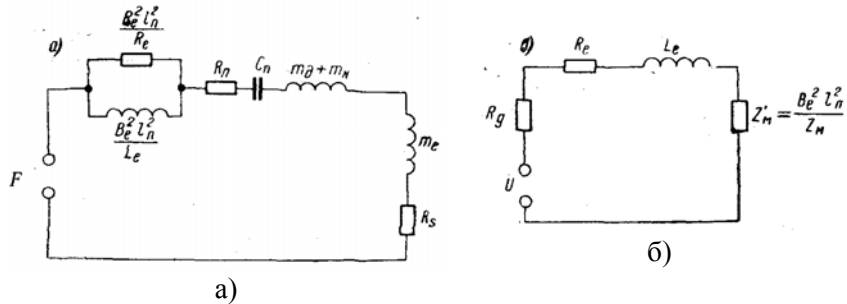


Рис. 48. Эквивалентные схемы механической (а) и электрической (б) цепей.

2.4.1. Полное электрическое сопротивление

Полное электрическое сопротивление громкоговорителя Z_{eM} , представляющее собой отношение напряжения на зажимах звуковой катушки к протекающему через нее току, определяется выражением (6).

При $\omega=0$ полное электрическое сопротивление Z_{eM} равно омическому сопротивлению звуковой катушки. С увеличением частоты оно возрастает и достигает максимума на частоте механического резонанса подвижной системы f_0 , т. е. когда инерционное сопротивление равно сопротивлению гибкости подвесов:

$$\omega_0 m = \frac{1}{\omega_0 C_n}. \quad (8)$$

В этом случае

$$Z_{eM} = R_e + j\omega_0 L_e + \frac{B_e^2 l_n^2}{R_n + R_s} [\text{Ом}]. \quad (9)$$

34) состоит из скобы или стакана 3, верхнего фланца 1 и керна 5, на который надета катушка подмагничивания 4. Катушку подмагничивания из тонкого провода наматывают на изоляционный каркас или на оправку и изолируют киперной лентой. Для увеличения теплоотдачи и электрической прочности катушку пропитывают специальными лаками или компаундами. Катушку обычно питают выпрямленным переменным током который, вследствие недостаточной фильтрации, имеет и переменную составляющую, создающую фон.

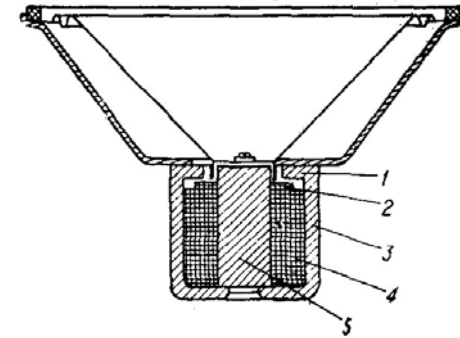


Рис. 34. Электродинамический громкоговоритель, имеющий магнитную цепь с подмагничиванием.

Для устранения фона на kern устанавливают дополнительную так называемую антифонную катушку 2, включаемую последовательно со звуковой катушкой. Число ее витков и направление включения выбирают с учетом наилучшей компенсации напряжения фона. Для уменьшения потерь сопротивление антифонной катушки должно быть в 10-15 раз меньше сопротивления звуковой.

Магнитные цепи с подмагничиванием широко применялись до появления высокомагнитных сплавов. В настоящее время они практически вышли из употребления, так как они менее технологичны и более дороги, чем магнитные цепи с постоянными магнитами. Кроме того, катушка подмагничивания является тепловым источником и уменьшает номинальную мощность громкоговорителя.

На рис. 35 представлена конструкция диффузорного громкоговорителя с комбинированной магнитной цепью,

состоящей из постоянного магнита и катушки подмагничивания, которая увеличивает индукцию в зазоре магнитной цепи. Громкоговорители с комбинированной магнитной цепью обычно применяют в радиоприемниках, в которых катушка подмагничивания используется в качестве дросселя выпрямительного фильтра. Как и в громкоговорителе с подмагничиванием, здесь необходима антифонная катушка.

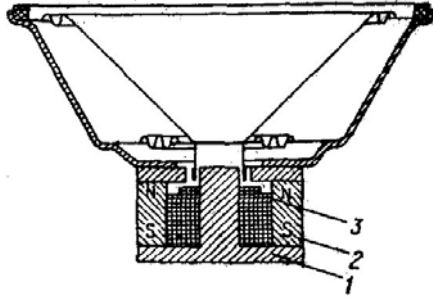


Рис. 35. Диффузорный громкоговоритель с комбинированной магнитной цепью. 1 - катушка подмагничивания; 2 - постоянный магнит; 3 - антифонная катушка.

Громкоговорителям с комбинированной магнитной цепью присущи все недостатки, свойственные громкоговорителям с подмагничиванием, поэтому применение их ограничено.

Сложные громкоговорители обычно имеют два диффузора или две звуковые катушки, или состоят из нескольких громкоговорителей, соединенных конструктивно в единое целое.

На рис. 36, а представлена конструкция диффузорного громкоговорителя, состоящего из катушки с двумя диффузорами. Диффузор 1 является обычным, а диффузор 2 имеет меньший угол раствора, вследствие чего обладает большой жесткостью и более эффективно воспроизводит высокие частоты. Современные модели таких двухдиффузорных громкоговорителей воспроизводят частоты до 18 000—20 000 Гц. Благодаря второму диффузору вес подвижной системы увеличивается и расширяется полоса воспроизведения в области нижних частот, как это показано на рис. 9, б. В двухдиффузорных громкоговорителях применяют круглые и эллиптические диффузоры. Основным их недостатком является относительно малый к.п.д. вследствие увеличения массы

произведения kR_D для диффузора, колеблющегося в бесконечном экране, где $k = \frac{\omega}{c_0}$; R_D - радиус излучающей части диффузора.

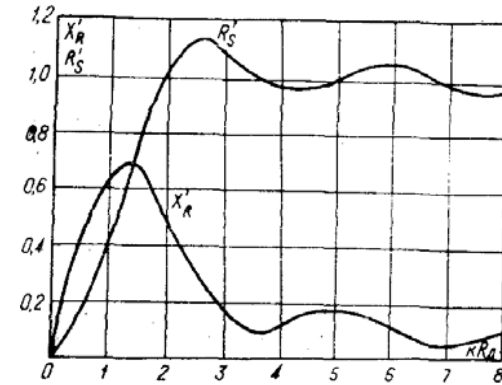


Рис. 47. Безразмерные коэффициенты активной и реактивной составляющих сопротивления излучения

В области низких частот составляющие R_s и X_R могут быть представлены в виде

$$R_s = \frac{\rho_0}{2\pi c_0} S_D^2 \omega^2 \text{ [Н·сек/м]}, \quad (4)$$

$$X_R = \frac{8}{3} \omega \rho_0 R_D^3 \text{ [Н·сек/м]}. \quad (5)$$

Решив совместно уравнения (1) и (2), получим выражения для полных сопротивлений электрической (Z_{eM}) и механической (Z_{Me}) цепей:

$$Z_{eM} = R_e + j\omega L_e + \frac{B_e^2 l_n^2}{(R_n + R_s) + j\left(\omega m - \frac{1}{\omega C_n^2}\right)} \text{ [Ом]}, \quad (6)$$

$$Z_{Me} = (R_n + R_s) + j\left(\omega m - \frac{1}{\omega C_n}\right) + \frac{B_e^2 l_n^2}{\frac{1}{R_e} + j\frac{1}{\omega L_e}} \text{ [Н·с/м]}. \quad (7)$$

Левая (электрическая) часть эквивалентной схемы содержит генератор электрического напряжения U с внутренним сопротивлением R_e и звуковую катушку с сопротивлением R_e и индуктивностью L_e . Правая (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_0 , массы звуковой катушки m_k и соколеблющейся массы воздуха m_e).

Работа громкоговорителя описывается двумя уравнениями:

а) для электрической части эквивалентной схемы

$$U = I \cdot Z_e + B_e \cdot l_n \cdot x, \quad (1)$$

где $Z_e = R_e + j\omega L_e$ - полное электрическое сопротивление заторможенной звуковой катушки, Ом; $\omega = 2\pi f$ - круговая частота, рад/сек.; f - частота, Гц; $B_e \cdot l_n \cdot x$ - э.д.с. возникающая при движении звуковой катушки в магнитном поле, В; x - скорость колебания подвижной системы, м/сек;

б) для механической части эквивалентной схемы

$$F = \dot{x}Z_M + F_A, \quad (2)$$

где Z_M - полное механическое сопротивление подвижной системы;

$$Z_M = R_n + R_s + j \left(\omega m - \frac{1}{\omega C_n} \right) \text{ [Н·с/м]}, \quad (3)$$

$F_A = \dot{x}Z_A$ - сила акустической реакции воздуха при колебании подвижной системы, Н; $Z_A = R_s + X_R$ - полное акустическое сопротивление, Н·с/м; $R_s = \rho_0 c_0 S_d R'_s$ - активное сопротивление излучения, Н·с/м; $X_R = \rho_0 c_0 S_d X'_R$ - реактивное сопротивление излучения, н·сек/м; ρ_0 - плотность воздуха, кг/м³; c_0 - скорость распространения звука в воздухе, м/сек; S_d - площадь излучающей части диффузора, м²; R'_s - безразмерный коэффициент активной части сопротивления излучения; X'_R - безразмерный коэффициент реактивной части сопротивления излучения.

На рис. 47 представлена зависимость R'_s и X'_R от

подвижной системы.

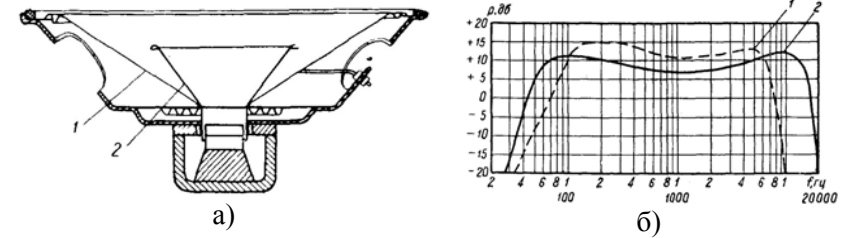


Рис. 36. Громкоговоритель с двумя диффузорами: а - конструкция и б - его частотная характеристика: 1 - без дополнительного диффузора; 2 - с дополнительным диффузором.

Громкоговоритель, показанный на рис. 37, состоит из одного диффузора и двух катушек K_1 и K_2 , намотанных на один каркас и разделенных специальным гофрированным пояском Γ .

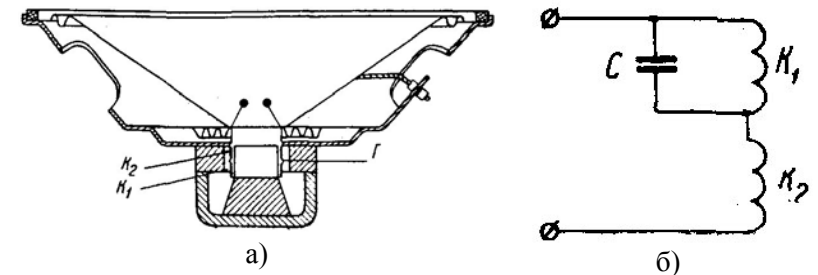


Рис. 37. Двухкатушечный громкоговоритель а) и схема его включения б).

На низких частотах ток течет через обе катушки; на высоких катушка K_1 шунтируется емкостью, поэтому ток протекает только через верхнюю, высокочастотную катушку K_2 . При этом нижняя катушка отключается как электрически, так и механически, общая масса подвижной системы становится меньше, и воспроизведение высоких частот улучшается. Этот тип громкоговорителя относится к широкополосным, однако эффективность воспроизведения высоких частот у него хуже, чем у двухдиффузорного. Кроме того, он значительно сложнее в производстве и требует большей затраты материалов. Поэтому двухкатушечные громкоговорители не нашли широкого применения.

Среднечастотные громкоговорители (mid-range)

Конструирование среднечастотных громкоговорителей, особенно для аппаратуры Hi-Fi, является наиболее сложным процессом. Это обусловлено тем, что, во-первых, в акустических системах категории Hi-Fi и High-End СЧ-громкоговорители используются в диапазонах частот от 200-800 Гц до 5-8 кГц, где чувствительность слуха ко всем видам искажений максимальна. (Субъективные дифференциальные пороги восприятия практически всех видов искажений достигают минимума в области 1-3 кГц).

Во-вторых, именно на эту область частот приходится максимум спектральной плотности мощности почти всех видов музыкальных программ. Поэтому при проектировании СЧ-громкоговорителей необходима чрезвычайная тщательность отработки всех элементов конструкции с целью снижения линейных и нелинейных искажений до пороговых уровней, повышения тепловой и механической устойчивости и т. д.

Основные принципы конструирования отдельных элементов и узлов СЧ-громкоговорителей аналогичны тем, которые применяются в НЧ-громкоговорителях, однако существует и своя специфика. Так, например, излучающий элемент - диафрагму - в СЧ громкоговорителях изготавливают как в виде криволинейных конусообразных рупоров, так и в виде куполов (рис. 38). Конусообразные диафрагмы используются, как правило, в СЧ-динамиках, воспроизводящих частоты от 200-400 Гц (их иногда называют Mid-Bass). Диаметры таких громкоговорителей составляют 125-200 мм, а верхние воспроизводимые частоты доходят до 3-5 кГц. Однако, такие динамики стараются использовать в более узкой полосе, так как из-за сравнительно больших размеров диафрагм они имеют узкую направленность.

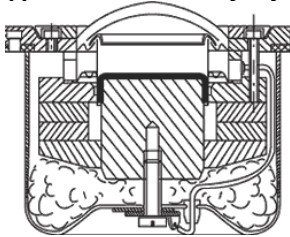


Рис.38. Конструкция среднечастотного купольного ГГ

токи всего спектра звуковых частот, а через высокочастотный - только токи высокой частоты.

Если высокие частоты эффективно воспроизводятся низкочастотным громкоговорителем, то такая схема включения может ухудшить характеристику направленности на высоких частотах она получается более острой. Если же приняты меры, благодаря которым высокие частоты не воспроизводятся низкочастотным громкоговорителем (например, диффузор выполнен с большим углом раствора, или у основания диффузора сделан специальный гофр), то в этом случае часть высокочастотной энергии, подводимой к низкочастотному громкоговорителю, теряется, а характеристика направленности расширяется.

Для эффективного разделения частотных диапазонов применяют фильтры, показанные на рис. 43,44,45. Фильтры (см. рис. 44) обеспечивают крутизну спада и подъема частотных характеристик громкоговорителей в области перекрытия -6 дБ на октаву; фильтры (см. рис. 44) -12 дБ на октаву, и фильтры (см. рис. 40) -18 дБ на октаву. В трехполосном коаксиальном громкоговорителе для выделения средних частот применяют дополнительный фильтр, показанный рис. 45.

2.4. Основные характеристики динамического диффузорного громкоговорителя

Как всякий электроакустический преобразователь, громкоговоритель может быть представлен в виде четырехполосника с электрическим входом и механическим выходом. Четырехполосник можно уподобить трансформатору с коэффициентом трансформации $1:B_e l_n$ (рис. 46), где $B_e l_n$ - коэффициент электромеханической связи.

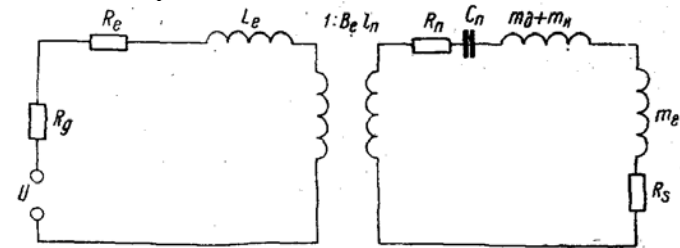


Рис. 46. Эквивалентная схема динамического диффузорного ГГ.

Еще более широкая полоса воспроизводимых частот с меньшей неравномерностью частотной характеристики и характеристики направленности получается в трехполосном коаксиальном громкоговори́теле, конструкция которого показана на рис. 45. Он состоит из диффузорного низкочастотного 1 и рупорного среднечастотного 2 громкоговори́телей. Внутри низкочастотного диффузора расположен либо диффузорный либо рупорный высокочастотный громкоговори́тель 3.

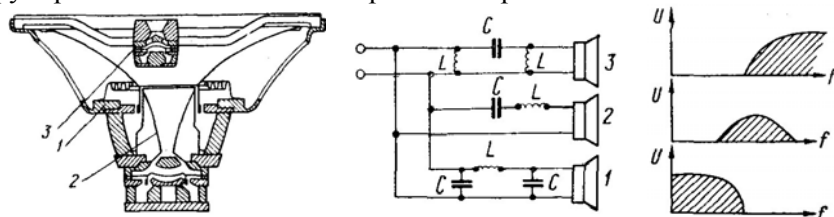


Рис. 45. Трехполосный коаксиальный громкоговори́тель и схема его включения.

Коаксиальные громкоговори́тели достаточно сложны и дороги. Они применяются, в основном, как измерительные громкоговори́тели, а также в высококачественных дорогих звуковоспроизводящих устройствах. В их конструкциях предусматриваются меры для обеспечения требуемых электроакустических параметров и высокого коэффициента полезного действия. Их магнитные цепи имеют высокую индукцию (порядка $1,5-1,8 \text{ Вб/м}^2$) в зазоре магнитной цепи. Это достигается благодаря применению кольцевых магнитов увеличенных размеров и веса из сплавов с высокой магнитной энергией (типа ЮНДК24). Для устранения перекосов подвижной системы, при креплении громкоговори́телей к экранной доске их диффузородержатели делают массивными. Обычно они отливаются из силумина и имеют специальные ребра жесткости.

Для частотного разделения сигналов, подводимых к звуковым катушкам коаксиальных громкоговори́телей, применяют фильтры. Наиболее простым является фильтр, состоящий из одной емкости, включенной в цепь звуковой катушки высокочастотного громкоговори́теля (см. рис. 42). При такой схеме включения через звуковую катушку низкочастотного громкоговори́теля проходят

СЧ-громкоговори́тели диаметрами 160-200 мм находят все большее применение в акустических системах, работающих совместно с НЧ-блоками (subwoofer), построенными по принципам "двойной фазоинвертор", "симметричная нагрузка", и воспроизводящими частоты не выше 150-200 Гц. В качестве материала для таких диафрагм чаще всего продолжают применять специально разработанные композиции на основе растительных целлюлоз, синтетических пленочных материалов, а также на основе полипропилена или высокомолекулярного кевлара.

Купольные диафрагмы имеют, как правило, диаметры 40-80 мм. СЧ-динамики с ними обладают лучшей направленностью, и применяются обычно в высококачественных акустических системах для воспроизведения частот от 600...1000 Гц до 6...8 кГц. Форма купольной диафрагмы жестко связана с применяемым для нее материалом. Как правило, диафрагмы изготавливаются либо из "мягких" (пропитанные ткани, синтетические пленки, целлюлоза и т. п.), либо из "жестких" материалов (алюминиевая, титановая, бериллиевая фольга, различные их высокомолекулярные сплавы, например, с бором, и т. п.).

У "мягких" диафрагм собственные окружные и радиальные резонансы расположены, как правило, в области воспроизводимых частот. Для уменьшения их амплитуд применяются различные меры по увеличению конструктивной жесткости: ребра жесткости на поверхности, использование составных диафрагм из куполов различной кривизны и жесткости материала и т.п., а также увеличение демпфирования за счет нанесения на их поверхность различных пропиток и смазок. При этом чрезмерное нанесение таких покрытий может привести к гистерезисным явлениям при колебании диафрагмы, что, в свою очередь, вызовет субъективное ощущение потери "полетности" звучания.

У СЧ-динамиков с мягкими диафрагмами подвесы обычно изготавливаются (прессуются или отливаются из целлюлозы) вместе с диафрагмой, и имеют, в основном, профиль тороидальной, синусоидальной или тангенциальной формы. В акустических системах средней мощности используют купольные СЧ-громкоговори́тели с одним подвесом, без центрирующей шайбы. В акустических системах большой мощности и низкой частотой

раздела применяют СЧ-громкоговорители с двумя гибкими элементами, как в НЧ-громкоговорителях, т.е. подвесом и шайбой, так как при закреплении на одном подвесе при больших смещениях возможны интенсивные поперечные и крутильные колебания подвижной системы, что существенно увеличивает нелинейные искажения. В некоторых конструкциях СЧ-динамиков под диафрагмой размещают звукопоглощающий материал, демпфирующий резонансы объема воздуха.

СЧ-громкоговорители с мягкими диафрагмами имеют, как правило, меньшую чувствительность, чем с жесткими диафрагмами, за счет более тяжелых из-за применения различных пропиток и смазок диафрагм. В связи с этим их стараются делать несколько более мощными, применяя звуковые катушки больших диаметров (50...80 мм), заполняют зазоры магнитных цепей магнитной жидкостью, обеспечивающей более интенсивное отведение тепла от звуковой катушки к неподвижным деталям магнитной цепи.

Для снижения нелинейных искажений, вызванных взаимодействием переменного магнитного поля звуковой катушки с постоянным магнитным полем цепей, в последних применяются описанные выше меры ("короткозамкнутые витки" и т.п.) Уменьшение влияния неравномерности и неоднородности магнитного поля в зазоре магнитной цепи во всех СЧ-динамиках (и с мягкими, и с жесткими диафрагмами) достигается применением звуковых катушек, имеющих высоту намотки, несколько меньшую высоты зазора, что позволяет звуковой катушке, учитывая сравнительно небольшую амплитуду ее смещений, находиться в процессе работы в наиболее равномерном и однородном постоянном магнитном поле внутри зазора. Этому способствует применение для намотки плоских проводов (медных и алюминиевых).

Необходимо отметить, что СЧ-громкоговорители с мягкими диафрагмами, особенно при малых уровнях входного сигнала, обеспечивают неокрашенное, естественное по тембру звучание. Однако, при больших уровнях, в них может возникнуть потеря динамической устойчивости и, соответственно, слышимые искажения.

частот, благодаря тому, что они состоят из двух узкополосных громкоговорителей, в каждом из которых легче получить большую равномерность частотной характеристики. Им также свойственна расширенная характеристика направленности в более широком диапазоне частот, так как высокочастотный громкоговоритель имеет диффузор с малой площадью излучающей поверхности.

Еще более равномерную характеристику направленности можно получить, применяя два высокочастотных громкоговорителя, оси которых расположены под углом друг к другу (рис. 43). Высокочастотные громкоговорители 2 крепятся к керну низкочастотного громкоговорителя 1. Применяют также двухполосные коаксиальные громкоговорители, состоящие из низкочастотного диффузорного и высокочастотного рупорного громкоговорителей. В некоторых конструкциях используют многоячековый рупор с выходными отверстиями, расположенными по сферической поверхности. Этим достигается более равномерная характеристика направленности в широком диапазоне частот. Головка высокочастотного громкоговорителя располагается за магнитной цепью низкочастотного, а рупор проходит через kern магнитной цепи последнего (рис. 44).

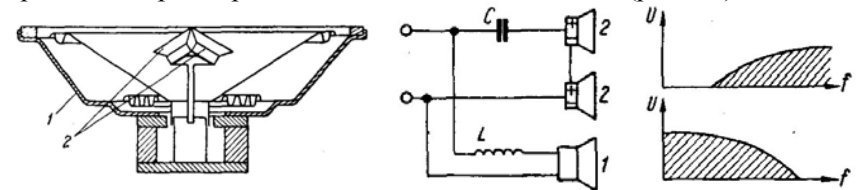


Рис. 43. Коаксиальный громкоговоритель с двумя высокочастотными диффузорными громкоговорителями, оси которых расположены под углом, и схема включения.

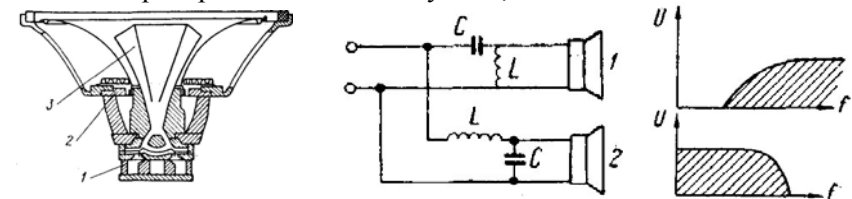


Рис. 44. Коаксиальный громкоговоритель с многоячечным рупорным высокочастотным громкоговорителем и схема его включения.

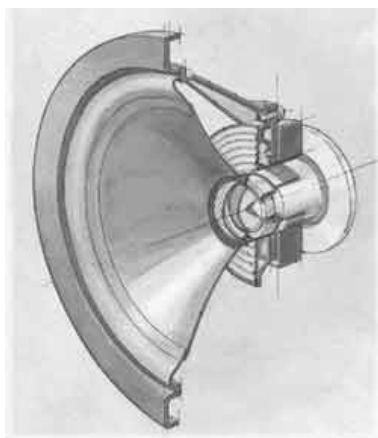


Рис.41 Коаксиальный громкоговоритель фирмы KEF

Не менее распространен многоэлементный или коаксиальный громкоговоритель состоящий из нескольких конструктивно объединенных простых громкоговорителей, звуковые катушки которых включены через фильтры. На рис. 42 представлена конструкция коаксиального громкоговорителя, состоящего из низкочастотного громкоговорителя 1, внутри большого диффузора которого помещен малый высокочастотный диффузорный громкоговоритель 2. В данной конструкции высокочастотный громкоговоритель прикрепляется к диффузодержателю низкочастотного. При этом края обоих диффузоров выдерживаются на одном уровне.

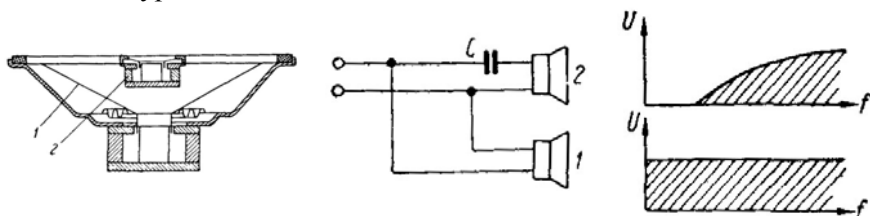


Рис. 42. Коаксиальный громкоговоритель с одиночным высокочастотным диффузорным громкоговорителем и схема его включения.

Коаксиальные громкоговорители обеспечивают более равномерную частотную характеристику в широком диапазоне

В СЧ-громкоговорителях с жесткими купольными диафрагмами обеспечивается расширенный воспроизводимый диапазон частот (до 12 кГц) при практически поршневом характере колебаний, что дает малые уровни переходных искажений и чистое звучание.

Высокочастотные громкоговорители (tweeters)

Требования к высокочастотным громкоговорителям для бытовых и профессиональных акустических систем за последние годы резко возросли в связи с увеличением спектральной плотности мощности в высокочастотной части спектра в современной (особенно электронной) музыке, а также с расширением частотного и динамического диапазона программ, воспроизводимых цифровой звуковоспроизводящей аппаратурой. Все это потребовало от фирм-производителей решения целого ряда новых конструктивных и технологических задач при проектировании ВЧ-громкоговорителей (рис. 39).

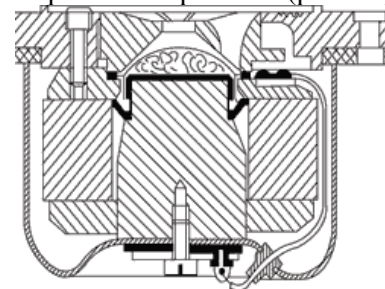


Рис.39. Конструкция высокочастотного громкоговорителя

В современных акустических системах высокочастотные громкоговорители используются, как правило, в диапазонах частот от 1,5...3 кГц до 30...40 кГц. Обеспечить равноценное качественное воспроизведение звука в таком широком диапазоне с помощью одного громкоговорителя чрезвычайно трудно. Поэтому большая часть выпускаемых в настоящее время ВЧ-динамиков применяются в диапазонах от 2...5 до 16...18 кГц, а в некоторых акустических системах устанавливаются дополнительные малогабаритные ВЧ-громкоговорители (supertweeter), воспроизводящие частоты от 8...10 до 30...40 кГц. Примером такого современного громкоговорителя может служить ST-200 фирмы Таппоу,

воспроизводящий диапазон до 54 кГц со спадом 6 дБ, и выдерживающий подводимую мощность 135 Вт (до 550 Вт в пиках).

Обычно в ВЧ-громкоговорителях используются купольные диафрагмы (диаметром 15...40 мм), так как в этой области частот у конусных диафрагм не удается избежать радиальных резонансных мод собственных колебаний, значительно ухудшающих как объективные характеристики, так и звучание. Электрические мощности таких динамиков достигают 8...15 Вт (без фильтрующе-корректирующих цепей) и 20...50 Вт в составе акустических систем, а чувствительность - не менее 90 дБ/Вт/м. Мощности ВЧ-динамиков все время растут - примером может служить вышеупомянутый громкоговоритель Tannoy; имеется целый ряд моделей, где мощности превышают 100 Вт, а чувствительность достигает 100 дБ/Вт/м.

Диафрагмы ВЧ-громкоговорителей, также как у СЧ-громкоговорителей, изготавливаются из тех же "мягких" или "жестких" материалов, соответственно горячим прессованием или штамповкой, с электронно-вакуумным напылением. В качестве материалов используется алюминий, титан (в вышеупомянутой модели Tannoy ST-200 купольная диафрагма изготовлена из 25 мкм титана с напыленным слоем золота), и даже самый легкий (и самый вредный при производстве) металл - бериллий. Для повышения теплоотвода от звуковой катушки в некоторых конструкциях купол и каркас звуковой катушки изготавливаются как единая деталь из одного материала (например, алюминиевой фольги). Наряду с купольными диафрагмами в ряде моделей применяются плоские или U-образные кольцевые диафрагмы (такие ВЧ-динамики применяются в концертно-театральной аппаратуре).

Подвесы у ВЧ-громкоговорителей изготавливают обычно из того же материала, что и диафрагма (хотя встречаются и комбинированные конструкции), плоской или синусоидальной формы. Для предотвращения возникновения резонансных колебаний объема под диафрагмой, подвес, как правило, заполняется демпфирующим материалом.

Звуковые катушки ВЧ-динамиков часто наматываются алюминиевым (иногда серебряным) плоским проводом,

позволяющим за счет меньшего удельного веса по сравнению с медным увеличить уровень звукового давления в области верхней граничной частоты на несколько децибел.

Специфической особенностью ВЧ-громкоговорителей является использование "акустических линз" (эквализаторов, концентраторов), устанавливаемых перед диафрагмой, и обеспечивающих выравнивание АЧХ в определенных диапазонах, и изменение характеристики направленности.

Особой разновидностью головок громкоговорителей являются совмещенные (коаксиальные) громкоговорители.

Коаксиальные громкоговорители получили широкое распространение в автомобильной и студийной технике. Наиболее известная конструкция была запатентована фирмой Tannoy (рис. 40). В этой конструкции совмещены высокочастотный купольный громкоговоритель, который через отверстие в керне излучает через низкочастотный громкоговоритель, образующая которого служит для него рупором. Такое совмещение помогает стабилизировать характеристики направленности, уменьшить фазовые искажения и др. Фирма Tannoy создала целую линейку таких громкоговорителей, и на их базе выпускает более двадцати моделей. Аналогичные модели громкоговорителей выпускает в настоящее время фирма KEF для аппаратуры High-End (рис.41).

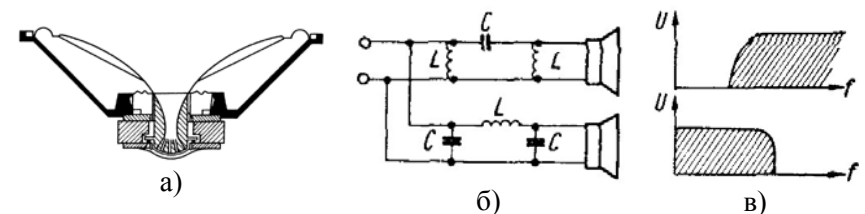


Рис.40 Конструкция и схема включения коаксиального громкоговорителя