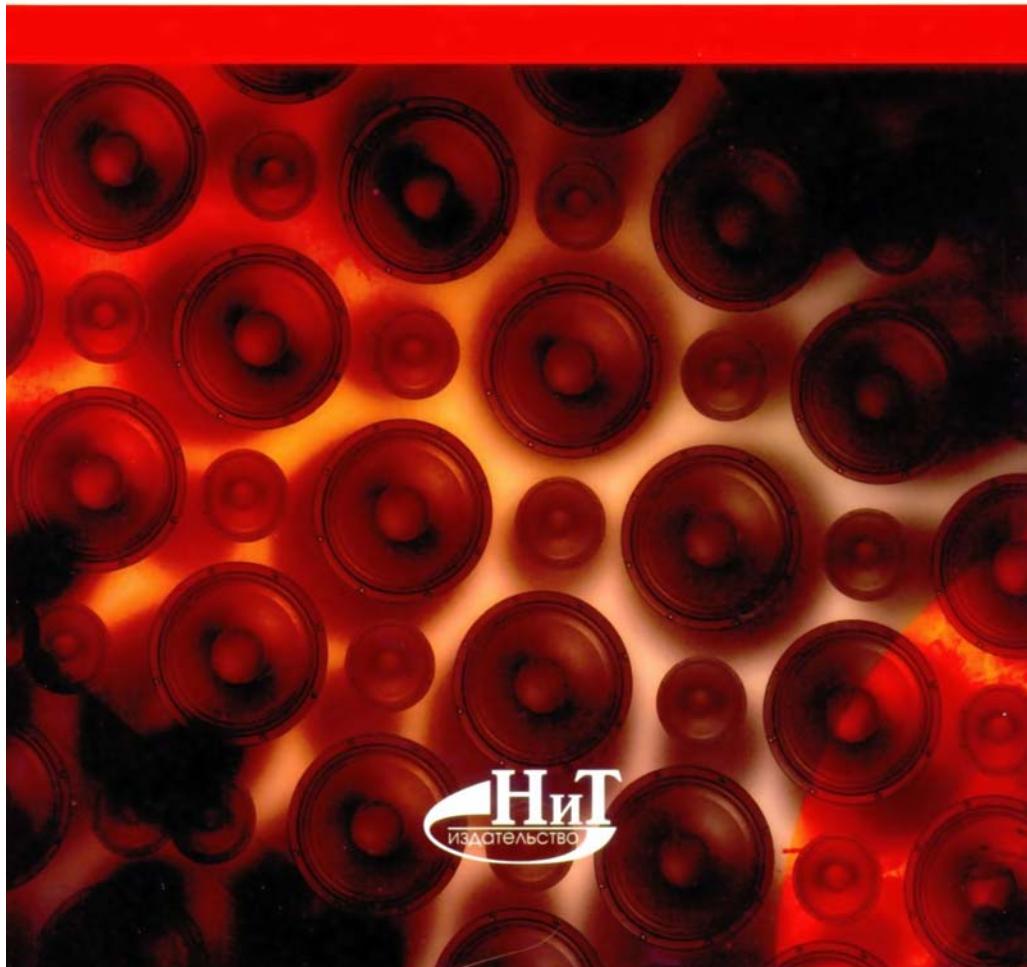


Гапоненко С. В.

# АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

своими руками



С. В. Гапоненко

# АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВОИМИ РУКАМИ



---

Наука и Техника, Санкт-Петербург  
2013

Гапоненко С. В.

Акустические системы своими руками. — СПб.: Наука и Техника, 2013. — 240 с.

**ISBN 978-5-94387-829-9**

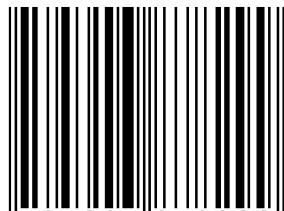
---

Книга содержит простые рекомендации по построению хорошо звучащих акустических систем. Принципиальной особенностью в подходе автора является отказ от фазоинверторов в акустическом оформлении в пользу закрытых ящиков и трансмиссионной линии, применение одного излучателя в частотном диапазоне, определяющем стереоэффект (200—3000 Гц), а также применение простейших последовательных разделительных фильтров первого порядка.

Такие подходы обеспечивают качественное звучание за счет хороших переходных характеристик, хорошей пространственной сцены и одновременно избавляют от сложных расчетов и измерений.

Прочитав эту книгу, читатели смогут отказаться от прямого и неосознанного копирования «чужих» акустических систем и смогут сами выбрать оптимальную конструкцию для полноценной реализации возможностей доступных им динамических головок.

Книга предназначена для широкого круга читателей, радиолюбителей, любителей качественного звука.



**ISBN 978-5-94387-829-9**

Автор и издательство не несут ответственности  
за возможный ущерб, причиненный в ходе  
использования материалов данной книги.

Контактные телефоны издательства  
(812) 412-70-25, 412-70-26  
(044) 516-38-66

Официальный сайт: [www.nit.com.ru](http://www.nit.com.ru)

© Гапоненко С. В.

© Наука и Техника (оригинал-макет), 2013

---

ООО «Наука и Техника».

Лицензия № 000350 от 23 декабря 1999 года.  
198097, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, д. 29.

Подписано в печать . Формат 70×100 1/16.  
Бумага газетная. Печать офсетная. Объем 15 п. л.

Тираж 1500 экз. Заказ №

**JTP**

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в ГП ПО «Псковская областная типография»  
180004, г. Псков, ул. Ротная, 34

# Содержание

<b>От автора .....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. Звук, музыка и динамическая головка .....</b>	<b>8</b>
1.1. Что такое звук? .....	8
1.2. Что такое музыка? .....	12
1.3. Уточним терминологию .....	15
1.4. Как работает динамическая головка? .....	18
1.5. Параметры динамической головки.....	20
1.6. Какие параметры влияют на звук?.....	30
1.7. Диапазон воспроизводимых частот акустической системы .....	32
1.8. Микро- и макродинамика звуковоспроизведения .....	34
1.9. Параметры и цены динамиков, пригодных для построения хорошо звучащих систем.....	37
<b>Глава 2. Акустические системы .....</b>	<b>43</b>
2.1. Типы акустического оформления.....	43
2.2. Почему маленькие динамики звучат не так, как большие? .....	46
2.3. Подходы профессионалов.....	52
2.4. Почему фазоинверторы доминируют на рынке акустических систем? .....	57
2.5. Какой же «ящик» звучит лучше? .....	59
2.6. Рекомендации автора по изготовлению акустических систем.....	61
2.7. Подведем итоги .....	63
<b>Глава 3. Расчет закрытых ящиков.....</b>	<b>65</b>
3.1. Что происходит при помещении динамика в закрытый ящик? .....	65
3.2. Формула для расчета АЧХ закрытого ящика.....	67
3.3. Оптимальный объем ящика .....	71
3.4. АЧХ для закрытого ящика произвольного объема.....	74
3.5. Когда фазоинвертор становится похожим на закрытый ящик? .....	77
3.6. Подведем итоги .....	84
<b>Глава 4. Расчет систем типа «трансмиссионная линия».....</b>	<b>86</b>
4.1. Акустические моды в трубе .....	87
4.2. Эксперимент Мартина Кинга .....	88
4.3. Основный принцип трансмиссионной линии .....	93
4.4. Конструкции АС типа «Т-линия» .....	95
4.5. Расчет параметров Т-линии .....	97
4.6. Расчет Т-линии переменного сечения .....	99
4.7. Две головки в одной акустической системе .....	106
4.8. Разновидности трансмиссионной линии .....	107
4.9. Подведем итоги .....	114

<b>Глава 5. Создаем акустические системы своими руками .....</b>	<b>116</b>
5.1. Можно ли сделать хорошо звучащую систему в домашних условиях?.....	116
5.2. Как выбрать конструкцию акустической системы? .....	118
5.3. Где взять хорошие динамики? .....	120
5.4. Какие параметры динамиков необходимо знать для построения акустической системы?.....	121
5.5. Как измерить параметры динамика в домашних условиях? .....	122
5.6. Рекомендации по подбору динамиков в многополосной системе.....	128
5.7. Разделительные фильтры: введение.....	132
5.8. Приближение к реальности .....	141
5.9. Рекомендация автора: последовательные фильтры 1-го порядка .....	150
5.10. Расчет и изготовление катушек индуктивности .....	160
5.11. Советы по выбору конденсаторов.....	164
5.12. Последовательные и параллельные фильтры в трехполосных системах .....	165
5.13. Фильтры высоких порядков .....	167
5.14. Изготовление корпуса.....	171
5.15. Подведем итоги .....	178
<b>Глава 6. Стереофоническая система своими руками: трансмиссионная линия .....</b>	<b>180</b>
6.1. Система с единственным широкополосным динамиком .....	180
Коррекция АЧХ широкополосных динамических головок .....	184
6.2. Двухполосная система с коаксиальными излучателями .....	186
6.3. Двухполосная система: раздельные НЧ- и ВЧ-головки.....	189
<b>Глава 7. Стереофоническая система своими руками: трехполосный вариант .....</b>	<b>195</b>
7.1. С чего начать? Выбираем основную головку .....	195
7.2. Система «10"+8"+1"» .....	200
7.3. Система «10"+6"+1"» .....	203
<b>Глава 8. Трифоническая система своими руками.....</b>	<b>206</b>
8.1. Принцип работы .....	206
8.2. Трифоническая система с общим низкочастотным излучателем на два канала .....	209
8.3. Превращение стандартного стереокомплекса в трифоническую систему... .....	211
8.4. Что такое «сабвуфер»?.....	221
<b>Глава 9. Советы по самостояльному изготовлению усилителей .....</b>	<b>224</b>
9.1. Простейший вариант: усилитель на интегральных схемах.....	224
9.2. Улучшенный вариант: полупроводниковый усилитель без общей обратной связи .....	227
9.3. На пути к «ламповому звуку»: несложные гибридные усилители .....	229
<b>Список обозначений .....</b>	<b>234</b>
<b>Список сокращений .....</b>	<b>235</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>236</b>
<b>Список использованных ресурсов Интернет.....</b>	<b>238</b>

## ОТ АВТОРА

Лучше один раз услышать, чем сто раз увидеть. В музыкальной акустике, как и в искусстве, нет абсолютной истины. Есть вкусы, мнения, предпочтения, стили и школы. Каждая акустическая система звучит по-своему. Хорошие акустические системы отличаются от плохих тем, что каждая из них звучит по-своему хорошо.

В то же время высокая верность звуковоспроизведения подразумевает максимальное приближение звучания фонограммы к звучанию реальных инструментов и вокалистов. Поэтому, вообще говоря, совершенные звуковоспроизводящие системы должны звучать одинаково — то есть неотличимо от реальных источников музыкального сигнала.

К сожалению, такое совершенство звуковоспроизведения пока остается мечтой. А в технике аудио-«хай-энда» состязание идет за степень приближения к реальности. В цепочке «запись-воспроизведение» акустическая система занимает последнее место. Последнее в электрическом тракте, но первое по вкладу в формирование достоверной звуковой картины у слушателя. Именно она превращает электрические сигналы в акустические. Именно здесь возникает максимальное количество вопросов и максимальное количество недокументируемых и не поддающихся техническому описанию нюансов звукопередачи, а мастерство конструирования акустических систем можно сравнить со штучным изготовлением качественных музыкальных инструментов.

Как выбрать подходящие динамические головки и согласовать их между собой? Какой тип акустического оформления дает лучшее звучание? Что реально достичь в условиях домашней мастерской? На чем можно экономить, оберегая семейный бюджет, а что потребует неизбежных расходов? Может ли «самодельщик» конкурировать с профессиональными разработчиками, продвигающими дорогие элитные «бренды» на наши рынки?

Читатели старшего поколения, возможно, помнят книги В. К. Иоффе и М. В. Лизункова, Э. Л. Виноградовой, И. А. Алдошиной и В. Г. Войшвило, посвященные конструированию акустических систем. Эти книги вышли очень давно и уже стали редкостью. Кроме того, за десятилетия, прошедшие после выхода этих книг, произошли изменения не только в характеристиках динамических головок гром-

коговорителей, в их доступности для самодельщиков, но и в подходах к изготовлению акустического оформления для них. Книги прошлых лет содержали большое количество громоздких формул, рассчитанных скорее на профессиональных разработчиков, чем на меломанов-самодельщиков.

В них, в основном, описывалось конструирование фазоинверторных корпусов. Такой подход, **во-первых**, требует исходного знания большого числа параметров динамических головок или умения их измерять в домашних условиях. **Во-вторых**, его следует признать всего лишь неудачным коммерческим компромиссом в конструировании акустических систем с целью расширения нижней границы воспроизводимого диапазона частот при испытаниях с использованием идеального *синусоидального* сигнала. При воспроизведении реальных музыкальных звуков более высокими субъективными характеристиками обладают акустические системы типа «трансмиссионная линия» или «закрытый ящик». Их субъективно более высокое качество звучания подтверждается объективно измерениями переходных характеристик при воспроизведении тестовых импульсных сигналов.

Настоящая книга содержит простые рекомендации по построению хорошо звучащих акустических систем, включая как стандартные стереофонические, так и трифонические с общим низкочастотным каналом. Материал книги основан на обобщении доступных в литературе и сети интернет данных, а также на личном опыте автора, изготавливавшего несколько описанных в книге систем.

Принципиальной особенностью в подходе автора является отказ от фазоинверторов в акустическом оформлении в пользу закрытых ящиков и трансмиссионной линии, применение одного излучателя в частотном диапазоне, определяющем стереоэффект (200—3000 Гц), а также применение простейших последовательных разделительных фильтров первого порядка.

Такие подходы обеспечивают более качественное звучание за счет лучших переходных характеристик, хорошей пространственной сцены и одновременно избавляют от сложных расчетов и измерений. Дополнительно в книге приводятся полезные рекомендации по построению относительно несложных, но хорошо звучащих транзисторных и лампово-транзисторных усилителей.

Автор надеется, что прочитав эту книгу, читатели откажутся от прямого и неосознанного копирования «чужих» акустических систем

и смогут сами выбрать оптимальную конструкцию для полноценной реализации возможностей доступных им динамических головок.

Книга написана по инициативе Сергея Леонидовича Корякина-Черняка. Написанию этой книги содействовали, прежде всего, мои родители, поддержавшие в мои школьные годы увлечение электроакустикой, и моя жена, вдохновляющая меня на новые аудиоконструкции. Я признателен им, а также «коллегам по аудиохобби» Михаилу Захаричу, Александру Гурскому, Леониду Лознеру, Максиму Диденко и Мартину Кингу за полезные советы, комментарии и замечания.

Желаю всем читателям приятного аудиотворчества и удовлетворения от его результатов. Ради того, что значит музыка в жизни каждого из нас. Буду рад ответить на любые вопросы и замечания, присланные на адрес: [audio-hobby@tut.by](mailto:audio-hobby@tut.by).

*С. В. Гапоненко, Минск, 2013*

## ГЛАВА 1

# ЗВУК, МУЗЫКА И ДИНАМИЧЕСКАЯ ГОЛОВКА

*В этой главе рассказывается о свойствах звуковых волн, об особенностях музыкальных звуков, о том, как звуки и музыка воспринимаются человеком. Описывается принцип работы электродинамической головки, подробно объясняется значение ее механических и электрических параметров, их связь и влияние на воспроизведение музыки. Приводятся сведения о нескольких десятках качественных динамических головок, пригодных для построения в домашних условиях хорошо звучащих акустических систем.*

## 1.1. Что такое звук?

Звук — это распространяющиеся в виде волн упругие колебания в газе, жидкости или твердом теле, слышимые человеком. Частотный диапазон звуковых колебаний составляет 16—20000 Гц. Колебания с частотой ниже 16 Гц называют инфразвуковыми, с частотой выше 20 кГц — ультразвуковыми колебаниями.

Напомним, что *частота  $f$  равна числу колебаний в единицу времени* (секунду) и обратно пропорциональна *периоду колебаний  $T$ , измеряемому в единицах времени (секундах)*,  $f = 1/T$ .

Например, если период колебаний равен 1 секунде, то частота равна 1 Гц (Герц), а если период колебаний равен 1 мс (миллисекунда), то частота колебаний равна 1 кГц (1 килогерц).

Звуковые колебания в газах и жидкостях являются продольными (направление колебаний сжатия-разрежения параллельно направлению распространения фронта волны). В твердых телах существуют также поперечные колебания (направление колебаний сдвига перпендикулярно направлению движения фронта волны).

Звук воспринимается человеком при помощи уха и мозга. Наружное ухо, состоящее из ушной раковины, слухового канала и барабанной

перепонки, улавливает колебания воздуха и передает их на барабанную перепонку. Механические колебания барабанной перепонки усиливаются в среднем ухе цепью сочлененных маленьких костей (молоточек, наковальня, стремечко) и передаются во внутреннее ухо, где имеется спиралевидная полость — улитка, переходящая в слуховой нерв. Слуховыми рецепторами являются волосковые клетки, расположенные внутри улитки. Они превращают механическую энергию колебаний в электрический сигнал, поступающий в мозг по слуховому нерву. Внутреннее ухо также содержит рецепторы вестибулярного аппарата, подающие в мозг статические сигналы, связанные с положением тела, и динамические сигналы, связанные с ускорением.

Основными физическими характеристиками звука являются:

- ♦ интенсивность, определяющая мощность в расчете на единичную площадь ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );
- ♦ спектральный состав — распределение мощности по частоте.

По слуховому восприятию частота звука воспринимается как его высота (тон), а интенсивность — как громкость (амплитуда). Диапазон чувствительности человеческого органа слуха по интенсивности весьма широк — от  $10^{-12}$   $\text{Вт}/\text{м}^2$  (порог слышимости) до  $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$  (болевой порог).

Соответствующий диапазон звукового давления  $P$  составляет  $10^{-5}—10^7$  Па (паскаль). Напомним, что  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}/\text{м}^2$  (ньютон на кв. метр).

Используемые в звуковоспроизводящей аппаратуре уровни электрической мощности порядка  $10—100$  Вт при озвучивании помещений площадью  $20—50 \text{ м}^2$  обусловлены низкой эффективностью электроакустических преобразователей (громкоговорителей), а также необходимостью иметь запас мощности для компенсации пониженной чувствительности человеческого слуха на очень низких частотах.

Интенсивность звука  $I$  пропорциональна квадрату звукового давления, т. е.  $I \sim P^2$ . Субъективное восприятие человеком интенсивности звука пропорционально логарифму интенсивности, т. е. для увеличения субъективно воспринимаемой интенсивности в два раза, ее значение надо возвести в квадрат, в три раза — в куб и т. д. Поэтому интенсивность звука  $I$  характеризуют с помощью логарифмических единиц — децибел (дБ):

$$\text{Интенсивность звука } I [\text{дБ}] = 10 \lg(I/I_0), \\ I_0 \text{ соответствует звуковому давлению } 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \quad (1)$$

Например, интенсивность звука 10 дБ соответствует 10-кратному превышению значения  $I_0$ , интенсивность звука 20 дБ — 100-кратному, а 30 дБ — 1000-кратному. Изменение интенсивности в 2 раза соответствует 3 дБ. Увеличение уровня соответствует «положительным» децибелам, а уменьшение — «отрицательным» децибелам.

При измерении звукового давления, развиваемого акустическими системами, и его зависимости от частоты (амплитудно-частотная характеристика, АЧХ, акустической системы) также используют логарифмические единицы — децибелы, однако формула для расчета отличается от формулы (1):

$$\text{Звуковое давление } P \text{ [дБ]} = 20 \lg(P/P_0), P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \quad (2)$$

Это связано с тем, что интенсивность пропорциональна квадрату давления, а при возведении числа в квадрат его логарифм удваивается. Например, уровень звукового давления в 20 дБ соответствует 100-кратному превышению значения  $P_0$ , уровень в 40 дБ — 100-кратному, а уровень в 60 дБ — 1000-кратному. Изменение давления в 2 раза соответствует изменению уровня на 6 дБ.



#### Примечание.

Амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) электронных компонентов звукового тракта (предварительных усилителей и усилителей мощности) измеряют и представляют в виде зависимости выходного напряжения от частоты. При этом часто тоже используют логарифмическую шкалу и единицу измерения децибел:  $U/U_0[\text{дБ}] = 20 \lg(U/U_0)$ . А вот уровни электрической мощности  $W$ , которая пропорциональна квадрату напряжения, рассчитывают по формуле  $W/W_0[\text{дБ}] = 10 \lg(W/W_0)$ .

Перевод отношений двух величин в децибели для интервала от 0,1 до 10 показан на рис. 1.1.

Разные коэффициенты при пересчете относительных интенсивностей и относительных давлений в децибели в формулах (1) и (2), на первый взгляд, могут запутать неискусшенного в электроакустике читателя. На самом деле, такой подход как раз устраниет возможные разнотечения при интерпретации «децибелных» характеристик и акустических систем, и усилителей. Например, представим, что звуковое давление изменилось в 2 раза, т. е. на 6 дБ. Интенсивность звука при



Рис. 1.1. Отношения амплитуд и уровней в абсолютных единицах и в децибелах

этом увеличится в 4 раза. Но для интенсивности изменение в 4 раза — это тоже 6 дБ. Если звуковое давление изменилось в 10 раз (т. е. на 20 дБ), интенсивность звука при этом изменится в 100 раз — т. е. тоже на 20 дБ.

Динамический диапазон музыкальных инструментов\*

Таблица 1.1

Источник звука	Минимальный/ максимальный уровни интенсивности звука, дБ	Динамический диапазон, дБ
Гитара	40/55	15
Струнный квартет	35/75	40
Орган	50/85	35
Рок-группа	80/110	30
Симфонический оркестр	35/110	75

Диапазон звукового давления от порога слышимости до болевого порога ( $10^{-5}$  Па /  $10^7$  Па =  $10^{12}$ ) составляет  $10 \times 12 = 120$  дБ. Таким образом, переход к децибелам упрощает оперирование с характеристиками звукового давления и интенсивности звука.

Уровни интенсивности звука для различных музыкальных источников представлены в табл. 1.1. Интенсивность звука симфонического оркестра доходит до уровня 110 дБ, а его динамический диапазон достигает 75 дБ, т. е. отношение интенсивности самого громкого звука к самому тихому превышает  $10^7$  раз.

Уровень громкости, воспринимаемый человеком, зависит от частоты звука. Чувствительность уха максимальна в области частот 3—4 кГц и уменьшается на более низких и более высоких частотах. Зависимость чувствительности уха от частоты и уровня звукового давления характеризуют набором кривых равной громкости (рис. 1.2), которые показывают, насколько должен отличаться уровень звукового

\* А. А. Петров. Звуковая схемотехника для радиолюбителей. С-Петербург, Наука и техника, 2003.

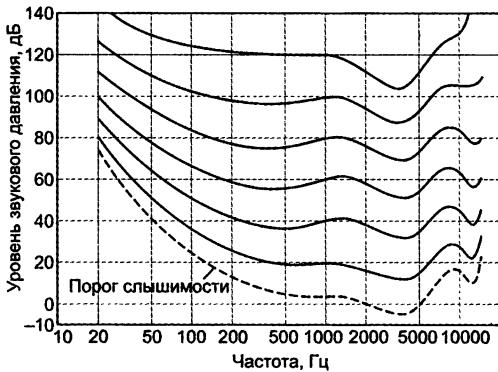


Рис. 1.2. Кривые равной громкости

давления на данной частоте для субъективного восприятия с громкостью, равной громкости источника звука с частотой 1 кГц. На рис. 1.2 переход по высоте от одной кривой к следующей соответствует равномерному субъективно воспринимаемому повышению громкости. В соответствии с ослаблением чувствительности слуха на краях звукового ди-

пазона, кривые равной громкости испытывают подъем по сравнению с частотой 1 кГц.

Неравномерность чувствительности растет с уменьшением громкости, поэтому при звуковоспроизведении на низких уровнях громкости часто используют коррекцию амплитудно-частотной характеристики звуковоспроизводящего тракта — т. н. тонкомпенсацию.

Скорость звука в воздухе составляет  $v = 330 \text{ м/с}$  при температуре  $0^\circ\text{C}$  и  $343 \text{ м/с}$  при температуре  $20^\circ\text{C}$ .

Длина волны  $\lambda$  равна произведению скорости звука на период колебаний,  $\lambda = v T = v/f$ . Иными словами, длина волны — это расстояние, проходимое волной за один период колебаний. Длина звуковых волн составляет в воздухе от 21,4 м (16 Гц) до 1,71 см (20 кГц). Приведем формулы для пересчета длины волны в частоту и обратно, которые будут часто использоваться в этой книге:

$$\text{длина звуковой волны (м)} = \frac{\text{скорость звука (м/с)}}{\text{частота (Гц)}} = \frac{343}{f}, \quad (3)$$

$$\text{частота (Гц)} = \frac{\text{скорость звука (м/с)}}{\text{длина звуковой волны (м)}} = \frac{343}{\lambda}. \quad (4)$$

## 1.2. Что такое музыка?

Музыка — это последовательность во времени особым образом соотнесенных по высоте (частоте) звуков, как правило, имеющих четкую временную организацию (такты), способная вызвать определенную позитивную психо-эмоциональную реакцию у человека.

Музыкальные звуки состоят из основного тона, определяющего высоту звука, и набора обертонов, частоты которых кратны частоте основного тона.

Интенсивность обертонов определяет окраску (темпер) звука. Диапазон основных тонов музыкальных звуков намного уже всего звукового диапазона и составляет приблизительно от 40 Гц до 2 кГц.



**Пример.**

Часто используемый в камертонах звук ноты ля первой октавы имеет частоту 440 Гц. Частотный диапазон звуков гитары — от 80 Гц до 1 кГц.

Высокочастотная часть звукового диапазона более 2 кГц воспринимается только через окраску звука.

Чувствительность слуха к изменению тона составляет примерно 0,3 %, т. е. человеческий слух различает, например, два тона 1000 и 1003 Гц, следующие один за другим. Чувствительность слуха к тембральной окраске звука порядка 0,01 %. На восприятие музыкальных звуков оказывает влияние и временная форма акустических колебаний — динамика нарастания и спада звука.

Интервал частот музыкальных звуков, на границах которого звуки по частоте отличаются в 2 раза, называют октавой. В пределах каждой октавы различают 12 ступеней (музыканты называют их полутонами), обозначаемых с помощью семи нот (тонов) и дополнительных полутонов (бемоли и диезы). Таким образом, 2 звука, обозначаемых одинаковыми нотами в разных октавах, отличаются по частоте в 2, 4, 8 и т. д. раз.

Последовательность нот и полутонов образует музыкальный звукоряд. Музыкальный звукоряд, сформированный в ходе культурной эволюции человека, имеет глубокую физическую основу. Разбиение звуков на октавы обусловлено слитным, гармоничным восприятием на слух одновременно двух типов колебаний с отношением частот, кратным двум.

Внутри октавы используются гармоничные созвучия двух или более звуков (аккорды), частоты которых соотносятся между собой как целые числа. Например, в мажорном аккорде частоты соотносятся как 1, 5/4, 3/2, (основной тон, большая терция, квинта), а в минорном — как 1, 6/5, 3/2 (основной тон, малая терция, квинта).

Со времен Древней Греции существует проблема оптимального сочетания двух аспектов в музыке — психофизиологического (с

точки зрения гармонии звучания) и функционального (исполнение на различных инструментах, транспонирование мелодии в различные тональности, т. е. линейное перемещение частоты звука по оси частот). Эта проблема в определенной степени была разрешена в начале XVIII века в Западной Европе переходом к равномерному по логарифмической шкале ряду частот в пределах октавы — т. н. темперированному звукоряду.

Этот ряд содержит частоты, возрастающие в следующей последовательности:  $1, 1 + \sqrt[12]{2}, 1 + (\sqrt[12]{2})^2, \dots$ , что позволяет удовлетворить функциональному критерию, но одновременно приводит к незначительному, но, к сожалению, слышимому, диссонансу в звучании. Математически эта проблема сводится к тому, что дробление октавы на отрезки с отношением  $1 + (\sqrt[12]{2})^n$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  не дает в точности чисел  $6/5, 5/4, 3/2$ .

Для музыкальных инструментов с жесткой фиксированной настройкой (орган, фортепиано, арфа, цимбалы) такое несовпадение создает трудности при исполнении произведений с частотным диапазоном шире одной октавы. По-видимому, завораживающая притягательность пения и игры на смычковых инструментах обеспечивается за счет возможности вариативного, по выбору исполнителя, применения адекватного набора частот в звукоряде. Напомним, что у смычковых инструментов нет металлических порожков (ладов), как у гитары, поэтому высота звука полностью находится в руках (точнее — в пальцах) музыканта.

Если длина волны соизмерима или превышает расстояние между ушами, то по разности времени прихода сигнала к правому и левому уху человек способен определять направление источника звука. Такую способность называют *бинауральным эффектом* (от лат. *bini* — два и *auris* — ухо).

Бинауральный эффект проявляется в интервале частот приблизительно 300—3 000 Гц (длины волн от 1,1 м до 11 см). В этом частотном диапазоне возможно получение стереоэффекта при воспроизведении звука по двум скоррелированным во времени каналам с использованием на выходе двух электроакустических систем (громкоговорителей), разнесенных на расстояние примерно 2 м.

Такой принцип записи и воспроизведения используется в стереофонии. Отсутствие стереоэффекта для больших длин волн (низких частот) позволяет использовать для воспроизведения стереофонограмм единый низкочастотный источник для правого и левого каналов совместно с раздельными средне-высокочастотными каналами.

Такую систему звуковоспроизведения называют **трифонической**. Если частота раздела составляет 150—300 Гц, для формирования целостной звуковой картины у слушателя низкочастотный излучатель располагают посредине между средне—высокочастотными излучателями.



#### **Внимание.**

Для получения хорошей звуковой сцены в стереосистеме очень важно обеспечить слитное, согласованное воспроизведение именно спектрального интервала 300—3000 Гц, где проявляется бинауральный эффект. Помимо этого добиться, если использовать для этого диапазона одну динамическую головку в каждом канале. Диаметр такой головки должен составлять 6,5—8 дюймов (16—20 см). С учетом плавного спада передаточной характеристики разделятельных фильтров реально воспроизводимый диапазон для такой головки составит примерно 200—4500 Гц.

Если частота раздела средних и низких частот ниже 150 Гц, место расположения низкочастотного источника колебаний не имеет значения. Такие излучатели называют **сабвуферами**. В этом случае длина звуковой волны соизмерима с размерами помещения, используемого для прослушивания музыки, или даже превышает эти размеры. Такие звуковые колебания полностью делокализованы в пределах помещения. Для коррелированности излучения сабвуфера с излучением правого и левого громкоговорителей используют временную задержку, настраиваемую для конкретного помещения и места расположения сабвуфера.

## **1.3. Уточним терминологию**

### **Динамическая головка**

Динамическая головка обеспечивает преобразование колебаний электрического напряжения и тока в упругие механические колебания, т. е. преобразует электрические сигналы в звуковые.

Другие, «разговорные» названия динамической головки — **динамик, излучатель**. Динамики большого размера часто называют драйверами («калька» с английского), обычно используют сочетания «низ-

кочастотный драйвер», «среднечастотный излучатель», «высокочастотный излучатель». Низкочастотную динамическую головку часто называют также «вуфер», а высокочастотную головку — «твиттер». Оба эти термина также заимствованы из английской литературы. НЧ-СЧ-динамик в двухполосной системе частот называют «мидбас» от английского «middle» — средний. В этой книге будут использоваться слова «динамик», «излучатель», часто с приставками НЧ-, НЧ-СЧ-, ВЧ-.

Англоязычные термины «драйвер», «вуфер», «мидбас» и «твиттер», заполонившие многочисленные форумы на интернет-сайтах, применяться не будут.

### Акустическая система

Акустическая система (АС) — это ящик, содержащий одну или несколько динамических головок. В литературе прошлых лет вместо термина «акустическая система» использовали термин «громкоговоритель». При этом к словам «динамическая головка» неизбежно прибавляли слово «громкоговорителя». Сейчас говорят проще: динамическая головка, НЧ-головка, ВЧ-излучатель и т. п.

Типичная акустическая система содержит обычно две (двухполосная система с НЧ-СЧ- и ВЧ-головками) или три динамические головки (трехполосная система с НЧ-, СЧ- и ВЧ-головками). В некоторых конструкциях АС каждая головка устанавливается в свой ящик.

Синонимом термина «акустическая система» является слово «звуковая колонка», часто просто «колонка». Происхождение этого термина связано с наиболее типичной формой акустических систем — вытянутого вертикального параллелепипеда.

В стереофонии используют как минимум две акустических системы — по одной на каждый канал. В трифонической системе применяют три колонки: две стандартные идентичные правую и левую («сателлиты») и одну общую низкочастотную. В квадрафонической системе звуковоспроизведения (широкого распространения не получила) применяют две фронтальные и две тыловые колонки. В популярных сегодня системах домашнего кинотеатра применяют пять колонок: фронтальную правую, центральную, фронтальную левую, и две тыловых. К ним часто добавляют сабвуфер.

### Акустическое оформление

Конструкцию ящика, а точнее конструкцию всего, что входит в состав акустической системы, за исключением собственно самих динамических головок, называют **акустическим оформлением**.

Если подать сигнал, содержащий в основном низкочастотные звуки (запись игры на контрабасе, бас-гитаре или запись, содержащую снижение тона органа), с выхода усилителя непосредственно на низкочастотный динамик, звук будет очень сильно отличаться от того, что мы хотели бы услышать. Связано это с тем, что диффузор, совершая колебательное движение, излучает звуковые волны как вперед, так и назад. Длина волны для низких частот составляет несколько метров, т. е. многократно превышает размеры динамика. Поэтому волны, испущенные вперед и назад, интерферируют и в значительной степени гасят друг друга. Этот эффект проявляется настолько сильно, что для динамика, способного реально воспроизводить частоты порядка 40—50 Гц, может вообще создаться впечатление, что он неисправен.

Поэтому, для того, чтобы обеспечить нормальное воспроизведение низкочастотных звуков, необходимо отделить излучение, испускаемое вперед, от излучения, испускаемого назад. Для этого, в первую очередь, и предназначено акустическое оформление. Наиболее распространенными типами акустического оформления являются ящики: иногда герметично закрытые, иногда с отверстием, иногда с вставленной через отверстие внутрь ящика небольшой трубой.



#### Примечание.

*Задача этой книги — объяснить принципы акустического оформления низкочастотных динамических головок и дать советы любителям музыки для самостоятельного изготовления хорошо звучащих акустических систем.*

Среднечастотные (СЧ) и высокочастотные (ВЧ) динамические головки не совершают поступательного движения, не излучают звуковых волн, длина которых многократно превышает их размеры, и не нуждаются в сложном акустическом оформлении. Для высокочастотных головок обычно корпус головки уже является минимально достаточным акустическим оформлением. Для среднечастотных головок достаточно использовать простейший экран размером примерно 30—40 см.

Тем не менее, для повышения отдачи СЧ- и ВЧ- головок и формирования определенной направленности их излучения иногда применяют экспоненциальные рупоры или акустические линзы. Эти типы акустического оформления в настоящей книге рассматриваться не будут.

#### 1.4. Как работает динамическая головка?

Динамическая головка состоит из магнитного сердечника в форме цилиндра, часто с внешним тороидальным магнитом, механически объединенного с металлическим каркасом в жесткую конструкцию (рис. 1.3). К каркасу мягко прикреплен диффузор в виде плоской, выпуклой, но чаще всего вогнутой мембранны.

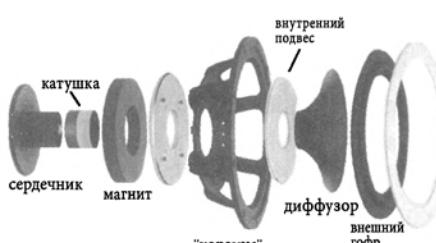


Рис. 1.3. Устройство динамической головки

В местах крепления диффузора к каркасу имеется концентрический гофр, обеспечивающий упругость подвеса. Диффузор изготавливают из бумаги или более сложных материалов, например, целлюлозного композита, алюминия, полипропилена, кевлара, углеродистого волокна и других современных материалов. Если

материал диффузора жесткий, вместо гофрирования внешней части применяют упругую прокладку из иного материала, в худших конструкциях низкочастотных головок — просто используют внешнее кольцо из резины.

Диффузор жестко связан с цилиндрической катушкой, которая перемещается свободно вдоль оси цилиндрического сердечника в магнитном зазоре. При подаче переменного электрического напряжения на катушку, находящуюся в магнитном поле, возникает сила, которая и приводит в движение катушку вместе с прикрепленным к ней диффузором.

Такая простейшая конструкция не может обеспечить воспроизведение всего звукового диапазона. При колебаниях диффузора излучаемая им мощность пропорциональна квадрату частоты. Поэтому, для излучения одной и той же мощности на низких частотах требуется значительно большая амплитуда колебаний. На нижней границе

звукового диапазона при мощности, необходимой для озвучивания жилого помещения, амплитуда колебаний динамической головки диаметром 20 см составляет несколько мм.

На высоких частотах амплитуда колебаний ничтожна. Не только потому, что для поддержания равной мощности с ростом частоты требуется меньшая амплитуда, но еще и потому, что в типичной музыкальной фонограмме с ростом частоты уменьшается интенсивность звука. Как уже отмечалось, основные звуковые тона музыкальных инструментов и голоса вокалистов находятся ниже 1 кГц. Выше этой границы находятся только обертона, формирующие окраску звука.

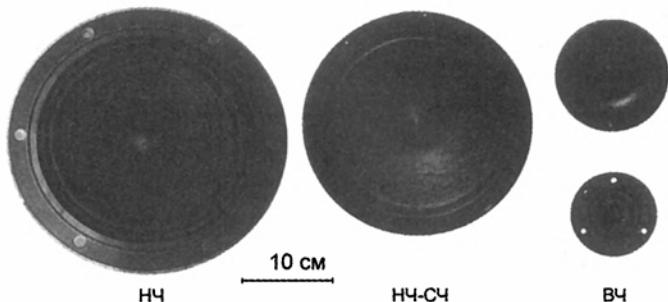
Поэтому динамические головки можно условно разделить на две большие группы:

- низкочастотные, имеющие большой диффузор конической формы и большую амплитуду колебаний для воспроизведения нижней части звукового диапазона — условно до 1—2 кГц;
- высокочастотные — маленькие, обычно в форме купола, с малой амплитудой колебаний, неуловимой невооруженным глазом.

Купол ВЧ-головки изготавливают из ткани либо из специально разработанных композитов или сплавов.

Для расширения диапазона воспроизводимых частот в сторону очень низких (до 30 Гц и менее) частот делают динамики большого диаметра (25—40 см). Полоса воспроизведения для таких динамиков сверху обычно составляет 500—600 Гц. Такие динамики могут работать только в составе системы с разделением на три или даже более полос.

В этом случае в акустической системе кроме НЧ- и ВЧ-динамиков появляется среднечастотный динамик. Такой динамик имеет обычно



*Рис. 1.4. Динамические головки:  
низкочастотная (полоса частот 30—500 Гц), НЧ-СЧ (полоса частот 40—5 000 Гц)  
и высокочастотные (полоса частот 2 000—20 000 Гц)*

диаметр 8—16 см, а по конструкции может быть как диффузорным, так и купольным.

СЧ-динамики купольной конструкции имеют диаметр менее 10 см, применяются обычно в составе дорогих АС, часто с числом полос более трех. Они по своим свойствам приближаются к ВЧ-динамикам, а СЧ-динамики с диффузором — к НЧ-динамикам.

Примеры различных динамиков представлены на рис. 1.4. НЧ-СЧ-динамик имеет в центре похожий на пулю фазовыравнивающий колпачок. Купол ВЧ-динамика скрыт под защитной решеткой. В последние годы появились ВЧ-динамики не с простым куполом, а со сложной формой излучающей поверхности в виде концентрических выпуклых колец.

## 1.5. Параметры динамической головки

*Действие электродинамической головки на низких частотах может быть адекватно описано тремя параметрами: резонансной частотой  $f$ , объемом воздуха  $V$ , эквивалентного ее акустической гибкости, и отношением электрического сопротивления к реактивному механическому сопротивлению на резонансной частоте  $Q$ . Из этих трех параметров можно также найти электроакустическую эффективность.*

*Невилл Тиле, 1961 г.*

Динамическая головка является электромеханическим и электроакустическим устройством. Ее свойства можно охарактеризовать тремя группами параметров: чисто механическими, чисто электрическими и акустическими.

### Механические параметры

Масса подвижной системы динамика определяется суммой масс диффузора и катушки и может составлять от долей грамма у купольных ВЧ головок до сотен грамм у мощных НЧ-динамиков. Международное обозначение —  $M_{MS}$ , индекс «MS» означает «moving system», т. е. подвижная система. Измеряется обычно в граммах.

Гибкость подвижной системы динамика показывает, на какую длину сместится диффузор его при приложении силы величиной 1 Н

(ньютон). Напомню, что сила величиной 1 Н равна весу груза массой 102 г. Гибкость измеряется в мм/н (миллиметры на ньютон). Гибкость важна для низкочастотных динамиков. Находится обычно в интервале от 0,2 до 0,5 мм/Н.

Международное обозначение —  $C_{MS}$ , индекс «MS» означает «moving system», т. е. подвижная система. Гибкость обратно пропорциональна упругости  $S_{MS}$ , т. е.

$$C_{MS} = 1 / S_{MS}.$$

Упругость измеряется в ньютонах на мм, Н/мм и численно равна силе, необходимой для перемещения диффузора на 1 мм.

Частота собственного резонанса — один из самых важных параметров низко- и среднечастотных динамиков. Международное обозначение —  $F_s$ , от английского слова «frequency» — частота. Измеряется в герцах. У НЧ-СЧ-динамиков размером 16—20 см находится в интервале 40—60 Гц, у НЧ-динамиков большего диаметра с большой массой диффузора может опускаться до 20 Гц. Она определяется массой и упругостью подвижной системы, точно так же, как выводится школьная формула для грузика, подвешенного на пружинке:

$$F_s = \sqrt{\frac{S_{MS}}{M_{MS}}} = \sqrt{\frac{1}{C_{MS} M_{MS}}}, \quad (5)$$

$$\text{Резонансная частота} = \sqrt{\frac{\text{упругость}}{\text{масса}}} = \sqrt{\frac{1}{\text{гибкость} \times \text{масса}}}.$$

И как видно из этой простой формулы, резонансная частота растет с увеличением гибкости и уменьшением массы подвижной системы. Резонансные свойства присущи всем колебательным системам. Если частота внешнего воздействия совпадает с частотой собственного резонанса, амплитуда колебаний принимает максимальное значение, по сравнению со всеми другими частотами.

При любом отклонении от положения равновесия, колебательная система возвращается в это положения, совершая затухающие колебания с частотой  $F_s$ . Насколько быстро затухают такие колебания? Это определяется потерями на внутреннее трение в системе и характеризуется механической добротностью.

Механическая добротность динамика — еще один важный параметр. Добротность равна отношению энергии, запасенной в колеба-

*тельной системе, к энергии, теряемой за один период колебаний.* Это безразмерная величина. Желательно, чтобы она была меньше 1. В противном случае, после прекращения каждого звукового импульса динамик будет продолжать жить «своей жизнью», создавая монотонные призвуки на частоте собственного резонанса. Добротность обозначается буквой  $Q$  от английского слова «quality» — качество.



#### Примечание.

*В английском языке, несмотря на его важность в современной науке и технологиях, как ни странно, отсутствует специальный термин для обозначения добротности. Вместо этого говорят «Q-фактор колебательной системы».*

Международное обозначение механической добротности —  $Q_{MS}$ , индекс «MS» как и прежде, означает «moving system» («подвижная система»). Ее значения для динамических головок составляют примерно от 1 до 10.

Эквивалентный объем динамической головки — не столь очевидный, как предыдущие параметры, но тоже очень важный для расчета акустических систем параметр. Понятие эквивалентного объема характеризует увеличение резонансной частоты головки после помещения ее в закрытый ящик. «Закрытый» означает полностью герметичный. Упругость системы «головка + закрытый ящик» увеличивается на величину упругости воздуха в закрытом ящике. Воздух «сопротивляется» сжатию при приложении механического усилия к диффузору. Упругость воздуха в ящике, добавленная к собственной упругости подвижной системы головки, повышает ее резонансную частоту:

$$F_{BOX} = \sqrt{\frac{S_{MS} + S_{BOX}}{M_{MS}}} > F_s. \quad (6)$$

При некотором объеме ящика упругость воздуха в нем оказывается равной собственной упругости головки. Такой объем и называют **эквивалентным объемом**. Международное обозначение эквивалентного объема —  $V_{AS}$ , единица измерения — литры. Таким образом, из предыдущей формулы следует, что в закрытом ящике объемом  $V_{AS}$  резонансная частота

$$F_{BOX} = \sqrt{\frac{S_{MS} + S_{MS}}{M_{MS}}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{S_{MS}}{M_{MS}}} = 1,414 F_s \quad (7)$$

увеличивается в 1,414 раз (точнее в  $\sqrt{2}$  раз) по сравнению с собственной частотой головки. Эквивалентный объем является одной из паспортных характеристик динамической головки.



#### Примечание.

*Знание эквивалентного объема для головки позволяет предсказать, насколько увеличится резонансная частота головки при помещении в герметично закрытый ящик любого объема.*

Сделать это очень просто. Соотношение (7) с учетом формулы для собственной резонансной частоты (5) можно переписать в виде

$$F_{\text{BOX}} = F_s \sqrt{1 + \frac{S_{\text{BOX}}}{S_{\text{MS}}}}. \quad (8)$$

Далее надо учесть, что *упругость воздуха в закрытом ящики обратно пропорциональна его объему*, поэтому  $S_{\text{зя}} \sim 1/V_{\text{зя}}$ , а  $S_{\text{MS}} \sim 1/V_{\text{AS}}$  (это следует из определения эквивалентного объема). Тогда из последней формулы сразу следует связь резонансной частоты головки в ящики с объемом ящика:

$$F_{\text{BOX}} = F_s \sqrt{1 + \frac{V_{\text{AS}}}{V_{\text{BOX}}}}. \quad (9)$$

Таким образом, резонансная частота головки в закрытом ящики повышается тем больше, чем меньше объем ящика по сравнению с эквивалентным объемом данной головки.

### Электрические параметры

Электрическая добротность характеризует затухание колебаний после прекращения действия электрического тока, вызвавшего отклонение диффузора головки от положения равновесия. Она численно равна отношению энергии, запасенной в колебательной системе, к энергии, теряемой за один период колебаний. Колебания затухают вследствие конечного сопротивления катушки головки, а также сил, возникающих при движении катушки с током в магнитном поле.

Электрическая добротность всегда меньше механической добротности и составляет обычно от 0,3 до 1. Международное обозначение электрической добротности  $Q_{\text{ES}}$  («ES» — от англ. electric system).

Полная добротность головки  $Q_{TS}$  («TS» — от англ. *total system*) как электромеханической колебательной системы определяется выражением, аналогичным выражению для расчета сопротивления двух параллельно соединенных проводников:

$$\frac{1}{Q_{TS}} = \frac{1}{Q_{MS}} + \frac{1}{Q_{ES}} \Rightarrow Q_{TS} = \frac{Q_{MS}Q_{ES}}{Q_{MS} + Q_{ES}}. \quad (10)$$

Это значит, что полная добротность всегда меньше и электрической, и механической добротности. Это понятно из физического смысла добротности. Она определяет скорость затухания колебаний. Чем больше каналов затухания, тем быстрее оно происходит, а значит — тем ниже добротность.

Активное сопротивление  $R_E$  (индекс «E» — от англ. *electric*) — это электрическое сопротивление катушки динамика. Это сопротивление измеряется омметром. Оно составляет обычно от 3 до 8 Ом. Меньшее сопротивление встречается в некоторых автомобильных системах, предназначенных для питания от низковольтного автомобильного аккумулятора. Большее значение сопротивления можно встретить для старинных или современных динамиков, предназначенных для ламповых усилителей. Например, почти легендарный советский динамик 4А32 имеет сопротивление 15 Ом.

Индуктивность головки определяется размерами катушки и числом витков, а также напряженностью постоянного магнитного поля, создаваемого магнитной системой. Чем больше эти величины, тем больше индуктивность. Индуктивность в электротехнике принято обозначать буквой  $L$ . Единица измерения индуктивности — генри (Гн).

Наличие индуктивности у динамической головки приводит к возрастанию ее сопротивления с ростом частоты. К активному сопротивлению  $R_E$  прибавляется индуктивное сопротивление

$$R_L = 2\pi fL. \quad (11)$$

Индуктивное сопротивление проявляется только по отношению к переменному току. Но ведь именно таким и является ток на выходе усилителя при воспроизведении музыкального сигнала. Это значит, что усилитель будет работать не на нагрузку, измеряемую омметром, а на нагрузку большей величины, причем, зависящую от частоты. Показания омметра указывают лишь минимальное значение полного сопротивления головки.

**Полное сопротивление головки  $Z$  равно**

$$Z(f) = R_E + R_L(f) = R_E + 2\pi fL. \quad (12)$$

Это выражение справедливо вдали от резонансной частоты. На частоте резонанса полное сопротивление динамической головки резко возрастает. Это связано с тем, что на резонансной частоте амплитуда колебаний резко увеличивается, поэтому для раскачки динамика требуется меньший ток. Меньший ток и означает большее значение сопротивления. Ограничимся этими качественными рассуждениями, не вдаваясь в сложные описания импульсных электромагнитных процессов в динамической головке на резонансной частоте.

Рис. 1.5 дает представление о том, насколько сильно отличается полное сопротивление  $Z(f)$  от активного сопротивления  $R_E$ . Для примера выбрана НЧ-СЧ-головка испанской фирмы Веута диаметром 25 см с резонансной частотой 40 Гц. Индуктивность на частоте 1 кГц равна 1,1 мГн. Как видно, на частоте резонанса сопротивление возрастает примерно в 4 раза по сравнению с активным сопротивлением (6,5 Ом).

Для динамиков большего диаметра, предназначенных исключительно для воспроизведения низких частот (30—500 Гц), сопротивление на резонансной частоте может доходить до 100 Ом.

С ростом частоты выше 200 Гц сопротивление монотонно увеличивается вследствие вклада индуктивного сопротивления. Надо отметить, что индуктивность головки падает с частотой. Это связано с тем, что с ростом частоты уменьшается магнитная проницаемость материала сердечника головки. Например, на частоте 10 кГц уменьшение индуктивности может составить 5—7 раз по сравнению с частотой 1 кГц.

Зависимость полного сопротивления динамической головки от частоты в низкочастотной области спектра в окрестности частоты собственного резонанса *содержит информацию о добродинности*

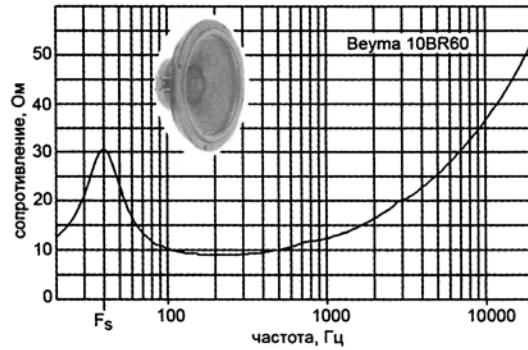


Рис. 1.5. Зависимость полного сопротивления от частоты для типичного НЧ-СЧ-динамика диаметром 25 см ([www.beyma.com](http://www.beyma.com)). Резонансная частота равна 40 Гц. Активное сопротивление равно 6,5 Ом

**головки.** Для любой колебательной системы, чем уже (рече) пик на зависимости отклика системы от частоты, тем выше добротность. И наоборот, чем слабее выражен пик на резонансной частоте, тем ниже добротность. Высота и ширина пика на зависимости  $Z(f)$  позволяют рассчитать полную добротность динамической головки. О том, как это сделать, будет рассказано далее.

### Акустические параметры

Чувствительность (среднее звуковое давление) характеризует способность динамической головки создавать определенное звуковое давление при подведении заданной электрической мощности. Чтобы сравнивать по чувствительности различные головки и рассчитать интенсивность звука при заданной подводимой мощности, измеряют звуковое давление на расстоянии 1 м от динамической головки вдоль ее оси при подведении электрической мощности 1 Вт, и указывают в паспортных данных на динамическую головку. Единицей измерения чувствительности является дБ/(Вт·м) — «дбцибел на ватт на метр». Ее обозначают  $Spl$  (от англ. *sound pressure level* — уровень звукового давления).

Как связано развивающееся динамической головкой звуковое давление с подводимой электрической мощностью? Звуковое давление пропорционально колебательной скорости диффузора. Скорость диффузора пропорциональна силе тока, протекающего через катушку динамической головки. Для чисто активного сопротивления сила тока пропорциональна подводимому напряжению. Таким образом, **звуковое давление динамической головки пропорционально подводимому электрическому напряжению**.



#### Примечание.

Электрическая мощность  $W = 1 \text{ Вт}$  на нагрузке  $R = 8 \text{ Ом}$  выделяется при подаче напряжения величиной 2,83 В (вспомним школьную формулу  $W = U^2/R$ ). К сожалению, некоторые производители «хитрят» и приводят значение  $Spl$  не в дБ/(Вт·м), а в дБ для динамиков номинальным сопротивлением 4 Ом и 6 Ом, не при мощности 1 Вт, а при подведении к этим динамикам напряжения 2,83 В. Мощность при этом составляет 2 Вт для 4 Ом и 1,33 Вт для 6 Ом. Таким образом, чувствительность намеренно завышается производителем с целью повышения привлекательности продукта!

Как скорректировать чувствительность, приводимую разными производителями? Покажем на конкретных примерах.



### Пример.

Для динамика номинальным сопротивлением  $R = 4 \text{ Ом}$  приведено значение звукового давления при подводимом напряжении  $U = 2,83 \text{ В}$ . Пользуясь формулой  $W = U^2/R$ , находим, что мощность составляет  $2 \text{ Вт}$  вместо общепринятого значения  $1 \text{ Вт}$ . Для того, чтобы к динамику подводилась мощность  $1 \text{ Вт}$ , надо уменьшить напряжение в  $1,41$  раз. Это значит, что звуковое давление при  $1 \text{ Вт}$  будет  $1,41$  раз ниже и составит  $0,707$  от давления, измеренного для напряжения  $2,83 \text{ В}$ . В соответствии с nomogrammой на рис. 1.1, изменение давления до уровня  $0,707$  соответствует значению —  $3 \text{ дБ}$ .



### Вывод.

Если для динамика сопротивлением  $4 \text{ Ом}$  звуковое давление указано не для мощности  $1 \text{ Вт}$ , а для напряжения  $2,83 \text{ В}$ , заявленная чувствительность динамика завышается на  $3 \text{ дБ}$ . Аналогично можно определить, что для динамика сопротивлением  $6 \text{ Ом}$  — завышение чувствительности  $1,15$  раз, или примерно  $0,6 \text{ дБ}$ .

Чувствительность динамической головки фактически задается значением ее к.п.д. — коэффициента полезного действия, который выражается через параметры головки  $F_s$ ,  $V_{AS}$  и  $Q_{TS}$  элегантной формулой Тиеле\*

$$\kappa.p.d. = \frac{2\pi^2 F_s^3 V_{AS}}{\nu^3 Q_{TS}}. \quad (13)$$

Напомним, что  $\nu = 330 \text{ м/с}$  — это скорость звука в воздухе. Интересующиеся читатели могут найти вывод этой формулы в книге Э. Л. Виноградовой\*\*.



### Вывод.

Таким образом, три параметра головки: частота собственного резонанса, эквивалентный объем и полная добротность — задают

\* N.Thiele. Loudspeakers in vented boxes. Part II. *Proceedings of the IRE Australia*, vol.22, pp .487—508 (Aug. 1961). Reprinted in *J.Audio Eng. Soc.*, vol.19, pp. 471—480, June 1971.

\*\* Виноградова Э. Л. Конструирование громкоговорителей со слаженными частотными характеристиками. М.: Энергия. — 1978.

ее к.п.д. и чувствительность на частотах выше частоты собственного резонанса.

Подставляя в формулу (13) значение  $\pi = 3,14$  и  $v = 330 \text{ м/с}$  и выражая  $V_{AS}$  в литрах, получаем расчетную формулу для к.п.д.

$$\kappa.\text{п.д.} = 5,5 \cdot 10^{-10} \frac{F_s^3(\Gamma_u) V_{AS}(\pi)}{Q_{TS}}. \quad (14)$$

Например, для типичного низкочастотного динамика с  $F_s = 50 \text{ Гц}$ ,  $V_{AS} = 50 \text{ л}$  и  $Q_{TS} = 0,5$  получаем к.п.д.  $\approx 0,007$  или  $0,7\%$ . Это — коэффициент преобразования электрической мощности в акустическую. Напомним, что акустическая мощность  $10^{-12} \text{ Вт/м}^2$  — это порог слышимости, а  $1 \text{ Вт/м}^2$  — болевой порог.

Таким образом, мы в состоянии услышать звук на расстоянии 1 м от рассматриваемого динамика при подведении к нему электрической мощности всего около  $10^{-10} \text{ Вт}$ .



#### Внимание.

Можно повредить свой слуховой аппарат при подведении электрической мощности около  $100 \text{ Вт}$ . Не забывайте об этом, экспериментируя с мощными усилителями и большими динамиками!

Формулу (13) можно упростить, если вспомнить, что длина волны связана с периодом и частотой колебаний  $\lambda = v T = v/f$ . Тогда

$$\kappa.\text{п.д.} = \frac{2\pi^2 V_{AS}}{\lambda_s^3 Q_{TS}}, \quad (15)$$

т. е. к.п.д. динамической головки в поршневом режиме задается отношением ее эквивалентного объема к объему куба со стороной, равной длине волны на резонансной частоте.

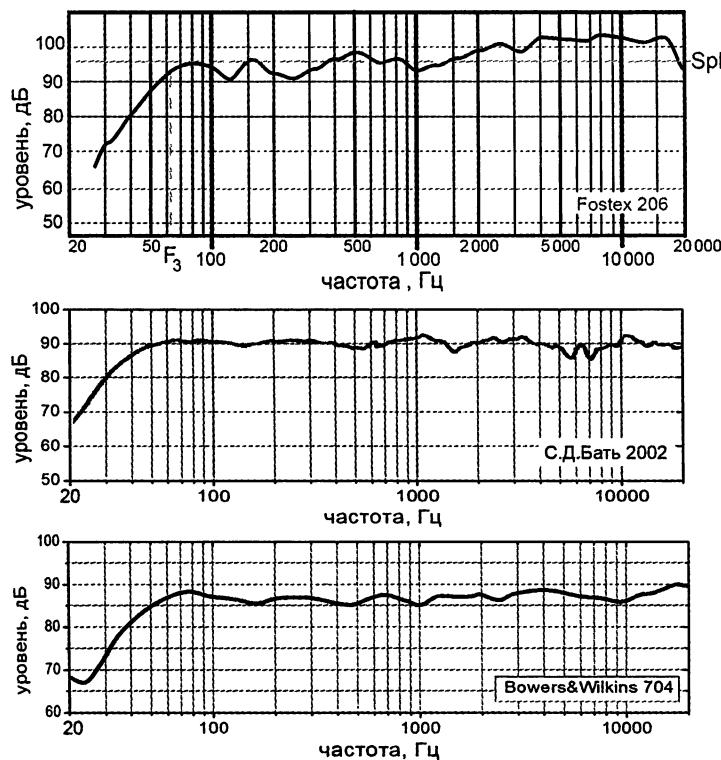
*Полоса воспроизводимых частот* характеризует диапазон частот, в котором динамик способен работать, обеспечивая заявленную чувствительность с нормированным уменьшением отдачи на краях диапазона. Обычно принимается спад на краях диапазона величиной 3 дБ, иногда 6 дБ. Иногда не совсем порядочные производители указывают рабочий диапазон, определяя крайние частоты при спаде в 10 дБ, умалчивая об этой «ловке» в рекламных проспектах.

Зависимость чувствительности динамической головки от частоты называется *амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)*.

Важным параметром динамической головки и акустической системы является неравномерность АЧХ в пределах рабочего диапазона.

На рис. 1.6 представлены примеры АЧХ для трех акустических систем.

Первый пример — АС типа «трансмиссионная линия» с широкополосной головкой Fostex 206 ([www.fostex.jp](http://www.fostex.jp)) — демонстрирует редкую возможность создания акустической системы на основе единственной динамической головки. Именно единственной, а не сдвоенной коаксиальной, как, например, в АС фирмы «Tannoy». Диаметр головки Fostex 206 равен 200 см, объем акустического оформления — 125 л (900×350×400 мм). Полоса частот по уровню ±3 дБ составляет 60 Гц ... 20 кГц с заметным подъемом в области средних частот выше 2 кГц более 6 дБ. Это область максимальной чувствительности нашего слуха, и такой подъем чувствительности, к сожалению, неизбежно скажется на звучании.



*Рис. 1.6. Амплитудно-частотные характеристики широкополосного динамика Fostex-206 в акустическом оформлении «обратный рупор», АС типа «фазоинвертор» С. Батя, и АС «Bowers&Wilkins» 740*

**Второй пример** — трехполосная АС на базе динамиков фирмы «Vifa» (25 см НЧ-динамик, 13 см СЧ-динамик и 2,5 см ВЧ-головка) с габаритами 1000×320×320 мм, объем — 100 л. Обращаю внимание на высокую равномерность характеристики, а также на нижнюю границу: 40 Гц по уровню -3 дБ. Отличный результат достигнут выбором качественных динамиков, грамотным акустическим оформлением, тщательным подбором схемы и элементов разделительных фильтров.

**Третий пример** — представитель солидного бренда АС «Bowers&Wilkins 740», стоимостью 2240 долл.<sup>\*\*</sup> Габариты 957×222×319 мм, объем 62 л. В этой АС установлены следующие головки: НЧ — 165 мм, НЧ-СЧ — 165 мм, ВЧ — 2,5 см. Эта система продемонстрировала самую равномерную характеристику в тесте напольных АС журнала «Салон AV». Нижняя граница по уровню -3 дБ составляет 45—50 Гц.



#### Примечание.

*Интересно, что в этой АС не только НЧ-отсек имеет фазоинвертор, но и НЧ-СЧ-модуль тоже снабжен отдельным фазоинвертором.*

## 1.6. Какие параметры влияют на звук?

Для всех динамиков (НЧ-, СЧ-, ВЧ-динамики) одинаково важны три параметра:

- чувствительность;
- сопротивление;
- полоса воспроизводимых частот.

Чувствительность должна быть одинакова для всех динамиков, устанавливаемых в одну акустическую систему. Если чувствительность динамиков различна, динамик с большей чувствительностью включается через делитель напряжения на двух резисторах. Так иногда приходится включать СЧ- или ВЧ-головки.

Однако никогда не включают через делитель НЧ-головку, так как при этом изменяется ее электрическая добротность и, кроме того, теряется мощность. Напомним, что именно НЧ-диапазон доминирует в спектре звукового сигнала и поэтому задает требования по уровню мощности, которым должен удовлетворять усилитель.

\* С. Батъ. Любительские громкоговорители. М., Радиософт, 2002.

\*\* Р. Тарасов. Эмоции и трезвый расчет. Салон AV, №1, 2005, с. 28–41.

**Сопротивление** (активное или среднее) должно быть одинаково для каждой группы динамиков, т. е. для НЧ-, ВЧ- и СЧ-полосы. *Например*, в одной системе может работать НЧ-динамик сопротивлением 8 Ом, два последовательно соединенных «среднечастотника» по 4 Ом, и два соединенных параллельно ВЧ-динамика сопротивлением по 16 Ом.

Полоса воспроизводимых частот должна перекрываться для динамиков разных полос, устанавливаемых в одну акустическую систему. *Например*, можно устанавливать в одну систему НЧ-динамик с полосой пропускания 40—4 000 Гц и ВЧ-динамик с полосой пропускания 2 000—20 000 Гц, но нельзя устанавливать в одну систему динамик с полосой 30—500 Гц и динамик с полосой 3 000—20 000 Гц. К ним необходимо добавить «среднечастотник» с полосой примерно 200—5 000 Гц.

Важность остальных параметров зависит от типа динамика.

Для НЧ-динамика важны параметры, задающие условия его работы в поршневом режиме в акустическом оформлении.

Таких параметров три:

- частота собственного резонанса  $F_s$ ;
- эквивалентный объем  $V_{As}$ ;
- полная добротность  $Q_{ts}$ .

Эти параметры были введены в теорию акустических систем австралийским ученым *Невиллом Тиле (Neville Thiele)* в 1961 г. и использованы им при построении согласованной теории работы динамической головки в поршневом режиме в фазоинверторе. Другой австралийский ученый — *Ричард Смолл (Richard Small)* — в серии блестящих статей, опубликованных в 1971—73 г.г., развил подход Тиле и применил его для расчета работы динамической головки в закрытом ящике. Указанные параметры получили поэтому название «параметры Тиле-Смолла».

Эти параметры задают условия работы динамика в конкретном акустическом оформлении (закрытый ящик, фазоинвертор, трансмиссионная линия). Для трансмиссионной линии масса подвижной системы тоже важна. Однако масса подвижной системы может быть рассчитана по известной резонансной частоте и эквивалентному объему.

Эквивалентный объем задается гибкостью подвеса, а резонансная частота — гибкостью и массой. Из объема вычисляем гибкость, а затем из резонансной частоты по известной гибкости находим массу.

Для высокочастотных и среднечастотных динамиков основными параметрами являются:

- частота собственного резонанса  $F_s$ ;
- полоса воспроизводимых частот.

ВЧ- и СЧ-динамики не предназначены для работы в поршневом режиме и никогда *не используются для воспроизведения частот вблизи резонансной частоты*. Значение  $F_s$  необходимо знать именно для того, чтобы при конструировании акустической системы (выборе динамиков, частот разделения полос и типов разделительных фильтров) не допустить проникновения сигналов с частотой, близкой к  $F_s$ , на динамик. Это *не только приведет к очень сильным искажениям, но при больших уровнях громкости может повредить динамическую головку*.

## 1.7. Диапазон воспроизводимых частот акустической системы

*Нижняя граничная частота акустической системы задается собственной резонансной частотой НЧ-динамика  $F_s$  и акустическим оформлением. Обычно принимают, что динамик не может воспроизводить звуки с частотой ниже частоты собственного резонанса.*

Для улучшения воспроизведения звуков вблизи частоты собственного резонанса и немного ниже нее применяют различные варианты акустического оформления:

- фазоинвертор;
- систему с пассивным радиатором;
- трансмиссионную линию.

В этих типах акустического оформления нижняя граничная частота, определяемая по уровню  $-3\text{дБ}$  (уменьшение интенсивности звука в 2 раза), может быть сделана немного ниже  $F_s$ .



### Примечание.

*В закрытом ящике нижняя граница частотного диапазона всегда выше частоты собственного резонанса динамика (формула 9).*

На первый взгляд, кажется, что можно снизить резонансную частоту динамика до любого желаемого значения, просто сделав подвижную систему потяжелее. Однако, **во-первых**, для получения достаточного уровня громкости на низких частотах при малом диаметре диффузора придется «заставлять» динамик работать с очень большой, более 1 см, амплитудой колебаний. При этом неизбежно нарушится линейность отклика динамика как упругой системы.

Во-вторых, изменение конструкции повлечет за собой изменение и других параметров — эквивалентного объема и добротности. Наконец, тяжелый диффузор не сможет передавать адекватно «быстрые» НЧ-сигналы, такие как удары барабана.

Верхняя граничная частота от акустического оформления не зависит, а определяется полностью конструкцией динамика. В больших (25 см и более) НЧ-динамиках с низкой частотой резонанса (20—30 Гц) верхняя граничная частота обычно не превышает 500 Гц. Такие динамики могут работать только в трехполосной системе совместно с СЧ-(полоса примерно 300—2000 Гц) и ВЧ-головками.

В НЧ-СЧ динамиках диаметром 16—20 см резонансная частота  $F_s$  обычно выше (40—60 Гц, возрастая с уменьшением размера), а спектр воспроизводимых частот расширяется до нескольких килогерц. Такие динамики могут работать в двухполосных системах совместно с одной ВЧ-головкой.

Многие меломаны высоко оценивают качество звуковоспроизведения больших широкополосных НЧ-СЧ-головок с бумажным диффузором с частотой резонанса 40—50 Гц и верхней границей воспроизводимого диапазона около 10 кГц. Такие динамики имеют диаметр 25—40 см и очень высокую чувствительность — более 95 дБ на ватт на метр.

Они используются обычно в аппаратуре для профессиональных электромузикальных инструментов. На основе таких динамиков, дополнив их ВЧ-головкой, изготавливают хорошо звучащие системы для работы с ламповыми усилителями класса А, где очень важна высокая чувствительность акустической системы.

Подобными свойствами обладают старинные советские динамики 4А28, 4А32, а также некоторые подобные им российские динамики. Субъективные отзывы о звучании таких систем обычно высокие. Однако определенные замечания возникают в связи с неравномерностью АЧХ в области средних частот для таких динамиков.

Звуковой сигнал распределяется между НЧ- и ВЧ- (а в трехполосных системах — между НЧ-, СЧ- и ВЧ) головками с помощью разделительных фильтров, состоящих главным образом из катушек индуктивности и конденсаторов.

Для ВЧ-динамиков полоса воспроизводимых частот снизу ограничивается частотой собственного резонанса  $F_s$ . Однако, в отличие от НЧ-динамиков, ВЧ-динамики не рассчитаны на работу при частотах, близких к  $F_s$ . Для этих динамиков рабочий диапазон начинается

обычно с  $F = 2—3 F_s$  и простирается до границы звукового диапазона (20 кГц) или даже далее.

В трехполосных системах кроме НЧ- и ВЧ-динамиков используют среднечастотные динамики. Для СЧ-динамиков основными параметрами являются частота собственного резонанса  $F_s$  и полоса воспроизводимых частот. СЧ-динамики купольной конструкции по своим свойствам приближаются к ВЧ-динамикам, а СЧ-динамики с диффузором — к НЧ-динамикам.

Хотя диффузорные СЧ-динамики и способны работать на частотах, близких к  $F_s$ , в реальных трехполосных акустических системах частоту раздела НЧ-СЧ полос выбирают заметно выше  $F_s$ , чтобы не увеличивать искажения.

## 1.8. Микро- и макродинамика звуковоспроизведения

Микро- и макродинамика звуковоспроизведения относятся к «не документируемым» (т. е. плохо поддающимся техническому описанию и измерению) свойствам аудиотракта. Они отличают действительно хорошую аудиосистему от посредственной и позволяют либо не позволяют при прослушивании музыки получить полноценный комплекс эмоций, а не просто что-то делать «под музыку».

Если аудиосистема имеет плохую микро- и макродинамику, но при этом имеет равномерную амплитудно-частотную характеристику и достаточно широкую полосу частот, то можно сказать, что на выходе вы услышите «аккуратный», «рафинированный», «вежливый» звук, который никогда не создаст ощущения реальной музыки, «атмосферы», «вовлеченности», «драйва».

Микродинамика характеризует способность аудиосистемы передавать тонкие нюансы реальных звуков. Хорошая микродинамика позволяет отличить манеру игры различных музыкантов на одном и том же инструменте, звучание хорошего музыкального инструмента от плохого, выделить в виде самостоятельных образов слабые звуки, часто теряющиеся в «каше» более громких звуков. Например, шепот на фоне удара в барабан или маленький треугольник в «крещендо» большого симфонического оркестра. Про акустические системы с плохой микродинамикой никто никогда не скажет, что они звучат «музыкально».

**Макродинамика** характеризует способность аудиосистемы передать атмосферу концертного зала, ощутить «пение» больших барабанов, «услышать» взмахи смычков струнной группы в большом оркестре, насладиться мастерством бас-гитариста или контрабасиста, отличить запись в зале от записи в студии, а оркестр, звучащий со сцены — от оркестра, звучащего из оркестровой ямы.

Микродинамика зависит от согласованности, слитности передачи реальных сигналов с широким частотным спектром. Эти сигналы воспроизводятся одновременно двумя или даже тремя динамиками. Важен одновременный приход к слушателю всех компонентов такого сигнала. Важно грамотное согласование по полосам с целью обеспечения хорошего перекрытия полос, которые способны воспроизводить динамики, хотя бы не менее одной октавы по отношению к частотам разделения полос.

На микродинамику влияет и выбор конструкции разделительных фильтров. Хорошую переходную характеристику обеспечивают фильтры первого порядка. Фильтры более высоких порядков такой способностью не обладают. Их применение в подавляющем большинстве коммерческих домашних акустических систем средней ценовой категории (порядка 1 тыс. долл.) связано с желанием «круче» разграничить участки спектра, предназначенные для НЧ-, СЧ- и ВЧ-излучателей, чтобы уменьшить их искажения. Для использования фильтров первого порядка необходимо иметь запас по полосе воспроизводимых частот для всех динамиков, а это значительно увеличивает стоимость всей системы.

Макродинамика определяется основным, низкочастотным каналом звуковоспроизведения, несущим основную мощность звукового сигнала. Она зависит от типа НЧ-излучателей и акустического оформления. Чем проще акустическое оформление — тем лучше для передачи импульсных низкочастотных сигналов (удар по струнам бас-гитары или в большой барабан). Расширение полосы воспроизводимых частот в низкочастотную сторону за счет конструирования сложных связанных колебательных систем — плохой, с точки зрения физики, способ улучшения передачи импульсных сигналов.

Для хорошей макродинамики необходимо в качестве низкочастотных применять большие динамики с низкой резонансной частотой и при этом использовать наиболее простые способы акустического оформления. Хорошую макродинамику гарантирует простой закрытый ящик, грамотно рассчитанный и хорошо изготовленный, а также трансмиссионная линия.

Макродинамика определяется не только свойствами акустической системы. Она во многом зависит от свойств усилителя. Передача полноценной макродинамики в аудиотракте сводится, фактически к передаче кратковременных импульсных электрических сигналов большой мощности на комплексную, т. е. активную и реактивную, нагрузку, какой является для усилителя НЧ-головка акустической системы.

Для хорошей макродинамики нужен хороший усилитель: мощный, способный кратковременно отдавать токи большой амплитуды на нагрузку с различным сопротивлением, да еще «невосприимчивый» к тем сложным переходным электродинамическим процессам, которые происходят в катушке динамика на фронте электрического импульса и после его прохождения. О проблеме построения таких усилителей подробно рассказано в книге автора<sup>\*</sup> и немного — в заключительной главе этой книги.

Требование к хорошей передаче импульсных НЧ-сигналов во многом сводится к обеспечению плавной АЧХ акустической системы на нижнем краю диапазона: без резких выбросов и крутых спадов. Горизонтальная АЧХ с понижением отклика с крутизной 6 дБ (4 раза) на октаву с понижением частоты, начиная примерно от 40 Гц — вот практически идеальная «модель» акустической системы, к которой стремятся разработчики.



#### Примечание.

*Характер спада АЧХ на границе полосы пропускания однозначно задает реакцию системы на воздействие прямоугольным импульсным электрическим сигналом.*

Крутизна спада АЧХ вне полосы пропускания зависит от добротности  $Q$  системы «динамик + акустическое оформление». Указанный плавный спад АЧХ –6 дБ/октаву соответствует  $Q = 0,707$  (*более точно  $\sqrt{2}/2$* ).

\* Гапоненко С.В. Лампово-транзисторные усилители своими руками. СПб.: Наука и Техника. — 2012.

## 1.9. Параметры и цены динамиков, пригодных для построения хорошо звучащих систем

### Выбор ценового диапазона

В этом разделе приведены параметры динамических головок, доступных сегодня жителям крупных городов на постсоветском пространстве. Выбраны динамики средней ценовой категории известных и хорошо зарекомендовавших себя производителей. Наряду с динамиками, предлагаемыми в элитных аудиосалонах и на специализированных сайтах для аудиофилов-самодельщиков, обращаю внимание на общедоступный источник качественных динамиков — салоны автомобильной аудиотехники, торгующие продукцией таких брендов как «Morel», «Alpine», «Infinity», «Hertz».

К сожалению, отечественные динамические головки (и старые советские, и немногочисленные современные российские) характеризуются большой неравномерностью АЧХ. Среди самодельщиков популярны широкополосные головки диаметром 25 см с дополнительным внутренним диффузором 4A28 («Кинап»), диаметром 30 см — 4A32, и их современная улучшенная версия 75ГДШ-3-3 (Новосибирск, завод «НОЭМА»\*, резонансная частота 45—55 Гц, сопротивление 15 Ом). В сети интернет можно найти много советов по их доработке\*\*.

АЧХ этих динамиков очень неравномерна. Кроме того, этим динамикам присуща очень узкая направленность на высоких частотах.

Достаточно интересные динамики 6ГД-2 (диаметр 25 см), выпускавшиеся в СССР Рижским радиозаводом, имеют высокую отдачу, довольно низкую резонансную частоту (30—35 Гц), но очень высокую добротность (до 1) при большом эквивалентном объеме (примерно 60 л). Такие динамики неплохо работают в открытых ящиках и в закрытых ящиках объемом примерно 100 л. В закрытых ящиках объемом примерно 50—60 л они будут склонны к «монотонности» и нечеткости при воспроизведении басовых звуков.

**Выбраны динамики следующих ценовых диапазонов:**

- ♦ НЧ-динамики..... от 50 до 150 долл. за 1 шт.;
- ♦ НЧ-СЧ-динамики..... от 30 до 160 долл. за 1 шт.;

\* Сайт производителя <http://www.noema.ru/>

\*\* См., например, сайт <http://www.gajdar.nm.ru/>

- ◆ ВЧ-динамики ..... от 40 до 60 долл. за 1 шт.;
- ◆ коаксиальные НЧ-СЧ-ВЧ комплекты ..... от 90 до 160 долл. за полный стереокомплект.

Таким образом, при самостоятельном изготовлении стереофонического комплекта акустических систем стоимость комплекта рекомендуемых динамических головок находится в диапазоне от 90 до 500—600 долл.

### Низкочастотные динамические головки

НЧ-динамики (табл. 1.2) используются для воспроизведения низкочастотного диапазона и применяются в акустических системах с количеством полос не менее трех. Характерный для низкочастотного динамика воспроизводимый диапазон частот — от 30 Гц до 500 Гц.

*Параметры низкочастотных динамических головок  
с полосой частот от  $F_s$  до 400—500 Гц*

Таблица 1.2

Марка	Диаметр D, мм	Активное сопротивление $R_e$ , Ом	Резонансная частота, $F_s$ , Гц	Эквивалентный объем, $V_{AS}$ , л	Масса подвижной системы, $M_{MS}$ , г	Полная добротность $Q_{fs}$	Чувствительность $Spl$ , дБ	Стоимость, долл.
<b>Динамики фирмы «Hertz» (Италия), номинальное сопротивление 4 Ом</b>								
ES 380	380	2,9	24	180	240	0,52	95	>150
ES 300	300	2,9	28	89	150	0,38	94	150
ES 250	250	2,6	27	55	106	0,37	93	120
ES 200	200	2,6	39	17	61	0,64	91	90
<b>Динамики фирмы «Alpine» (США), номинальное сопротивление 4 Ом</b>								
SWS1223D	300	4	30	61	110	0,6	85	140
SWE1244E	300	4	31	102	98	0,53	89	120
<b>Динамики фирмы «JBL» (США), номинальное сопротивление 4 Ом</b>								
GT5-12	300	4	23				93	99
<b>Динамики фирмы «Infinity» (США), номинальное сопротивление 4 Ом</b>								
Kappa 120.9W	300	4	23				91	195
<b>Динамики фирмы «Peerless» (Дания), номинальное сопротивление 8 Ом</b>								
SLS 830668	250	6,3	33	69	51	0,51	88,7	100
SLS 830669	300	8	28	172	-	0,47	91	125
<b>Динамики фирмы «SEAS» (Норвегия), номинальное сопротивление 8 Ом</b>								
H1288-08	200	6,1	29	97	21	0,41	89,5	130
H1471-08	200	6,2	34	82	18	0,30	91	160
<b>Динамики фирмы «Morel» (Израиль), номинальное сопротивление 8 Ом</b>								
CAW 938	200	6,3	29	70	27	0,52	86	170
<b>Динамики фирмы «Vifa» (Дания), номинальное сопротивление 8 Ом</b>								
P21W020-08	200	8	28	113	22	0,33	91	90

### НЧ-СЧ-динамики с полосой частот до 3—5 кГц

Эти динамики (табл. 1.3), в просторечье именуемые «midbass», могут работать как НЧ-СЧ-излучатели в составе двухполосных систем или в такой же роли, но в составе трехполосных систем. Они воспроизводят диапазон частот от  $F_s$  (частота собственного резонанса) до 3—5 кГц.

*Параметры низко-средне-частотных динамических головок с полосой частот от  $F_s$  до 3000—5000 Гц*

Таблица 1.3

Марка	Диаметр D, мм	Активное сопротивление $R_e$ , Ом	Резонансная частота, $F_s$ , Гц	Эквивалентный объем, $V_{AS}$ , л	Масса подвижной системы, $M_{MS}$ , г	Полная добротность $Q_{TS}$	Чувствительность $Spl$ , дБ	Стоимость, долл.
<b>Динамики фирмы «Hertz» (Италия), номинальное сопротивление 4 Ом</b>								
HV 200	200	3	40	35	28	0,48	94	80
SV 200 L	200	4	44	31	29	0,33	94	150
HV 165 L	165	2,9	55	12	15	0,42	92	70
<b>Динамики фирмы «ScanSpeak» (Дания), номинальное сопротивление 4 Ом</b>								
18W/4424G00	165	2,9	42	28	13	0,31	91	65
<b>Динамики фирмы «Peerless» (Дания), номинальное сопротивление 8 Ом</b>								
HDS Exclusive 830883	165	5,7	42	22	17	0,36	88	100
HDS NOMEX 830869	200	6,0	30	76	26	0,29	90	70
<b>Динамики фирмы «SEAS» (Норвегия), номинальное сопротивление 8 Ом</b>								
H1456-08 (ER18RNX)	165	8	37	32	-	0,6	88	120
<b>Динамики фирмы «Visaton» (Германия), номинальное сопротивление 8 Ом</b>								
AL 170/8	165	8	38	33	-	0,34	88	150
WS 17 E/8	165	8	41	31	-	0,63	88	30
<b>Динамики фирмы «Morel» (Израиль), расчетное сопротивление 8 Ом</b>								
MW 265	200	5,3	33	61	25	0,61	89	160
MW 266	200	5,2	40	80	25	0,56	89	150
<b>Динамики фирмы «Веутма» (Испания), номинальное сопротивление 8 Ом</b>								
10BR60	250	6,5	40	47	50	0,47	91	
8Woofer/P-V2	200	5,8	35	59	20	0,5	90	

### Высокочастотные динамики

Выбраны динамики с относительно низкой резонансной частотой, пригодные для работы в составе двухполосной системы совместно с НЧ-СЧ головкой и не требующие разделительного ВЧ-фильтра высокого порядка (табл. 1.4).

Параметры высокочастотных динамических головок

Таблица 1.4

Марка	Диаметр D, мм	Активное сопротивление, Re, Ом	Резонансная частота, F <sub>r</sub> , Гц	Полоса частот, Гц	Чувствительность, Spl, дБ	Стоимость, долл.
<b>Динамики фирмы «ScanSpeak» (Дания), номинальное сопротивление 4 Ом</b>						
R2604/832000	104	2,9	500	1 000 — 20 000	90 дБ	60
<b>Динамики фирмы «SEAS» (Норвегия), номинальное сопротивление 6 Ом</b>						
H0881 (27TFFC)	103	5	550	1 500 — 20 000	91	60
H1283 (22TAF/G)	98	4,9	1100	2 500 — 20 000	92	58
H1508-06 (26TFF)	98	6	1000	2 000 — 25 000	91	55
<b>Динамики фирмы «Vifa» (Дания), номинальное сопротивление 4 Ом</b>						
XT19SD-00/04	94	2,9	680	1 500 — 20 000	89	55
XT25SC90-04		4	840	1 500 — 40 000	92	40
<b>Динамики фирмы «Morel» (Израиль)</b>						
MDT20	28	8 (номин.)	650	1 600 — 25 000	90	50
MT22	28	4 (номин.)	950	1 600 — 25 000	91	50
MDT37	28	8 (номин.)	700	1 800 — 20 000	93	60

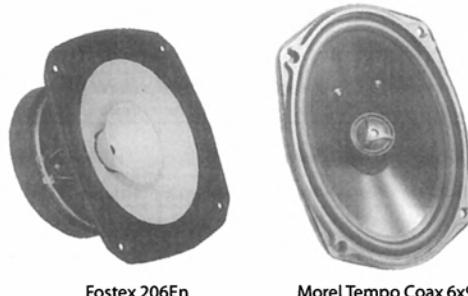


Рис. 1.7. Широкополосный динамик Fostex 206 с внутренним ВЧ-излучателем ([www.fostex.jp](http://www.fostex.jp)) и двухполосная коаксиальная система Morel Tempo ([www.morelhifi.com](http://www.morelhifi.com))

### Широкополосные динамики

Широкополосный динамик может быть использован для создания акустической системы без дополнительного ВЧ-динамика, без фильтра и т. п. вспомогательных элементов. К сожалению, сделать такую динамическую головку непросто, поэтому их выбор невелик, а стоят они немало. На рис. 1.7 показана одна из таких головок — весьма популярная среди самодельщиков японская «Fostex 206».

Параметры широкополосных динамических головок

Таблица 1.5

Марка	Диаметр D, мм	Активное сопротивление Re, Ом	Резонансная частота, F <sub>s</sub> , Гц	Эквивалентный объем, V <sub>ss</sub> , л	Масса подвижной системы, M <sub>ss</sub> , г	Полная добротность Q <sub>ss</sub>	Чувствительность SpL, дБ	Стоимость, долл.
Динамики фирмы «Fostex» (Япония), номинальное сопротивление 8 Ом, диапазон частот 40 Гц...20 кГц								
FE206En	200	6,8	45	71	12	0,19	96	190
FE207E	200	6,7	39	56	-	0,26	95	-
FE203	200		43	-	12	0,14	95	-
FE164	165	7,2	50	32	6,9	0,31	93,5	100
Динамики коаксиальные (сдвоенные) фирмы «Beuma» (Испания), номинальное сопротивление 8 Ом, диапазон частот 60 Гц... 20 кГц								
8BX/N	200	5,3	57	22	23	0,66	92	160
8BX	200	5,2	55	23	23	0,68	92	200

Для читателей с ограниченным бюджетом и не очень большим помещением для прослушивания музыки (до 18 м<sup>2</sup>) можно порекомендовать обратить внимание на автомобильные коаксиальные двухполосные системы с НЧ-СЧ-динамиком овальной формы 6×9 дюймов (150×230 мм) и встроенным внутренним ВЧ-излучателем (рис. 1.7). Вполне приличный бюджетный вариант!

Преимущества коаксиальных систем, кроме привлекательной цены:

- поддержка НЧ-мод вдоль 9-дюймовой оси, — больше, чем 8-дюймового кругового динамика;
- согласованность источников СЧ-ВЧ сигнала по месту расположения;
- наличие встроенных или внешних фильтров.

Коаксиальные автомобильные системы рассчитаны на акустическое оформление типа «акустический экран» или «открытый ящик». Они хорошо работают в системах типа «трансмиссионная линия».

Полоса частот составляет от 35—45 Гц до 20 кГц, ВЧ-головка имеет шелковый купол и пониженную резонансную частоту. Имеются встроенные или внешние разделительные фильтры, обычно первого порядка. Частота раздела около 4 кГц — отличный вариант для достижения хорошего стереоэффекта! Внешние фильтры предпочтительнее, такое решение свидетельствует о более серьезной конструкции. Параметры некоторых коаксиальных систем приведены в табл. 1.6. Цена указана за полный стереокомплект. Номинальное сопротивление — 4 Ом.

**Двухполосные коаксиальные излучатели****Таблица 1.6**

Тип излучателя	FS Гц	QTS	VAS	Spl, дБ	Цена за стереокомплект
Alpine SPE 69C2	57	0,8	21	90	75 у.е.
Morel Tempo Coax 6x9	67	0,87	21	90	100 у.е.
Morel Maximo Coax 6x9				91,5	100 у.е.
CDT CL-69X				90	120 у.е.
Infinity Kappa 692				90	135 у.е.
Focal Access 690 CA1				91	145 у.е.
DLS 962	55	0,58	18	89	160 у.е.

**Паспортная и реальная мощность**

До сих пор мощность динамических головок вообще не обсуждалась.

**Примечание.**

*Показываемая производителями мощность примерно в 6—10 раз превышает реально достижимую мощность при воспроизведении музыки при приемлемом уровне искажений.*

«Паспортная» мощность, хотя и производит сильное впечатление на потребителя, указывает на «стойкость» головки к электрическим нагрузкам (включая нагрев), а не на звучание.

Например, многие динамические головки диаметром 250 и 300 мм имеют паспортную мощность 200—300 Вт, а ВЧ-головки при подаче ВЧ-сигнала — предельную мощность около 100 Вт.

В то же время, уже отмечалось, что при чувствительности примерно 90 дБ/Вт/м мощности в несколько ватт достаточно для создания в помещении реальной громкости камерного оркестра.

## ГЛАВА 2

# АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

*Прочитав эту главу, читатели узнают, зачем нужно помещать динамические головки в «ящики», какие «ящики» для этого используются, чем отличается звучание разных типов ящиков, и сколько все это стоит в магазине.*

*В этой главе также объясняется, почему основной динамик в акустической системе должен быть не меньше, чем размер нашей головы, и почему при проектировании акустических систем целесообразно придерживаться принципа «чем меньше динамических головок, тем лучше».*

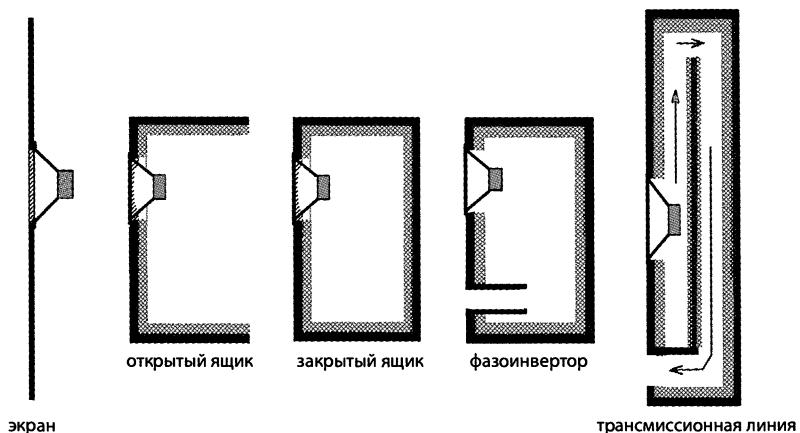
*Анализируются предпочтения профессиональных разработчиков на рынке акустических систем высокой ценовой категории и обсуждаются возможные преимущества конструкторов-самодельщиков при создании хорошо звучащих акустических систем.*

## 2.1. Типы акустического оформления

### Акустическое оформление

Чтобы обеспечить нормальное воспроизведение низкочастотных звуков, необходимо *отделить излучение, испускаемое вперед, от излучения, испускаемого назад*. Для этого, в первую очередь, и предназначено акустическое оформление. Различные виды акустического оформления динамических головок показаны на рис. 2.1.

**Плоский экран.** Самый элементарный тип акустического оформления — плоский экран с отверстием для динамика. Размеры экрана должны составлять несколько метров для динамика, способного воспроизводить частоты от 40 Гц. Такие экраны использовать нереально. Их применяют для измерения характеристик динамических головок в лабораторных условиях.



*Рис. 2.1. Различные виды акустического оформления низкочастотной динамической головки*

**Открытый ящик.** Простейшим типом практического акустического оформления стал открытый ящик. Иногда его называют «свернутым экраном». Типичным примером этого акустического оформления являются старинные деревянные радиоприемники, радиолы и телевизоры. Иногда в открытый ящик устанавливают легкую заднюю стенку с мелкими отверстиями. Открытый ящик является «акустическим диполем»: он излучает звук и вперед, и назад.

Испущенные назад звуковые волны, отразившись от стен, серьезно нарушают звуковое поле перед слушателем. В современной технике высококачественного звукоспроизведения акустические системы типа «открытый ящик» являются очень большой редкостью.

**Закрытый ящик.** Второй задачей акустического оформления является облегчение работы динамической головки на самых низких частотах, вблизи собственной резонансной частоты головки. Простейший способ сделать это — поместить головку в закрытый ящик, а внутреннюю поверхность стенок ящика оклеить звуко- и вибропоглощающими материалами. Англоязычные названия — *closed box, sealed box*.

При этом, однако, возрастает резонансная частота головки из-за того, что упругость воздуха в ящике добавляется к собственной упругости подвеса механической системы динамика. Вместе с тем закрытый ящик обеспечивает отличную динамику передачи низкочастотных звуков, начиная с частот примерно в 1,5 раза выше собственной резонансной частоты динамика.

Закрытый ящик ограничивает амплитуду колебания диффузора головки на резонансной частоте и на соседних частотах, не позволяя тем самым динамику выйти из безопасного режима с относительно небольшой амплитудой колебаний.

Существует как минимум два способа расширения полосы воспроизводимых частот до частоты собственного резонанса динамической головки и даже несколько ниже. Самый распространенный способ — превратить закрытый ящик в фазоинвертор.

**Фазоинвертор.** Фазоинвертор — это закрытый ящик с дополнительным отверстием. Англоязычные названия — *vented box*, *ported box* или *bass reflex*. В одной из стенок (чаще — в передней) делают отверстие диаметром порядка 10 см и в него вставляют трубку, направленную внутрь ящика. Длина трубки подобрана так, чтобы она служила резонатором на частоте, равной или близкой к частоте собственного резонанса.

На этих частотах акустическая система излучает не только звук, исходящий от передней стороны диффузора динамической головки, но и звук, исходящий от ее тыльной стороны. Отсюда и название — фазоинвертор. Этот дополнительный звук выходит из наружного отверстия трубки, которое называется *портом* фазоинвертора. Фазоинвертор является сегодня абсолютно доминирующим способом акустического оформления для называемых «полочных» акустических систем объемом до 20 л, а также для относительно узких напольных систем с низкочастотными динамиками диаметром 13—20 см.

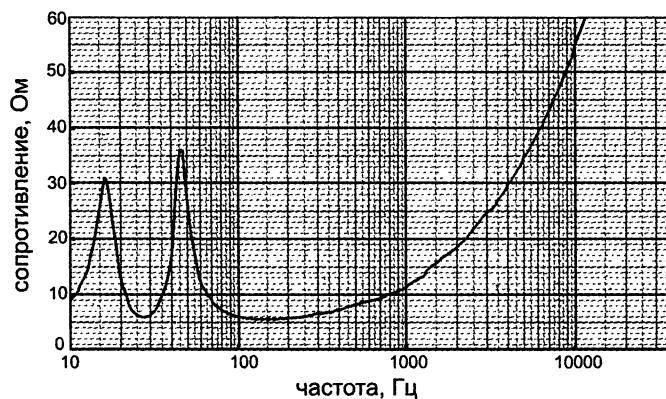


Рис. 2.2. Типичная зависимость полного сопротивления от частоты для динамической головки в акустическом оформлении типа «фазоинвертор». Частота собственного резонанса головки 45 Гц

Фазоинвертор настраивают на частоту собственного резонанса  $F_s$  головки. При этом резонансный отклик головки громкоговорителя «расщепляется»: возникают две резонансные частоты на зависимости полного сопротивления динамика от частоты (рис. 2.2), расположенные симметрично относительно  $F_s$ . Такое поведение обусловлено взаимодействием двух связанных колебательных систем: динамической головки и трубы фазоинвертора.

### Трансмиссионная линия

Более эффективным, но гораздо менее распространенным способом понижения нижней границы полосы воспроизводимых частот является трансмиссионная линия (рис. 2.1). К сожалению, этот способ акустического оформления не получил широкого коммерческого распространения. Трансмиссионная линия представляет собой трубу длиной несколько метров, на одном конце которой укреплена динамическая головка. Линия может быть несколько раз сложена, а ее открытый конец можно направить в сторону слушателя.

В трансмиссионной линии резонансная частота ниже, чем собственная резонансная частота головки. Происходит это оттого, что воздух, находящийся в трубе позади диффузора динамической головки, колеблется вместе с диффузором. Присоединенная масса воздуха и понижает резонансную частоту. Это замечательное свойство трансмиссионной линии экспериментально установил Мартин Кинг (Martin King).

## 2.2. Почему маленькие динамики звучат не так, как большие?

Автор книги убежден, что размер динамической головки во многом определяет естественность звучания и пространственную сцену. Переход от оглушающего звука симфонического оркестра к комнатным условиям путем простого «масштабирования» источника звука (от большого зала — к комнате, от контрабаса и барабана — к небольшим коробочкам акустических систем с маленькими динамиками) без потери достоверности воспроизведения осуществить нельзя.

Дело в том, что в звуковом сигнале есть характеристика, задаваемая размером. Это длина звуковой волны.

Во-первых, для воспроизведения самых низких частот требуется определенный размер помещения. Во-вторых, у динамиков есть два режима работы.

На самых низких частотах подвижная система (диффузор и катушка) совершает поступательное движение вперед–назад с частотой сигнала. Этот режим называют поршневым. С повышением частоты начинает вибрировать поверхность динамика, пространственная картина колебаний поверхности зависит от частоты звука и размера динамика. Многие высококачественные акустические системы содержат купольные среднечастотные головки, вообще не имеющие поршневого режима.

Классик теории акустических систем Невил Тиле так определял границу между поршневым и поверхностным режимами\*:

«Это режим, когда окружность динамика меньше, чем длина волны излучаемого звука, т. е. ниже 400 Гц для 12-дюймового динамика и ниже 1 кГц для 5-дюймового.»

На рис. 2.3 показана картина колебаний диффузора динамической головки, полученная методом лазерного сканирования для различных частот. При низкой частоте (580 Гц) диффузор совершает поступательное движение, т. е. движется как единое целое. С повышением частоты (984 Гц, 3046 Гц) сохраняется поступательный характер движения

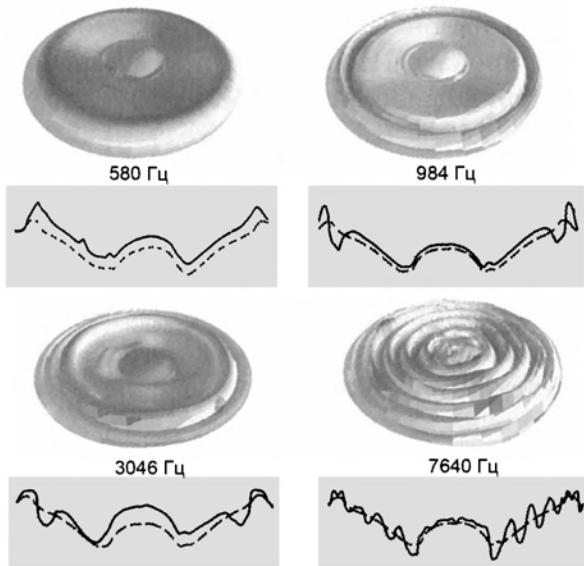


Рис. 2.3. Картина колебаний диффузора для различных частот. Под каждым изображением помещен поперечный срез диффузора, на котором пунктирная линия показывает геометрию диффузора в спокойном состоянии, а сплошная линия — во время колебаний (по данным фирмы «Klipfel Gmbh», Германия)

\* см. ссылку на стр. 27

центральной части диффузора, а его периферическая часть начинает вибрировать независимо от центральной части.

При дальнейшем повышении частоты поступательное движение диффузора не наблюдается (7640 Гц). К сожалению, авторы не сообщают о размерах и типе динамической головки, использовавшейся в эксперименте, однако судя по присутствию поршневого режима на частотах примерно 600 Гц, динамик имел диаметр заметно менее 20 см.

У автора есть субъективное, но устойчивое ощущение: маленькие динамики и акустические системы — «маленький» звук, большие динамики и акустические системы — «большой» звук, т. е. широкая и глубокая звуковая сцена не возникает с маленькими динамиками.

Можно в качестве предположения указать следующие возможные причины ухудшения пространственной картины при использовании громкоговорителей малого размера:

- ◆ иное частотное соотношение между поршневым и поверхностным режимами колебаний;
- ◆ фазовый сдвиг в области средних частот при больших амплитудах перемещения диффузора;
- ◆ модуляция (периодическое изменение во времени) частоты из-за эффекта Допплера;
- ◆ изменение диаграммы направленности для нижнего СЧ-диапазона.

Рассмотрим каждую из возможных причин подробнее.

### Различия в модовой структуре колебаний малых и больших динамических головок

Динамики разных размеров могут иметь различающуюся модовую структуру колебаний при воспроизведении одного и того же музыкального сигнала. Динамик малого размера может иметь более поздний с ростом частоты переход от поршневого к «поверхностному» режиму колебаний, так как длина волны поверхностной моды не может превышать размера диффузора.

Большой динамик может отрабатывать низкочастотную часть среднечастотного диапазона (около 300 Гц) в поверхностном режиме, а малый вынужден это делать в режиме поступательного движения, который из-за большой амплитуды еще и увеличивает искажения. Эта особенность имеет место всегда, так как определяется только размером диффузора.

### Изменение во времени положения источника звука в СЧ-диапазоне

Еще одна причина неполноценной пространственной сцены при воспроизведении фонограмм с помощью маленьких динамиков может быть связана с изменением во времени положения источника звука среднечастотного диапазона при одновременном воспроизведении низко- и среднечастотных колебаний одним динамиком малого размера. Она связана с большой амплитудой низкочастотных колебаний. Малогабаритный динамик развивает в поршневом режиме колебания с амплитудой примерно  $\pm 5$  мм.

Амплитуда низкочастотных колебаний  $\pm 5$  мм означает, что кажущийся источник звука с основным тоном, соответствующим поверхностному режиму колебаний, за время порядка 10 мс (соответствует частоте 100 Гц) изменил свое положение на 1 см.

А 1 см — это 10% от длины звуковой волны для частоты 3 кГц, т. е. на такую же величину по сравнению со значением  $2\pi$  изменится и фаза колебаний.

Таким образом, большая амплитуда низкочастотных колебаний может разрушать пространственную звуковую картину из-за разрушения когерентности колебаний в верхнем среднечастотном диапазоне, участвующем в формировании стереоэффекта.



#### Примечание.

*Подчеркну еще раз, что этот эффект будет иметь место только при одновременном воспроизведении низких и средних частот одним динамиком малого размера.*

К сожалению, именно так и бывает: большинство колонок с малым НЧ-динамиком (и полочных, и напольных) — двухполосные с частотой раздела примерно 2 кГц, т. е. основному динамику отводится и НЧ-, и нижний СЧ-диапазоны. Возможно, при переходе к трехполосным системам этот эффект ослабнет, однако трехполосных систем с малыми динамиками обычно не делают.

### Проявление эффекта Допплера

Цельность, слитность, «музыкальность» звучания может нарушиться и в результате повышенного эффекта Допплера для малых динамиков. Эффект Допплера состоит в изменении частоты звука при

относительном движении источника и приемника: при их сближении частота увеличивается, при удалении — уменьшается.

Связано это с тем, что приемник (в данном случае — наше ухо) принимает больше звуковых колебаний в единицу времени в первом случае и меньше — во втором случае по сравнению со случаем неподвижного источника относительно приемника.

Поступательное движение диффузора на низких частотах может повлиять на восприятие частот, соответствующих поверхностным колебаниям диффузора.

Причем при воспроизведении звуковых колебаний одной и той же частоты в поршневом режиме с одинаковой громкостью диффузор малого динамика вынужден ускоряться быстрее, чем диффузор большого динамика. Ведь для обеспечения равной громкости его амплитуда колебаний должна быть больше. Отсюда и повышенное проявление эффекта Допплера.

Небольшое, но все-таки искажение воспроизведения сигналов среднечастотного диапазона 1000—3000 Гц разрушает когерентность (т. е. пространственно-временное согласование) звуковых импульсов сложной формы с широким спектром как в пределах одного канала, так и между каналами.



#### Примечание.

Обратите внимание, что именно среднечастотный диапазон и определяет пространственную картину, так как длина волны СЧ-колебаний соизмерима с расстоянием между нашими ушами.

Отсюда и нечеткость пространственной картины с малыми динамиками: звук «не хочет» выходить из колонок. Например, малогабаритный динамик, развивающий в поршневом режиме колебания с амплитудой  $S = \pm 5$  мм на частоте  $f = 100$  Гц, имеет скорость поступательного движения в крайних положениях примерно 4 м/с, т. е. более 1% по отношению к скорости звука.

Такое изменение скорости будет присуще всем звукам за пределами поршневого режима, т. е. примерно начиная от ноты «ми» первой октавы (первая, самая тонкая струна гитары) и выше. Как уже отмечалось, человек различает относительное изменение частоты 0,3%, а это значит, что эффект Допплера действительно можно услышать.

Причем, поскольку эффект имеет место для всех частот выше некоторой, изменяться во времени будет не только тон, но и тембр

звучания. Это может вполне привести к разрушению «консонанса» — слитности, созвучности, гармоничности музыкальных звуков. Этот эффект, как и предыдущий, будет проявляться в двухполосных акустических системах, где одному динамику отводится и НЧ-диапазон, и значительная часть СЧ-диапазона. Он будет нарастать с увеличением громкости воспроизведения.

### **Повышенная дифракция для нижнего СЧ-диапазона**

Маленькие динамики обычно помещают в маленькие ящики. В напольном исполнении ящики относительно высокие, но узкие. Малые размеры ящика в горизонтальной плоскости приводят к изменению диаграммы излучения вследствие дифракции звуковой волны на краях ящика. Влияние дифракции в звуковоспроизведении надежно установлено.

Для акустических систем с корпусом шириной менее 40 см, но более 25 см, дифракция (огибание краев ящика) звуковых волн приводит к снижению низкочастотных составляющих. Это происходит оттого, что самые низкочастотные колебания, т. е. колебания с длиной волны 0,5 м и более, излучаются и вперед, и назад, огибая ящик акустической системы, тогда как более высокочастотные — только вперед.

В результате дифракции низкочастотные составляющие, не влияющие на стереоэффект, ослабляются, а затем, отразившись от стен, доходят до слушателя, но уже, конечно, без какого-либо фазового согласования. Такое ослабление, если оно влияет на тональный баланс, успешно корректируют простым LCR-фильтром на входе акустической системы (т. е. понижением СЧ-ВЧ-составляющих до уровня реальной громкости НЧ-составляющей).

В случае ящика шириной 15—20 см назад начнут излучаться и волны более высоких частот, соизмеримые с расстоянием между нашими ушами и поэтому участвующие в формировании стереоэффекта. Это означает, что стереоэффект при использовании ящиков малого размера может ухудшаться.

Дифракция обусловлена исключительно малыми размерами корпуса, причем не внутренними, а именно внешними размерами. Поэтому дифракцию можно ослабить, увеличив размеры передней стенки акустической системы. От громкости воспроизведения дифракционный эффект не зависит.

**Совет.**

Желательно, чтобы размеры НЧ-СЧ головки были не меньше, чем расстояние между нашими ушами!

**Вывод.**

Существует как минимум четыре причины, приводящие к ухудшению звучания динамиков малого размера (менее расстояния между нашими ушами). Три из них в принципе **неустранимы**, а четвертая может быть устранена увеличением размеров акустической системы.

## 2.3. Подходы профессионалов

Мы не будем здесь обсуждать конструирование малогабаритных систем объемом 10—15 л, так называемых полочных колонок или «полочников». Полноценного звучания от таких колонок не добиться, причем цена не является определяющим фактором. Есть «полочки» стоимостью несколько тысяч долларов!

И они даже в большей степени вызывают неудовлетворение, так как за эти деньги можно приобрести полноценную напольную систему высшего класса. «Перегрузка мидбасовых драйверов на больших уровнях» — заключение эксперта о полочных колонках Acoustic Energy AE1 Reference mkIII SE\*, стоимостью 9 тыс. долл.(!). И таких отзывов о небольших акустических системах много.

При желании добиться приличного звука от малогабаритных колонок начинают увеличивать их размер (до 20 л) и массу (до 15 кг). Не каждая «полка» выдержит такой вес, особенно с учетом громкости звука и уровня вибраций.

**Примечание.**

Приличные «полочки» требуют установки на подставки, желательно с большой массой и подавлением вибраций, например, в виде трубы, засыпанной песком, установленной на мраморное основание или на толстый ковер.

\* Р. Тарасов. Пределы совершенства. «Салон AV», №5, с. 40—47. — 2011.

Но тогда «полочная» колонка уже превращается в напольную, но с «зажатыми» басами, вялой динамикой и т. п. недостатками, обсуждавшимися в разделе 2.2. А вот, как высказывается о звучании полочных колонок эксперт журнала «Stereophile»\*:

*«Маленькие АС требуют высоких мощных подставок. Иллюзия, что маленькие АС намного проще в расположении, чем АС нормального размера — это игнорирование научных принципов размещения звуковых источников. Законы физики просто не позволяют (...) генерировать точный бас ниже 120 герц акустическим системам с маленьким корпусом. То, что обычно называют басом в маленьких АС — чаще всего лишь растянутая нижняя середина. (...) Эти АС не воспроизводят лучшую середину за счет баса, они просто производят слишком много среднечастотной энергии по отношению к басу. Маленький корпус (...) вынуждает конструктора идти на всевозможные хитрости, чтобы получить иллюзию приемлемого баса. Талантливый конструктор никогда не заплатит такую цену и будет добиваться успеха с АС нормального размера. Мировая практика только подтверждает этот тезис.»*

Рассмотрим подходы профессионалов к конструированию напольных акустических систем высокой стоимости (от 2—3 тыс. долл. и выше).

Там, где цена не имеет значения, реализуются два диаметрально противоположных подхода. С одной стороны — предельный минимализм: две полосы с минимумом компонентов в разделительных фильтрах. С другой стороны — многоголосность, иногда до 6-ти полос с целью обеспечить максимально равномерную характеристику, иногда с намеренным подъемом в области низких частот.

Рассмотрим примеры минималистского подхода. Одна из лучших в мире серия акустических систем — Glenair фирмы «Tannoy» (Великобритания). В этих акустических системах имеется единственный (!) излучатель Dual Concentric диаметром 25, 30 или 38 см с бумажным диффузором со встроенной коаксиально расположенной ВЧ-головкой. На рис. 2.4 показана АС Glenair 10 с излучателем диаметром 10 дюймов (25 см).

\* A. H. Cordesman, Who stole the bass. «Stereophile», v.10, No 5, August 1987.



*Рис. 2.4. Слева — акустическая система Glenair10 фирмы Tannoy (Великобритания), справа — акустические системы фирмы «PMC» (Великобритания)*

Ее параметры следующие:

- ◆ полоса частот по уровню -6 дБ..... 38—25 000 Гц;
- ◆ тип акустического оформления ..... фазоинвертор;
- ◆ чувствительность (2,83 В на расстоянии 1 м) ..... 91 дБ;
- ◆ максимальный уровень громкости (достигается при 120 Вт средней подводимой мощности) ..... 112 дБ;
- ◆ объем ..... 62 л;
- ◆ материал диффузора НЧ ..... бумага;
- ◆ материал диффузора ВЧ ..... метал;
- ◆ частота раздела НЧ-ВЧ ..... 2,1 кГц;
- ◆ размеры ..... 100×36×35 см;
- ◆ цена (за пару) ..... 10 тыс. долл.

Комбинированный широкополосный излучатель — несомненное техническое достижение разработчиков фирмы «Tannoy». Подобный излучатель разработала также и фирма «KEF», однако в отличие от излучателя Tannoy этот излучатель имеет диаметр примерно 16 см и не обеспечивает полноценного воспроизведения нижнего звукового диапазона. Поэтому в напольных акустических системах он работает только совместно с НЧ-динамиком диаметром 16 или 20 см.

Примером минималистского подхода служат многие разработки фирмы «Bose» (США): во многих колонках этой фирмы используются

двуухполосные системы, причем для разделения полос применяется всего одна (!) деталь — конденсатор, образующий ВЧ-фильтр первого порядка для высокочастотного динамика. Спад коэффициента передачи вблизи частоты раздела полос для НЧ-СЧ головки обеспечивается либо ее конструкцией, либо формированием НЧ-фильтра с помощью двухкамерного ящика.

Фирмой «PMC» (Великобритания) выпускаются двухполосные напольные системы с конструкцией типа «трансмиссионная линия» (рис. 2.4, справа). Наличие длинного лабиринта сечением, примерно равным площади диффузора НЧ-СЧ-динамика (его диаметр для колонок показанных на рисунке равен 16,5 см), улучшает отдачу на низких частотах при хорошей макродинамике в нижнем регистре.

Примеры второго подхода — многополосность. Сложные фильтры (иногда до 4-го порядка!) представлены на рис. 2.5.

AC Grand Utopia («Focal JMlab») имеет 5 динамиков. Диаметр основного НЧ динамика 40 см, дополнительного — 26 см, двух «среднечастотников» — 16,5 см, ВЧ-динамика — 3 см). Полоса частот — 18—40 000 Гц, высота — примерно 2 м, а масса — более 200 кг. Наклонная передняя панель в НЧ-отсеке решает одновременно две задачи.

Во-первых, обеспечивается одинаковое расстояние от центров НЧ-, СЧ- и ВЧ-головок до слушателя. Это необходимо для цельного восприятия звукового импульсного сигнала с широким спектром.

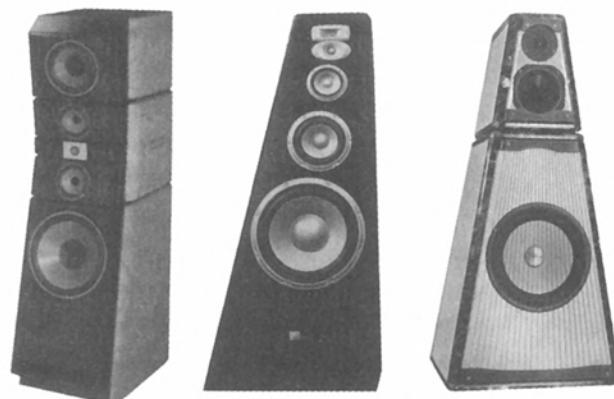


Рис. 2.5. Многополосные акустические системы: четырехполосная AC Grand Utopia («Focal-JMlab», слева), пятиполосная AC S9800 SE («JBL», в центре) и трехполосная AC Heops ENP 2.0 («Virtual Acoustics») с корпусом из натурального мрамора (справа)

Во-вторых, непараллельность стенок НЧ-отсека исключает возникновение стоячих волн, приводящих к «бубнящему» и гулкому звучанию. Отметим также непараллельность осей динамических головок. Это сделано для возможного расширения зоны стереоэффекта в реальных жилых помещениях с учетом отражений от потолка.

Пятиполосная система S9800 SE фирмы «JBL» (США) также имеет наклонную стенку, но не переднюю, а боковую (рис. 2.5, в центре).

Показанная на рис. 2.5 (справа) АС Heops ENP 2.0 фирмы «Virtual Acoustics» демонстрирует бескомпромиссный выбор идеального по плотности и структуре материала для корпуса акустических систем — натурального мрамора!

Корпус двухкамерный (НЧ- и СЧ-ВЧ- отсеки), выполнен в виде усеченной пирамиды. Такая форма, как уже отмечалась, обеспечивает подавление стоячих волн и одновременность прихода к слушателю колебаний от всех динамических головок. Тип акустического оформления — закрытый корпус. Размеры этой АС — 104×44×40 см, стоимость — 35 тыс. долл. НЧ-динамик — 25-сантиметровый SEAS W26FX 001 (Норвегия), СЧ-динамик — Audax HM 130Z12 (Франция), ВЧ-головка — Morel MDT-30 (Израиль), резонансная частота — 700 Гц. Эти акустические системы собираются в России.

Все приведенные выше акустические системы, за исключением трансмиссионной линии фирмы «PMC», имеют оформление типа «фазоинвертор». Порт (отверстие) фазоинвертора часто располагают на задней или на нижней стенке корпуса. Фазоинвертор является сегодня доминирующим типом акустического оформления и для малогабаритных, и для крупногабаритных систем.

Конструкции типа «закрытый ящик» сегодня можно встретить только в классе высококачественных сабвуферов. Оформление типа «трансмиссионная линия», кроме упомянутой фирмы «PMC», для которой эта конструкция является основной, встречается в некоторых профессиональных системах небольшого размера, которые называют студийными мониторами.



Рис. 2.6. Трехполосная акустическая система с обратным рупором

**Примечание.**

Отметим, что АС типа «трансмиссионная линия», если попадают в число тестируемых аудиокомпонентов в глянцевых журналах, неизбежно получают высокую или высшую оценку.

Разновидностью трансмиссионной линии можно считать конструкцию типа «обратный рупор». С акустическим оформлением в виде обратного рупора выполнена, например, трехполосная АС Hans Deutsch HD 308SII фирмы «Sound Magic», показанная на рис. 2.6.

Отверстие рупора находится в верхней части корпуса. Диаметр НЧ-динамика 20 см, частоты разделения фильтров 1,7 кГц, 4,3 кГц. Стоимость 2050 евро. Размеры — 54×30×28 см.

## 2.4. Почему фазоинверторы доминируют на рынке акустических систем?

В книжке, опубликованной 30 лет назад,\* приводится следующая статистика предлагаемых на рынке домашних акустических систем по типам акустического оформления:

- в США и Западной Европе доминируют системы типа «закрытый ящик» — 43% и 61%, соответственно;
- в Японии доминируют фазоинверторы — 62%.

Преобладание фазоинверторов в Японии в те годы можно объяснить как стремлением к передовым, часто более сложным устройствам, требующим точных технологий и компьютерного моделирования, так и скромными жилищами с площадью, в несколько раз меньшей типичных американских и западно-европейских домов и апартаментов.

**Примечание.**

Сегодня ситуация сильно изменилась. Абсолютное большинство акустических систем, предлагаемых на рынке — от «малолитражных» полочных АС стоимостью 200—300 долл. до серьезных напольных систем стоимостью примерно 10 тыс. долл. — это фазоинверторы!

\* Иоффе В. К., Лизунков М. В. Бытовые акустические системы. М.: Радио и связь. — 1982.

Например, в одном из недавних обзоров напольных систем в журнале «Салон Audio Video» стоимостью примерно 2 тыс. долл. 11 систем из 12 протестированных имели конструкцию «фазоинвертор» и лишь одна модель (AC типа «трансмиссионная линия» фирмы «PMC») не принадлежала к этой категории.

Сегодня «закрытые ящики» занимают значительную нишу лишь среди сабвуферов, а системы типа «трансмиссионная линия» являются большой редкостью во всех категориях акустических систем: и среди «полочников», и среди «напольников», и среди сабвуферов.

Доминирование фазоинверторов можно объяснить несколькими причинами. *Во-первых*, широким введением компьютерного моделирования, необходимого для их расчета, в современное производство и повышением стабильности характеристик выпускаемых динамических головок (фазоинверторы очень чувствительны к разбросу их параметров).

*Во-вторых*, активным «внедрением» электронных музыкальных инструментов, включая барабаны, в современную музыкальную «культуру»: многим нравится когда «баса много», хотя и с искажениями.

*В-третьих*, насквозь пронзившим современную индустрию звукозаписи электронными «подчистками», «подтяжками» и прочими операциями, выхолащающими признаки «живого» звучания из наших домашних аудиосистем.

Среди аудиофилов уже давно укоренилось мнение, что объективно измеряемые параметры и усилителей, и акустических систем, как правило, не дают однозначного указания на то, какое из устройств будет звучать лучше.

Набор этих параметров ограничен и не охватывает в полной мере все богатство реальных музыкальных сигналов. Поэтому и получает все большее распространение субъективное тестирование аудиоаппаратуры, т. е. оценка ее качества по результатам прослушивания, а не измерения.

Но... большинство конкретных покупателей, по-видимому, ориентируется на технические характеристики. А по ним фазоинверторы превосходят закрытые ящики, прежде всего, по значению нижней граничной частоты при одинаковом объеме ящика и одинаковых исходных параметрах динамиков.

## 2.5. Какой же «ящик» звучит лучше?

Как уже отмечалось, «ящик» нужен динамику для того, чтобы обеспечить качественное воспроизведение низких частот. В абсолютном большинстве случаев действительно качественных низкочастотных акустических систем используют высококачественные низкочастотные головки диаметром 25—30 см с низкой резонансной частотой (20—30 Гц) и оформление типа **закрытый ящик**.

Некоторые фирмы применяют пассивный излучатель (в каком-то смысле — разновидность фазоинвертора) или трансмиссионную линию и ее разновидность — обратный рупор.

Приведем два красноречивых, по мнению автора, примера. При тестировании активных сабвуферов стоимостью выше 1 тыс. долл. журналом «Салон АВ»\* пять из восьми отобранных аппаратов имели конструкцию «закрытый ящик» и три — «фазоинвертор». «Гран-при» редакции получил Jamo C80 sub конструкции «закрытый ящик». При тестировании трифонических систем общей стоимостью примерно 3 тыс. долл.\*\* пять из восьми систем имели сабвуфер с оформлением «закрытый ящик», две — «фазоинвертор» и один — «пассивный излучатель». «Гран-при» редакции получил комплект фирмы «Ruark» с сабвуфером Ruark Log Rhytm 150 типа «закрытый ящик».



### Примечание.

*Таким образом, можно утверждать, что закрытые ящики начинают доминировать в классе качественных сабвуферов, в которые можно установить НЧ-головку с достаточно низкой резонансной частотой. Эти аппараты лидируют в аудиотестах.*

Фазоинвертор следует рассматривать как компромисс в небольших двух- и трехполосных системах с малогабаритными НЧ-СЧ-динамиками (13—20 см). Фазоинвертор, хотя и позволяет расширить полосу воспроизведения в сторону низких частот, одновременно портит переходную, импульсную характеристику акустической системы из-за сложного взаимодействия динамической головки с воздухом в ящике вблизи резонансной частоты. Причем, даже запредельная стоимость эксклюзивных малогабаритных АС не позволяет избежать общих недостатков малогабаритных систем и фазоинверторного оформления!

\* В. Кошелев. Громовержцы. «Салон АВ», №11, с. 42—59. — 2007.

\*\* Р. Тарасов. Материализация духов. «Салон АВ», №10, с. 26—40. — 2004.

В лучшем случае положительные впечатления сводятся к тому, что воспроизведение низких частот неожиданно хорошее для колонок такого малого размера. Вот отзывы эксперта, оценивавшего несколько двухполосных АС фазоинверторного типа объемом 15—30 л\*:

«*Нижнему регистру не хватает линейности*» — о колонках Raidho X Monitor, стоимость 6 тыс. долл.

«*При таком объеме корпуса и калибре мидбасов энергетика в нижнем регистре могла бы быть впечатльнее*» — о колонках Bowers & Wilkins DM805, стоимость 6,5 тыс. долл.

**Трансмиссионная линия** — отличное решение для двухполосных напольных систем! Ее потенциал не оценен профессиональными разработчиками. Этот тип акустических систем получил много превосходных отзывов самодельщиков. Удивительно, что при таком оформлении понижается резонансная частота динамической головки, подобно системе с фазоинвертором, но при этом обеспечивается отличная динамика звучания.

Автор книги считает, что:

- ◆ для двухполосных или однополосных систем с динамиками диаметром 16—20 см и резонансной частотой 40—60 Гц трансмиссионная линия — отличное решение;
- ◆ для больших динамиков (30 см и более) с низкой резонансной частотой (20—30 Гц) трансмиссионная линия неоправдана: во-первых, громоздкая получится конструкция, во-вторых, понижать резонансную частоту не имеет большого смысла.

Здесь лучшее решение — **закрытый ящик**. Такое решение подходит для создания классических трехполосных систем (частоты разделения примерно 250 и 3000 Гц) или для трифонических инсталляций с общим НЧ-излучателем на оба стереоканала.

Надо, однако, учитывать, что если динамики диаметром 30 см будут использоваться в стереосистеме, состоящей из двух одинаковых трехполосных акустических систем, то большими окажутся и масса, и стоимость, и размеры таких систем.

Запас по мощности будет многократный, значительной окажется и площадь в помещении, занимаемая такими системами. Хорошим вариантом эффективного использования большого НЧ-динамика в домашней аудиосистеме является создание **трифонической системы**

---

\* Р. Тарасов. Пределы совершенства. «Салон AV», №5, с. 40—47. — 2011.

**с общим для двух каналов НЧ-динамиком в ящике объемом 50—70 л, устанавливаемом в центре между двумя стереоколонками.**

По-видимому, худшим по сравнению с вышеуказанными, но допустимым вариантом, является использование такого динамика в роли сабвуфера, *аддитивно* подключаемого в тракт в дополнение к стереоколонкам. В следующем разделе приводятся рекомендации автора по выбору конструкции домашних акустических стереосистем.

## **2.6. Рекомендации автора по изготовлению акустических систем**

### **Стандартная стереофоническая конфигурация из двух идентичных колонок**

Рекомендуется использовать в каждой акустической системе единственный широкополосный излучатель диаметром 20 или 25 см (8 или 10 дюймов). Можно сделать двухполосную конструкцию с НЧ-СЧ-излучателем диаметром 8—10 дюймов и высокочастотным излучателем. Акустическое оформление — трансмиссионная линия. Такие конструкции будут описаны в Главе 6.

При наличии финансовых средств для приобретения динамиков и места в помещении для прослушивания можно изготовить трехполосные системы в оформлении типа «закрытый ящик». Такие конструкции будут описаны в Главе 7.

### **Трифоническая система с общим низкочастотным каналом**

Эта система содержит дополнительный усилитель с НЧ-колонкой, устанавливаемой в центре между двумя стереоколонками, а также входные разделительные фильтры между источником сигнала и усилительным трактом.

Такой вариант рекомендуется, если по каким-либо причинам вы приняли решение приобрести или изготовить малогабаритные акустические системы объемом 10—15 л с основным динамиком диаметром 16 см и менее.

Такими причинами могут быть высокая стоимость больших широкополосных динамиков или ограниченность места в помещении для прослушивания. Тогда полноценное звучание можно получить только

с использованием общего дополнительного низкочастотного громкоговорителя в отдельном корпусе, снабженного отдельным усилителем.

Оптимально будет выбрать частоту раздела между этим НЧ-громкоговорителем и стерео-сателлитами в интервале 150—250 Гц. Малогабаритные динамики правого и левого каналов в этом случае разгружаются от НЧ колебаний, уровень искажений заметно снизится, а неизбежно присутствующий в промышленных колонках такого формата фазоинвертор (труба с отверстием в ящике акустической системы) не будет портить переходную характеристику.

Низкочастотную акустическую систему надо устанавливать между стерео-сателлитами. Это потребует достаточно большого места в помещении для прослушивания, однако результат того стоит! Такая трифоническая система приятно удивит вас мощью, наполненностью, натуральностью звуковоспроизведения при отличной пространственной сцене. Тип акустического оформления НЧ-колонки — закрытый ящик. Она описана в главе 8.

### Упрощенная трифоническая система с сабвуфером

Если места для размещения центрального НЧ-излучателя (конструкции, рассмотренной выше) в вашей квартире нет, можно использовать супернизкочастотный излучатель (сабвуфер), подключаемый к стандартному стереокомплекту (стереоусилитель плюс две акустические системы).



#### Примечание.

*В этом случае НЧ-колонка добавляет к излучению сателлитов самую низкочастотную часть спектра с частотой ниже 100 Гц, не вмешиваясь в работу основных стереоканалов усиления и колонок-сателлитов.*

Сабвуфер можно устанавливать практически в любом месте помещения, за исключением плотного прилегания к углам комнаты. Ввиду того, что длина волн, излучаемых сабвуфером, составляет несколько метров (11 м для частоты 30 Гц), установка сабвуфера рекомендуется в помещениях площадью более 16 м<sup>2</sup>, лучше — 20—30 м<sup>2</sup>. В этом случае искажения на низких частотах основных малогабаритных колонок уменьшатся за счет понижения громкости, а воспроизведение низких частот заметно улучшится. Обретут мощь удары барабанов, появится ощущение «дыхания» зала на концертных записях.

## 2.7. Подведем итоги

Акустическая система состоит из динамических головок, помещенных в акустическое оформление. Акустическое оформление требуется для обеспечения максимально достоверной передачи низкочастотной части спектра звукового сигнала, которая соответствует поршневому режиму колебаний динамической головки. Высокочастотная часть звукового диапазона, содержащая обертоны музыкальных звуков, воспроизводится, как правило, отдельной динамической головкой, не требующей акустического оформления.

Среди различных типов акустического оформления в фирменных акустических системах доминирует фазоинвертор, трансмиссионная линия является большой редкостью, а закрытый ящик применяется главным образом в сабвуферах. Такая «рыночная» ситуация, по мнению автора, не отражает реальных достоинств и недостатков различных типов акустического оформления, а определяется сочетанием компромиссов по стоимости, по техническим, а не музыкальным характеристикам, по размерам-массе-весу, а также трудо-, энерго- и материлоемкости при производстве.



### Совет.

Для получения хорошего стереоэффекта и цельной звуковой сцены желательно обеспечить воспроизведение диапазона 200—3000 Гц в каждой из колонок стереосистемы единственным динамиком, причем желательно, чтобы его диаметр был соизмерим с размерами нашей головы или превышал ее размеры.

Это позволит избежать работы динамика в поршневом режиме с большими отклонениями подвижной системы, приводящими к сильным искажениям низкочастотных звуков и опосредованым искажениям среднечастотной части музыкального сигнала.

Очевидным преимуществом конструкторов-самодельщиков является свобода в выборе оптимального типа акустического оформления, большой выбор качественных динамических головок, доступных сегодня в крупных городах. Отмечу, что для создания самодельных конструкций, рекомендуемых в этой книге, минимальная стоимость стереокомплекта динамических головок составляет примерно 80 долл. США, максимальная — в 5 раз выше.

Автор надеется, что прочитав эту книгу, читатели откажутся от прямого и неосознанного копирования описанных здесь, в других книжках и в сети интернет акустических систем, и смогут сами выбрать оптимальный из доступного им набора динамиков. Тогда, по-видимому, стоимость самостоятельного изготовления акустических систем может быть дополнительно уменьшена.

## ГЛАВА 3

# РАСЧЕТ ЗАКРЫТЫХ ЯЩИКОВ

*В этой главе популярно излагаются общие представления о том, как изменяются свойства динамической головки в закрытом ящике, какие параметры головки и ящика важны для получения хорошего звучания и как правильно выбрать ящик для имеющейся у вас динамической головки. Поведение динамической головки, помещенной в закрытый ящик, при подаче на ее катушку переменного напряжения различной частоты, описывается с помощью моделей, учитывающих ее электрические и механические свойства.*

*Анализ таких моделей похож на анализ электротехнических цепей, а функция отклика системы «головка + ящик» оказывается похожей на передаточную функцию ВЧ-фильтра второго порядка. Прочитав эту главу, читатель не растеряется перед разнообразием параметров предлагаемых сегодня на рынке динамических головок и сможет построить НЧ- или НЧ-СЧ-канал акустической системы с динамичным и глубоким звучанием в басовом регистре.*

## 3.1. Что происходит при помещении динамика в закрытый ящик?

### Повышение резонансной частоты

Повышение резонансной частоты головки происходит оттого, что упругость воздуха в ящике  $S_{BOX}$  складывается с собственной упругостью головки  $S_{MS}$ . Вспомним формулу (6) из Главы 1

$$F_{BOX} = \sqrt{\frac{S_{MS} + S_{BOX}}{M_{MS}}} > F_s. \quad (16)$$

В этой формуле  $F_s$  — это собственная резонансная частота головки, а  $F_{\text{BOX}}$  — резонансная частота головки в ящике,  $M_{\text{MS}}$  — масса подвижной системы головки.

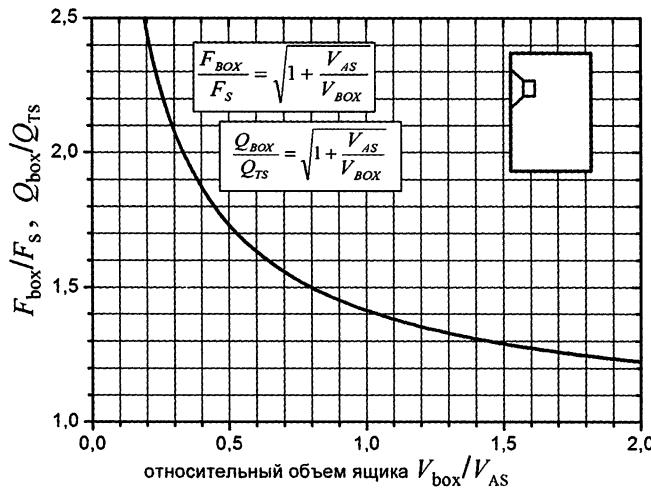
Упругость воздуха в ящике обратно пропорциональна его объему: чем меньше объем ящика, тем больше «сопротивляется» сжатию воздух в ящике. При некотором объеме ящика упругость воздуха в нем становится равной собственной упругости головки. Как уже говорилось в главе 1 (раздел 1.5), это свойство используют для введения понятия *эквивалентного объема динамической головки*  $V_{\text{AS}}$ . С помощью этого понятия повышение резонансной частоты головки в ящике объемом  $V_{\text{BOX}}$  можно описать простой формулой:

$$F_{\text{BOX}} = F_s \sqrt{1 + \frac{V_{\text{AS}}}{V_{\text{BOX}}}} \quad \text{или} \quad \frac{F_{\text{BOX}}}{F_s} = \sqrt{1 + \frac{V_{\text{AS}}}{V_{\text{BOX}}}}. \quad (17)$$

### Повышение добротности

Добротность системы «головка + закрытый ящик»  $Q_{\text{BOX}}$  изменяется по сравнению с собственной полной добротностью головки  $Q_{\text{TS}}$  по такому же закону:

$$Q_{\text{BOX}} = Q_{\text{TS}} \sqrt{1 + \frac{V_{\text{AS}}}{V_{\text{BOX}}}} \quad \text{или} \quad \frac{Q_{\text{BOX}}}{Q_{\text{TS}}} = \sqrt{1 + \frac{V_{\text{AS}}}{V_{\text{BOX}}}}. \quad (18)$$



*Рис. 3.1. Зависимость резонансной частоты и добротности головки в ящике от объема ящика*

Обращаем внимание на то, что для хорошего воспроизведения импульсных сигналов общая добротность системы «головка + ящик»  $Q_{\text{BOX}}$  не должна быть больше 1. Иначе после окончания импульса головка будет совершать заметные колебания с частотой  $F_{\text{BOX}}$ . Появятся характерное «бубнение» и «монотонность» баса. Некоторым слушателям (например, поклонникам музыки «диско» или «техно») такое звучание может даже понравиться, т. к. баса будет «много». Однако приговор музыкантов по отношению к таким системам «плохо читаются басовые ноты» однозначно выводит этот режим за рамки высококачественного, т. е. достоверного звуковоспроизведения.

На рис. 3.1 показано, как увеличиваются резонансная частота и добротность в зависимости от отношения объема ящика к эквивалентному объему.

### 3.2. Формула для расчета АЧХ закрытого ящика

Анализ работы динамической головки в закрытом ящике похож на анализ электротехнических цепей, а функция отклика системы «головка + ящик» оказывается похожей на передаточную функцию ВЧ-фильтра второго порядка с затуханием коэффициента передачи с крутизной 12 дБ на октаву ниже некоторой частоты.

Теория, описывающая работу динамической головки в закрытом ящике, была, в основном, разработана в 70-х годах прошлого века в работах Дж. Бенсона (J. E. Benson) и Р. Смолла (R. Small). Изложение основных принципов этой теории содержится в книжке Э. Л. Виноградовой.\*

Амплитудно-частотная характеристика (зависимость К.П.Д. от частоты  $f$ ) головки в закрытом ящике в безразмерных, относительных единицах (от 0 до 1) описывается следующим выражением

$$A\chi X = \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{Q_{TS}^2} - 2 \left( 1 + \frac{V_{AS}}{V_{\text{BOX}}} \right) \right) \left( \frac{F_s}{f} \right)^2 + \left( 1 + \frac{V_{AS}}{V_{\text{BOX}}} \right)^2 \left( \frac{F_s}{f} \right)^4}. \quad (19)$$

\* Виноградова Э. Л. Конструирование громкоговорителей со слаженными частотными характеристиками. М.: Энергия. — 1978.

Как видно из этой формулы, АЧХ однозначно задается тремя параметрами:

- собственной резонансной частотой головки  $F_s$ ;
- относительным объемом ящика  $V_{\text{BOX}}/V_{AS}$ ;
- собственной добротностью головки  $Q_{TS}$ .

На рис. 3.2 показана серия АЧХ для головки с собственной добротностью  $Q_{TS} = 0,45$ , установленной в ящики различного относительного объема  $V_{\text{BOX}}/V_{AS}$ . Значения объема выбраны таким образом, чтобы результирующая добротность, определяемая формулой (18) и присущая (неявно) в формуле (19), принимала одно из следующих значений:

$$Q_{\text{BOX}} = Q_{TS} \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_{\text{BOX}}}} = 1; 0,707 (= 1/\sqrt{2}); 0,577 (= 1/\sqrt{3}); 0,5.$$

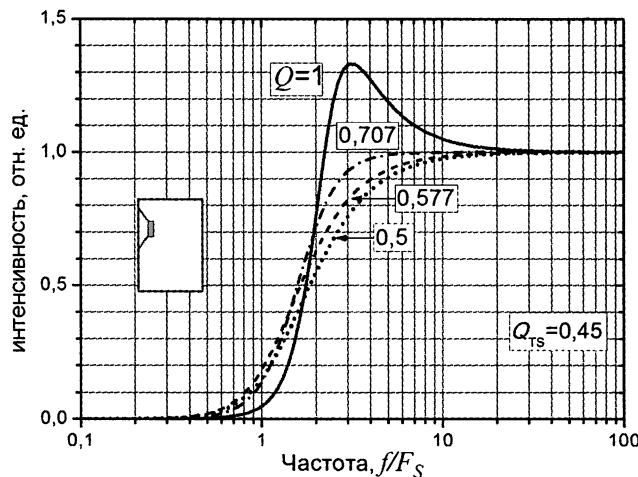
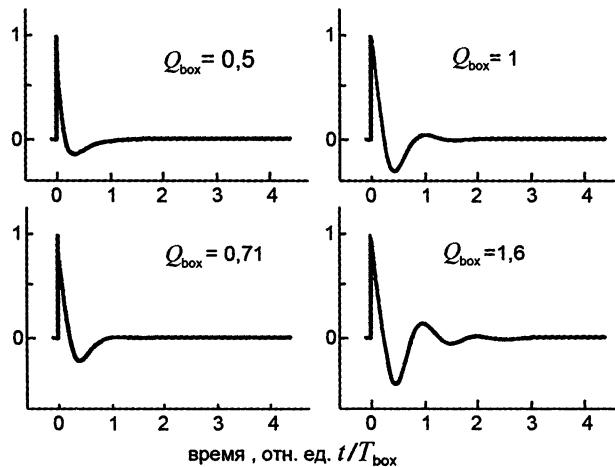


Рис. 3.2. Набор АЧХ различного типа для головки в закрытом ящике

Такие режимы соответствуют упрощению выражения для АЧХ и могут быть охарактеризованы следующим образом (R. Small, 1972, J. Benson, 1971):

- $Q_{\text{BOX}} = 1$ : АЧХ описывается полиномом Чебышева, система имеет отклик с равными пульсациями;
- $Q_{\text{BOX}} = 0,707$ : максимально гладкая АЧХ (функция Баттервота);
- $Q_{\text{BOX}} = 0,577$ : максимально «гладкий» временной отклик (функция Бесселя);
- $Q_{\text{BOX}} = 0,5$ : система с «критическим» затуханием.



**Рис. 3.3.** Поведение динамической головки в закрытом ящике после подачи импульсного сигнала для различных значений добротности системы «головка + ящик»

Чем выше результирующая добротность головки в ящике, тем больше проявляется ее резонансный отклик в АЧХ (рис. 3.2). Одновременно, с повышением добротности выше критического значения 0,5 реакция головки в ящике на прямоугольный импульс начинает постепенно приобретать осциллирующий характер. Поведение головки при подаче импульсного сигнала показано на рис. 3.3, взятом из классической работы Ричарда Смолла 1972 г. «Акустическая система типа закрытый ящик»\*. Здесь время отсчитывается в относительных единицах,  $T_{\text{box}} = 1/F_{\text{box}}$  — характерное собственное время головки в ящике, определяемое ее резонансной частотой.

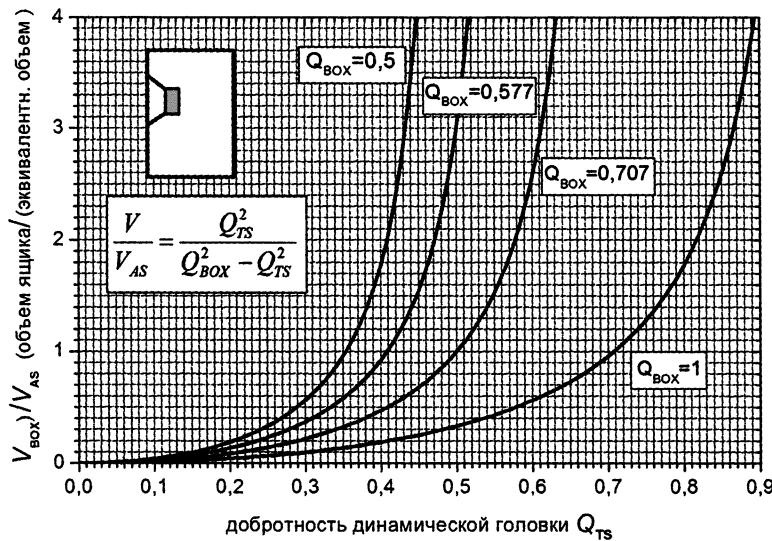
Сопоставление рис. 3.2 и рис. 3.3 помогает понять, как форма АЧХ определяет реакцию системы на импульсное возбуждение.



#### Совет.

*В связи с тем, что при приближении добротности к 1 начинает заметно ухудшаться переходная характеристика акустической системы, рекомендуется при конструировании закрытых ящиков выбирать добротность  $Q_{\text{box}}$  между значениями 0,5 (критическое затухание, при котором еще нет осцилляций) и 0,707 (максимально гладкая АЧХ). В этом интервале заслуживает внимания значение  $Q_{\text{box}} = 0,577$ , обеспечивающее гладкий временной отклик.*

\* R. Small. Closed-box loudspeaker systems. Part I: Analysis. J. Audio Engin. Soc. 1972, v.20, N12, p. 798.



**Рис. 3.4.** Значения объема закрытого ящика, при которых достигаются указанные на графиках величины полной добротности  $Q_{\text{box}}$ , как функции собственной добротности динамической головки  $Q_{\text{TS}}$

Значения относительного объема ящика, при котором достигаются величины результирующей добротности  $Q_{\text{box}} = 1; 0,707; 0,577; 0,5$ , показаны на графиках на рис. 3.4 как функции собственной добротности головки  $Q_{\text{TS}}$ .

Подставляя в формулу (19) для АЧХ значения  $Q_{\text{box}}$  с использованием соотношения (18), можем определить частоту, на которой амплитуда сигнала головки уменьшается в 2 раза, т. е. составляет  $-3$  дБ. Эту частоту среза, определяющую низкочастотную границу рабочей полосы частот, обозначают  $F_3$ .

Для различных характерных значений полной добротности  $Q_{\text{box}}$  можно определить значения  $F_3$  относительно резонансной частоты головки в ящике  $F_{\text{box}}$ :

$$\text{для } Q_{\text{box}} = 0,5 \quad F_3 = 1,554F_{\text{box}};$$

$$\text{для } Q_{\text{box}} = 0,577 \quad F_3 = 1,272F_{\text{box}};$$

$$\text{для } Q_{\text{box}} = 0,707 \quad F_3 = F_{\text{box}}.$$

Отметим, что во всех случаях  $F_3 > F_s$ , потому что  $F_{\text{box}} > F_s$ . Это видно и на рис. 3.2.

### 3.3. Оптимальный объем ящика

#### Оптимальная добротность

Большинство экспертов при расчете закрытого ящика рекомендуют добиваться результирующей добротности  $Q_{\text{BOX}} = 0,707$ . Дело в том, что в этом случае с учетом того, что  $Q_{\text{BOX}} = Q_{\text{TS}} \sqrt{1 + V_{\text{AS}} / V_{\text{BOX}}}$ , один из коэффициентов в формуле (19) обращается в ноль, а именно

$$\frac{1}{Q_{\text{TS}}^2} - 2 \left( 1 + \frac{V_{\text{AS}}}{V_{\text{BOX}}} \right) = 0. \quad (20)$$

Тогда выражение (19) сильно упрощается:

$$A\text{ЧХ} = \frac{1}{1 + \left( 1 + \frac{V_{\text{AS}}}{V_{\text{BOX}}} \right)^2 \left( \frac{F_s}{f} \right)^4} \text{ для } Q_{\text{BOX}} = 0,707. \quad (21)$$

Из условия (20) получаем формулу для нахождения оптимального объема ящика по известным значениям добротности головки и эквивалентного объема:

$$V_{\text{BOX}} = V_{\text{AS}} \frac{2Q_{\text{TS}}^2}{1 - 2Q_{\text{TS}}^2}. \quad (22)$$

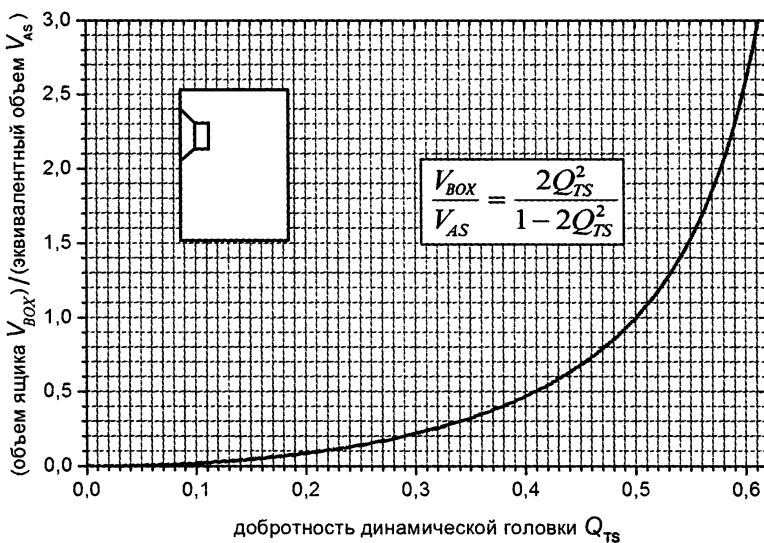
График функции (21) уже был построен на рис. 3.4 (кривая  $Q_{\text{BOX}} = 0,707$ ). Для удобства расчетов, этот график повторен на рис. 3.5 в растянутом масштабе. С его помощью по известным параметрам головки  $Q_{\text{TS}}$  и  $V_{\text{AS}}$  можно быстро определить объем закрытого ящика, при котором полная добротность системы будет равна 0,707.

Обращаю внимание, что для каждой комбинации объема ящика и эквивалентного объема однозначно рассчитывается резонансная частота головки в ящике  $F_{\text{BOX}}$  и совпадающая с ней граничная частота  $F_3$

$$F_3 = F_{\text{BOX}} = F_s \sqrt{1 + \frac{V_{\text{AS}}}{V_{\text{BOX}}}}, \quad (23)$$

причем для определения  $F_{\text{BOX}}$  и  $F_3$  можно воспользоваться рис. 3.1.

Теперь построим АЧХ по формуле (21). Она изображена на рис. 3.6 для четырех различных исходных значений собственной добротности головки. Каждое из этих значений однозначно задает необходимый относительный объем ящика  $V_{\text{BOX}} / V_{\text{AS}}$ . Понятно, что поскольку



*Рис. 3.5. Зависимость оптимального объема закрытого ящика от собственной добротности динамической головки*

добротность системы «ящик + головка»  $Q_{box}$  всегда выше собственной добротности головки  $Q_{TS}$ , для получения  $Q_{box} = 0,707$  необходимо, чтобы выполнялось условие  $Q_{TS} < 0,707$ , а лучшие  $Q_{TS} = 0,4—0,5$ .

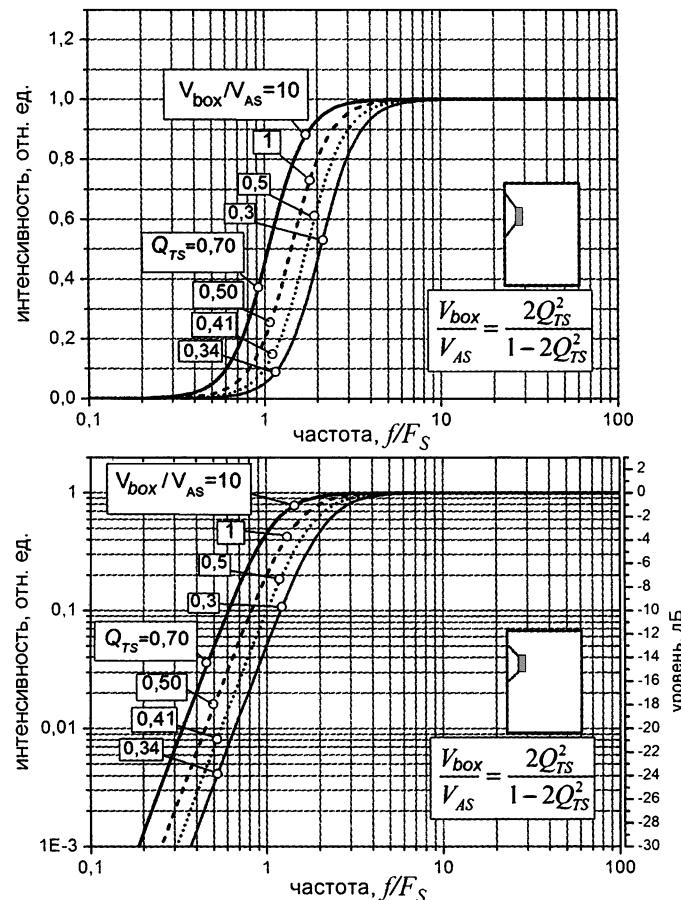


#### Примечание.

Если собственная добротность головки будет близка к 0,7, потребуется очень большой по сравнению с  $V_{AS}$  объем закрытого ящика. Это может быть неосуществимо практически.

Если же собственная добротность головки намного меньше, чем 0,7, то объем ящика будет незначительным, но при этом он может оказаться настолько малым, что при помещении в него головки, ее резонансная частота возрастет недопустимо сильно. Напомню, что резонансная частота и добротность головки в ящике увеличиваются в одно и то же число раз. Т. е. если мы хотим в 2 раза поднять добротность, то неизбежно в 2 раза увеличится и резонансная частота, а вместе с ней и нижняя граничная частота системы  $F_3$ .

На рис. 3.6 видно, что для интервала  $0,34 < Q_{TS} < 0,7$  оптимальный объем закрытого ящика изменяется от  $0,3V_{AS}$  до  $10V_{AS}$ , при этом нижняя граничная частота соответственно изменяется от  $F_3 \approx F_s$  до  $F_3 \approx 2F_s$ , т. е. на целую октаву!



*Рис. 3.6. АЧХ закрытого ящика, объем которого удовлетворяет условию (22):  
а — в линейном масштабе; б — в логарифмическом масштабе*

### Практические примеры

Покажу на примерах, как пользоваться формулами и графиками для выбора динамика и расчета объема ящика. Головка с  $Q_{TS} = 0,5$  — вполне подходящий вариант для построения акустической системы с добротностью  $Q_{TS} = 0,707$ . Объем ящика должен быть равен для этого эквивалентному объему головки.

Нижняя граничная частота по уровню  $-3\text{дБ}$   $F_3$  при этом составит  $1,41F_S$ . Обратимся к табл. 1.2 (приведенной ранее). Этот случай соответствует динамику SLS 830668 (фирма «Peerless», диаметр 25 см, резонансная частота 33 Гц, эквивалентный объем 69 л, стоимость

100 долл.). Для получения  $Q_{TS} = 0,707$  берем ящик объемом 69 л, нижняя частота по уровню  $-3\text{дБ}$  составит 46 Гц.

Еще один пример головки с  $Q_{TS} = 0,5$  — «Morel» CAW 938 диаметром 20 см. При таком же объеме ящика нижняя частота по уровню  $-3\text{дБ}$  для этой головки составит 41 Гц. Это — лучше. Однако головка «Morel» стоит в 1,7 раз дороже.

Для головок с меньшим значением  $Q_{TS}$  необходимый объем ящика окажется меньше, чем  $V_{AS}$  (это хорошо!), но нижняя граница в этом случае окажется еще выше (это плохо).

Например, для головки с  $Q_{TS} = 0,4$  имеем:  $V_{BOX} = 0,5V_{AS}$ ;  $F_3 \approx 1,7F_s$ . Это соответствует динамику «Hertz» ES300 (диаметр 30 см,  $V_{AS} = 90$  л). Объем ящика составит 45 л, а резонансная частота будет равна 47 Гц.

### 3.4. АЧХ для закрытого ящика произвольного объема

Что делать, если условие  $\frac{V_{BOX}}{V_{AS}} = \frac{2Q_{TS}^2}{1-2Q_{TS}^2}$  не выполнено и «выставить» значение полной добротности системы  $Q_{BOX} = 0,707$  не удается? Например, нет подходящей головки, или добротность приобретенной головки оказалась отличной от ее номинального значения. Или есть желание использовать уже имеющийся готовый ящик, а выбор головок невелик. Как будет выглядеть АЧХ? И как это отразится на звучании?

Строим функцию (19) для диапазона собственной добротности головки  $Q_{TS} = 0,3—0,7$  (рис. 3.7) для разных объемов ящика: от  $V_{BOX} / V_{AS} = 0,3$  до  $V_{BOX} / V_{AS} = 2$ .

Чтобы проще было сравнивать различные АЧХ, графики на рис. 3.7 построены в линейном масштабе по интенсивности. Так лучше заметно различие АЧХ при небольших изменениях добротности головки. Чтобы дать представление, как выглядят такие графики в стандартном «децибелевом» представлении, на рис. 3.8 представлен один из этих графиков. Выбран режим  $V_{BOX} = V_{AS}$ .

Из этих графиков можно сделать вполне определенные выводы.

**Вывод 1.** Головки с высокой добротностью ( $0,6—0,7$ ) можно устанавливать только в большие ящики. В малых ящиках заметное повышение добротности вследствие добавления упругости воздуха в ящике

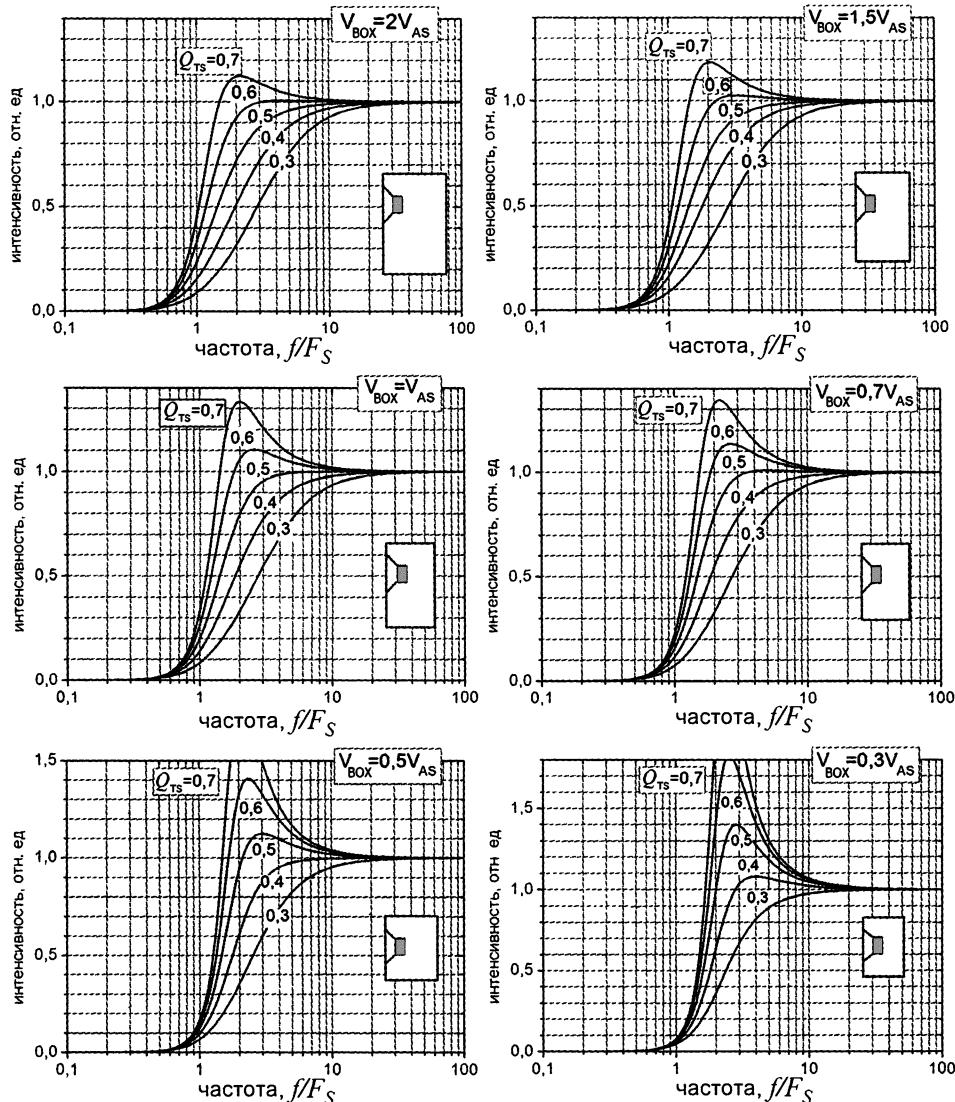
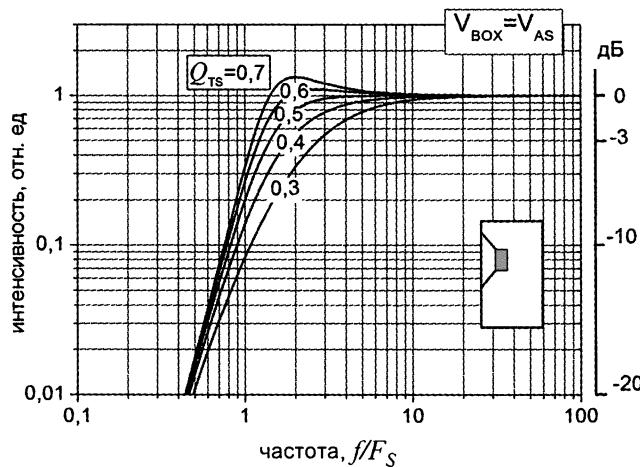


Рис. 3.7. АЧХ динамических головок с различной собственной добротностью в закрытых ящиках объемом  $V_{\text{BOX}} = 0,3-2V_{\text{AS}}$

к упругости головки приведет к сильному подъему АЧХ на частотах  $f = 2-3F_s$ . Головки с очень высокой добротностью (более 0,7) лучше вообще не использовать в оформлении «закрытый ящик».

**Вывод 2.** Для получения конечной добротности системы 0,707 оптимальны головки с добротностью 0,4—0,5. Даже если не удастся



**Рис. 3.8. АЧХ динамических головок с различной собственной добротностью в закрытом ящике объемом  $V_{\text{box}} = V_{\text{AS}}$  в двойном логарифмическом масштабе**

получить точно значение полной добротности 0,707, вы получите гладкую АЧХ в широком диапазоне объемов ящика:

- для  $Q_{\text{TS}} = 0,4$  — в объемах  $V_{\text{box}} = 0,4 - 3V_{\text{AS}}$ ;
- для  $Q_{\text{TS}} = 0,5$  — в объемах  $V_{\text{box}} = 0,7 - 3V_{\text{AS}}$ .

**Вывод 3.** Головки с очень низкой добротностью могут неплохо работать в ящиках малого объема (порядка  $0,3V_{\text{AS}}$ ). Интересно, что вопреки интуитивному ощущению, увеличение объема ящика вовсе не обязательно приводит к понижению нижней граничной частоты  $F_3$ ! На рис. 3.7 хорошо видно, что, например, для значения  $Q_{\text{TS}} = 0,4$  (головка «Hertz» ES300, диаметр 30 см,  $V_{\text{AS}} = 90$  л) с увеличением объема ящика выше оптимального  $V_{\text{box}} = 0,5V_{\text{AS}}$ , обеспечивающего добротность системы 0,707, нижняя граничная частота не понижается, а наоборот — *увеличивается*. Это связано с изменением формы АЧХ при изменении относительного объема ящика. Заметим, что резонансная частота головки в ящике с ростом объема *понижается*.

Эти советы помогут вам получить предсказуемый результат, избежать бубнения в ящиках завышенного объема и обрезания нижнего диапазона в ящиках заниженного объема. Но если при выборе головки и объема ящика вы точно выполните условие  $\frac{V_{\text{box}}}{V_{\text{AS}}} = \frac{2Q_{\text{TS}}^2}{1-2Q_{\text{TS}}^2}$  (см. рис. 3.5), то получите не только глубокий бас, но и прекрасные импульсные характеристики!

**Совет.**

Если головка имеет  $Q_{TS} = 0,4—0,5$ , то ее можно «выводить» на  $Q_{BOX} = 0,707$ , выбрав объем ящика по графику на рис. 3.5. Если же  $Q_{TS}$  ниже, то для того, чтобы делать  $Q_{BOX} = 0,707$  придется головку поместить в очень маленький ящик. При этом нижняя граничная частота сильно уйдет вверх. Поэтому головки с малым  $Q_{TS}$  можно пробовать устанавливать в ящик с планируемой полной добротностью системы 0,5 или 0,577, выбирая значение объема ящика по графикам на рис. 3.4.

Может получиться интересное звучание с повышенной четкостью воспроизведения басовых нот!

### 3.5. Когда фазоинвертор становится похожим на закрытый ящик?

Теория акустических систем типа «фазоинвертор» разрабатывалась примерно полвека назад несколькими специалистами в области аудиотехники: Дж. Бенсоном (J. E. Benson), Р. Смоллом (R. Small), Дж. Новаком (J. Novak), Н. Тиле (N. Thiele). Основополагающая работа австралийского ученого Невилла Тиле 1961 г., безусловно, относится к числу шедевров мировой аудиолитературы\*. В этом разделе приведены некоторые рекомендованные им варианты фазоинверторов. В разных версиях эти рекомендации можно найти в книгах А. А. Петрова,\*\* Э. Л. Виноградовой\*\*\*, И. А. Алдошиной и В. Г. Войшвило\*\*\*\*.

Фазоинвертор представляет собой герметичный ящик, в котором имеется труба, установленная внутри ящика с выходом наружу. Эта труба называется портом фазоинвертора. Принцип работы фазоинвертора состоит в том, что на частотах вблизи резонансной частоты головки порт сам становится источником звука, направляя вперед

\* A. N. Thiele. Loudspeakers in vented boxes. Part I. *Proceedings of the IRE Australia*, vol.22, pp. 487—508 (Aug. 1961). Reprinted in *J. Audio Eng. Soc.*, vol.19, pp. 382—392, May 1971.

\*\* Петров А. А. Звуковая схемотехника для радиолюбителей. — СПб.: Наука и Техника. — 2003.

\*\*\* Виноградова Э. Л. Конструирование громкоговорителей со слаженными частотными характеристиками. М.: Энергия. — 1978.

\*\*\*\* Алдошина И. А., Войшвило В. Г. Высококачественные акустические системы и излучатели. М.: Радио и связь. — 1985.

излучение тыльной стороны динамической головки. Для этого порт должен иметь определенную длину и поперечное сечение, задаваемые желаемой частотой его настройки и объемом воздуха в ящике.

Параметрами порта как колебательной системы выступают масса воздуха внутри порта и упругость воздуха внутри ящика.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) акустической системы типа «фазоинвертор» сложнее, чем АЧХ закрытого ящика (формула (19)) и в отличие от формулы (19) содержит в знаменателе слагаемые, пропорциональные  $f^6$  и  $f^8$ . Такая АЧХ соответствует ВЧ-фильтру четвертого порядка. АЧХ фазоинвертора характеризуется расширением спектра воспроизводимых частот в сторону низких частот.

Частота  $F_3$ , на которой звуковое давление уменьшается в два раза, т. е. на  $-3$  дБ, часто совпадает с резонансной частотой динамика  $F_s$  или даже ниже нее. Однако одновременно происходит резкое уменьшение звукового давления с уменьшением частоты, приводящее к потере «быстроты» и ухудшению «динамики» передачи низкочастотных звуков. Поэтому звучание фазоинвертора очень чувствительно к незначительному изменению его параметров.

Существуют, однако, определенные значения добротности динамической головки, при которых можно так подобрать объем ящика  $V_{\text{BOX}}$  и частоту настройки порта  $F_{\text{BOX}}$ , что АЧХ получится относительно гладкой, а импульсные характеристики — хорошими. Мы рассмотрим 3 из примерно 10 подобных случаев, описанных Невиллом Тиле.

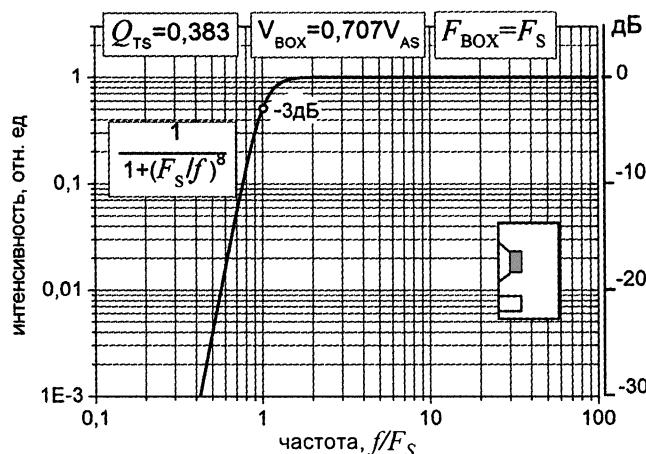
При добротности динамика  $Q_{\text{TS}} = 0,383$ , если выбрать  $V_{\text{BOX}} = 0,707 V_{\text{AS}}$  и  $F_{\text{BOX}} = F_s$ , характеристика имеет следующий вид

$$\text{АЧХ}_{\Phi\text{И}} = \left[ 1 + \left( \frac{F_s}{f} \right)^8 \right]^{-1} \quad (24)$$

для  $Q_{\text{TS}} = 0,383$ ,  $V_{\text{BOX}} = 0,707 V_{\text{AS}}$ ,  $F_{\text{BOX}} = F_s$ .

Она показана на рис. 3.9. Частота  $F_3$ , на которой звуковое давление уменьшается в два раза, т. е. на  $-3$  дБ, точно совпадает с резонансной частотой динамика  $F_s$ .

Среди упоминавшихся в Главе 1 низкочастотных динамических головок две имеют добротность, весьма близкую к требуемому значению. Характеристики этих динамиков, а также объем ящика фазоинвертора для реализации указанного режима, представлены в табл. 3.1.



*Рис. 3.9. Предельно гладкая АЧХ фазоинвертора, достижимая при единственном указанном на графике и в тексте наборе параметров динамика, ящика и порта*

Динамики фирмы «Hertz» (Италия), номинальное сопротивление 4 Ом

Таблица 3.1

Марка	Диаметр D, мм	Стоимость, долл.	Чувствительность Spl, дБ	Полная добротность $Q_{TS}$	Резонансная частота, $F_s$ , Гц	Эквивалентный объем, $V_{AS}$ , л	Объем ящика $V_{BOX} = 0,707V_{AS}$ , л
ES 300	300	150	94	0,38	28	89	63
ES 250	250	120	93	0,37	27	55	39

Среди других важных сочетаний параметров головки и ящика для фазоинверторов, отмеченных Н. Тиле, приведем следующие:

- $Q_{TS} = 0,45$ ,  $V_{BOX} = V_{AS}$  и  $F_{BOX} = F_S$ , при этом  $F_3 = F_S$ ,
- $Q_{TS} = 0,415$ ,  $V_{BOX} = V_{AS}$  и  $F_{BOX} = F_S$ , при этом  $F_3 = 0,9F_S$ .

Типы и параметры динамических головок с близкими к указанным значениями добротности приведены в табл. 3.2.

Динамические головки с добротностью, близкой к значениям 0,45 и 0,415

Таблица 3.2

Марка	Диаметр D, мм	Активное сопротивление $R_e$ , Ом	Резонансная частота, $F_s$ , Гц	Эквивалентный объем, $V_{AS}$ , л	Полная добротность $Q_{TS}$	Чувствительность Spl, дБ	Стоимость, долл.
<b>Динамики фирмы «Peerless» (Дания), номинальное сопротивление 8 Ом</b>							
SLS 830669	Таблица 3.2	8	28	172	0,47	91	125
<b>Динамики фирмы «SEAS» (Норвегия), номинальное сопротивление 8 Ом</b>							
H1288-08	Таблица 3.2	6,1	29	97	0,41	89,5	130

Как рассчитать геометрические размеры порта: площадь сечения порта  $S_{\text{ПОРТ}}$  и его длину  $L_{\text{ПОРТ}}$ ? Интересно отметить, что сосуд с воздухом, имеющий трубку небольшого диаметра, был впервые подробно исследован немецким физиком Германом Гельмгольцем полтора века назад. Такое устройство получило название «резонатор Гельмгольца».



#### Примечание.

*Особенность этого устройства состоит в том, что резонансная частота трубы, присоединенной к сосуду оказывается намного ниже собственной частоты, которую имеет труба без сосуда.*

Иными словами, размер трубы оказывается во много раз меньше резонансной длины волны. Нужная нам формула содержится во многих учебниках по акустике, а самая ранняя ее публикация восходит, по-видимому, к двухтомной монографии Рэлея «Теория звука» 1877 г.\* Площадь сечения и длина порта связаны с частотой настройки  $\Phi$  и  $F_{\text{BOX}}$  и объемом ящика  $V_{\text{BOX}}$  следующим соотношением:

$$\frac{S_{\text{ПОРТ}}}{L_{\text{ПОРТ}}} = V_{\text{BOX}} \left( \frac{2\pi F_{\text{BOX}}}{v} \right)^2, \quad v = 343 \text{ м/с.} \quad (25)$$

Кроме того, порт «как бы» удлиняется за счет изменения условий движения воздуха на его выходном отверстии. Это удлинение зависит от площади порта и равно  $\Delta L = 0,825 \sqrt{S_{\text{ПОРТ}}}$ . На эту величину порт нужно укоротить по сравнению с длиной, рассчитанной по формуле (25).

Обычно параметры порта рассчитывают, пользуясь графиками или номограммами. Такие графики представлены на рис. 3.10. В левой части рисунка построены зависимости отношения  $S_{\text{ПОРТ}}/L_{\text{ПОРТ}}$  по формуле (25) для различных значений объема ящика. В правой части построена связь этого отношения с длиной порта для ряда значений площади порта с учетом поправки на краевой эффект.

Пользоваться этими графиками очень просто. Пример показан стрелками и соответствует динамику ES300 из табл. 3.1. Задаемся частотой порта ( $F_{\text{BOX}} = 28$  Гц) и объемом ящика ( $V_{\text{BOX}} = 63$  л) и определяем отношение  $S_{\text{ПОРТ}}/L_{\text{ПОРТ}} = 1,6$  см. Затем перемещаемся на правую

\* Стрейтт Дж.В. (Лорд Рэлей) Теория звука (в 2-х т.). М.: Гостехиздат. — т. 2., с. 172.

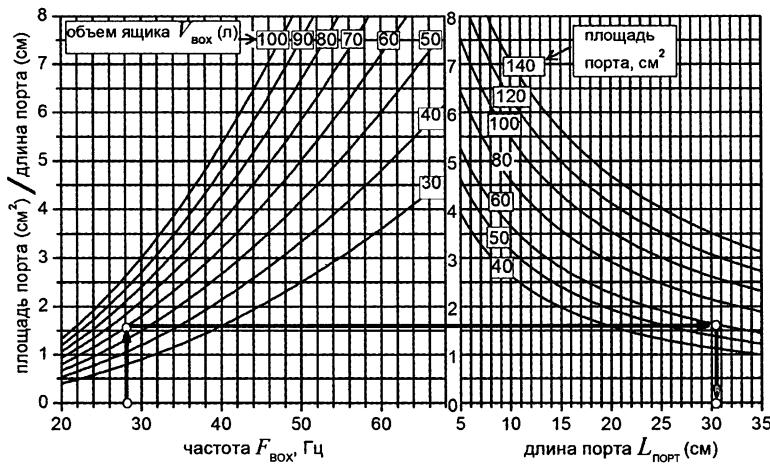


Рис. 3.10. Графики для расчета параметров порта фазоинвертора по заданным объему ящика и частоте настройки ФИ

часть рисунка и для данного отношения выбираем комбинацию  $S_{\text{ПОРТ}}$  ( $60 \text{ см}^2$ ) и  $L_{\text{ПОРТ}}$  ( $31 \text{ см}$ ).



#### Внимание.

Объем ящика  $V_{\text{BOX}}$  в расчетах — это объем воздуха в ящике, т. е. внутренний объем ящика минус объем порта минус объем головки!

Правильность настройки фазоинвертора проверяется по результатам измерения зависимости полного электрического сопротивления головки в готовом акустическом оформлении от частоты (рис. 3.11). Минимум сопротивления находится на частоте настройки порта ФИ  $F_{\text{BOX}}$ , и если  $F_{\text{BOX}} = F_s$ , то два максимума сопротивления на графике имеют примерно одинаковую высоту и расположены симметрично относительно  $F_s$ .

Какую комбинацию значений площади порта и его длины предпочтеть из бесчисленного множества их комбинаций для каждого набора значений  $F_{\text{BOX}}$  и  $V_{\text{BOX}}$ ?

*Во-первых*, для того, чтобы собственные моды порта не влияли на его функцию, длина порта ФИ должна быть меньше, чем

$$L_{\text{ПОРТ}} (m) < \frac{1}{12} \lambda_{\text{BOX}} = \frac{1}{12} \frac{\nu}{f_{\text{BOX}}} = \frac{28}{f_{\text{BOX}} (\Gamma u)}.$$

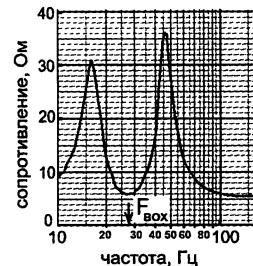


Рис. 3.11. Зависимость полного сопротивления от частоты для головки в АС типа «фазоинвертор»

При частоте настройки ФИ около 30 Гц длина порта должна быть меньше метра, при частоте около 50 Гц — менее полуметра. Это условие выполнить легко и, как правило, оно всегда выполняется автоматически и в самодельных, и в коммерческих системах.

*Во-вторых*, расстояние от внутреннего края порта до ближайшей (обычно задней) стенки не должно быть меньше его диаметра (в случае порта круглого сечения) или минимального поперечного размера (в случае порта прямоугольного сечения).

*В-третьих*, желательно выбрать площадь порта побольше! Вот, что рекомендует в уже цитированной статье Невил Тиле:

*«Единственный совет, который можно дать, это спроектировать площадь порта настолько большой, насколько возможно в конкретных условиях, вплоть до предельного значения, равного эффективной площади диффузора.»*

Такие акустические системы с большой площадью порта проектировали в старых высококачественных АС большого объема. К сожалению, в современных «малолитражных» напольных и полочных фазоинверторных системах это правило обычно нарушается. Как видим, оно нарушается и в выбранном нами примере. Длину порта увеличить нереально.

Итак, для длины порта примерно 30 см глубина ящика должна быть весьма значительной — не менее 40 см! А площадь сечения порта при этом оказывается всего лишь 60 кв. см: для круглого порта диаметр составит всего 8,7 см. И это при эффективном диаметре диффузора более 20 см! Причина такого несоответствия — в очень низкой резонансной частоте современных головок при относительно небольшом эквивалентном объеме головки и, соответственно, небольшом объеме ящика ФИ.

Замечу, что сечение порта вовсе не обязательно должно быть круглым. Оно может быть и прямоугольным. Такая рекомендация также содержится в упомянутой работе Н. Тиле. Предлагаемая им конструкция фазоинвертора показана на рис. 3.12. Рекомендуемые пропорции размеров корпуса связаны с желанием уменьшить призвуки за счет образования стоячих волн.

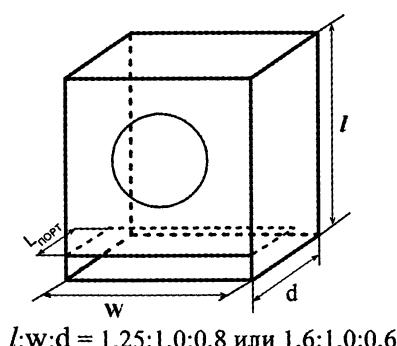


Рис. 3.12. Конструкция фазоинвертора Невилла Тиле

Приведенный пример показывает, что сконструировать хорошую акустическую систему типа «фазоинвертор» вовсе не просто! Сложность изготовления дополнительно увеличивается из-за того, что к сложности выбора параметров головки, размеров ящика и порта добавляется еще и сильная зависимость АЧХ, а значит и звучания, от точности значений каждого из следующих параметров: добротности головки, ее резонансной частоты, эквивалентного объема, объема ящика и частоты его настройки.



#### **Внимание.**

*При изготовлении фазоинвертора необходимо максимально точно знать параметры динамика  $Q_{Tg}$ ,  $V_{AS}$  и  $F_s$ . Как их измерить, написано далее в главе 5. Необходимо точно выдерживать объем  $V_{BOX}$  и частоту настройки  $F_{BOX}$ . Это не всегда удается даже опытным разработчикам-изготовителям акустических систем.*

Что делать, если, измерив зависимость сопротивления от частоты для головки в фазоинверторе, вы обнаружили несоответствие между фактической и нужной частотой? Из формулы (25), используя элементарное дифференциальное исчисление на уровне школы, можно получить приближенные соотношения

$$\frac{\Delta L_{PORT}}{L_{PORT}} = -2 \frac{\Delta F}{F_{BOX}} \Rightarrow \Delta L_{PORT} = -2 L_{PORT} \frac{\Delta F}{F_{BOX}}. \quad (26)$$

Они показывают, на какую величину  $\Delta L_{PORT}$  надо изменить длину порта  $L_{PORT}$ , чтобы частота настройки ФИ  $F_{BOX}$  изменилась на величину  $\Delta F$ . Знак «минус» означает, что для понижения частоты надо увеличивать длину порта, а для повышения частоты — уменьшать длину порта. *Например*, вы сделали порт длиной  $L_{PORT} = 20$  см и получили частоту  $F_{BOX} = 33$  Гц, а требуется  $F_{BOX} = 30$  Гц. Имеем  $\Delta F = -3$  Гц. Подставляя в формулу (26), получаем  $\Delta L_{PORT} = +4$  см, т. е. порт надо удлинить на 4 см. Первая из формул (26) просто содержит утверждение:

*«Относительное уменьшение (увеличение) длины порта должно быть в два раза больше, чем требуемое относительное увеличение (уменьшение) частоты его настройки».*

Т. е. для понижения частоты на 10% надо удлинить порт на 20% и т. д.

### 3.6. Подведем итоги

**Закрытый ящик** является наиболее простым в реализации типом акустического оформления. В то же время закрытый ящик обеспечивает хорошую динамику звучания. К этим очевидным достоинствам добавляется слабая чувствительность АЧХ к отклонениям параметров динамика и ящика от расчетных: малые отклонения приводят к слабому изменению характера звучания.

Недостатком закрытого ящика является неизбежное повышение резонансной частоты динамика, установленного в такой ящик. Как следствие, нижняя граничная частота АС типа «закрытый ящик» всегда будет выше собственной резонансной частоты динамической головки.

В качестве предварительной оценки параметров ящика можно принимать его объем, равный 0,7—1 эквивалентного объема динамической головки, а нижнюю граничную частоту — примерно в 1,4 раза выше резонансной частоты головки.

Плавная зависимость акустических характеристик АС этого типа от параметров ящика и головки позволяет получить удовлетворительные результаты без предварительного точного измерения параметров головки, на основе лишь спецификации производителя.

Для создания АС типа «закрытый ящик» рекомендуются головки с добротностью 0,3—0,55. Необходимый объем ящика может быть найден на основе рис. 3.4 с учетом следующих рекомендаций.

Во-первых, допустимым является результирующая добротность в интервале 0,5—0,75.

Во-вторых, хорошие результаты по динамике звучания и полосе частот получаются при результирующей добротности:

- ◆ 0,707 для головок добротностью 0,45—0,55;
- ◆ 0,577 для головок добротностью 0,35—0,45;
- ◆ 0,5 для головок добротностью ниже 0,35.



#### Примечание.

Надо учитывать, что чем ниже конечная добротность системы, тем выше поднимается ее нижняя частота по сравнению с резонансной частотой головки.

Это значит, что среди головок с пониженной добротностью следует выбирать по возможности головку с более низкой резонансной частотой.

той. Более низкие значения результирующей добротности рекомендуются для головок с более низкой резонансной частотой.

**Положительным свойством «закрытого ящика»** является ограничение максимальной амплитуды колебаний динамической головки на самых низких частотах. У фазоинвертора амплитуда колебаний диффузора ниже частоты  $F_s$  ничем не ограничивается, что может привести к выходу динамика из строя. Для предотвращения такого исхода спектр звукового сигнала часто ограничивают снизу, устанавливая фильтр в усилителе. Это, однако, удлиняет сигнальный тракт, что противоречит основному принципу высококачественного звучания: «ни одной лишней детали в сигнальном тракте!»\*.

**Фазоинвертор** является сложной электромеханической системой, очень чувствительной к небольшим изменениям параметров головки и ящика относительно расчетных. Создание фазоинверторов можно рекомендовать только при условии достаточного опыта, терпения и предварительного измерения параметров головки: резонансной частоты  $F_s$ , эквивалентного объема  $V_{AS}$  и добротности  $Q_{TS}$ .



#### Примечание.

*При равных объемах фазоинвертор всегда обеспечивает более низкую граничную частоту, чем закрытый ящик.*

Граничная частота обычно близка к частоте  $F_s$  или даже меньше ее. Однако АЧХ фазоинвертора характеризуется резким спадом при снижении частоты, что приводит к ухудшению динамики звучания.

Существуют, однако, три специальных случая добротности головки  $Q_{TS} = 0,383$ ,  $Q_{TS} = 0,45$ ,  $Q_{TS} = 0,415$ , при которых можно достичь хорошей «динамичности» фазоинверторов, выбрав следующие значения объема ящика  $V_{BOX}$  и частоты настройки  $F_{BOX}$ :

$$Q_{TS} = 0,383, \quad V_{BOX} = 0,707V_{AS}, \quad F_{BOX} = F_s;$$

$$Q_{TS} = 0,45, \quad V_{BOX} = V_{AS}, \quad F_{BOX} = F_s;$$

$$Q_{TS} = 0,415, \quad V_{BOX} = V_{AS}, \quad F_{BOX} = F_s.$$

Параметры порта фазоинвертора для получения нужной частоты  $F_{BOX}$  рассчитываются с помощью рис. 3.10.

---

\* См. подробнее в книге Гапоненко С. В. Лампово-транзисторные усилители своими руками. СПб.: Наука и Техника. — 2012.

## ГЛАВА 4

# РАСЧЕТ СИСТЕМ ТИПА «ТРАНСМИССИОННАЯ ЛИНИЯ»

*«По мнению энтузиастов и поклонников трансмиссионной линии, заглушенная трансмиссионная линия обла-  
дает нейтральным неокрашенным звучанием, которое не  
достигимо ни с фазоинвертором, ни с закрытым ящиком».*

*Дж. Аугспургер, из доклада на съезде  
Аудиотехнического Общества, Нью-Йорк, 1999*

В начале XXI века акустические системы типа «трансмиссионная линия» завоевали массовые симпатии самодельщиков по всему миру, несмотря на то, что промышленные системы такого типа представлены на рынке весьма редкими моделями некоторых фирм. Причина такой высокой популярности этих систем у самодельщиков — яркое, открытое, динамичное звучание.

Причина низкой популярности таких систем у профессиональных разработчиков — отсутствие развитой теории по сравнению с системами типа «закрытый ящик» или «фазоинвертор». В этой главе описывается принцип работы и методика расчета таких акустических систем, ставшая доступной главным образом, благодаря экспериментам и теоретической модели американского энтузиаста акустических систем этого типа Мартина Кинга.

На основании анализа и обобщения его данных для основной моды расширяющейся и сужающейся линии приведены обобщенные формула и график, позволяющие определить оптимальную длину линии переменного сечения без моделирования и расчета полной амплитудно-частотной характеристики акустической системы.

## 4.1. Акустические моды в трубе

*«Воздух в органной трубе следует рассматривать как столб, колеблющийся почти свободно, причем нижний конец, через который проходит струя воздуха, трактуется сугубо как открытый, а верхний конец — как открытый или закрытый, смотря по тому, что имеет место. Так, длина волны основного тона открытой трубы в четыре раза больше длины трубы. Обертоны трубы — нечетные гармоники».*

*Лорд Рэлей, «Теория звука», 1877 г.*

Акустическая система типа «трансмиссионная линия» представляет собой полую трубу постоянного или переменного сечения, один конец которой закрыт, а второй открыт. Со стороны закрытого конца (или вблизи него) устанавливается динамическая головка. Схема такого акустического оформления с применением полой трубы постоянного сечения показана в верхней части рис. 4.1. Как видно из эпиграфа, такие трубы используются в органах, а их свойства обсуждали более века назад.

В трубе, закрытой с одной стороны и открытой с другой, поддерживаются колебания воздуха с длиной волны, которая удовлетворяет следующим условиям:

- у закрытого конца трубы амплитуда колебаний воздуха равна нулю;
- у открытого конца амплитуда принимает максимальное значение.

Четыре первых типа колебаний (их называют *модами*) показаны в нижней части рис. 4.1. Значения длины волны  $\lambda_N$  этих колебаний имеют следующий вид:

$$\lambda_N = 4L, \frac{4L}{3}, \frac{4L}{5}, \frac{4L}{7}, \dots = \frac{4L}{2N-1}, N = 1, 2, 3, \dots \quad (27)$$

Как видно из рис. 4.1 и из последней формулы, для первой моды в трубе умещается четверть длины волны, для второй моды — три четверти, для третьей моды — пять четвертей и т. д. Для каждой моды в трубе умещается нечетное число четвертей длины волны. Поэтому такое акустическое оформление называют «четвертьволновая трансмиссионная линия».

По-английски это звучит «*Quarter wave transmission line (QWTL)*». Мы будем далее для краткости использовать название «Т-линия», опуская слова «четвертьволновая».

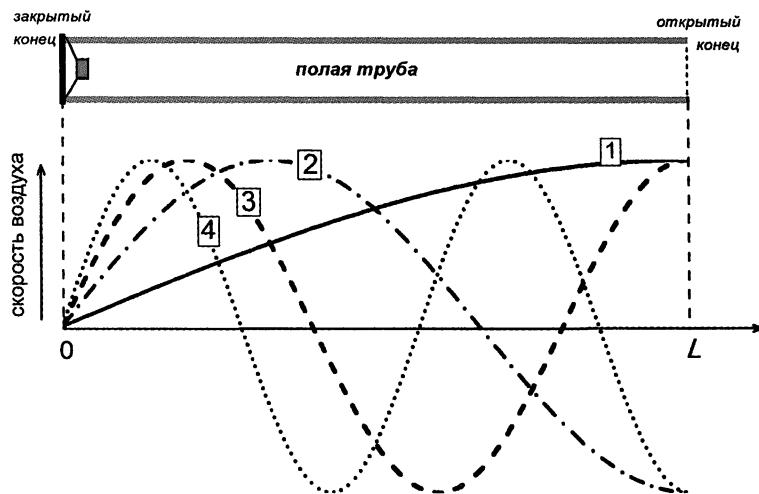


Рис. 4.1. Конструкция трансмиссионной линии и первые 4 моды колебаний



#### Примечание.

Как видно из приведенных выше рассуждений, любая линия, закрытая с одного конца, является четвертьволновой.

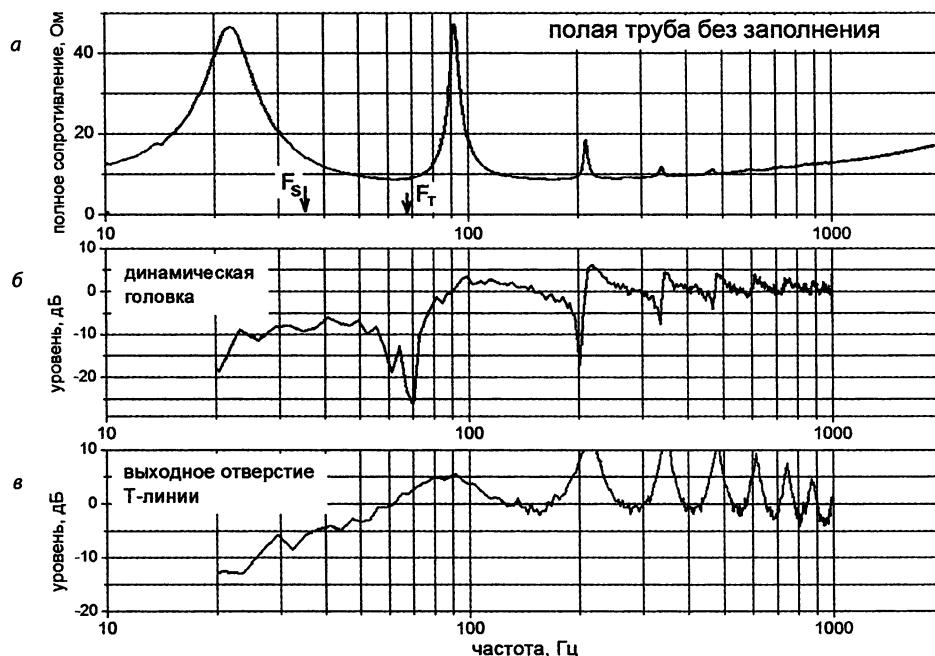
Обращаю внимание, что показанная на рис. 4.1 скорость движения воздуха описывает продольные волны — сжатие и разрежение воздуха вдоль оси трубы. У читателя не должно возникнуть впечатления, будто колебания происходят в поперечном направлении. Звуковые волны в воздухе и в других газах — это продольные, а не поперечные волны.

Чтобы разобраться, как работает четвертьволновая линия, обратимся к эксперименту, поставленному Мартином Кингом в 2002 г.

## 4.2. Эксперимент Мартина Кинга

Мартин Кинг провел серию экспериментов, установив динамическую головку с внешним диаметром 8 дюймов (20 см) с резонансной частотой  $FS = 34$  Гц (длина волны  $\lambda_s = 10,1$  м) в пластиковую трубу\*. Диаметр трубы был равен  $D = 7,25$  дюймов, т. е. примерно равен диаметру диффузора головки.

\* M. King. Test line results. 2002 ([www.quarter-wave.com](http://www.quarter-wave.com)).



**Рис. 4.2.** Результаты эксперимента с полой трансмиссионной линией и головкой Focal 8V 4412 ( $F_s = 34$  Гц,  $Q_{TS} = 0,38$ ,  $V_{AS} = 67$  л):  
а — зависимость полного сопротивления головки от частоты;  
б — зависимость звукового давления головки от частоты;  
в — зависимость звукового давления на выходе Т-линии от частоты

Длина трубы была равна 1,226 м, т. е. несколько меньше, чем  $1/8\lambda_g$ . Дело в том, что эффективная (мы будем говорить «акустическая») длина трубы по отношению к возбуждаемым в ней колебаниям немного больше ее геометрической длины. Такое «удлинение» трубы возникает за счет граничных условий при выходе воздуха из открытого конца трубы\* и составляет  $0,3D$ . С учетом этого эффекта акустическая длина трубы оказалась равной 1,28 м =  $1/8\lambda_g$ . Собственные моды такой трубы соответствуют частотам звука: 67 Гц, 200 Гц, 334 Гц, 467 Гц, 601 Гц, ... .

В эксперименте измерялись зависимости от частоты для:

- ◆ полного сопротивления динамической головки  $Z$ ,
- ◆ звукового давления динамической головки,
- ◆ звукового давления на выходе трубы.

Результаты представлены на рис. 4.2. Они заслуживают подробного обсуждения.

\* N. H. Fletcher and T. D. Rossing. The Physics of Musical Instruments, 2nd ed. (Springer, New York, 1999).

### Зависимость $Z(f)$

Зависимость полного сопротивления динамической головки от частоты  $Z(f)$  (рис. 4.2, а) имеет серию максимумов на частотах: 22 Гц, 94 Гц, 214 Гц, 343 Гц, 475 Гц, 598 Гц.

Эти максимумы интерпретируются следующим образом. Взаимодействие двух колебательных систем — головки, имеющей резонансную частоту 34 Гц ( $F_s$ ), и трубы с основной модой 67 Гц ( $F_t$  на рис. 4.2, а) — приводит к понижению резонансной частоты головки до 22 Гц с одновременным увеличением частоты основной моды трубы до 94 Гц.

Остальные пики соответствуют более высоким модам трубы, слегка сдвинутым в сторону больших частот из-за присутствия динамической головки на одном конце трубы. Отметим, что «расталкивание» основных мод связанных колебательных систем присуще не только для акустических волн, но и для других колебательных систем в механике (связанные маятники), в электротехнике (связанные LC-контуры), в оптике (связанные оптические резонаторы). В акустике подобный эффект имеет место для динамической головки в ящике с отверстием — фазоинверторе.



#### Примечание.

Удивительным является то, что понижение резонансной частоты динамической головки оказалось в точности таким, каким оно должно быть в предположении, что на частоте резонанса воздух в трубе колеблется совместно с диффузором головки.

Таким образом, масса подвижной системы головки увеличивается на величину массы воздуха в трубе. Приведем соответствующий расчет.

Частота собственного резонанса головки в открытом пространстве равна (формула 5) — задача про грузик на пружинке:

$$F_s = \sqrt{\frac{S_{MS}}{M_{MS}}}.$$

При присоединении дополнительной массы воздуха  $M_{возд}$  новая частота будет равна

$$F_s^* = \sqrt{\frac{S_{MS}}{M_{MS} + M_{возд}}} = F_s \sqrt{\frac{M_{MS}}{M_{MS} + M_{возд}}}.$$

Масса воздуха в трубе равна произведению объема трубы на плотность воздуха. Плотность воздуха составляет 1,2 г/л, а объем — 33 литра. Масса воздуха в трубе составит  $1,2 \times 33 = 40$  г! Это почти в два раза больше собственной массы подвижной системы головки, равной 22 г. Постановка этих величин в формулу для резонансной частоты и дает наблюдаемое уменьшение частоты примерно в 1,5 раза.

### Звучание головки и трубы

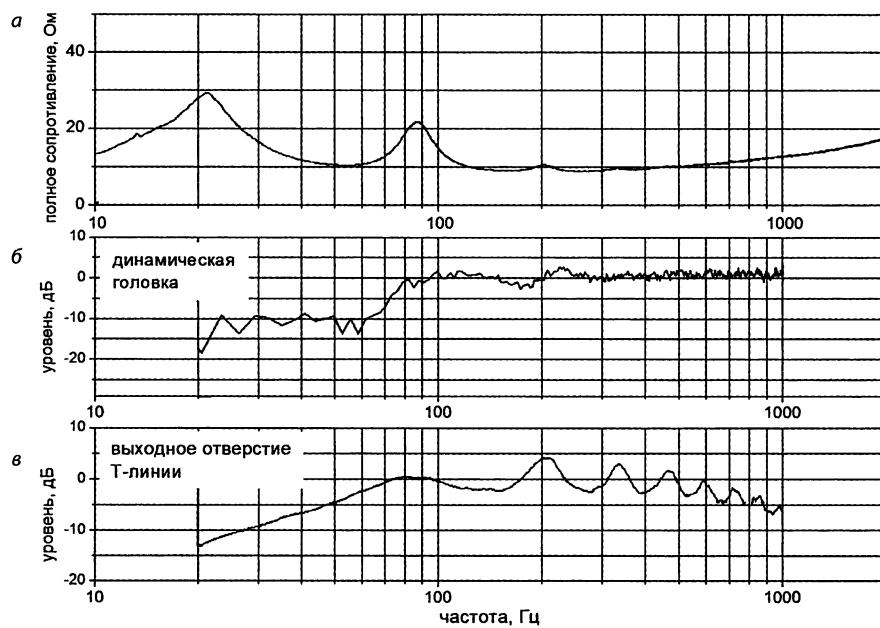
Зависимость звукового давления головки от частоты (рис. 4.2, б) имеет ярко выраженные провалы на частотах, соответствующих собственным модам трубы. На этих же частотах «поет» труба: звуковое давление на выходе трубы для этих частот имеет максимумы.

### Подавление нежелательных резонансов

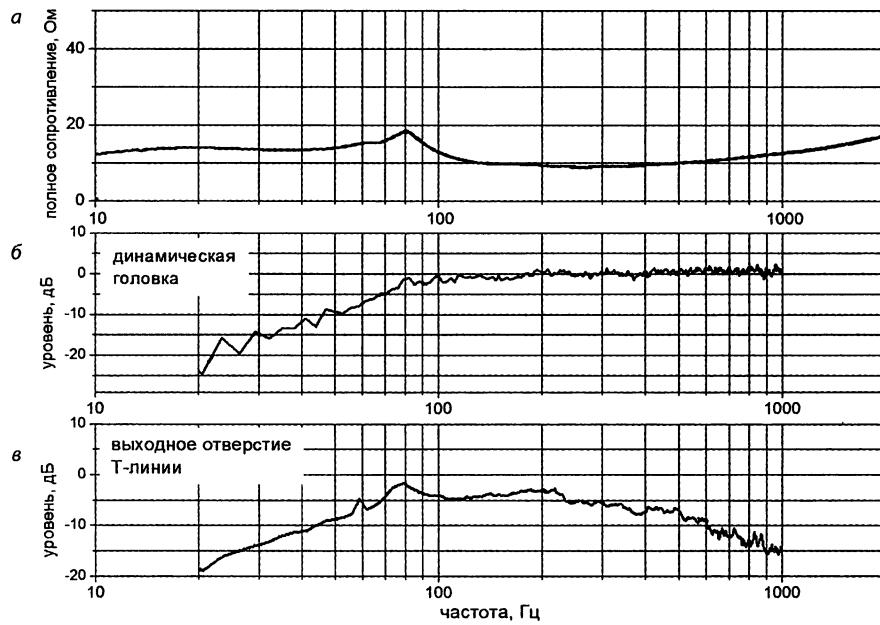
После того, как стало понятно взаимодействие динамической головки с воздухом в трубе, М. Кинг проделал аналогичную серию измерений с трубой, заполненной волокнистым материалом плотностью от 3 до 9 г/дм<sup>3</sup> (рис. 4.3 и рис. 4.4). Отметим, что это соответствует используемому для домашнего изготовления подушек и одеял материалу «файбертек», доступному в наших торговых центрах.

Заполнение трубы указанным материалом уменьшает проявление резонансов. При заполнении материалом плотностью 9 г/дм<sup>3</sup> АЧХ динамической головки приобретает ровный вид с плавным уменьшением отдачи с понижением частоты — примерно -12 дБ на октаву (рис. 4.4, б). Плавный спад АЧХ с понижением частоты обеспечивает хорошую импульсную характеристику — лучше чем акустические системы типа фазоинвертор, в которых резкий спад АЧХ приводит к искажению импульсных сигналов. Сравните рис. 4.4, б с рис. 3.9 из предыдущей главы.

Понижение отдачи головки частично компенсируется звучанием трубы. При более низких значениях плотности заполнения, резонансы ослабляются в меньшей степени, причем частоты резонансов не изменяются. Это означает, что волокнистый материал в трубе не «тормозит» распространение звука и не изменяет, поэтому воспринимаемую звуковой волной длину трубы. Иными словами, волокна колеблются в такт с колебаниями диффузора.



*Рис. 4.3. Результаты эксперимента с полой трансмиссионной линией и головкой Focal 8V 4412 ( $F_s = 34$  Гц,  $Q_{TS} = 0,38$ ,  $V_{AS} = 67$  л), с заполнением Т-линии материалом плотностью 3 г/дм<sup>3</sup>*



*Рис. 4.4. Результаты эксперимента с полой трансмиссионной линией и головкой Focal 8V 4412 ( $F_s = 34$  Гц,  $Q_{TS} = 0,38$ ,  $V_{AS} = 67$  л), с заполнением Т-линии материалом плотностью 9 г/дм<sup>3</sup>*

### Выводы из экспериментов

Акустическое оформление типа «Т-линия» приводит к появлению серии резонансов в спектре полного сопротивления головки и ее звукового давления.

Самый низкий по частоте резонанс соответствует резонансной частоте головки, уменьшенной за счет присоединения массы воздуха в Т-линии к массе подвижной системы головки.

Второй по частоте резонанс соответствует резонансной частоте «Т-линии», увеличенной вследствие взаимодействия с динамической головкой.

На частотах, соответствующих собственным колебаниям Т-линии, звучание (уровень звукового давления) головки минимально, а звучание (уровень звукового давления) выходного отверстия Т-линии максимально.

Заполнение Т-линии волокнистым материалом уменьшает проявление резонансов, не изменяя их частот.

## 4.3. Основный принцип трансмиссионной линии

Основной принцип применения трансмиссионной линии состоит в том, чтобы уменьшить амплитуду колебаний динамической головки в области самых низких частот вблизи ее резонансной частоты  $F_s$  с одновременной компенсацией уменьшения отдачи головки за счет собственных колебаний трансмиссионной линии длиной  $L$  в ее основной, самой низкой по частоте моде.

Для этого длина Т-линии должна совпадать с четвертью длины волны звуковых колебаний на частоте собственного резонанса динамической головки, т. е.

$$\text{длина линии } L = \frac{1}{4} \lambda = \frac{1}{4} \frac{\text{скорость звука (м/с)}}{\text{резонансная частота головки (Гц)}}. \quad (28)$$

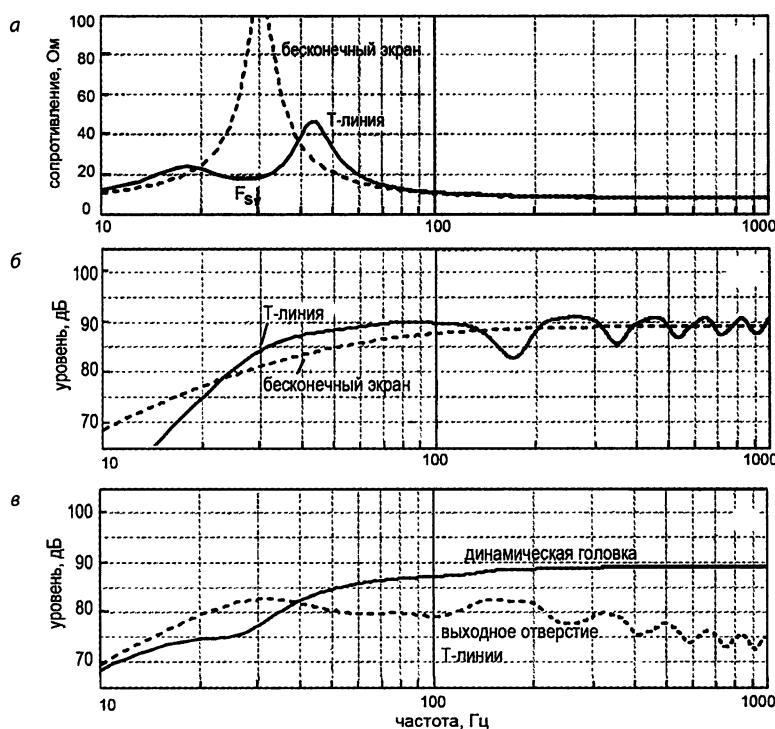
Здесь  $L$  — т. н. акустическая длина, которая превышает реальную, геометрическую длину линии примерно на величину:

$$\text{«удлинение» Т-линии} = 0,3 \sqrt{S}, \quad (29)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения Т-линии.

Все остальные моды (типы колебаний) Т-линии являются нежелательными и должны быть максимально ослаблены. Самая интенсивная мода имеет длину волны  $4L/3$  (формула 27), а максимальная амплитуда ее колебаний находится примерно на расстоянии  $L/3$  от начала линии (мода 2 на рис. 4.1). Поэтому ее проявление можно очень эффективно ослабить, если установить динамическую головку не в начале Т-линии, а на расстоянии примерно  $L/3$  от начала.

На основную, полезную моду в «трубе» такое смещение головки повлияет лишь незначительно, так как перемещение головки во много (в 12 раз) раз меньше длины волны колебаний основной моды в «трубе». Остальные нежелательные моды «трубы» гасятся заполнением волокнистым материалом не очень высокой плотности по сравнению с плотностью воздуха.



*Рис. 4.5. Результат моделирования оптимизированной АС типа «трансмиссионная линия» (данные М. Кинга):*

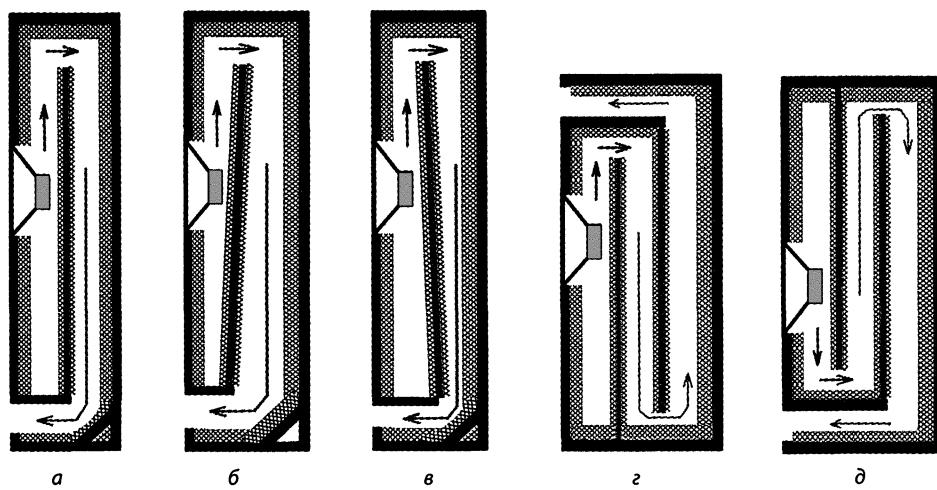
*а — зависимость полного сопротивления головки от частоты для головки, установленной в Т-линии (сплошная кривая) и в бесконечном плоском экране (пунктир); б — зависимость звукового давления от частоты в дальней зоне для головки в АС типа «Т-линия» (сплошная кривая) и в бесконечном экране (пунктир); в — зависимость звукового давления от частоты в ближней зоне для динамической головки (сплошная кривая) и Т-линии*

На рис. 4.5 представлены результаты М. Кинга, полученные при моделировании Т-линии, выполненной по указанным выше принципам с головкой  $F_s=30$  Гц. Ключевым для понимания работы Т-линии является рис. 4.5, в, где четко видно, что уменьшение отдачи головки на ее собственной резонансной частоте (30 Гц) компенсируется звуком, выходящим из отверстия Т-линии.

#### 4.4. Конструкции АС типа «Т-линия»

Для частоты 40 Гц длина Т-линии должна составлять примерно 2 метра. Поскольку в жилом помещении установить акустическую систему такого размера нереально, Т-линию обычно «переламывают» и делают двух-, а иногда трехсекционной.

Практические конструкции таких акустических систем показаны на рис. 4.6. Сечение Т-линии может быть как постоянным (рис. 4.6, а), так и переменным — с расширением (рис. 4.6, б) или с сужением (рис. 4.6, в). Головку располагают примерно на расстоянии 1/3 длины линии от ее начала. Выход Т-линии может находиться как снизу (наиболее типичное решение), так и сверху (рис. 4.6, г).



*Рис. 4.6. Конструкции АС типа «трансмиссионная линия»:*  
 а — двухсекционная линия постоянного сечения; б — двухсекционная линия с расширением;  
 в — двухсекционная линия с сужением; г — трехсекционная линия с выходом сверху;  
 д — трехсекционная линия с выходом снизу

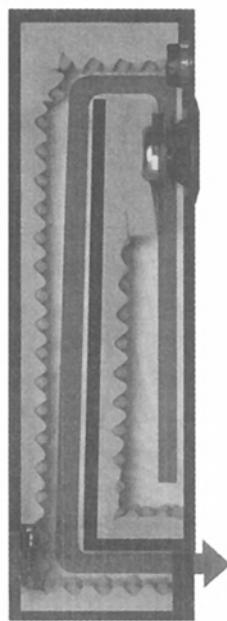
Внутреннюю поверхность «трубы» обязательно тщательно оклеивают звукопоглощающим материалом. Можно использовать самодельные стеганые маты из файбертека, похожие на куски одеяла, искусственное, а еще лучше — шерстяное ковровое покрытие или мех. В крайнем случае — поролон. Кроме того, часть «трубы» от ее начала до динамической головки, т. е. примерно на 1/3 ее длины, равномерно заполняют волокнистым материалом средней плотности, например, типа «файбертек», для подавления нежелательных резонансов.

Объем «трубы» приблизительно (в пределах ±20—30%) равен эквивалентному объему головки. Сечение трубы приблизительно равно или в 1,3—2 раз больше эффективной площади диффузора.

Труба настраивается на четверть длины волны на резонансной частоте головки. Для этого она должна быть примерно на 5—10 см короче, чем четверть длины волны, так как труба «удлиняется» за счет изменения условий колебаний воздуха на границе трубы-воздух. «Акустическая» длина трубы оказывается больше ее геометрической длины. Точная настройка в резонанс не требуется.

Можно настраивать Т-линию немного ниже резонансной частоты головки. Так поступают разработчики фирмы «PMC» — Professional Monitor Company. Эта фирма изготавливает акустические системы для профессиональных звукозаписывающих студий и достаточно дорогие системы для домашнего пользования. Она изготавливает исключительно системы типа «трансмиссионная линия».

На рис. 4.7 показан разрез такой акустической системы, из которого ясно видно ее устройство и подход к заполнению внутреннего объема наполнителем. Динамик находится со стороны закрытого конца на расстоянии примерно 1/3 от длины линии. Наполнитель сконцентрирован непосредственно в месте расположения динамика, а также на изломе линии в верхней части акустической системы. Видно также, что линия немного сужается. Внешний вид этой акустической системы был показан ранее на рис. 2.4. Поверхность наполнителя имеет рельеф размером порядка 3—5 см для



*Рис. 4.7. Акустическая система фирмы PMC в разрезе (PMC Ltd. Brochure No. 5366, 2008)*

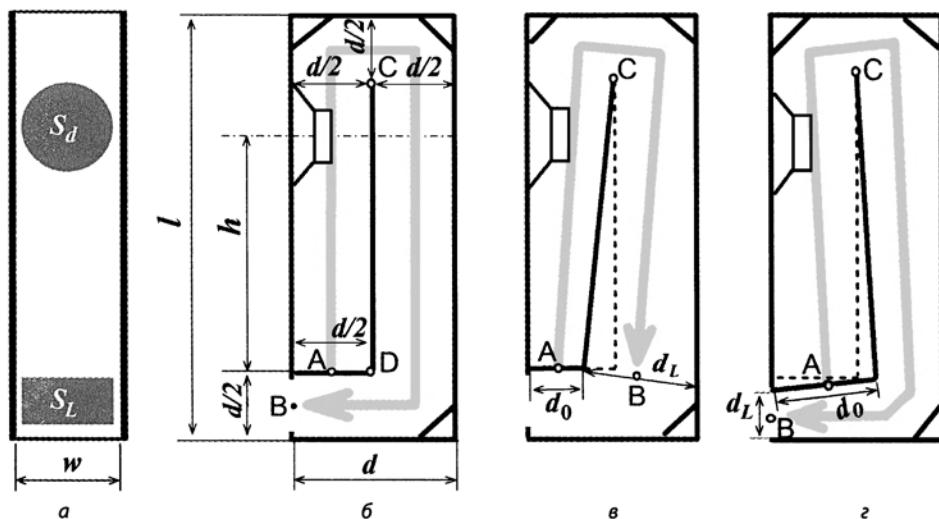


Рис. 4.8. Расчет параметров двухсекционной Т-линии:  
а — вид спереди; б — вид сбоку — линия постоянного сечения;  
в — вид сбоку — линия с расширением; г — вид сбоку — линия сужением

дополнительного подавления нежелательных отражений в поперечном направлении (устранение образования стоячих волн между параллельными стенками ящика).

#### 4.5. Расчет параметров Т-линии

Акустические системы типа «трансмиссионная линия» проектируют в напольном варианте. Для построения акустической системы используют прямоугольный корпус с отношением высоты к ширине примерно 4. Ширина корпуса обычно незначительно превышает диаметр динамической головки, а высота задается главным образом рекомендуемым расположением динамической головки на уровне немного ниже уровня головы сидящего человека, т. е. 65—75 см от пола.

При таком подходе наиболее разумным представляется изготовление двухсекционной трансмиссионной линии, как показано на рис. 4.8. Показанное на рисунке «глаживание» углов в местах поворота воздушного потока не является обязательным.

Проще всего в домашних условиях рассчитать и изготовить Т-линию постоянного сечения (рис. 4.8, б). Геометрическая длина линии равна сумме отрезков от точки А до точки В. Как видно из

рисунка, она равна удвоенной высоте АС, т. е.  $2l$ . Точка С должна быть равноудалена от передней, верхней и задней стенок ящика, как показано на рисунке. Акустическая длина линии рассчитывается по формуле (28).

Для ряда значений резонансной частоты динамической головки значения акустической длины приведены в табл. 4.1.



#### Примечание.

*Акустическая длина может примерно на 10—15 процентов превышать расчетную, т. е. Т-линию можно настраивать немного ниже частоты резонанса головки.*

*Акустическая длина Т-линии для различных значений  
резонансной частоты головки*

*Таблица 4.1*

Резонансная частота динамической головки F <sub>s</sub> , Гц										
20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Резонансная длина волны, м										
17,5	13,7	11,4	9,80	8,57	7,62	6,86	6,24	5,72	5,28	4,90
Акустическая длина трансмиссионной линии, м										
4,25	3,40	2,83	2,44	2,13	1,90	1,70	1,55	1,42	1,31	1,22

«Акустическая» длина трубы превышает ее геометрическую длину примерно на 5—10 см. Для ящика с динамической головкой диаметром 16,5 см можно принять удлинение равным 5—6 см. Для ящика с динамической головкой диаметром 20 см — принять удлинение равным 10 см.

Таким образом требуемая геометрическая длина, т. е. расстояние между точкам А и В на рис. 4.10, б оказывается на 5—10 см меньше расчетного значения, указанного в табл. 4.1.

Глубина акустической системы  $d$  выбирается из условия примерного равенства или некоторого превышения площади поперечного сечения линии по сравнению с эффективной площадью  $S_d$  диффузора головки, т. е.

$$w \cdot d / 2 = (1 \dots 1,5) S_d \approx D^2, \quad (30)$$

где  $D$  — полный диаметр диффузора. Например, для головки диаметром 20 см можно выбрать ширину АС  $w = 25$  см, а глубину  $d = 20$  см.

Все размеры — внутренние, т. е. указанная глубина не учитывает толщины перегородки.

Положение динамической головки выбирается на расстоянии

$$h \approx \frac{1}{3}L \approx \frac{2}{3}l.$$

Двухсекционная трансмиссионная линия рекомендуется для домашнего изготовления единичных экземпляров акустических систем главным образом потому, что в такой линии можно на слух подбирать варианты заполнения внутреннего объема для погашения нежелательных резонансных пиков в АЧХ. Для этого верхнюю и нижнюю крышку не укрепляют окончательно, а лишь максимально плотно прижимают: верхнюю с помощью груза массой 20—25 кг (ящик с песком или различные гири), а нижнюю — под действием веса АС с указанным грузом сверху.

При высоте колонки  $l = 1$  м акустическая длина двухсекционной линии составит  $2l+0,1\text{ м}=2,1\text{ м}$ . Как видно из табл. 4.1, нижняя частота настройки трансмиссионной линии составит примерно 40 Гц. При высоте 80 см нижняя граница составит 50 Гц. С учетом отмеченной выше возможности настройки Т-линии несколько ниже резонансной частоты головки, выбор динамических головок для трансмиссионной линии постоянного сечения достаточно велик.

Можно ли понизить частоту настройки Т-линии до 25—30 Гц, не удлиняя ее добавлением третьей секции? Оказывается, можно! Для этого надо использовать *сужающуюся* Т-линию (рис. 4.8, г).

## 4.6. Расчет Т-линии переменного сечения

*Высота звука повышается [...] расширением трубы.*

*Лорд Рэлей, «Теория звука», 1877 г.*

### Таблицы и формулы

Мартин Кинг разработал математическую модель трансмиссионной линии переменного сечения и провел всесторонний анализ работы такой линии на основе численного расчета АЧХ для линий с различным коэффициентом сужения и расширения в интервале

$$0,1 \leq S_L / S_0 \leq 10,$$

где  $S_L$  — площадь сечения на выходе, а  $S_0$  — в начале Т-линии. Результаты расчетов приведены в табл. 4.2\*. Расчеты показали, что:

- акустическая длина сужающейся линии *больше* ее геометрической длины;
- акустическая длина расширяющейся линии *меньше* ее геометрической длины.

Это хорошо видно из табл. 4.2. Для всех частот при  $S_L/S_0 = 1$  акустическая длина линии в точности равна четверти длины волны для частоты резонанса. Для  $S_L/S_0 < 1$  акустическая длина увеличивается и при  $S_L/S_0 = 0,1$  акустическая длина примерно в 1,7 раз превышает ее геометрическую длину. При таком сужении линии при ее геометрической длине 2 м частота настройки составит уже не 42 Гц (случай линии постоянного сечения), а 27 Гц!

Для расширяющейся линии происходит обратный эффект. Чем сильнее расширение, тем больше повышается резонансная частота линии в сравнении с частотой для Т-линии постоянного сечения. Например, для  $S_L/S_0 = 10$  для линии с геометрической длиной 2 м вместо 42 Гц, присущих линии постоянного сечения, имеем 60 Гц.

Есть ли в таком случае смысл применять вообще расширяющуюся линию? Ответ положительный. Дело в том, что:

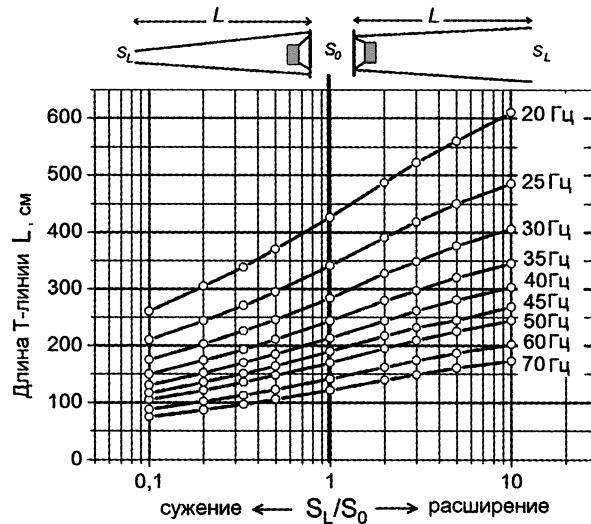
- расширяющаяся линия дает повышенную громкость звучания;
- сужающаяся линия дает пониженную громкость по сравнению с линией постоянного сечения.

*Длина трансмиссионной линии (в метрах) для различных коэффициентов сужения-расширения линии  $S_L/S_0$ , для разных значений резонансной частоты (по расчетам М. Кинга)*

Таблица 4.2

$S_L/S_0$	Резонансная частота, Гц										
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
	Длина волны, м										
10	6,10	4,85	4,06	3,47	3,03	2,69	2,45	2,20	2,02	1,87	1,73
5	5,60	4,50	3,76	3,20	2,81	2,45	2,25	2,04	1,87	1,73	1,61
3	5,22	4,18	3,48	2,97	2,62	2,32	2,09	1,90	1,74	1,61	1,49
2	4,87	3,91	3,27	2,80	2,44	2,17	1,95	1,77	1,62	1,50	1,40
1	4,25	3,40	2,83	2,44	2,13	1,90	1,70	1,55	1,42	1,31	1,22
0,5	3,70	2,95	2,46	2,11	1,85	1,64	1,48	1,34	1,23	1,14	1,06
0,333	3,38	2,71	2,26	1,93	1,70	1,51	1,36	1,23	1,13	1,04	0,97
0,2	3,05	2,44	2,03	1,74	1,52	1,36	1,22	1,11	1,02	0,94	0,87
0,1	2,61	2,10	1,75	1,50	1,31	1,17	1,05	0,955	0,88	0,81	0,75

\* M. King. Classical transmission line enclosure alignment tables. 2003( [www.quarter-wave.com](http://www.quarter-wave.com)).

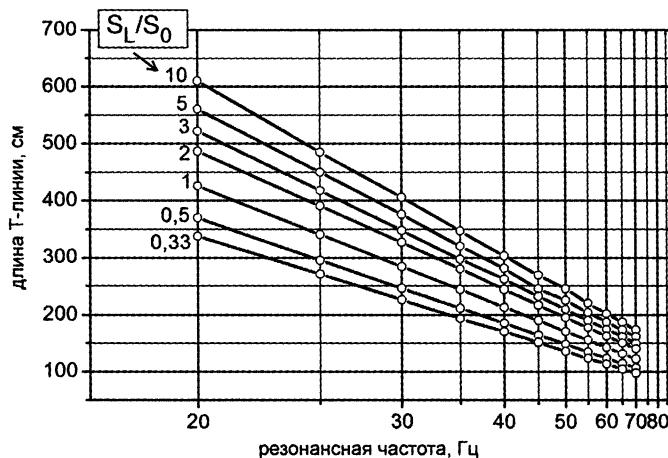


*Рис. 4.9. Длина Т-линии в зависимости от коэффициента сужения-расширения для различных частот*

Для удобства определения значений длины линии для промежуточных величин резонансных частот и коэффициентов сужения-расширения на рис. 4.9 построены графики по табл. 4.2. Из графиков, в отличие от таблицы, лучше видны закономерности изменения резонансной частоты при изменении параметров линии. Видно равномерное понижение необходимой геометрической длины линии при переходе от расширяющейся к сужающейся конструкции.

Возникает вопрос: является ли коэффициент пересчета геометрической длины в акустическую длину специфическим для каждого значения резонансной частоты или можно рассчитать некоторые универсальные коэффициенты, зависящие только от параметров линии и пригодные для любых частот? Оказалось, что можно!

Построим те же данные из табл. 4.2, но изобразим зависимость длины линии от резонансной частоты для различного коэффициента сужения-расширения. Если шкалу частот сделать не линейной, а в виде  $1/F_s$ , все графики принимают вид прямых линий (рис. 4.10). Спрямление графиков в этом масштабе однозначно указывает на то, что длина трубы обратно пропорциональна частоте. Это значит, *она пропорциональна длине волны* (т. к. длина волны обратно пропорциональна частоте).



*Рис. 4.10. Зависимость длины Т-линии от частоты настройки для различных значений коэффициента сужения-расширения трубы  $S_L/S_0$*

Таким образом, как и можно было предполагать, физически принципиальным параметром при построении трансмиссионной линии выступает длина волны звука на резонансной частоте.

*Длина  $L$ , которую должна иметь Т-линия, по отношению к четверти длины волны для различных значений отношения площади выходного отверстия  $S_L$  к площади в начале линии  $S_0$*

*Таблица 4.3*

$S_L/S_0$	0,1	0,2	0,333	0,5	1	2	3	5	10
$L/(\lambda/4)$	0,61	0,71	0,79	0,86	1,0	1,14	1,21	1,31	1,41

Если пересчитать данные табл. 4.2 не по отношению к частотам, а по отношению к длине волны, то оказывается, что коэффициент сужения-расширения трубы  $S_L/S_0$  однозначно задает корректирующий коэффициент укорочения-удлинения трубы  $\frac{L}{\lambda/4}$ .

Значения корректирующих коэффициентов представлены в табл. 4.3. Они одинаковы для всех частот! И для тех, что включены в табл. 4.2, и для тех, которых нет в этой таблице.

На основании табл. 4.3 можно построить универсальный (т. е. применимый для всех значений резонансных частот и соответствующих им длин волн) график. Он представлен на рис. 4.11. Как видно, он неплохо аппроксимируется прямой, если  $S_L/S_0$  откладывать в логарифмическом масштабе. Таким образом, зависимость длины транс-

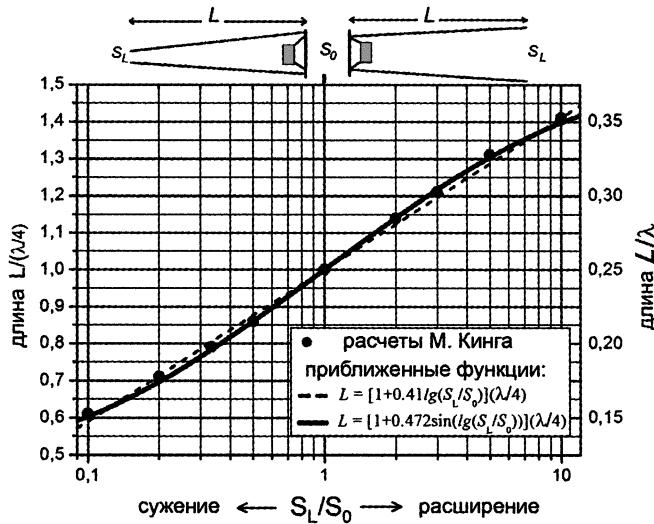


Рис. 4.11. Универсальная зависимость длины  $L$ , которую должна иметь Т-линия, от коэффициента сужения-расширения

трансмиссионной линии  $L$  от коэффициента сужения-расширения  $S_L/S_0$  выражается приближенной формулой

$$L = \frac{\lambda}{4} + 0,1025\lambda \times \lg \frac{S_L}{S_0}. \quad (31)$$

Для расширяющейся трубы второе слагаемое больше нуля и трубу требуется удлинить по сравнению с четвертью длины волны. Для сужающейся трубы второе слагаемое меньше 0, и трубу можно укоротить по сравнению с четвертью длины волны.

Для трубы постоянного сечения второе слагаемое равно нулю и длина трубы в точности равна четверти длины волны.

Вместо длины волны в расчетах можно использовать частоту  $F = v/\lambda$ , где  $v = 343 \text{ м/с}$  — скорость звука. Тогда формула (31) принимает вид:

$$L(m) = \frac{85,7}{F(\Gamma_U)} + \frac{35,15}{F(\Gamma_U)} \lg \frac{S_L}{S_0}. \quad (32)$$

Напомним, что частота  $F$  выбирается равной или несколько меньшей, чем резонансная частота головки  $F_s$ .

Часто необходимо решить обратную задачу: по геометрической длине Т-линии уже имеющейся акустической системы определить,

какова ее частота настройки, чтобы выбрать подходящую динамическую головку. Тогда из формулы (32) получаем

$$F(\Gamma_{\text{u}}) = \frac{1}{L(\text{м})} \left( 85,7 + 35,15 \times \lg \frac{S_L}{S_0} \right). \quad (33)$$

Наконец, перед вами может возникнуть и такая задача: есть ящик высотой  $l$ , задающий акустическую длину линии  $L = 2l + 10$  см, есть головка с известной резонансной частотой  $F_s$ . Надо определить требуемый коэффициент сужения-расширения для настройки ящика на частоту головки. Для этого из формулы (32) надо выразить величину  $S_L/S_0$  как функцию  $L$  и  $F_s$ :

$$S_L/S_0 = 10^{\frac{F_s(\Gamma_{\text{u}}) \times L(\text{м}) - 85,7}{35,15}}. \quad (34)$$

### Практические примеры

**Пример первый.** Вернемся к рис. 4.8. Задаемся высотой 80 см для 16-см динамика. Акустическая длина трубы составит  $L = 2 \cdot 80 + 10 = 170$  см. Для Т-линии постоянного сечения частота настройки линии составит примерно 50 Гц. Если эта частота совпадает с резонансной частотой головки или несколько ниже нее, можно ничего больше не рассчитывать. Устанавливаем динамик на расстоянии  $1/3L = 565$  мм от начала трубы. Расстояние от центра динамика до пола составит

$$(d/2 + h) = 105 + 1700/3 = 670 \text{ мм.}$$

Если резонансная частота динамика ниже 50 Гц, надо использовать сужающуюся трубу, применив коэффициенты из табл. 4.2 или любого из рис. 4.9—4.11. Можно воспользоваться также формулой (34).

Пусть, например, резонансная частота динамика оказалась равной 40 Гц. Определим коэффициент сужения трубы  $S_L/S_0$ .

Подставляя значение  $L$  в формулу (34), находим  $S_L/S_0 = 0,313$ .

Табл. 4.2 дает  $S_L/S_0 = 0,333$ , т. е. оба значения достаточно близки.

Если от частоты 40 Гц перейти к длине волны, она составит  $\lambda = 343/40 = 8,575$  м. Акустическая длина линии уже зафиксирована на значении  $L = 1,7$  м. Имеем отношение  $L/\lambda = 0,2$ . Обращаемся к рис. 4.13 и для этого значения (правая ось) находим  $S_L/S_0 = 0,33$ .

**Пример второй.** Вернемся к рис. 4.8. Задаемся высотой 100 см для 20-см динамика. Для Т-линии постоянного сечения частота настройки линии составит 41 Гц. Если резонансная частота динамика  $F_s$  находится

в интервале  $F_s = 37—45$  Гц, можно ничего больше не рассчитывать и использовать линию с постоянным сечением. Если частота  $F_s > 45$  Гц, линию необходимо расширять, если  $F_s < 37$  Гц — сужать. Коэффициент сужения-расширения находится по формуле (34) с подстановкой  $L = 2,1$  м. Например, для частоты  $F_s = 35$  Гц получаем  $S_L/S_0 = 0,45$  — сужение.

Динамическую головку устанавливаем на расстоянии примерно  $1/3L$  от начала «трубы», т. е.  $h = 70$  см, а высота от уровня пола — 82,5 см. Расчет закончен.

Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 4.4.

Практические примеры расчета трансмиссионной линии

Таблица 4.4

Диаметр головки, мм	Высота $l$ , см	Ширина $w$ , см	Глубина $d$ , см	Объем $V$ , л	Длина Т-линии $L = 2l + 10$ , см	Частота настройки Т-линии $F$ , Гц		
						$S_l/S_0 = 1$	$S_l/S_0 = 0,33$	$S_l/S_0 = 0,45$
165	80	20—22	20—25	30—40	165	50	40	43
200	100	25	25—30	60—70	205	41	33	35

Примечание: все размеры — внутренние!



#### Внимание.

*Расчет расширяющейся трубы не так прост.*

Взгляните на рис. 4.8, в. Конец Т-линии — точка В — находится не на выходе «тоннеля», а гораздо глубже. В результате длина Т-линии оказывается меньше  $2l$ . Кроме того, между концом расширяющейся линии и выходным отверстием акустической системы возникает отрезок, в котором также возбуждаются колебания воздуха. Это усложняет процессы в туннеле акустической системы. Усложнение не означает ухудшение звучания.

Тем не менее, читателям, принявшим решение изготавливать расширяющуюся трансмиссионную линию, рекомендуем увеличивать ширину выходного отверстия таким образом, чтобы выход Т-линии совпадал с выходом всего «туннеля». И после этого пользоваться для расчетов табл. 4.2, 4.3, или графиками на рис. 4.11—4.13 и формулами (29) — (32). Возможно, вас воодушевят на эксперименты положительное свойство расширяющейся трубы: более высокий уровень звуко-вого давления на ее выходе.

### Какая добротность лучше?

Внимательный читатель, возможно, уже обратил внимание, что, в отличие от предыдущей главы, в настоящей главе нигде не обсуждается добротность динамической головки. В этом состоит еще одно преимущество трансмиссионной линии: *трансмиссионная линия хорошо работает с любыми динамическими головками, имеющими добротность в интервале 0,35—0,6.*

Более низкие значения добротности также приемлемы, однако в этом случае необходимо будет больше внимания уделить борьбе с нежелательными резонансами, тщательно подбирая плотность и место расположения наполнителя. М. Кинг советует настраивать Т-линию для динамиков с добротностью менее 0,35 на 5—10 Гц выше резонансной частоты головки, а для динамиков с добротностью 0,6 и более — на 5—10 Гц ниже резонансной частоты головки.

## 4.7. Две головки в одной акустической системе

Две головки могут также успешно работать в АС типа «трансмиссионная линия». При анализе и моделировании акустических систем с двумя головками принимают в качестве параметров неизменную резонансную частоту  $F_s$ , а эквивалентный объем динамической головки удваивают. Тем самым учитывают двукратное увеличение массы подвижной системы.

С учетом того, что основным параметром при расчете Т-линии является резонансная частота, можно сказать, что принципиальных изменений в конструкцию Т-линии при установке в ней двух динамиков вносить не нужно. Рекомендуется лишь увеличить объем «ящика» за счет увеличения площади сечения Т-линии, приблизив объем Т-линии к удвоенному эквивалентному объему одной головки.

Точное совпадение объемов не требуется. вполне достаточна точность в пределах 30%. При этом надо иметь в виду, что Т-линия большего объема звучит громче.

Можно также порекомендовать одну головку установить в начале туннеля, а вторую — на расстоянии  $1/3$  длины линии от начала «туннеля».

Фирма «PMC» — производитель профессиональных мониторных АС и элитных домашних систем исключительно конструкции

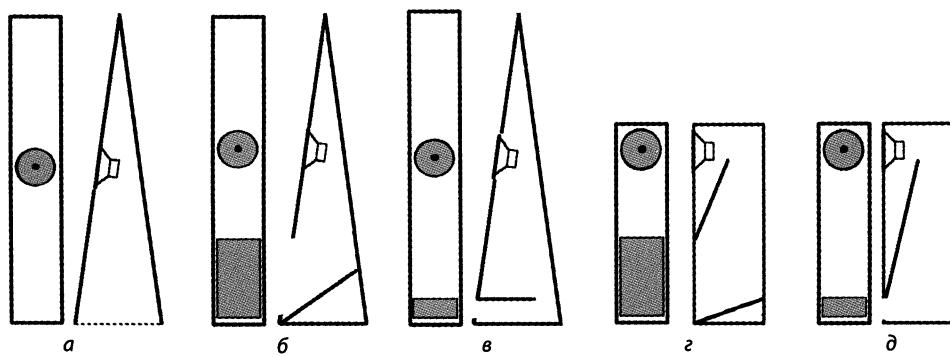
«Т-линия» — выпускает как минимум две модели, в которых установлены по два динамика в один корпус. Одна модель — широкополосная АС «Fact 8» с двумя НЧ-СЧ-головками и одной ВЧ-головкой. Вторая модель — активный сабвуфер TLE1 с двумя головками диаметром 170 мм. Объем ящика — около 60 л, внутри организован трехсекционный туннель.

## 4.8. Разновидности трансмиссионной линии

### Труба Войта

Среди самодельщиков в последнее десятилетие получила распространение конструкция, известная под названием «труба Войта». Эта конструкция была предложена в 1930 г. англ. аудиоинженером немецкого происхождения Паулем Войтом (Paul Voigt, 1901—1981).

Устройство трубы Войта показано на рис. 4.12, *а*: это равномерно расширяющаяся труба, примерно на середине которой расположена динамическая головка. Она может быть практически реализована с выходом конца трубы вперед, как показано на рис. 4.13, *б*. Многие самодеятельные конструкторы изготавливают АС в виде, показанном на рис. 4.13, *в*: труба Войта вместо выходного отверстия содержит еще одну колебательную систему — выходной порт, подобный выходному порту (трубе) фазоинвертора.



*Рис. 4.12. Акустические системы типа «труба Войта»:*

- а* — принцип действия;
- б* — практическая реализация;
- в* — вариант с выходным каналом постоянного сечения;
- г* — вариант сложенной трубы;
- д* — сложенная труба с уменьшенным выходным отверстием

Сечение выходного порта выбирают равным площади диффузора головки. Следует отметить, что именно такой размер сечения выходного порта фазоинвертора для получения хорошей динамичности звучания еще в 1961 г. рекомендовал основоположник современной теории АС типа «фазоинвертор» Невилл Тиле!

Таким образом, конструкция типа той, что показана на рис. 4.12, в, сочетает свойства трансмиссионной линии и фазоинвертора.

Длину трубы обычно рекомендуют выбирать равной четверти длины волны, соответствующей резонансной частоте динамической головки. И вот здесь возникает интересный вопрос, поднятый М. Кингом: ведь согласно его расчетам (табл. 4.2 и рис. 4.9—4.11), расширяющаяся труба длиной  $L$  имеет первую моду с длиной волны, существенно меньшей, чем  $4L$ ! Заметим, что это свойство расширяющейся трубы было известно еще в XIX веке.\*



#### Примечание.

Таким образом, все конструкции самодельщиков типа «труба Войта» оказываются настроенными заметно выше собственной резонансной частоты динамической головки.

Тем не менее, по отзывам их создателей, они прекрасно звучат. Это говорит о том, что *точная настройка акустического оформления типа «трансмиссионная линия» не является абсолютно необходимой*.

В сети интернет описано много конструкций типа тех, что показаны на рис. 4.12, в, причем во многих акустических системах принципиально используется единственный широкополосный динамик. Поскольку конструкция получается довольно громоздкой, часто применяют динамики относительно малого размера — 16,5 см. В этом случае, несмотря на достоинства акустического оформления, хотя низкочастотные звуки и воспроизводятся неожиданно хорошо, полноценного «баса» все равно не получается.

Трубу Войта, как и трансмиссионную линию, можно сложить пополам и уместить в ящик, имеющий форму параллелепипеда. На рис. 4.12, г, д показаны варианты таких акустических систем.

При самостоятельном изготовлении АС типа «труба Войта» для того, чтобы не было разочарования в ее звучании, воспользуйтесь следующим советом: точно воспроизведите конструкцию, которая

\* См. эпиграф к разделу 4.6.

уже кем-то создана и описана как хорошо звучащая, с использованием динамика с такой же резонансной частотой. Если ваши знания и опыт позволяют, самостоятельно рассчитайте акустическую систему под конкретный динамик с помощью программы, доступной на сайте М. Кинга.\*

Конструкции типа показанных на рис. 4.12 в любительской «интернет-литературе» часто называются: *TQWT (tapered quarter wave tube)*, *TQWP (tapered quarter wave pipe)*.

Оба варианта переводятся на русский язык как «сужающаяся четвертьволновая труба».

Конструкции, подобные той, что показана на рис. 4.12, б, г являются акустическим оформлением, в котором динамическая головка нагружена на обратный рупор (по-английски — *back horn*). АС такой конструкции выпускаются в наше время фирмой «Lowther Loudspeakers» (Великобритания). Они содержат, как правило, единственный широкополосный динамик и трех-четырехсекционный рупор сложной формы, часто выходящий на тыльную сторону акустической системы. Стоимость таких АС — несколько тысяч долл. США.

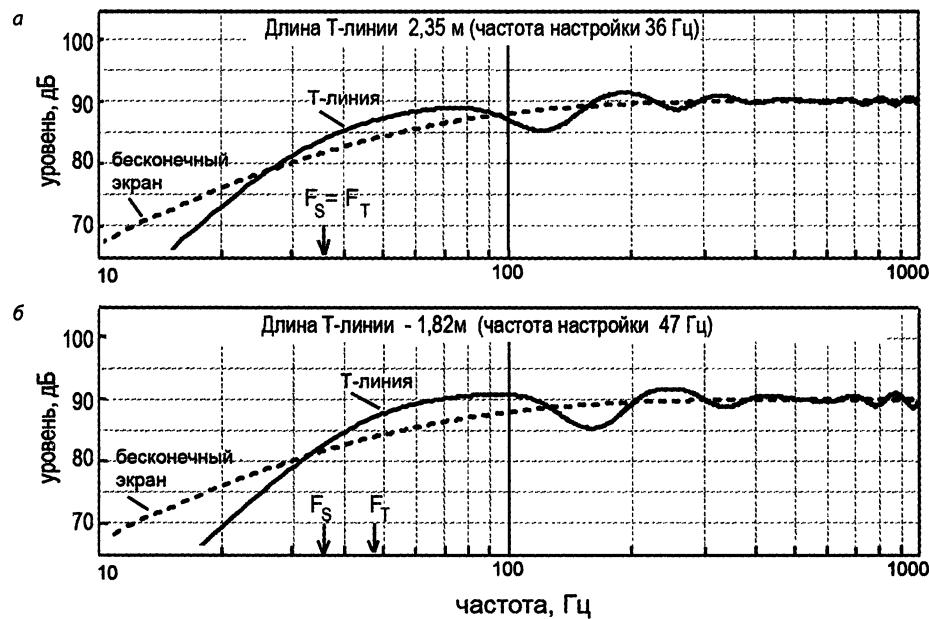
#### Что происходит при расстройке Т-линии относительно резонанса динамической головки

Начнем этот раздел с повторения утверждения, сформулированного в предыдущем разделе: *точная настройка акустического оформления типа «трансмиссионная линия» не является абсолютно необходимой*.

Такое заключение подтверждается расчетами. На рис. 4.13 показаны рассчитанные АЧХ для одной и той же динамической головки Focal 8V4412, установленной в трансмиссионную линию с точной настройкой основной моды линии на частоту резонанса головки (рис. 4.13, а), и с приличной отстройкой (рис. 4.13, б). Как видно, АЧХ Т-линии с более высокой частотой настройки имеет вполне гладкую характеристику, причем потери звукового давления в самой низкочастотной области незначительны.

Что касается отстройки основной моды Т-линии вниз от частоты собственного резонанса головки, то она даже рекомендуется многими авторами для расширения диапазона частот в нижнюю сторону.

\* [www.quarter-wave.com](http://www.quarter-wave.com) — сайт содержит теорию АС типа «трансмиссионная линия» и программу для моделирования в среде MathCad — для подготовленного читателя.



**Рис. 4.13.** АЧХ для одной и той же динамической головки Focal 8V4412 в трансмиссионной линии с точной настройкой основной моды на частоту резонанса головки (а), и с отстройкой от нее (б) (данные М. Кинга, [www.quarter-wave.com](http://www.quarter-wave.com))



#### Вывод.

Таким образом, характеристики АС типа «трансмиссионная линия» устойчивы относительно изменения ее длины примерно в пределах  $-30\%...+20\%$ , а это значит, что можно успешно построить такие акустические системы без точного измерения резонансной частоты головки, руководствуясь лишь данными производителя!

#### Т-линия с выходным портом в виде трубы

В качестве примера того, как выходной порт в виде трубы может повлиять на свойства АС типа «Т-линия», приведем конструкцию Мартина Кинга, предлагаемую для широкополосных динамических головок фирмы «Fostex»:

Fostex 206:  $F_s = 45$  Гц,  $V_{AS} = 71$  л,  $Q_{TS} = 0,19$ ;

Fostex 207:  $F_s = 39$  Гц,  $V_{AS} = 56$  л,  $Q_{TS} = 0,26$ .

Головки имеют одинаковый внешний вид (см. рис. 1.7) и близкие параметры. Чертеж АС представлен на рис. 4.14. Исходные размеры были указаны в дюймах, поэтому при пересчете в мм получились

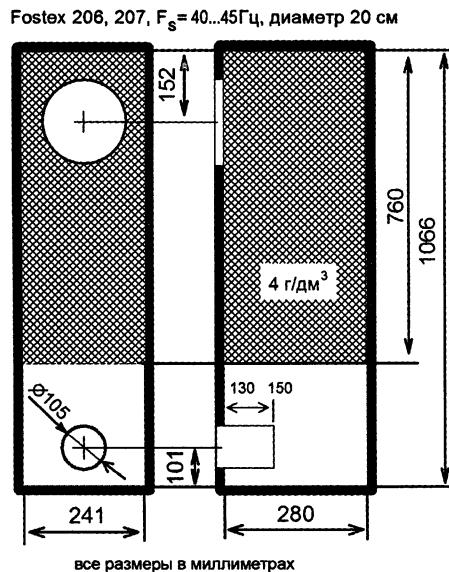
немного странные числа типа «101», «241» и т. п. Их, конечно можно округлить для удобства. Акустическая система имеет порт в виде трубы постоянного сечения.

Внутренний объем примерно на 2/3 сверху заполнен волокнистым материалом плотностью 4 г/дм<sup>3</sup> (соответствует синтепону или файбертеку средней плотности, доступным в магазинах по торговле подушками, одеялами и т. п. принадлежностями).

Автор указывает резонансную частоту «ящика» 32—34 Гц. Это несколько ниже частоты  $F_s$ . Более удивительно другое: для изготовления классической Т-линии постоянного сечения потребовалась бы «труба» длиной 2,6 м (343 м/с/(4F))! Этот пример показывает, что свойства Т-линии с выходным портом в виде трубы нельзя предсказать на основе простых соображений, а необходимо тщательно моделировать.

Возникает вопрос: не является ли конструкция, показанная на рис. 4.14, обычной АС типа «фазоинвертор» (ФИ)? М.Кинг обосновывает, что классифицировать такую конструкцию как простой ФИ нельзя:

- ♦ *во-первых*, здесь, в отличие от ФИ, играет роль не только объем ящика, но и его конкретные размеры;
- ♦ *во-вторых*, в отличие от ФИ, играет роль место расположения динамической головки.



**Рис. 4.14.** Акустическая система типа «Т-линия» с выходным портом в виде трубы. Частота настройки 32—34 Гц. Рассчитана на применение широкополосных головок «Fostex 206» или «Fostex 207». Разработка М.Кинга

### Т-линия длиной 1/8-длины волны

Все предыдущее изложение в этой главе было основано на том, что длина Т-линии  $L$  должна выбираться так, чтобы ее основная мода, имеющая длину волны  $\lambda_T = 4L$ , совпадала точно или примерно с длиной волны  $\lambda_s = 343/F_s$  для резонансной частоты динамика  $F_s$ . Это соответствует «четвертьволновому» условию для длины линии  $L = \lambda_s/4$ . В предыдущем разделе указано, что точная настройка не является абсолютно необходимой, и возможно получение хорошего звучания при укорочении Т-линии примерно на 30%.

Существует разновидность акустических систем типа «Т-линия», у которых длина линии выбирается из расчета  $L = \lambda_s/8$ , или, что то же самое,

$$L(m) = \frac{343 \text{ м/с}}{8F_s(\Gamma_u)} = \frac{43}{F_s(\Gamma_u)}. \quad (35)$$

Такие АС описаны в сети интернет с хорошими отзывами о звучании. Действительно, если вернуться к эксперименту М.Кинга (рис. 4.2—4.4), то видно, что именно такая длина трубы и использовалась. График АЧХ на рис. 4.4 (после заполнения волокнистым материалом средней плотности) показывает очень плавный спад звукового давления с понижением частоты. Динамика будет отличная. Но «глубокого баса», как видно из этих рисунков, не получается. При резонансной частоте головки  $F_s = 34$  Гц спад АЧХ начинается примерно с 80 Гц. Полезно сравнить рис. 4.4 с рис. 4.13, чтобы понять, что теряется при двукратном укорочении Т-линии.

Таким образом, укороченную до размеров  $L = \lambda_s/8$  трансмиссионную линию можно рекомендовать только для работы совместно с головками, имеющими очень низкую резонансную частоту (30 Гц).

Отметим, что идея использования лабиринта длиной 1/8-длины волны по отношению к резонансу динамической головки не нова. Такая конструкция упомянута в книге М. М. Эфруssi «Громкоговорители и их применение», опубликованной в 1976 г.

**Как будет звучать «Т-линия», если ее длина  
находится в интервале от 1/8 до 1/4 длины волны  
на частоте резонанса головки?**

По-видимому, единственным серьезным исследованием трансмиссионной линии, опубликованным до того, как сообщству аудио-

самодельщиков и аудио-профессионалов стало доступным исследование М. Кинга, была опубликованная в 2000 г. статья Дж. Аугспургера «Громкоговорители на демпфированных трубах».\* Эта работа интересна тем, что в ней акустическая система типа «трансмиссионная линия» рассматривается как *принципиально нерезонансная система*. Автор обобщает эксперименты для нескольких случаев, соответствующих соотношению длины трубы  $L$  и длины звуковой волны  $\lambda_s = 343/F_s$  на резонансной частоте динамика  $F_s$

$$\lambda_s/8 \leq L \leq \lambda_s/4,$$

или, что то же самое,  $43/F_s(\text{Гц}) \leq L(\text{м}) < 86/F_s(\text{Гц})$ . Сечение «Т-линии» выбиралось таким образом, чтобы при приближении длины линии  $L$  к значению  $\lambda_s = 343/F_s$  объем ящика приближался к эквивалентному акустическому объему динамической головки  $V_{AS}$ .



#### Примечание.

*В этом случае оказалось, что чем короче Т-линия, тем больше повышается нижняя граничная частота  $F_3$  акустической системы по отношению к  $F_s$ , подобно тому, как это происходит при помещении динамической головки в закрытый ящик. Однако положительный эффект от Т-линии сохраняется: на низких частотах уменьшается амплитуда колебаний диффузора динамической головки, а снижение уровня громкости при этом компенсируется «звучанием» выходного отверстия Т-линии.*

Таким образом, любой вариант длины «трубы» в интервале  $43/F_s(\text{Гц}) \leq L(\text{м}) < 100/F_s(\text{Гц})$  «работоспособен». Надо иметь в виду, что только при длине «трубы»  $80/F_s(\text{Гц}) \leq L(\text{м}) < 100/F_s(\text{Гц})$  можно получить повышение отдачи акустической системы для частот ниже резонансной частоты головки  $F_s$ . Для более коротких «труб» главное улучшение будет состоять не в расширении диапазона в сторону низких частот, а в снижении искажений, благодаря уменьшению амплитуды колебаний диффузора для частот, близких к  $F_s$ .

\* Augspurger G. L. Loudspeakers on damped pipes. Journal of Audio Engineering Society. 2000. V. 48, No. 5, p. 424—436.

## 4.9. Подведем итоги

Акустическое оформление типа «трансмиссионная линия» обладает следующими преимуществами по сравнению с АС типа «закрытый ящик» и «фазоинвертор»:

- ◆ отличная динамика на низких частотах (не уступает закрытому ящику);
- ◆ расширенный вниз частотный диапазон (не уступает фазоинвертору);
- ◆ не требует сложных расчетов (в отличие от фазоинвертора);
- ◆ имеет низкую чувствительность к разбросу параметров головки и ящика (в отличие от фазоинвертора);
- ◆ не требует точного измерения параметров динамика (в отличие от фазоинвертора).

Добавим, что акустические системы этого типа не нуждаются в подставках, занимают малую площадь и легко обеспечивают расположение динамика на уровне головы сидящего человека.



### Примечание.

*Указанные достоинства трансмиссионной линии позволяют рекомендовать ее как основной тип акустической системы для домашнего изготовления.*

Расчет Т-линии очень прост:

- ◆ объем АС примерно равен эквивалентному объему головки;
- ◆ площадь туннеля примерно равна или несколько больше площади диффузора;
- ◆ длина линии постоянного сечения определяется из условия  $L(m) = 86/F_s(\Gamma_4)$ , где  $F_s$  — резонансная частота головки;
- ◆ длина сужающейся линии уменьшается по сравнению с  $L(m) = 86/F_s(\Gamma_4)$  в соответствии с рис. 4.11;
- ◆ длина расширяющейся линии увеличивается по сравнению с  $L(m) = 86/F_s(\Gamma_4)$  в соответствии с рис. 4.11;
- ◆ длина линии выбирается с точностью примерно  $\pm 20\%$ ;
- ◆ для Т-линии подходят головки с добротностью 0,3—0,7, причем для головок с низкой добротностью Т-линию рекомендуется на 20% укорачивать, а для головок с высокой добротностью — на 20% удлинять по сравнению с  $L(m) = 86/F_s(\Gamma_4)$ ;

- если Т-линия строится для головки с очень низкой резонансной частотой, возможно использование линии постоянного сечения любой длины в интервале  $43 / F_s(\Gamma\zeta) \leq L(m) < 86 / F_s(\Gamma\zeta)$ . В этом случае АЧХ акустической системы будет похожа на АЧХ для АС типа «закрытый ящик» такого же объема (т. е. нижняя частота АС будет заметно выше резонансной частоты головки), однако передача импульсных НЧ-сигналов улучшится по сравнению с «закрытым ящиком».

## ГЛАВА 5

# СОЗДАЕМ АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВОИМИ РУКАМИ

Какую конструкцию акустической системы можно реально изготовить в домашних условиях, чтобы получить хорошее звучание, не превращая свое жилище в столярную мастерскую и электроакустическую лабораторию, а помещение для прослушивания музыки — в помещение для размещения и хранения акустических систем? Где взять «приличные» динамики? Как измерить их параметры? И в каких случаях это необходимо делать? Из чего сделать ящик? Как рассчитать и изготовить фильтры? Ответы на эти вопросы содержатся в этой главе.

## **5.1. Можно ли сделать хорошо звучащую систему в домашних условиях?**

Соотношение между розничной ценой акустических систем и стоимостью установленных в них динамиков составляет более 10 раз. Такая разница связана не только со стоимостью ящиков и организацией производства, но и с высокими дополнительными расходами на хранение, доставку, упаковку и рекламу.

Это соотношение максимально для акустических систем большого размера, а также для эксклюзивных, «топовых» моделей, продающихся небольшими партиями. Поэтому, потратив на приобретение хороших динамиков 100—300 долл. США, можно изготовить аудиосистему, звучащую на уровне фирменных образцов за 1—3 тыс. долларов.

Производственные издержки, налоги, высокая стоимость рекламы диктуют режим жесткой экономии при разработке товаров средней ценовой категории, не говоря уже о товарах массового спроса. И

появляются в акустических системах стоимостью порядка 500 долл. большие пластмассовые вставки на задней панели, катушки с сердечниками, и даже электролитические конденсаторы в разделительных фильтрах. Экономия идет и на толщине стенок корпуса (и материала меньше, и легче при транспортировке), и на размерах корпуса.

Например, автору приходилось видеть самому и слышать многочисленные отзывы о том, как красиво изготовленные «фирменные» колонки объемом 15—20 л имели толщину задней стенки 8 мм и электролитические конденсаторы внутри. Бескомпромиссные коммерческие решения приводят к стоимости от 3 до 6 тыс. долл. за акустические системы объемом примерно 15 л с основным динамиком диаметром 16 см и свыше 10 тыс. долл. для напольных систем с динамиками диаметром 20 и более см.

Какие же преимущества может использовать самодельщик? Таких возможностей достаточно много:

- ◆ отказаться от создания малогабаритных акустических систем, т. н. «полочников»;
- ◆ отказаться от конструкции типа «фазоинвертор», выбрать оформление «трансмиссионная линия» или «закрытый ящик»;
- ◆ не экономить на толщине стенок корпуса;
- ◆ не экономить на проводах и конденсаторах: использовать достаточно толстый медный провод (к счастью, он на всем постсоветском пространстве намного дешевле, чем за рубежом) и делать катушки без сердечников;
- ◆ отказаться от применения электролитических конденсаторов;
- ◆ не экономить на ящике. Делать ящик достаточного объема (25—40 л и более) из деревянных плит или фанеры толщиной не менее 20 мм (к счастью, и дерево в наших странах намного дешевле, чем в Западной Европе, США и Японии);
- ◆ сосредоточиться на достижении качественного звука, не тратя средства и время на изощренную декоративную отделку;
- ◆ использовать простые, но прекрасно звучащие последовательные фильтры первого порядка, тщательно отобрав для работы с ними ВЧ-головку с низкой резонансной частотой.

## 5.2. Как выбрать конструкцию акустической системы?

Какую конструкцию акустической системы реально изготовить в домашних условиях, чтобы получить хорошее звучание, не превращая свое жилище в электроакустическую лабораторию?

Оптимальным по соотношению качества звучания, стоимости, трудоемкости и возможности реализации в домашних условиях с точки зрения автора представляются двухполосные системы (один НЧ-СЧ динамик и один ВЧ-динамик) с последовательными разделительными фильтрами первого порядка:

- ♦ эти фильтры обеспечивают равномерную суммарную характеристику многополосной акустической системы;
- ♦ имеют хорошие импульсные характеристики;
- ♦ содержат минимальное количество компонентов.

При изготовлении двухполосной акустической системы оптимальным представляется акустическое оформление в виде *трансмиссионной линии*. Преимущества такой конструкции четко указаны в конце предыдущей главы. Главные из них:

- ♦ лучшая динамика по сравнению с фазоинвертором;
- ♦ расширение полосы воспроизведения в сторону низших частот по сравнению с закрытым ящиком;
- ♦ слабая чувствительность к разбросу параметров головки.

Важное преимущество АС типа трансмиссионная линия состоит в том, что благодаря расширенному вниз диапазону частот возможно получение хорошего воспроизведения низких частот с помощью *двухполосной, а не трехполосной системы*. Для помещения площадью менее 15 м<sup>2</sup> неплохие результаты можно получить, используя НЧ-СЧ головку диаметром 16,5 см, а лучше — коаксиальные системы с основным динамиком в форме эллипса 15×23 см.

Последний вариант позволит значительно повысить качество и «комфортность» звучания по сравнению с круглыми головками диаметром 16,5 см при тех же габаритах АС и стоимости комплекта динамических головок. Для помещений площадью до 20 м<sup>2</sup> рекомендуется использовать НЧ-СЧ-головки диаметром 20 см, а для помещений большей площади — АС-типа «трансмиссионная линия» с НЧ-СЧ-головкой диаметром 25 см.

При использовании головок диаметром 16,5 см потребуется добавление сабвуфера для полноценной передачи органной музыки, сложных оркестровых произведений или музыки стилей «hard rock», «heavy metal», и подобных им. Для сабвуфера выбирается НЧ-головка диаметром не менее 25 см с резонансной частотой ниже 30 Гц. Одновременно добавится и дополнительный одноканальный усилитель с НЧ-фильтром и смесителем, объединяющим НЧ-составляющую двух каналов. Рекомендуется изготавливать сабвуфер конструкции «закрытый ящик», учитывая простоту изготовления и хорошую динамику этого типа акустического оформления.

Как видите, *системы типа «фазоинвертор» не рекомендуются для самостоятельного изготовления*. Причинами являются:

- ◆ плохая динамика;
- ◆ необходимость *точного* измерения параметров динамической головки;
- ◆ сложность настройки, связанная с высокой чувствительностью к разбросу параметров головки, ящика и порта фазоинвертора.

Во всех случаях двухполосную систему можно заменить однополосной, используя широкополосную динамическую головку. При этом надо, однако, учитывать высокую стоимость таких головок, их дефицитность, а также присущую им неравномерность амплитудно-частотной характеристики в области средних частот.

Эта неравномерность заметна вследствие повышенной чувствительности уха в этом частотном диапазоне. Уменьшить неравномерность можно введением дополнительного RLC-фильтра между выходом усилителя и динамиком.

Трехполосные системы рекомендуются для помещений площадью более 20 м<sup>2</sup> как альтернатива системам типа «трансмиссионная линия» с НЧ-СЧ-головками диаметром 25 см или системам «трансмиссионная линия» с НЧ-СЧ-головками диаметром 20 см и общим на два канала сабвуфером с дополнительным усилителем.



#### Примечание.

Эти рекомендации отражают эстетические предпочтения автора и его стремление уберечь читателей от неоправданных финансовых расходов.

Конечно, читатель должен сам принять решение о выборе размеров и типа акустических систем. Однако в любом случае следует иметь в

*виду, что устанавливать сабвуферы или трехполосные системы с НЧ-головкой с резонансной частотой ниже 30 Гц в помещения площадью примерно 15 м<sup>2</sup> или менее не эффективно!*

Малые размеры комнаты по сравнению с длиной волны (более 10 м!) не позволяют воспроизвести самый нижний диапазон, и вы будете разочарованы из-за напрасно потраченных денег, времени и труда.

### 5.3. Где взять хорошие динамики?

Автор обратил внимание, что цены на динамические головки, указываемые зарубежными «самодельщиками» и многими зарубежными поставщиками, ниже тех, которые предлагаются в странах СНГ. Поэтому обладатели валютных кредитных карточек и другие читатели, имеющие доступ к международным платежным механизмам, могут заказывать динамические головки у производителей и их многочисленных дилеров.

Рекомендуемые динамические головки и их производители указаны в разделе 1.9. При таком способе приобретения можно сэкономить на таможенной пошлине и других «наценках», возникающих на сложном пути в торговой системе.

Если такой возможности нет, необходимо обращаться на сайты доступных поставщиков. Одним из таких сайтов является <http://samodelka.ru>. Этот поставщик обеспечивает доставку по России, Украине и Белоруссии. Набрав в поисковой системе в сети интернет «динамик «производитель» цена», вы можете обнаружить других поставщиков в вашем регионе.

Практически в каждом городе сегодня имеются поставщики хороших автомобильных динамических головок. Многие из них, например, «Hertz», «Morel», «Alpine», «Infinity», «Kenwood» имеют достойные параметры. Многие производители автомобильных динамиков указывают полный набор параметров Тиле-Смолла, предоставляют рекомендации по применению корректирующих RC-цепочек.

При приобретении НЧ-динамиков с низкой резонансной частотой надо учитывать, что рекомендации производителя «закрытый ящик» свидетельствуют о полной пригодности таких динамиков также для оформления типа «трансмиссионная линия».

Рекомендация «free air» подразумевает установку на задней полке автомобиля без применения какого-либо ящика. Это означает, что динамик имеет довольно высокую собственную добротность. Он полностью пригоден для «трансмиссионной линии», но в закрытом ящике будет звучать навязчиво, «жирно», «быстро» басовых звуков вы не получите.

Если при этом диаметр динамика 300 мм, вряд ли вы захотите строить для него трансмиссионную линию: слишком большой размер будет иметь такая акустическая система.

#### 5.4. Какие параметры динамиков необходимо знать для построения акустической системы?

Акустическое оформление, или проще говоря, «ящик», делается для обеспечения качественного воспроизведения низких частот. Поэтому и параметры «ящика» определяются параметрами НЧ- или НЧ-СЧ-головки. Параметры ВЧ-головки нужно знать лишь для ее правильного сопряжения с НЧ-СЧ-головкой.

Для низкочастотного динамика, ради которого и делается «ящик», главными параметрами являются:

- резонансная частота  $F_s$ ;
- эквивалентный объем  $V_{AS}$ ;
- полная добротность  $Q_{TS}$ .



##### Примечание.

*Сразу успокою читателя, не склонного к экспериментам и измерениям: можно построить вполне приличную систему типа «трансмиссионная линия», не делая вообще никаких измерений параметров динамических головок!*

При приобретении динамических головок хорошего производителя указанные параметры можно найти в паспорте головки. Их можно найти также на сайте производителя или авторизованного дилера. Приведенные в главе 2 параметры динамиков могут служить отправной точкой при выборе и поиске подходящих динамиков.

**Примечание.**

*Значения параметров, указанные производителем, достаточны для построения трансмиссионной линии.*

Если есть возможность, рекомендую при расчете трансмиссионной линии измерить резонансную частоту головки. Измерение добротности и эквивалентного объема желательно при изготовлении систем типа «закрытый ящик».

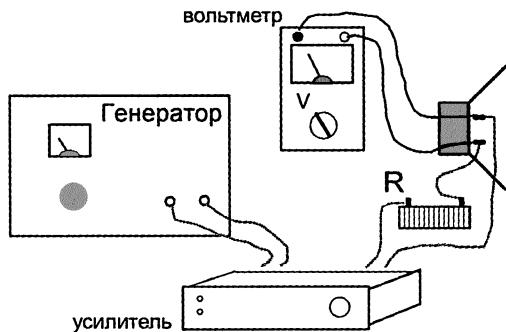
Все три указанных параметра необходимо точно измерить при изготовлении систем типа «фазоинвертор». Именно поэтому такие системы и не рекомендуются для самостоятельного изготовления.

## 5.5. Как измерить параметры динамика в домашних условиях?

### Измеряем резонансную частоту головки

Проще всего измерить резонансную частоту головки. Для этого потребуется звуковой генератор, способный генерировать частоты в диапазоне примерно 30—100 Гц, усилитель мощностью хотя бы 2—3 Вт, способный усиливать сигналы этого диапазона, резистор мощностью 5—10 Вт сопротивлением 4—10 Ом и вольтметр.

В качестве генератора можно использовать компьютер со звуковой картой с соответствующей программой. Такие программы, написанные радиолюбителями, доступны на многих сайтах в сети интернет.



*Рис. 5.1. Схема для измерения зависимости сопротивления динамической головки от частоты*

Схема измерений показана на рис. 5.1. Она не сложнее школьной лабораторной работы по физике в старших классах. Динамик устанавливается диффузором вверх в центре комнаты на табурет, чтобы уменьшить влияние отражений от стола, пола и стен. Выходное напряжение генератора, усиленное усилителем до величины  $U_0 = 1—2$  В, подается на динамическую головку через резистор известного сопротивления  $R$ .

Из-за того, что сопротивление  $Z$  динамической головки зависит от частоты  $f$ , при изменении частоты напряжение на выводах головки  $U_Z$  и на выводах резистора  $U_R$  будет зависеть от частоты, а их сумма будет всегда равна выходному напряжению усилителя  $U_0$ . В соответствии с законом Ома

$$\begin{aligned} Z(f) \cdot I + R \cdot I &= U_0; \quad U_Z = Z(f) \cdot I, \\ U_R = R \cdot I &\Rightarrow \frac{U_Z}{U_R} = \frac{Z(f)}{R} \Rightarrow Z(f) = R \frac{U_Z}{U_R}. \end{aligned}$$

Для определения частоты собственного резонанса динамической головки  $F_s$  надо подключить вольтметр переменного тока (аналоговый или цифровой) и, плавно изменяя частоту генератора в интервале 20—100 Гц, найти частоту, при которой вольтметр будет показывать максимальное напряжение. Эта частота и есть  $F_s$ . Измерение закончено.

### Определяем полную добротность

Полная добротность важна при построении систем типа «закрытый ящик». Она определяется на основании измерения зависимости полного сопротивления головки  $Z$  от частоты  $f$ . Для этого используют схему, показанную на рис. 5.1, однако измерения проводят в более широком интервале частот, рассчитывая для каждой частоты значение  $Z$  по формуле

$$Z(f) = R \frac{U_Z}{U_R}. \quad (36)$$

Если усилитель имеет низкое выходное сопротивление по сравнению с  $R$  и  $Z$ , его выходное напряжение  $U_0$  будет одинаково независимо от частоты  $f$  и значения  $Z$  на этой частоте. Если заранее в этом убедиться, то далее в процессе измерений можно не перебрасывать щупы вольтметра с динамика на резистор, а регистрировать только падение напряжения на катушке динамика. Тогда значение  $Z(f)$  рассчитывается по формуле

$$Z(f) = R \frac{U_Z}{U_0 - U_Z}. \quad (37)$$

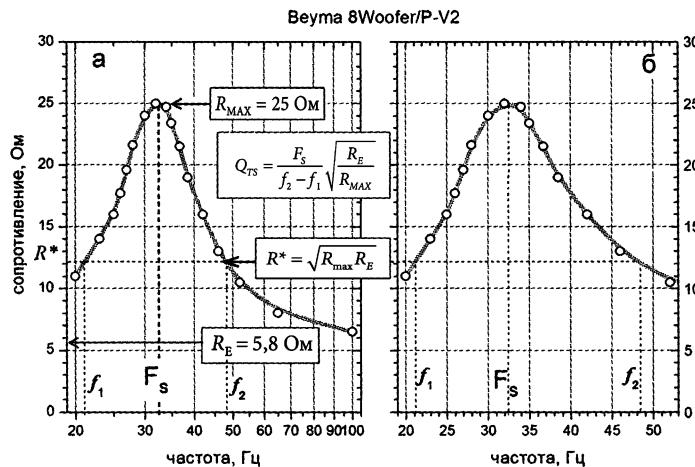


Рис. 5.2. Зависимость  $Z(f)$  сопротивления динамической головки от частоты и определение ее полной добротности  $Q_{ts}$

На рис. 5.2 показан пример таких измерений для головки 8Woofer/P-V2 испанской фирмы «Веума». На участках, где изменение сопротивления с частотой максимально, необходимо делать измерения с шагом 1 Гц. На рис. 5.2, а использована стандартная логарифмическая шкала частоты. Поскольку диапазон частот, в котором необходимо проводить измерения, относительно невелик, можно строить график в более удобном линейном по частоте масштабе (рис. 5.2, б). Конечный результат определения добротности от этого не зависит. После построения графика, аналогичного изображенному на рис. 5.2, а или рис. 5.2, б, поступают следующим образом.

Сначала определяют максимальное значение сопротивления  $R_{max}$ , которое как известно, имеет место на частоте собственного резонанса головки  $F_s$ . В нашем случае  $R_{max} = 25 \text{ Ом}$ . Затем, измерив омметром сопротивление звуковой катушки головки  $R_E$  (в нашем случае  $R_E = 5,8 \text{ Ом}$ ), рассчитывают среднее геометрическое этих двух сопротивлений:

$$R^* = \sqrt{R_{max} R_E}. \quad (38)$$

Для нашего случая  $R^* = 12 \text{ Ом}$ . Затем по графику определяют два значения частоты  $f_1$  и  $f_2$ , для которых измеренное полное сопротивление головки равно  $R^*$ . В нашем случае эти частоты равны 21,3 и 48,5 Гц. Обращаю внимание, что эти значения надо определить максимально точно, причем намного проще это сделать, используя линейный, а не

логарифмический масштаб по частоте. Далее рассчитывают полную добротность по формуле:

$$\text{Полная добротность } Q_{TS} = \frac{F_s}{f_2 - f_1} \sqrt{\frac{R_E}{R_{MAX}}}. \quad (39)$$

В нашем случае имеем  $Q_{TS} = 0,57$ . Паспортное значение по данным производителя — 0,5. Как видно, отклонение измеренного значения от паспортного примерно 15%. Отметим, что и измеренное значение резонансной частоты (32,5 Гц) на 10% отличается от паспортного значения (35 Гц).

Описанная методика определения добротности динамической головки была предложена и обоснована в классической работе Ричарда Смолла «Анализ системы с динамической головкой прямого излучения»\* и впоследствии в разных вариациях изложена многими авторами, к сожалению часто с опечатками в обозначениях и формулах. Будьте внимательны, используя другие источники!

Некоторые авторы рекомендуют повторно измерять частотную зависимость полного сопротивления динамика, если измеренная зависимость не обладает свойством  $f_1 f_2 = F_s^2$ . Такое условие означает, что зависимость  $Z(f)$  симметрична относительно  $F_s$ , если использована логарифмическая шкала частот. Однако полная симметрия имеет место лишь при отсутствии зависящего от частоты вклада индуктивного сопротивления головки, что в общем случае не выполняется.

Некоторые авторы вместо измерения  $R_E$  вольтметром рекомендуют брать минимальное сопротивление на графике  $Z(f)$ . Строго говоря, для этого надо иметь генератор, работающий, начиная с 1 Гц, и использовать сопротивление, измеренное на самой низкой доступной частоте. Если использовать минимум сопротивления с высокочастотной стороны резонанса (примерно 100 Гц на рис. 5.2), значение  $R_E$  окажется завышенным по причине уже упоминавшегося вклада индуктивного сопротивления головки.



#### Примечание.

*Можно немного упростить и ускорить процесс измерения добротности. Строго говоря, измерять полную зависимость сопротивления от частоты не требуется.*

---

\* R. H. Small. Direct-radiator loudspeaker system analyses. J. Audio Engineering Soc. 1972, V.20, p.383.

Требуется лишь определить значения, входящие в формулу (39). Можно поступить таким образом.

**Шаг 1.** Собираем схему в соответствии с рис. 5.1.

**Шаг 2.** Определяем резонансную частоту динамика  $F_s$  и соответствующее ей сопротивление  $R_{\max}$ .

**Шаг 3.** Рассчитываем величину  $R^* = \sqrt{R_{\max} R_E}$ . Предполагается, что сопротивление катушки динамика по постоянному току  $R_E$  уже изменено.

**Шаг 4.** Рассчитываем, какое напряжение должно быть на клеммах динамика, если его сопротивление равно  $R^*$ :

$$U^* = U_0 \frac{R^*}{R^* + R}, \quad (40)$$

где  $R$  — это сопротивление вспомогательного резистора, включенного последовательно с головкой.

**Шаг 5.** Перестраивая генератор, следим за показаниями вольтметра и отмечаем два значения частоты, для которых показания вольтметра равны  $U^*$ . Это и есть частоты  $f_1$  и  $f_2$ , для которых полное сопротивление головки равно  $R^*$ .

**Шаг 6.** Рассчитываем добротность по формуле (39).

### Определяем эквивалентный объем

Эквивалентный объем  $V_{AS}$  низкочастотной динамической головки необходимо знать для построения систем типа «закрытый ящик» и «фазоинвертор». Для акустических систем типа «трансмиссионная линия» точное значение  $V_{AS}$  не требуется.

Не существует иного простого метода определения акустического объема, кроме того, который прямо следует из определения этого понятия (см. раздел 1.5 и формулы 6—9). Повторим формулу (9) еще раз ввиду ее важности:

$$F_{BOX} = F_s \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_{BOX}}}. \quad (9)$$

Для определения эквивалентного объема надо сделать следующее.

**Шаг 1.** Определить резонансную частоту  $F_s$  динамической головки на воздухе с помощью генератора, вспомогательного резистора и вольтметра (рис. 5.1).

**Шаг 2.** Изготовить аккуратный закрытый ящик («закрытый» — значит герметичный!) произвольного объема, например, 10—15 л, с аккуратным отверстием, равным установочному размеру головки.

**Шаг 3.** Установить (т. е. привинтить к передней панели) динамическую головку в закрытый ящик и определить экспериментально резонансную частоту головки  $F_{\text{BOX}}$  в ящике. Привинчивать головку можно тыльной стороной наружу. На результатах измерений это не отразится, а подключение к клеммам головки проводов упростится.

**Шаг 4.** Определить резонансную частоту головки в ящике с помощью генератора, вспомогательного резистора и вольтметра (рис. 5.1).

**Шаг 5.** Рассчитать эквивалентный объем с помощью рис. 3.1 или формулы

$$V_{\text{AS}} = V_{\text{BOX}} \left( \frac{F_{\text{BOX}}^2}{F_s^2} - 1 \right), \quad (41)$$

вытекающей из формулы (9).



**Примечание.**

*Обращаю внимание, что в ящике не должно быть никаких отверстий.*

Если головка установлена тыльной стороной внутрь и ее клеммы недоступны снаружи, найдите возможность загерметизировать отверстия, необходимые для вывода проводов, хотя бы пластилином.



**Примечание.**

*Не забудьте, что  $V_{\text{BOX}}$  — это объем воздуха в ящике, т. е. внутренний объем ящика минус объем головки.*

Постарайтесь аккуратно его оценить. Это особенно важно при использовании ящика малого объема, для которого пренебрежение объемом головки может привести к большой погрешности в определении акустического объема.

## 5.6. Рекомендации по подбору динамиков в многополосной системе

В акустике, как и в искусстве, нет абсолютной истины. Есть вкусы, мнения, предпочтения и школы. Каждая акустическая система звучит по-своему. Хорошие акустические системы отличаются от плохих тем, что каждая из них звучит по-своему хорошо. Содержание этого раздела может отличаться от рекомендаций, изложенных в статьях и книгах, написанных другими авторами. Постарайтесь понять аргументы, изложенные ниже, и вы, по-видимому, примете точку зрения автора.



### Примечание.

*Самым главным динамиком в вашей акустической системе является тот, который воспроизводит частотный диапазон примерно 200—3000 Гц. Этот диапазон должен обязательно воспроизводиться одним динамиком.*

Поэтому в двухполосной системе надо использовать частоту разделения примерно 4 кГц, а в трехполосных системах — частоты разделения примерно 150—200 Гц и 3,5—5 кГц.

Упомянутая самая главная в системе динамическая головка должна иметь размер как минимум 16,5 см, лучше 20 см, еще лучше — 25 см. Для пояснений прочитайте раздел 2.2 «Почему маленькие динамики звучат не так, как большие».

При таком подходе в акустическую систему устанавливается основная головка диаметром 16,5—25 см. Ее резонансная частота должна находиться в интервале 40—50 Гц.

Если резонансная частота ниже, то скорее всего такая головка будет плохо воспроизводить верхний СЧ-диапазон (2—3 кГц). Если выше — не удастся получить приемлемое воспроизведение самого нижнего диапазона. Если вам повезло, и у вас есть широкополосная головка такого размера (впрочем, недешевая вещь!), можете сразу переходить к расчету ящика и больше ничего не конструировать.

Тип акустического оформления — только трансмиссионная линия. Никаких «закрытых ящиков» для головок такого типа! Иначе придется дополнительно строить сабвуфер!

### Основной вариант: двухполосные системы

Если головка имеет границу полосы воспроизведения ниже 20 кГц, скажем 5—6 кГц, к ней необходимо добавить высокочастотную (ВЧ) головку. Для этого вначале рассчитайте и изготовьте ящик для основного динамика. Затем подключайте к нему ВЧ-головку.

Можно попробовать использовать естественный спад АЧХ основного динамика для частот выше 5—6 кГц и подключить ВЧ-головку через «ВЧ-фильтр первого порядка», т. е. просто через конденсатор емкостью 3—5 мкФ для ВЧ-головки номинальным сопротивлением 8 Ом и 5—8 мкФ для ВЧ-головки сопротивлением 4 Ом.

При таком включении весьма желательно, чтобы резонансная частота ВЧ-головки была ниже 1 кГц. Поэкспериментируйте с полярностью подключения: головки включаются синфазно, но иногда противофазное включение оказывается более благозвучным! Можно использовать конденсаторы МБГЧ, К40-У-9, К73, ФТ. Еще лучше — «Mundorf», «MultiCap» (до 10 долл.), а если позволяют средства — «Jensen» или «Solen» (до 100 долл.!).

Пусть не смущает вас примитивность такого решения. В «Hi-End» аппаратуре полностью реализуется принцип «краткость — сестра таланта» по отношению к протяженности сигнального тракта. Разработчики таких грандов аудиоиндустрии как «Bose» и «Bowers&Wilkins» с гордостью сообщают в своих проспектах, что им удалось «развести» НЧ-СЧ- и ВЧ-излучатели с помощью единственного конденсатора.

Возможно, вам понравится звук, и на этом конструирование акустической системы можно считать законченным. Переходите к отделке корпуса и окончательной установке ВЧ-головки.

Если с единственным конденсатором между основной НЧ-СЧ-головкой и ВЧ-головкой звучание покажется вам недостаточно хорошим, попробуйте установить НЧ-фильтр первого порядка, т. е. катушку индуктивности перед НЧ-СЧ-головкой. О том, как это сделать, будет написано в следующем разделе. Если вы обладаете достаточным опытом и у вас есть возможность измерять АЧХ акустических систем (для этого надо иметь генератор, усилитель, измерительный микрофон и подготовленное помещение), можете экспериментировать с фильтрами более высоких порядков. Но успех не гарантирован!

Возможно, вы неудачно выбрали головки, неверно рассчитали или некачественно изготовили корпус (о том, как делать корпус, написано далее в разделе 5.11), использовали некачественные конденсаторы,

либо ваше помещение не подходит для прослушивания. Например, очень маленькая комната с голыми стенами, минимумом мягкой мебели, незашторенным окном, застекленной дверью и т. п.).

### Трехполосные системы

Если вы примете решение делать трехполосную систему, добавляйте к НЧ-СЧ- и ВЧ-динамикам серьезный «низкочастотник» диаметром хотя бы 20 см, гораздо лучше 25 см, еще лучше — 30 см с резонансной частотой ниже 30 Гц.

В этом месте возникает необходимость сделать еще одно нетипичное утверждение:

*в такой трехполосной системе одинаково важно акустическое оформление как НЧ-динамика (назовем его дополнительным НЧ-динамиком), так и основного НЧ-СЧ-динамика!*

Это означает, что при проектировании трехполосной системы надо одновременно рассчитывать два акустически не связанных «ящика»: один для НЧ-, а второй — для НЧ-СЧ-головки.



#### Примечание.

*Это утверждение полностью противоречит распространенному мнению, что ящик делается только для одной НЧ-головки, а остальные динамики достаточно просто изолировать от низкочастотной головки с помощью каких-либо «коробочек».*

Такое мнение можно принять, сделав частоту раздела примерно 700—1500 Гц, однако мы уже условились, что для качественного воспроизведения распределять диапазон 200—3000 Гц между двумя головками недопустимо\*.

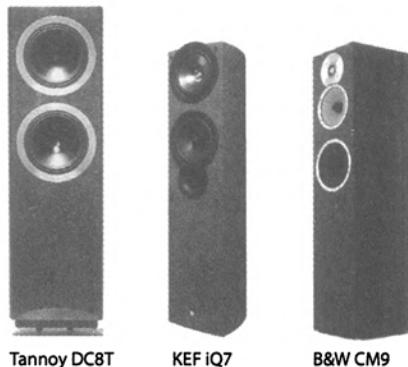
Позиция автора подкрепляется не только рассуждениями, но также личным опытом и несколькими примерами из мира элитных акустических систем. Ранее, в главе 2 уже упоминалась акустическая система

\* Теоретически возможно создать хорошую систему с разделением сигнала в области 500—1500 Гц с помощью очень сложных фильтров, обеспечивающих равномерность суммарных частотной и фазовой характеристик, а также одновременность прихода к слушателю сигналов НЧ- и СЧ-головок. Так поступают некоторые фирмы, используя более десятка элементов в разделительных фильтрах высоких порядков. Этот подход — явно не для «самодельщиков».

Glenair10 фирмы «Tannoy» стоимостью 10 тыс. долл. с единственной головкой диаметром 25 см, в центре которой находится дополнительный полноценный ВЧ-излучатель со своей катушкой и магнитной системой (рис. 2.4).

Развитие этой линейки акустических систем идет по двум направлениям: применение коаксиального двухполосного излучателя большего размера (до 15 дюймов!) и добавление НЧ-излучателя такого же диаметра, как коаксиальная «пара». Стоимость таких систем существенно превышает 10 тыс. долл. В качестве примера на рис. 5.3 показана АС Tannoy DC10T, в которой дополнительно к коаксиальному излучателю снизу установлен НЧ-динамик диаметром 25 см.

Такой же подход используют многие другие фирмы с высокой репутацией, например, «KEF», «Bowers&Wilkins» в системах ценовой категории примерно 2 тыс. долл. В акустической системе KEF iQ7 установлен подобный на решение «Tannoy» двойной концентрический широкополосный излучатель диаметром 16,5 см, с ним совместно работает НЧ-динамик такого же диаметра. Частоты разделения полос — 250 Гц и 2,8 кГц. Низкочастотный динамик имеет бумажный диффузор. В акустической системе Bowers&Wilkins CM9 НЧ- и НЧ-СЧ-динамики также имеют размер 16,5 см, НЧ-динамик изготовлен из бумаги, частоты разделения — 350 Гц и 4 кГц.



*Рис. 5.3. Акустические системы высшей ценовой категории, в которых НЧ-СЧ- и НЧ-динамики имеют одинаковые размеры*

### Трифоническая система

В связи с тем, что основной НЧ-СЧ-динамик может иметь диаметр 20 или 25 см, его резонансная частота может быть примерно 50 Гц или даже немного ниже. Он может вполне работать в составе трехполосной системы с частотой разделения примерно 150—200 Гц или даже ниже. В этом случае НЧ-динамик будет воспроизводить участок спектра до 200 Гц, в котором субъективная локализация источника звука практически невозможна. А это значит, что стереофоническая система может эволюционировать в *трифоническую* с общим НЧ-динамиком в центре между двумя стерео-сателлитами.

Такая «инсталляция» рекомендуется для больших помещений — от 30 кв. м и более. При этом центральный НЧ-динамик может иметь диаметр 30 см и более, а его нижняя частота может достигать 22—25 Гц. Этот вариант по качеству звуковой сцены и естественности передачи мощных пассажей симфонической музыки и хард-рока, по чувствительности к возможным фазовым рассогласованиям различных полос намного предпочтительнее, чем более стандартный сабвуферный вариант.



#### Примечание.

*Автор далек от мысли, что среди читателей этой книги окажется много меломанов, имеющих личные помещения для прослушивания музыки подобного размера. Речь идет скорее о групповом прослушивании в клубах, барах или кафе.*

## 5.7. Разделительные фильтры: введение

### Зачем нужны разделительные фильтры?

Разделительные фильтры с неизбежностью входят в состав акустической системы, если в ней установлено более одной динамической головки. Они распределяют широкополосный музыкальный сигнал между двумя или более динамическими головками. Это делают для того, чтобы каждая из них воспроизводила ту часть музыкального сигнала, которую она способна воспроизвести, и не перегружалась теми сигналами, которые она не способна воспроизвести.

Вопреки распространенному мнению о вторичной роли фильтров по сравнению с динамиками укажу, что даже в относительно простой двухполосной системе неудачные фильтры не позволяют раскрыть потенциал динамиков и акустического оформления, не позволяют создать полноценную звуковую сцену и приблизиться к звучанию реальных голосов и инструментов.

### Как работает разделительный фильтр?

В разделительных фильтрах используются конденсаторы и катушки индуктивности. Их сопротивление зависит от частоты. Сопротивление  $R_L$  катушки индуктивностью  $L$  растет с ростом частоты электриче-

ского сигнала  $f$  прямо пропорционально частоте, а сопротивление  $R_C$  конденсатора емкостью  $C$  уменьшается с ростом частоты обратно пропорционально частоте:

$$R_L = \omega L, R_C = \frac{1}{\omega C}, \omega = 2\pi f,$$

$R$  [Ом],  $L$  [Генри],  $C$  [Фарад],  $f$  [Герц]. (42)

По спектру пропускаемых частот фильтры делятся на:

- фильтры верхних частот (ФВЧ);
- фильтры нижних частот (ФНЧ);
- полосовые фильтры (используются в трехполосных системах для выделения среднечастотного диапазона).

По принципу построения фильтры делятся на *параллельные* и *последовательные*. Классификация фильтров по числу фильтрующих элементов и крутизне спада за пределами проводится с применением термина «*порядок фильтра*». Чем выше порядок фильтра, тем выше крутизна его характеристики и тем большее количество конденсаторов и катушек индуктивности он содержит.

### Фильтр верхних частот первого порядка

Фильтр верхних частот (ФЧХ) первого порядка — это просто конденсатор, включенный последовательно с нагрузкой (рис. 5.4).

Чтобы рассчитать АЧХ такого фильтра, необходимо представить его как делитель напряжения, состоящий из сопротивления конденсатора  $R_C$  и активного сопротивления  $R$ . При записи  $R_C$  нужно учитывать изменение фазы при прохождении переменного тока через конденсатор:

$$R_C = \frac{1}{i\omega C}, i^2 = -1. \quad (43)$$

Здесь  $i$  — мнимая единица. Полное сопротивление последовательно соединенных динамической головки и конденсатора

$$R_{\text{общ}} = \frac{1}{i\omega C} + R,$$

а падение напряжения на динамической головке по отношению к входному напряжению составит

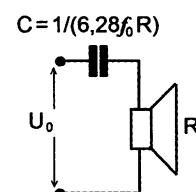


Рис. 5.4. Фильтр верхних частот первого порядка

$$\frac{U_R}{U_0} = \frac{R}{\frac{1}{i\omega C} + R} = \frac{iR\omega C}{1 + iR\omega C}.$$

Это комплексное число в виде дроби преобразуется следующим образом. Необходимо умножить числитель и знаменатель на величину, комплексно сопряженную по отношению к знаменателю, т. е. на  $(1 - iR\omega C)$ . Получаем

$$\frac{U_R}{U_0} = \frac{R^2\omega^2C^2}{1 + R^2\omega^2C^2} + i \frac{R\omega C}{1 + R^2\omega^2C^2}.$$

Теперь рассчитаем квадрат модуля этой величины, который и даст нам АЧХ нашего ВЧ-фильтра по отношению к мощности. Для этого вспомним, что квадрат комплексного числа  $(|a+ib|)^2 = a^2 + b^2$ . Удобно ввести обозначение

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}, f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (44)$$

т. е. частота  $f_0$  — это такая частота, на которой сопротивление конденсатора  $R_C$  (см. формулу (42)) равно сопротивлению динамической головки  $R$ . После несложных преобразований получаем

$$\text{АЧХ ВЧ-фильтра 1 порядка} \left| \frac{U_R}{U_0} \right|^2 = \frac{f^2}{f^2 + f_0^2}, f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (45)$$

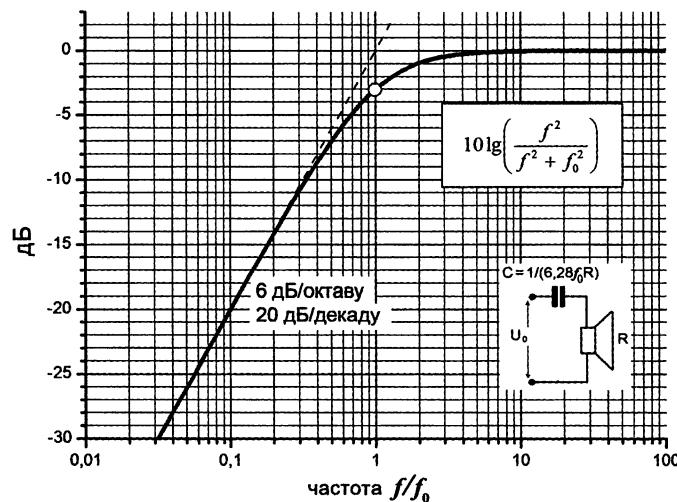


Рис. 5.5. Амплитудно-частотная характеристика фильтра высоких частот первого порядка

Для перехода к шкале в децибелах необходимо построить величину

$$A\chi X (\text{дБ}) = 10 \lg \left| \frac{U_R}{U_0} \right|^2 = 10 \lg \left( \frac{f^2}{f^2 + f_0^2} \right).$$

График этой функции показан на рис. 5.5. Для частот  $f >> f_0$  коэффициент передачи фильтра равен 1, или 0 дБ. На частоте  $f_0$  он уменьшается до 0,5, или до уровня -3 дБ (см. рис. 1.1 для пересчета отношений напряжений и мощностей в децибели). При дальнейшем уменьшении частоты коэффициент передачи уменьшается с крутизной -6 дБ/октаву (т. е. в 4 раза при уменьшении частоты в 2 раза) и -20 дБ/декаду (т. е. в 100 раз при уменьшении частоты в 10 раз).

### Схема простейшей акустической системы: от старинных радиол к элитным системам «Bose»

Используя НЧ-СЧ-головку и ВЧ-головку, а также простейший фильтр верхних частот в виде одного конденсатора, уже можно строить акустическую систему. Ее звучание будет определяться качеством динамических головок и качеством конденсатора, а также правильностью выбора его емкости  $C$ , задающей частоту раздела  $f_0$ . Схема такой акустической системы показана на рис. 5.6.

Такое включение высокочастотной (ВЧ) головки широко использовали в старинных радиоприемниках и радиолах. Так подключают ВЧ-головку в некоторых современных акустических системах высокого класса, например, разработанных фирмой «Bose» (США). При этом используется естественное снижение отдачи НЧ-СЧ-головки с ростом частоты для частот выше 4—6 кГц. В этом диапазоне и выбирается  $f_0$ , используемая для расчета емкости разделятельного конденсатора. В табл. 5.1 приведены значения емкости для различных частот раздела и различных сопротивлений ВЧ-головки.

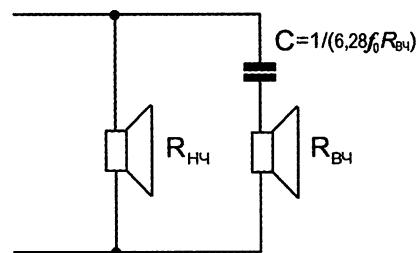


Рис. 5.6. Схема простейшей двухполосной акустической системы

Значения емкости разделительного конденсатора

Таблица 5.1

Частота раздела $f_0$ , кГц	3,0	4,0	5,0	6,0
Сопротивление ВЧ-головки 4 Ом				
емкость, мкФ	13,3	9,9	8,0	6,6
Сопротивление ВЧ-головки 5 Ом				
емкость, мкФ	10,6	8,0	6,3	5,3
Сопротивление ВЧ-головки 6 Ом				
емкость, мкФ	8,8	6,6	5,3	4,4
Сопротивление ВЧ-головки 7 Ом				
емкость, мкФ	7,6	5,7	4,5	3,8
Сопротивление ВЧ-головки 8 Ом				
емкость, мкФ	6,6	5,0	4,0	3,3
Сопротивление ВЧ-головки 9 Ом				
емкость, мкФ	5,9	4,4	3,5	2,9

Какое сопротивление  $R$  для ВЧ-головки брать при расчете емкости разделительного конденсатора  $C$ ? Рекомендуется брать сопротивление, измеренное омметром, увеличив его при расчете  $C$  на 10—15%, чтобы учесть возрастание сопротивления головки с частотой вследствие добавления к активному сопротивлению ее индуктивного сопротивления  $R_L = \omega L$ . В отличие от НЧ-СЧ-головки (типичная зависимость сопротивления от частоты показана ранее на рис. 1.5), сопротивление ВЧ-головки не увеличивается сильно с ростом частоты:

- **во-первых**, меньший размер магнитной системы обуславливает меньшую индуктивность;
- **во-вторых**, магнитная проницаемость сердечника с ростом частоты снижается, что дополнительно понижает индуктивность и ее вклад в общее сопротивление головки.



#### Совет.

Рекомендуется подбирать емкость конденсатора на слух, начиная с меньших значений, например, с 3,3 мкФ, и постепенно увеличивая, пока вам не покажется немного «навязчивым» звучание верхнего СЧ-диапазона.

Звук в этом случае кажется, как говорят профессиональные звукооператоры, «агрессивным» или «хрустящим».



#### Внимание.

Частота раздела во всех случаях должна быть как минимум в 4 раза, а лучше в 5—6 раз выше частоты собственного резонанса ВЧ-головки!

Фильтр, состоящий из одного конденсатора, как уже отмечалось, уменьшает мощность, подводимую к головке, в 4 раза при уменьшении частоты в два раза. Если это условие не выполнить, вы получите сильные искажения из-за перегрузки головки НЧ-сигналом.



#### Совет.

*Рекомендуется использовать ВЧ-головки с резонансной частотой ниже 1 кГц.*



#### Примечание.

*Можно выбирать на слух более удачное включение головок: синфазное или противофазное.*

### Фильтр нижних частот первого порядка

Используя катушку индуктивности, соединенную последовательно с НЧ-СЧ-головкой, можно построить простейший фильтр нижних частот. Его называют НЧ-фильтром первого порядка. Схема такого фильтра показана на рис. 5.7.

Рассуждаем так же, как при анализе ВЧ-фильтра, показанного на рис. 5.4, и принимаем во внимание, что сопротивление катушки индуктивности с учетом фазы переменного тока представляется в виде

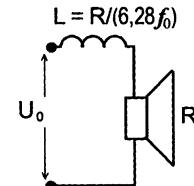


Рис. 5.7. Фильтр нижних частот первого порядка

$$R_L = i\omega L, \quad \omega = 2\pi f, \quad i^2 = -1. \quad (46)$$

В результате получаем АЧХ для НЧ фильтра в виде

$$\text{АЧХ НЧ-фильтра 1 порядка} \left| \frac{U_R}{U_0} \right|^2 = \frac{f_0^2}{f^2 + f_0^2}, \quad f_0 = \frac{R}{2\pi L}. \quad (47)$$

Для перехода к шкале в децибелах необходимо построить величину

$$\text{АЧХ} (\text{дБ}) = 10 \lg \left| \frac{U_R}{U_0} \right|^2 = 10 \lg \left( \frac{f_0^2}{f^2 + f_0^2} \right).$$

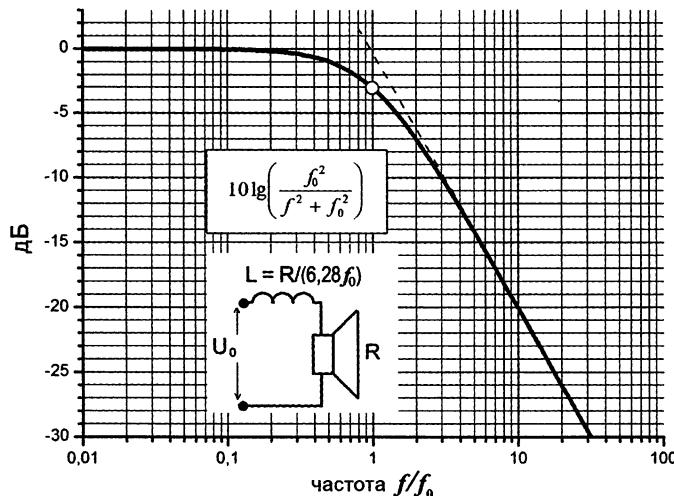


Рис. 5.8. Амплитудно-частотная характеристика фильтра нижних частот первого порядка

Этот график построен на рис. 5.8. Для частот  $f \ll f_0$  коэффициент передачи фильтра равен 1, или 0 дБ. На частоте  $f_0$  он уменьшается до 0,5, или до уровня -3 дБ (см. рис. 1.1 для пересчета отношений напряжений и мощностей в децибелы). При дальнейшем уменьшении частоты коэффициент передачи уменьшается с крутизной -6 дБ/октаву (т. е. в 4 раза при уменьшении частоты в 2 раза) и -20 дБ/декаду (т. е. в 100 раз при уменьшении частоты в 10 раз). Такое уменьшение на логарифмической шкале соответствует прямой линии (показана пунктиром).

В отличие от конденсаторов, катушку необходимой индуктивности купить трудно. Такие катушки обычно изготавливают самостоятельно. О том, как это сделать, написано в разделе 5.8.



#### Внимание.

Очень важно, чтобы активное сопротивление катушки индуктивности (т. е. сопротивление медного провода, измеренное омметром на постоянном токе) было минимальным. Обычно — не более 5% от активного сопротивления динамической головки. Для этого катушки индуктивности необходимо наматывать проводом большого диаметра — 1—1,2 мм. В противном случае на катушке будет рассеиваться заметная мощность с соответствующим снижением отдачи низкочастотной головки.

### Схема акустической системы с параллельными фильтрами первого порядка

На этом этапе изложения мы уже в состоянии сконструировать двухполосную акустическую систему с параллельными разделительными фильтрами первого порядка. Ее схема показана на рис. 5.9.


**Примечание.**

*Динамические головки должны иметь одинаковое сопротивление и одинаковую чувствительность.*

Для идеальных динамических головок с чисто активным сопротивлением  $R$  суммарная АЧХ будет абсолютно равномерной:

$$A\chi X_{H\chi} + A\chi X_{B\chi} = \left| \frac{U_{H\chi}}{U_0} \right|^2 + \left| \frac{U_{B\chi}}{U_0} \right|^2 = \frac{f_0^2}{f^2 + f_0^2} + \frac{f^2}{f^2 + f_0^2} \equiv 1. \quad (48)$$

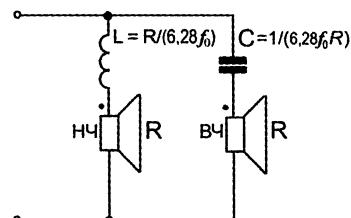
Она показана на рис. 5.10 в виде прямой линии на уровне 0 дБ. Неужели все так просто? К сожалению, нет.


**Примечание.**

*Амплитудно-частотные характеристики фильтров и их суммарная характеристика имеют вид, показанный на рис. 5.10, только в одном единственном случае: сопротивления НЧ- и ВЧ-головки строго постоянны во всем звуковом диапазоне и равны.*

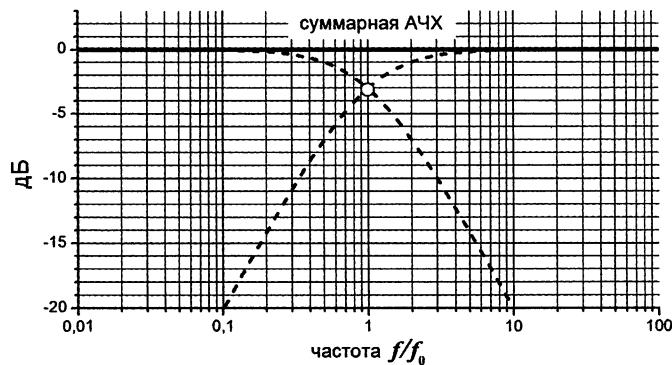
К сожалению, в реальности так не бывает. Вспомним рис. 1.5, где показано реальное сопротивление НЧ-СЧ-головки. Сопротивление такой головки многократно возрастает на частоте собственного резонанса, затем падает примерно до значения, равного активному сопротивлению (измеряемому обычным омметром), а затем монотонно увеличивается с частотой вследствие значительной собственной индуктивности.

На рис. 5.11, *a* показано, что происходит с передаточными характеристиками фильтров и суммарной АЧХ для реальной акустической системы с параллельными фильтрами первого порядка (моделирование выполнено А. Елютиным\*).

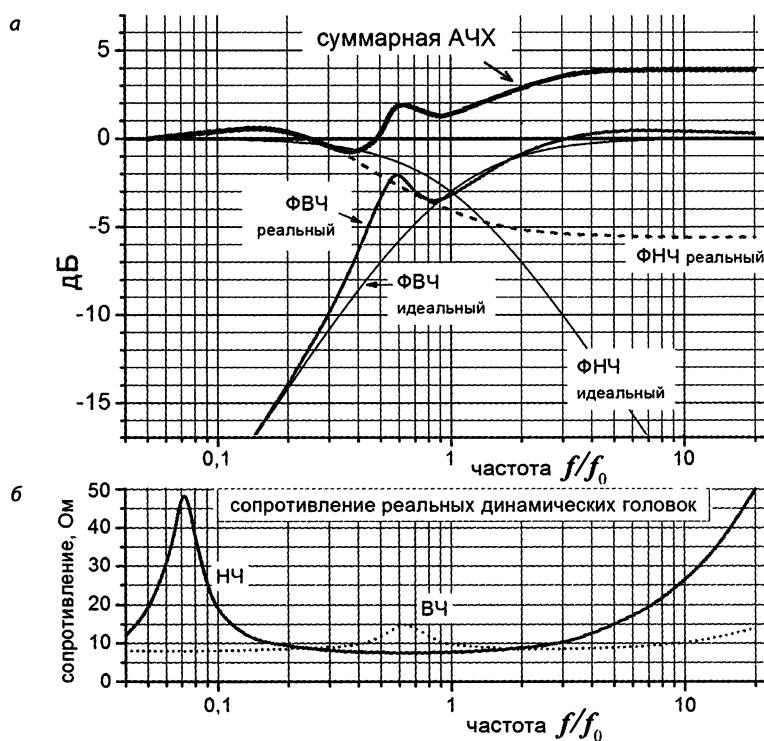


*Рис. 5.9. Схема двухполосной акустической системы с параллельными разделительными фильтрами первого порядка*

\* «Автозвук», 2010. №1.



**Рис. 5.10.** Суммарная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) двухполосной акустической системы с динамическими головками, имеющими одинаковое чисто активное сопротивление и одинаковую и равномерную чувствительность (сплошная линия). Пунктиром показаны АЧХ для НЧ- и ВЧ-каналов



**Рис. 5.11.** Характеристики реальной двухполосной системы:

а — амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров высоких (ФВЧ) и низких (ФНЧ) частот первого порядка при работе с реальными динамическими головками, и суммарная АЧХ акустической системы с параллельными фильтрами. Для сравнения показаны АЧХ в случае идеальной активной нагрузки;

б — зависимости сопротивления реальных динамических головок от частоты

Использованные при моделировании зависимости сопротивления динамических головок от частоты показаны на рис. 5.11, б. Обращаем внимание, что индуктивный характер сопротивления ВЧ-головки по сравнению с НЧ-головкой на высоких частотах выражен слабо из-за малых габаритов магнитной системы.

**Рис. 5.11** весьма поучителен. Удивительно, что подобных рисунков нет ни в одной из известных автору книг (и книжек), посвященных описанию акустических систем.

Анализ графиков на рис. 5.11 позволяет сделать следующие выводы.

**Вывод 1.** Значительное возрастание сопротивления НЧ-головки на частоте собственного резонанса почти не проявляется на АЧХ фильтра низких частот. Это связано с тем, что для самых низких частот сопротивление катушки индуктивности очень мало по сравнению с сопротивлением НЧ-головки.

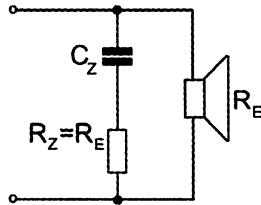
**Вывод 2.** На высоких частотах сильный рост сопротивления НЧ головки приводит к тому, что фильтр низких частот практически не работает: сопротивление головки и сопротивление катушки растут одновременно, в результате «фильтр» обеспечивает постоянное не зависящее от частоты ослабление (по уровню примерно  $-5$  дБ) с нулевой крутизной. В результате на суммарной АЧХ появляется значительное повышение отдачи для всех частот выше частоты раздела  $f_0$ .

**Вывод 3.** На частоте резонанса ВЧ-головки ( $0,6f_0$  в выбранном примере) рост сопротивления головки по сравнению с сопротивлением конденсатора приводит к «всплеску» как на АЧХ фильтра высоких частот, так и на суммарной АЧХ. Несколько уменьшить это всплеск можно, если сделать частоту раздела во много раз выше частоты резонанса ВЧ-головки, однако полностью подавить его невозможно.

## 5.8. Приближение к реальности

### Компенсация реактивного сопротивления НЧ-СЧ-головки

Для того, чтобы обеспечить нормальную работу разделительных фильтров необходимо «линеаризовать» сопротивления НЧ- и ВЧ-головок. Подчеркнем, что речь идет именно об обеспечении нормальной работы разделительных фильтров с целью получения



*Рис. 5.12. Подключение RC-цепочки (цепочка Цобеля) для компенсации роста полного сопротивления НЧ-СЧ-динамической головки с ростом частоты*

равномерной суммарной АЧХ акустической системы.

«Всплеск» сопротивления на частоте собственного резонанса НЧ-ВЧ-головки можно не компенсировать. Как видно из рис. 5.11, он слабо отражается на суммарной АЧХ. Для нормальной работы ФНЧ совместно с динамической головкой необходимо компенсировать рост сопротивления головки с увеличением частоты для частот выше 1 кГц. Это делают с помощью цепочки Цобеля: последовательно соединенных резистора и конденсатора, подключаемых параллельно динамической головке, как показано на рис. 5.12.

Уменьшающееся с ростом частоты сопротивление конденсатора в цепочке Цобеля компенсирует рост сопротивления динамической головки с частотой, обусловленный ее индуктивностью.

Номинал резистора  $R_z$  обычно выбирают равным сопротивлению  $R_E$  по постоянному току, измеренному омметром, или близкому к нему номинальному паспортному сопротивлению, указанному производителем.

Номинал конденсатора  $C_z$  в цепочке Цобеля выбирают следующим образом. Сначала измеряют зависимость сопротивления динамической головки от частоты в диапазоне примерно 300—7000 Гц, используя схему, представленную на рис. 5.1. На основании этих измерений определяют частоту  $f^*$ , на которой полное сопротивление головки в 2 раза превышает сопротивление  $R_E$  по постоянному току, измеренное омметром. Это значит, что на этой частоте индуктивное сопротивление головки  $R_L = R_E$ . Для головки, сопротивление которой представлено на рис. 5.11, б, эта частота равна примерно 5000 Гц. Затем рассчитывают емкость шунтирующего конденсатора по формуле:

$$C_z = \frac{1}{2\pi f^* R_E}.$$

Все величины — в системе СИ, т. е. частота в герцах, сопротивление в омах, емкость — в фарадах. Для случая, показанного на рис. 5.11, б, имеем  $R_z = R_E = 7,5$  Ом,  $C_z = 4,2$  мкФ.

**Примечание.**

Индуктивность динамической головки обычно уменьшается с ростом частоты вследствие уменьшения магнитной проницаемости материала, из которого изготовлен сердечник катушки.

Поэтому рост сопротивления с частотой происходит медленнее, чем  $R_L = 2\pi f L$ . В связи с этим неправильными оказываются советы некоторых авторов использовать при расчетах паспортное значение индуктивности головки.

Отметим, что некоторые производители указывают рекомендуемые номиналы резистора и конденсатора цепочки Цобеля в паспортных документах на свои динамические головки. Если такая информация доступна, этими рекомендациями надо воспользоваться, не делая никаких измерений и расчетов.

### Компенсация реактивного сопротивления ВЧ-головки

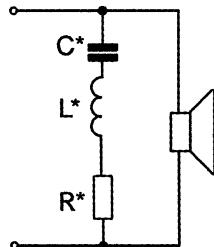
Для ВЧ-головки, как видно из рис. 5.11, важно подавить «всплеск» сопротивления на частоте собственного резонанса. Для этого параллельно ВЧ-головке подключают цепочку, состоящую из индуктивности  $L^*$ , емкости  $C^*$  и активного сопротивления  $R^*$ . Схема показана на рис. 5.13.

Значения  $L^*$  и  $C^*$  выбирают из условия резонанса корректирующей цепочки на частоте собственного резонанса ВЧ-головки

$$F_S = 1 / (2\pi \sqrt{L^* C^*}) \quad (48)$$

таким образом, чтобы не только резонансная частота, но и добротность корректирующего контура и ВЧ головки совпадали:

$$C^* = \frac{1}{2\pi F_S Q_{ES} R_E}, \quad L^* = \frac{Q_{ES} R_E}{2\pi F_S}, \quad R^* = \frac{Q_{ES}}{Q_{TS}} R_E \approx 1,1 \dots 1,3 R_E. \quad (49)$$



*Рис. 5.13. Подключение RCL-цепочки для выравнивания сопротивления ВЧ-головки в области частоты собственного резонанса*

В этих формулах  $R_E$  — сопротивление головки по постоянному току, измеренное омметром,  $Q_{TS}$  — полная добротность головки,  $Q_{ES}$  — электрическая добротность головки. Условие резонанса (48) должно выполняться по возможности точно, а условия (49) — с точностью примерно 10—20%. Если вам сложно измерить резонансную частоту, воспользуйтесь паспортным значением.

Хорошие производители часто указывают и добротности головки. Почти все производители приводят зависимость полного сопротивления головки от частоты. В этом случае можно рассчитать значение полной добротности по методике, описанной в разделе 5.5 (формула (39)). Электрическая добротность обычно на 10—30% превышает пол-

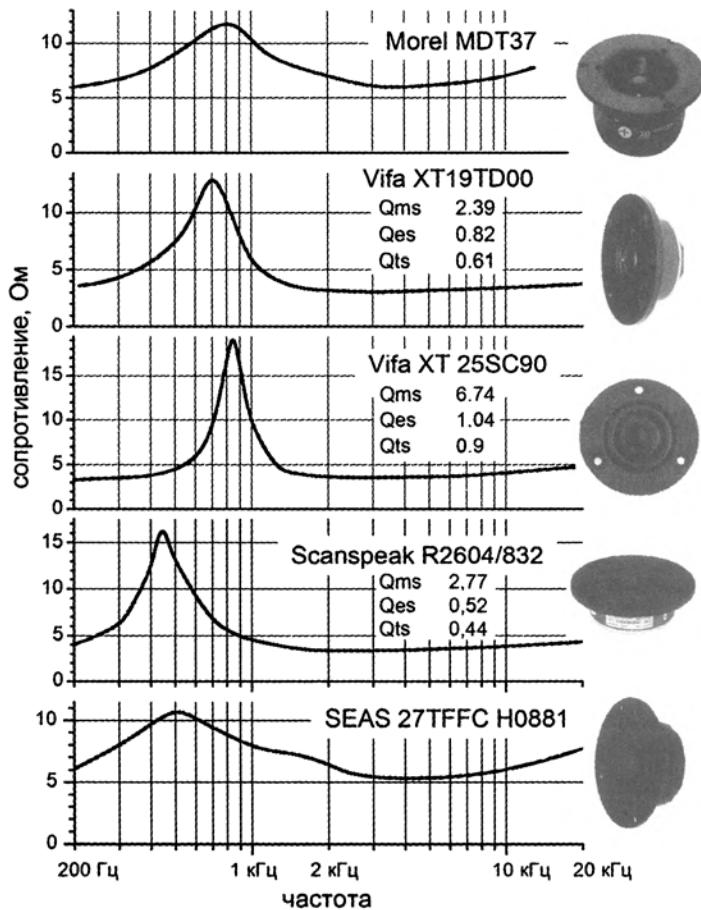


Рис. 5.14. Зависимость полного сопротивления от частоты для высокочастотных динамических головок

ную добротность. Характеристики нескольких хороших ВЧ-головок представлены на рис. 5.14.



#### Примечание.

*Если при расчете номиналов элементов корректирующей цепочки вы пользуетесь только данными производителя, рекомендуем увеличить сопротивление  $R^*$  до значения примерно  $1,5—2R_E$ .*

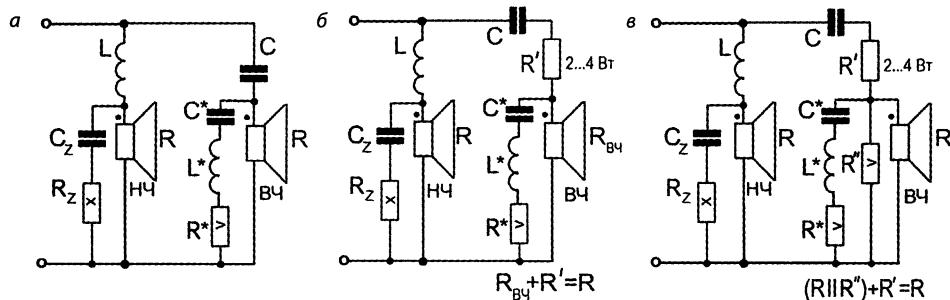
Этим вы понизите добротность корректирующего контура, что позволит значительно ослабить «всплеск» сопротивления головки на частоте собственного резонанса даже при неточном выполнении условия (48) вследствие отклонения фактической частоты резонанса головки от ее паспортного значения.

#### Полная схема акустической системы с параллельными фильтрами 1 порядка

На рис. 5.15, *a* представлена полная схема двухполосной акустической системы с простейшими параллельными фильтрами 1-го порядка. Предполагается, что номинальные сопротивления обеих головок равны ( $R$ ) и головки имеют одинаковую чувствительность.

Фильтр низких частот образован катушкой индуктивности  $L$ , фильтр высоких частот — конденсатором  $C$ . Формулы для расчета номиналов этих элементов приведены на рис. 5.9.

Элементы  $C_Z$ ,  $R_Z$  компенсируют индуктивную компоненту сопротивления НЧ-СЧ-головки. Элементы  $C^*$ ,  $L^*$ ,  $R^*$  компенсируют «всплеск»



**Рис. 5.15. Полная схема двухполосной акустической системы:**  
*а — чувствительности и номинальные сопротивления НЧ-СЧ- и ВЧ-головок совпадают;*  
*б — чувствительность ВЧ-головки выше, а номинальное сопротивление ниже, чем НЧ-СЧ-головки;*  
*в — чувствительность ВЧ-головки выше, а номинальное сопротивление равно сопротивлению НЧ-СЧ-головок.*

сопротивления ВЧ-головки на частоте ее собственного резонанса и в окрестности резонанса.

**Совет.**

*Необходимо разнести в пространстве катушки индуктивности на расстояние, заметно большее их диаметров, чтобы исключить их взаимное влияние. Если такой возможности нет, катушки необходимо установить так, чтобы их оси были взаимно перпендикулярны.*

**Внимание.**

*Напоминаем еще раз, что в акустических системах с фильтрами первого порядка необходимо использовать ВЧ-головку с резонансной частотой ниже 1 кГц, а частоту разделения полос выбирать не ниже 4 кГц.*

Если у вас нет таких ВЧ-динамиков, рекомендуется применять фильтр первого порядка для НЧ-головки и фильтр третьего порядка для ВЧ-головки. Так поступает большинство профессиональных разработчиков акустических систем. Фильтры высоких порядков описаны в разделе 5.13.

### Выравнивание повышенной чувствительности ВЧ-головки

Часто бывает, что чувствительность ВЧ-головки выше, чем чувствительность НЧ-СЧ-головки. Если сопротивление ВЧ-головки ниже сопротивления НЧ-СЧ-головки, может оказаться, что достаточно включить последовательно с ВЧ-головкой резистор, одновременно увеличивающий сопротивление, на которое нагружен ВЧ-фильтр (сопротивление головки + сопротивление резистора), и понижающий звуковое давление ВЧ-головки (резистор  $R'$  на рис. 5.15, б).

*Например*, подключение к 4-омной ВЧ-головке сопротивления  $R' = 2$  Ом увеличивает номинальное значение сопротивления, на которое рассчитывается фильтр, до  $4+2=6$  Ом. Уровень звукового давления при этом составит  $4/6=0,66$  или  $-4$  дБ от номинального значения. При  $R' = 4$  Ом номинальное значение сопротивления, на которое рассчитывается фильтр, составит 8 Ом, а уровень звукового давления  $-0,5$ , или  $-6$  дБ от номинального значения.

Подключение к 6-омной ВЧ-головке сопротивления  $R' = 2$  Ом увеличивает до 8 Ом номинальное значение сопротивления, на которое рассчитывается фильтр. Уровень звукового давления при этом составит  $6/8=0,75$ , или  $-2,5$  дБ от номинального значения.

Если чувствительность ВЧ-головки выше, чем чувствительность НЧ-СЧ-головки, и при этом номинальные сопротивления головок равны, ВЧ-головку подключают через делитель напряжения на резисторах  $R'$ ,  $R''$ , как показано на рис. 5.15, в.

Как рассчитать номиналы этих резисторов? Имеем номинальное сопротивление динамической головки  $R$  и коэффициент  $\alpha < 1$ , равный желаемому отношению напряжения на головке к входному напряжению. Имеем два условия:

$$(R \parallel R') + R'' = R, \quad \frac{(R \parallel R')}{(R \parallel R') + R''} = \alpha.$$

Первое из этих условий означает, что ВЧ-фильтр должен «видеть» нагрузку сопротивлением  $R$ , второе условие задает необходимый коэффициент передачи по напряжению. Напомню, что  $R \parallel R' = RR' / (R + R')$ . Решая эту простую систему из двух уравнений относительно двух неизвестных  $R'$ ,  $R''$  при заданных значениях  $R$  и  $\alpha$ , получаем:

$$R' = R(1 - \alpha), \quad R'' = R \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (50)$$

Осталось разобраться, как от разницы чувствительности головок в децибелах на метр на ватт перейти к необходимому коэффициенту  $\alpha$ . Внимательный читатель может это сделать самостоятельно, используя нижние шкалы на рис. 1.1. Приведем сразу конечную формулу

$$\alpha \equiv \frac{U_{BЧ}}{U_{HЧ}} = 10^{-0,05\Delta(\text{dB})}, \quad (51)$$

где  $\Delta(\text{dB})$  = чувствительность ВЧ-головки минус чувствительность НЧ-СЧ-головки.

*Например*, ВЧ-головка имеет чувствительность 92 дБ, НЧ-головка — 90 дБ, номинальное сопротивление головок 4 Ом. Рассчитаем делитель напряжения  $R'$ ,  $R''$ .

- 1) Имеем  $\Delta = +2$  дБ, и по формуле (51) определяем  $\alpha = 0,8$ .
- 2) По формулам (50) определяем  $R' = 0,8$  Ом,  $R'' = 16$  Ом.



### Примечание.

Можно просто запомнить, что понижение чувствительности на 1 дБ соответствует приближительно умножению на  $a = 0,89$ , на 2 дБ — умножению на  $a = 0,89 \times 0,89 = 0,8$ , на 3 дБ — умножению на  $a = 0,89 \times 0,89 \times 0,89 = 0,71$  и т. д.

В табл. 5.2 приведены рассчитанные по указанным формулам номиналы резисторов  $R'$  и  $R''$  для различных значений  $\Delta$  и  $R$ . При изготовлении акустических систем вполне достаточно выбрать ближайшие к указанным в табл. 5.2 номиналы резисторов из стандартного ряда.

*Номиналы резисторов  $R'$  и  $R''$  для различных значений превышения чувствительности ВЧ-головки по сравнению с НЧ-СЧ-головкой  $\Delta$*

Таблица 5.2

$\Delta$ , дБ	+1	+2	+3	+4	+5	+6
$a$	0,89	0,8	0,71	0,63	0,56	0,5
<b>Номинальное сопротивление головок <math>R = 4</math> Ом</b>						
$R'$	0,44	0,8	1,2	1,5	1,8	2
$R''$	32	16	9,8	8,9	5,1	4
<b>Номинальное сопротивление головок <math>R = 6</math> Ом</b>						
$R'$	0,66	1,2	1,7	2,2	2,6	3
$R''$	49	24	14,7	13,3	7,6	6
<b>Номинальное сопротивление головок <math>R = 8</math> Ом</b>						
$R'$	0,9	1,6	2,3	3,0	3,5	4
$R''$	64	32	20	18	10,2	8

Можно задать вопрос: на какой частоте надо сравнивать сопротивления НЧ-СЧ- и ВЧ-головок. Ответ такой: сравнивать можно номинальные сопротивления головок, при этом подразумевается, что рост сопротивления НЧ-СЧ-головки с частотой уже скомпенсирован цепочкой  $R_Z C_Z$  (рис. 5.12).



### Совет.

Если чувствительность ВЧ-головки выше, чем НЧ-СЧ-головки, а сопротивления НЧ-СЧ- и ВЧ-головок равны, не торопитесь подключать ВЧ-головку через делитель напряжения! Сначала послушайте звучание акустической системы при воспроизведении различных музыкальных записей.

Дело в том, что кривые равной громкости (рис. 1.1) имеют подъем в области 7—15 кГц, что означает снижение чувствительности уха в

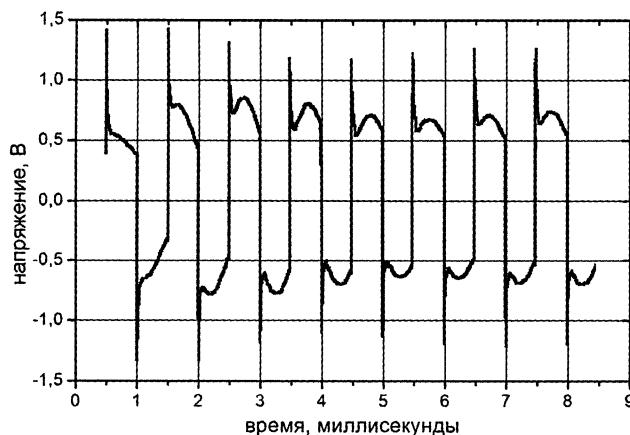
этом диапазоне. Поэтому повышенная отдача ВЧ-головки может оказать благоприятное влияние на звучание акустической системы.

### Подведем итоги

Что же мы получили в итоге? *Облегчили работу фильтров* ценой присоединения к динамическим головкам двух резисторов, двух конденсаторов и одной индуктивности в дополнение к двум исходным реактивным элементам разделительных фильтров ( $L$  и  $C$ ) и в дополнение к реактивным компонентам, присущих самим динамическим головкам.

Но ведь акустическая система делается не ради фильтров! Главный вопрос при всех усложнениях акустической системы: как это отразится на звучании? Ответ хорошо известен: равномерность амплитудно-частотной характеристики, измеренной для стационарного синусоидального сигнала повысится, но *передача импульсных сигналов, к сожалению, ухудшится!* Большое число реактивных компонентов, собранных вместе, — не лучшая система с точки зрения фазочастотных характеристик.

Так, может быть, лучше отказаться от корректирующих элементов  $C_z$ ,  $R_z$  для НЧ-СЧ- и  $C^*$ ,  $L^*$ ,  $R^*$  для ВЧ-головки? К сожалению, нет. Без этих элементов суммарная частотная характеристика будет неравномерной (подъем на средних частотах), а передача импульсных сигналов будет сильно искажена.



*Рис. 5.16. Результат моделирования передачи прямоугольных импульсов длительностью 0,5 мс амплитудой ±0,5 В двухполосной акустической системой с реальными импедансами динамических головок и параллельными фильтрами первого порядка (данные Р. Эллиотта, <http://sound.westhost.com>)*

На рис. 5.16 показано, как воспроизводит прямоугольные импульсы двухполосная акустическая система, имеющая схему, показанную на рис. 5.9, с учетом реальных импедансов динамических головок.

## 5.9. Рекомендация автора: последовательные фильтры 1-го порядка

### Особенности фильтров

Последовательные фильтры первого порядка представляют собой уникальное по электроакустическим свойствам в сочетании с предельной простотой решение задачи разделения полос в акустических системах. Применение последовательных фильтров в акустических системах описано еще в первой половине прошлого столетия.\*

Уникальные свойства этих фильтров были подробно проанализированы в 1971 г. одним из основателей современной теории акустических систем Ричардом Смоллом.\*\* Тем не менее, эти фильтры игнорируются профессиональными разработчиками. Но для «самодельщиков» простейшие последовательные фильтры первого порядка — идеальное решение!

### Схема: проще не бывает

Рис. 5.17 показывает переход от параллельных фильтров к последовательным. Схемы на рис. 5.17, *a* и 5.17, *b* электрически идентичны. Это показано знаком равенства «==» на рисунке. Переход от параллельных к последовательным фильтрам показан стрелкой от рис. 5.17, *b* к рис. 5.17, *c*. Как видите, *в двухполосной системе переход от параллельного к последовательному включению фильтров происходит с помощью всего одной «перемычки», соединяющей точки «A» и «B».*

На рис. 5.17, *c* показано стандартное изображение последовательных фильтров первого порядка. Оно электрически идентично схеме на рис. 5.17, *b*, что показано знаком равенства «==».

\* Например, последовательные фильтры второго порядка описаны в книге В. В. Фурдуева «Электроакустика», опубликованной в 1948 г.

\*\* Richard Small, «Constant Voltage Crossover Network Design». Journ. Audio Engineering Society 1971, v. 19, N1, p. 12—19.

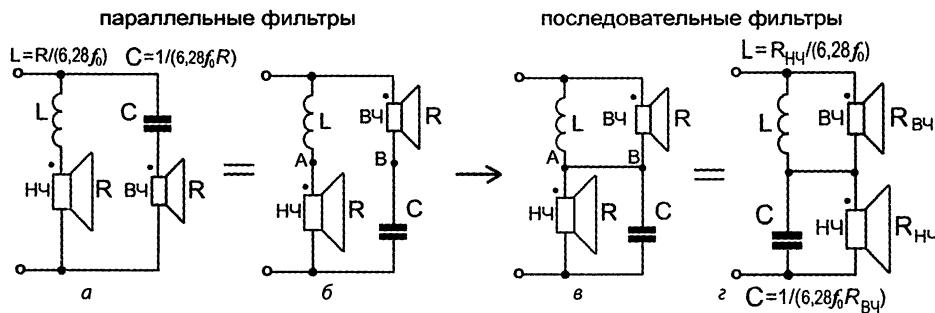


Рис. 5.17. Двухполосные акустические системы с фильтрами первого порядка:  
а, б — параллельные фильтры; в, г — последовательные фильтры

Головки включаются последовательно и синфазно. Параллельно ВЧ-головке подключается катушка индуктивности, а параллельно НЧ-головке — конденсатор.

### Принцип работы

Значения емкости  $C$  и индуктивности  $L$  выбираются таким образом, чтобы на частоте раздела  $f_0$  индуктивное сопротивление катушки было равно сопротивлению НЧ-головки, а емкостное сопротивление конденсатора было равно сопротивлению ВЧ-головки:

$$L = \frac{R_{НЧ}}{2\pi f_0}, C = \frac{1}{2\pi f_0 R_{BЧ}}. \quad (52)$$

Принцип работы фильтров очень прост. При подаче на вход акустической системы низкочастотного сигнала ( $f < f_0$ ) низкое индуктивное сопротивление катушки шунтирует ВЧ-головку, ток на нее не ответвляется и проходит к параллельно соединенным конденсатору и НЧ-головке. Здесь ситуация противоположная: сопротивление конденсатора велико и весь ток проходит через НЧ-головку, не ответвляясь на конденсатор.

В пределе высокочастотного сигнала ( $f > f_0$ ) верхнее и нижнее «плечи» акустической системы меняются местами. Теперь сопротивление катушки велико, она не потребляет ток, и весь ток поступает на ВЧ-головку. НЧ-головка на высоких частотах полностью зашунтирована конденсатором и ток в нее не ответвляется, а проходит через конденсатор.

При промежуточных значениях частоты сигнал воспроизводится одновременно обеими головками.

**Примечание.**

*На частоте раздела полос  $f_0$  сигнал делится между головками поровну.*

Преимущества таких фильтров впечатляют:

- ◆ эти фильтры обеспечивают равномерную суммарную характеристику без точного подбора сопротивлений динамических головок, без выравнивания полного сопротивления головок корректирующими RC-цепочками, подключаемыми параллельно катушке динамика, и без подстройки частоты раздела;
- ◆ такие фильтры обеспечивают лучшую передачу импульсных сигналов по сравнению со всеми другими фильтрами;
- ◆ они содержат минимальное количество компонентов: всего одну катушку и один конденсатор!

По своим преимуществам последовательные фильтры первого порядка не имеют аналогов.

**Внимание.**

*Напоминаю еще раз, что в акустических системах с фильтрами первого порядка необходимо использовать ВЧ-головку с резонансной частотой ниже 1 кГц, а частоту разделения полос выбирать выше 4 кГц!*

**Немного математики**

Для детального анализа работы фильтров в дополнение к формулам (52) достаточно просто воспользоваться законом Ома для цепей переменного тока.

Полное сопротивление  $R_{\text{общ}}$  всей цепи будет состоять из суммы двух последовательно соединенных компонентов, каждый из которых представляет собой параллельно соединенные сопротивление динамической головки и реактивный элемент, т. е.

$$R_{\text{общ}} = R_{\text{вЧ}} \parallel R_L + R_{\text{нЧ}} \parallel R_C. \quad (53)$$

Сопротивление катушки индуктивности с учетом фазы переменного тока представляется в виде

$$R_L = i\omega L, \quad \omega = 2\pi f, \quad i^2 = -1,$$

а сопротивление конденсатора — в виде

$$R_C = \frac{1}{i\omega C}, \quad i^2 = -1.$$

Несложные, но громоздкие преобразования приводят к выражению для полного сопротивления всей системы в виде

$$R_{\text{общ}} = R_{B\text{Ч}} \parallel R_L + R_{H\text{Ч}} \parallel R_C = R_{B\text{Ч}} \frac{1 + i \frac{f}{f_0}}{\frac{R_{B\text{Ч}}}{R_{H\text{Ч}}} + i \frac{f}{f_0}}.$$

Интересно отметить, что из последней формулы при  $R_{B\text{Ч}} = R_{H\text{Ч}} = R$  получаем, что полное сопротивление акустической системы  $R_{\text{общ}} = R$ , т. е. не зависит от частоты. И это несмотря на то, что сопротивления конденсатора и катушки индуктивности от частоты зависят. В этом проявляется уникальное свойство последовательных фильтров первого порядка.

Далее рассуждения и преобразования похожи на вывод формулы (45) для фильтра высоких частот. АЧХ — амплитудно-частотная характеристика представляет собой квадрат модуля отношения напряжения  $U_{H\text{Ч}}$  на зажимах НЧ- или  $U_{B\text{Ч}}$  на зажимах ВЧ-головки к полному входному напряжению  $U_0$ . В свою очередь отношение напряжений для ВЧ- и НЧ-компонентов просто равно отношению сопротивления соответствующего плеча к полному сопротивлению всей системы. В результате получаем

$$\begin{aligned} A\text{ЧХ}_{B\text{Ч}} &= \left| \frac{U_{B\text{Ч}}}{U_0} \right|^2 = \left| \frac{R_{B\text{Ч}} \parallel R_L}{R_{\text{общ}}} \right|^2 = \frac{f^2}{f_0^2 + f^2}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi CR_{B\text{Ч}}} = \frac{R_{H\text{Ч}}}{2\pi L}, \\ A\text{ЧХ}_{H\text{Ч}} &= \left| \frac{U_{H\text{Ч}}}{U_0} \right|^2 = \left| \frac{R_{H\text{Ч}} \parallel R_C}{R_{\text{общ}}} \right|^2 = \frac{f_0^2}{f_0^2 + f^2}, \quad A\text{ЧХ}_{B\text{Ч}} + A\text{ЧХ}_{H\text{Ч}} = 1. \end{aligned} \quad (54)$$

Как видим, формулы для АЧХ последовательного фильтра по форме сопадают с таковыми для элементарных  $RC$ - (формула (45)) и  $LC$ - (формула (47)) фильтров. Однако последовательные фильтры обеспечивают равномерную суммарную АЧХ = 1 для произвольных значений сопротивлений НЧ- и ВЧ-головок! Напомним, что при парал-

ельном включении фильтров равномерность АЧХ получается только при равных и не зависящих от частоты сопротивлениях головок.

### Преимущества и недостатки

Передаточные характеристики для ВЧ- (ФВЧ) и НЧ-плеч (ФНЧ) акустической системы показаны на рис. 5.18 сплошными линиями. Их сумма представляет собой горизонтальную прямую. Сравним с рис. 5.10, где показаны такие же графики для параллельных фильтров. На первый взгляд — одно и то же.

Действительно, формулы (54) совпадают с такими же для параллельных фильтров. Но в случае параллельных фильтров необходимо жесткое выполнение равенства сопротивлений НЧ-СЧ- и ВЧ-головок. В случае же последовательных фильтров они могут различаться, например в два, в три или даже более раз.

С помощью последовательных фильтров можно, например, объединять в одной акустической системе головку сопротивлением 4 Ом с головкой сопротивлением 8 Ом. Главное, чтобы выполнялись условия (52). Они повторены и в формулах (54): индуктивность рассчитывается для работы в качестве ФНЧ совместно с сопротивлением  $R_{\text{НЧ}}$ , а емкость рассчитывается для работы в качестве ФВЧ совместно с сопротивлением  $R_{\text{ВЧ}}$ .

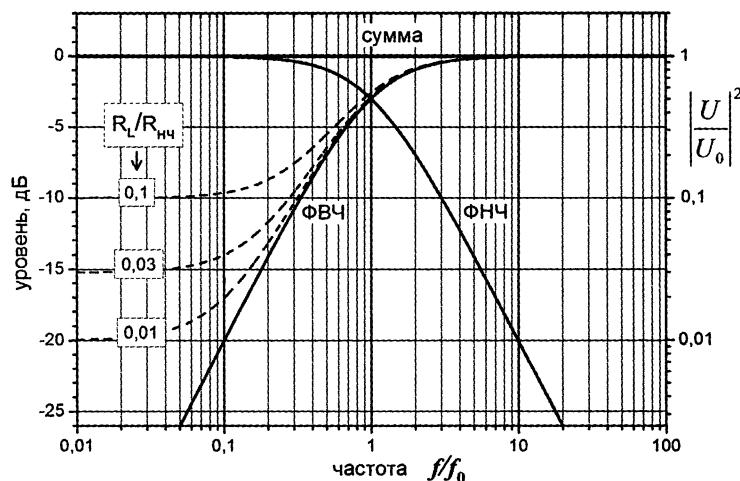


Рис. 5.18. Передаточные характеристики последовательных фильтров первого порядка.  
 $R_L$  — активное паразитное сопротивление катушки индуктивности

Итак, первое преимущество последовательных фильтров первого порядка по сравнению с параллельными: *не требуется подбор НЧ-СЧ- и ВЧ-головок с одинаковыми номинальными сопротивлениями!*

Более того, добавляя сопротивления последовательно с динамической головкой, можно выравнивать звуковое давление для головок с разной чувствительностью. При этом не требуется изменять схему фильтров. Только надо учесть увеличенное сопротивление ВЧ-головки при расчете значения емкости  $C$ .

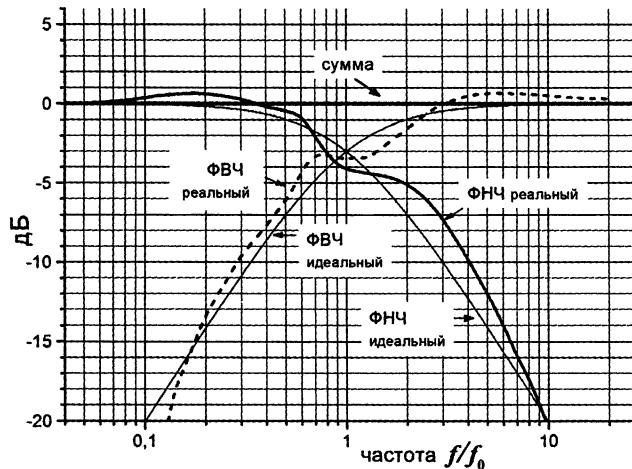


**Примечание.**

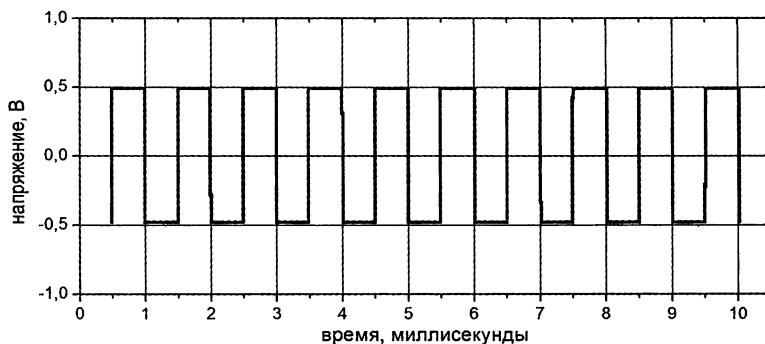
*К НЧ-головке обычно не подключают резистор, чтобы, во-первых, не потерять заметно в мощности, во-вторых, не изменять фактор демпфирования (отношение сопротивления головки к выходному сопротивлению усилителя). Включенное последовательно с НЧ-головкой сопротивление сложится с выходным сопротивлением УНЧ и снизит фактор демпфирования.*

Второе преимущество последовательных фильтров по сравнению с параллельными является следствием первого: *нет необходимости компенсировать индуктивный характер сопротивления динамических головок!*

Это замечательное свойство иллюстрируется на рис. 5.19, где показаны передаточные характеристики фильтров и суммарная АЧХ



**Рис. 5.19.** Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) последовательных фильтров высоких (ФВЧ) и низких (ФНЧ) частот первого порядка при работе с реальными динамическими головками, и суммарная АЧХ акустической системы



*Рис. 5.20. Результат моделирования передачи прямоугольных импульсов длительностью 0,5 мс амплитудой ±0,5 В двухполосной акустической системой с реальными импедансами динамических головок и последовательными фильтрами первого порядка (данные Р. Эллиомта, <http://sound.westhost.com>)*

для реальной акустической системы с последовательными фильтрами первого порядка (моделирование выполнено А. Елютиным\*). Характеристика каждого фильтра существенно изменяется при работе на реальную динамическую головку. Однако суммарная АЧХ остается горизонтальной!

Третье преимущество последовательных фильтров первого порядка по сравнению с параллельными: *отличная передача импульсных сигналов!*

Это свойство иллюстрируется на рис. 5.20, где показаны результаты моделирования передачи прямоугольных импульсов длительностью 0,5 мс амплитудой ±0,5 В двухполосной акустической системой с реальными импедансами динамических головок. Сравним с рис. 5.16. Преимущества последовательных фильтров очевидны.



#### Примечание.

*Дополнительное преимущество последовательных фильтров — невосприимчивость к тепловым изменениям сопротивлений динамических головок.*

Коэффициент полезного действия динамической головки составляет примерно 1%. Это значит, что 99% подводимой мощности, в конце концов рассеивается в виде тепла. Значительная часть тепловых потерь связана с нагревом звуковой катушки. Сопротивление провода, которым намотана катушка, увеличивается с ростом температуры.

\* «Автозвук», 2010. №1.

Поэтому, в процессе работы, особенно на высоких уровнях громкости, сопротивления динамиков могут отличаться от расчетных. Это приведет к изменению частоты раздела. Самое неприятное последствие этого эффекта — не просто в рассогласовании разделительных фильтров и смещении частоты раздела, а в динамичном, случайном характере этих изменений.

Как видно из предыдущего рассмотрения, для параллельных фильтров этот отрицательный эффект неизбежен, тогда как при использовании последовательных фильтров он полностью отсутствует.

Не правда ли, достоинства последовательных фильтров первого порядка впечатляют? Столько преимуществ при предельной простоте! Но, к сожалению, как это часто бывает, *достоинства существуют одновременно с недостатками*.

Первым недостатком фильтров первого порядка (и рассматриваемого последовательного фильтра, и альтернативного ему *параллельного*) является низкая крутизна спада за пределами  $f_0$ .



#### Примечание.

Это накладывает определенные требования на НЧ-головку: она должна быть способна к воспроизведению частот порядка 3—6 кГц.

Следует отметить, что это требование не сложно выполнить. Более того, если даже используемая в вашей системе НЧ-СЧ-головка будет иметь завал на этих частотах это не только не ухудшит серьезно качество воспроизведения, но даже наоборот, может улучшить тембровый баланс из-за повышенной чувствительности уха в этой области: звуки меньшей интенсивности будут казаться достаточно громкими вследствие спада на кривых равной громкости (см. рис. 1.1).

Вторым недостатком всех фильтров первого порядка является *опасность перегрузки ВЧ-динамика* низкочастотными сигналами вследствие малой крутизны передаточной функции фильтра, а также возможность сильных искажений вблизи его резонансной частоты. Чтобы минимизировать этот недостаток фильтров первого порядка, необходимо выбирать частоту раздела  $f_0$  в 4 и более раз выше резонансной частоты ВЧ-головки.

**Примечание.**

*Иначе говоря, для работы в акустической системе с ВЧ-фильтром первого порядка необходимо выбирать ВЧ-головки с пониженной частотой резонанса: 500—700 Гц. Частоту раздела следует выбирать примерно 4—5 кГц.*

Такие головки, как правило, имеют большую мощность и более высокую стоимость. Однако высокая верность воспроизведения благодаря хорошей передаче импульсных сигналов стоит таких затрат.

Тем более, что одновременно увеличивается запас по мощности и повышается линейность, уменьшаются расходы на дополнительные конденсаторы и сокращается общее число реактивных компонентов в звуковом тракте, т. е. звуковой тракт становится более коротким. Последнее, как известно, является одним из главных принципов современного высококачественного звукоспроизведения.

**Примечание.**

*Оба недостатка являются общими для всех фильтров первого порядка: как последовательных, так и параллельных.*

Малая крутизна фильтров чревата искажениями для ВЧ-головки на высоких уровнях мощности. Однако, в домашних условиях при использовании рекомендованных ВЧ-головок (рис. 5.14) повышенной мощности с резонансной частотой примерно 500—700 Гц при работе на комфортных уровнях громкости искажения незаметны. А преимущества по сравнению с параллельными фильтрами, а также с фильтрами более высоких порядков — очень даже заметны.

Третий недостаток последовательного фильтра первого порядка (у альтернативного ему параллельного фильтра первого порядка этот недостаток отсутствует) — влияние паразитного активного сопротивления катушки индуктивности на степень ослабления НЧ-составляющей входного сигнала для ВЧ-головки. Параллельное подключение индуктивности к ВЧ-головке благоприятно, так как ослабляет проникновение нежелательного сигнала на средних частотах.

Однако одновременно с индуктивностью к ВЧ-головке подключается и независящее от частоты сопротивление медного провода, которым намотана катушка. Индуктивное сопротивление в пределе  $f \rightarrow 0$  в идеале должно стремиться к нулю, но реально оно стремится к конечной величине — сопротивлению провода!

На рис. 5.18 пунктирными кривыми показано, как изменяется передаточная характеристика фильтра высоких частот при учете паразитного активного сопротивления катушки  $R_L$ .

Конечное сопротивление катушки на низких частотах приводит к тому, что при  $f \rightarrow 0$  коэффициент передачи ФВЧ стремится не к нулю, а к конечному значению, равному отношению активного сопротивления катушки к суммарному сопротивлению НЧ-динамика и катушки индуктивности. ВЧ-головка на самых низких частотах оказывается подключенной просто к резистивному частотно-независимому делителю напряжения.

Эта нетривиальная ситуация заслуживает того, чтобы ее спокойно обсудить. К сожалению, многие сторонники последовательных фильтров упускают отмеченный недостаток, стремясь подчеркнуть, что шунтирование ВЧ-головки индуктивностью улучшает ее работу. Конечное (т. е. не равное нулю) паразитное сопротивление медного провода при этом не учитывают.

По умолчанию обычно подразумевается, что сопротивление катушки индуктивности должно быть как минимум в 10 раз ниже сопротивления НЧ-СЧ-головки. К сожалению, этого в случае последовательных фильтров недостаточно. Необходимо, чтобы сопротивление катушки индуктивности по постоянному току  $R_L$  было в 30—100 раз ниже сопротивления НЧ-головки, т. е. составляло примерно 0,04—0,13 Ом для головок номинальным сопротивлением 4 Ом. Если этого не сделать, один указанный недостаток последовательных фильтров перекроет все их достоинства: вы получите сильные искажения на высоких частотах.



#### Внимание.

ВЧ-головка оказывается электрически незащищенной и от возможного появления постоянного напряжения на выходе усилителя. Такая ситуация может возникнуть при неисправности усилителя.

Коэффициент ослабления постоянного напряжения равен коэффициенту ослабления в пределе  $f \rightarrow 0$ , т. е. примерно  $R_L/R_{\text{НЧ}}$ . Не подключайте акустические системы с последовательными фильтрами 1 порядка к усилителям сомнительного происхождения или к самодельным усилителям до их полной настройки и отладки!

$$L \text{ [мГн]} = 2 \cdot 10^{-6} N^2 \frac{(D+d)^2}{6,5D - 3,5d + 9h}$$

*N* - число витков

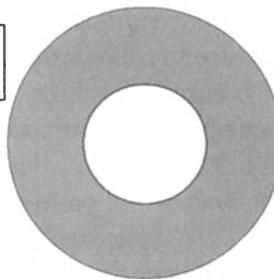
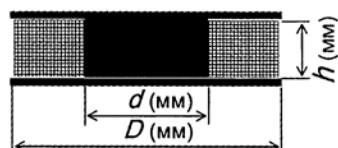


Рис. 5.21. Катушка индуктивности



#### Совет.

Катушку в последовательном фильтре первого порядка надо наматывать очень толстым проводом — диаметром 1,2—1,5 мм.

## 5.10. Расчет и изготовление катушек индуктивности

Для расчета многослойных катушек индуктивности цилиндрической формы (рис. 5.21) пользуются приближенной эмпирической формулой, предложенной Х. Уиллером в 1928 г.:

$$L \text{ [мГн]} = 2 \cdot 10^{-6} N^2 \frac{(D+d)^2}{6,5D - 3,5d + 9h}. \quad (55)$$

Рекомендуется применять медный эмалированный провод диаметром не менее 1,2 мм. Как оценить сопротивление провода  $R$ ? Вспомним школьную формулу

$$R = \rho l / S, \quad (56)$$

где  $\rho = 0,017 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  — удельное сопротивление меди,  $l$  — длина провода, а  $S$  — площадь его сечения. Длину провода можно приблизительно рассчитать, умножив средний периметр витка ( $\pi(D+d)/2$ ) на число витков  $N$ , т. е.

$$l \approx N\pi(D+d)/2.$$

Расчет катушки проводят обычно в несколько этапов методом последовательных приближений.

**Пример 1.** Рассчитаем индуктивность катушки со следующими размерами:  $D = 60$  мм,  $d = 20$  мм,  $h = 20$  мм. При плотной намотке проводом 1,3 мм по вертикали поместится  $h/1,3 = 15$  витков, по горизонтали  $((D - d)/2)/1,3 = 15$  витков. Таким образом, на такой катушке поместится до  $15 \times 15 = 225$  витков провода. С учетом реальной ручной намотки это число можно в оценках уменьшать на 10—15%, что дает примерно 200 витков. Расчет индуктивности по формуле (55) дает 1,0 мГн.

**Сколько провода необходимо для такой катушки?** Длину провода можно оценить как  $l \approx N\pi(D + d)/2 \approx 25$  м.

**Чему равно сопротивление такой катушки?** Сопротивление 25 м провода из меди диаметром 1,3 мм согласно формуле (56) равно 0,32 Ом.

**Пример 2.** Рассчитаем катушку для работы совместно с НЧ-головкой сопротивлением 4 Ом для частоты раздела 5 кГц. Необходимое значение индуктивности (формула 52) составит 0,13 мГн. Учитывая результаты предыдущего примера, подберем размеры и число витков для провода диаметром 1,5 мм.

При тех же размерах катушки ( $D = 60$  мм,  $d = 20$  мм,  $h = 20$  мм) на ней уместится примерно 140 витков. Учитывая, что индуктивность пропорциональна квадрату числа витков мы получим индуктивность примерно 0,5 мГн.

Таким образом, необходимо уменьшать размеры. Выберем  $D = 50$  мм,  $d = 20$  мм,  $h = 10$  мм, диаметр провода 1,5 мм. На каркасе уместится примерно 60 витков провода. Получаем индуктивность примерно 0,1 мГн. Это меньше необходимого значения. Увеличиваем диаметр до  $D = 55$  мм, число витков до 66 и повторяем расчет. Получаем 0,14 мГн. Наматываем и измеряем индуктивность.

Затем добавляем или уменьшаем число витков до получения нужного значения. Длина провода составит примерно 7,3 м, а его сопротивление — всего 0,07 Ом. Отличный результат в смысле малости сопротивления катушки по сравнению с сопротивлением головки.

Итак, приведем для сведения значения индуктивности некоторых катушек

- $D = 60$  мм,  $d = 20$  мм,  $h = 20$  мм,  $N = 200$ ,  
провод 1,3 мм  $\rightarrow L = 1$  мГн
- $D = 60$  мм,  $d = 20$  мм,  $h = 20$  мм,  $N = 140$ ,  
провод 1,5 мм  $\rightarrow L = 0,5$  мГн

- ♦  $D = 55 \text{ мм}, d = 20 \text{ мм}, h = 20 \text{ мм}, N = 66,$   
провод 1,5 мм →  $L = 0,14 \text{ мГн}$
- ♦  $D = 50 \text{ мм}, d = 20 \text{ мм}, h = 10 \text{ мм}, N = 60,$   
провод 1,3 мм →  $L = 0,1 \text{ мГн}.$

Возникает вопрос: как измерить индуктивность катушки? Проще всего, разумеется, воспользоваться измерителем индуктивности. Если такой возможности нет, необходимо с помощью генератора, усилителя и вспомогательного сопротивления величиной примерно 4–10 Ом измерить полное сопротивление катушки  $R$  на известной частоте, например,  $f = 1000 \text{ Гц}$ . Схема измерений такая же, как на рис. 5.1. Затем рассчитать индуктивность по формуле  $L = (R - R_L)/(6,28f)$ . Напомню, что  $R_L$  — сопротивление катушки по постоянному току, измеренное обычным омметром.



#### Совет.

*Не устанавливайте катушку индуктивности в акустическую систему, если вы не уверены, что ее индуктивность имеет нужную величину. Ручная намотка проводом большого диаметра приводит обычно к заниженным значениям индуктивности по сравнению с расчетным значением. Учитывайте это обстоятельство.*

Если у вас недостаточно опыта, увеличивайте заранее размеры каркаса примерно на 10%, наматывайте до заполнения, затем измеряйте индуктивность и уменьшайте до получения нужного значения индуктивности.

Для получения минимального паразитного сопротивления катушки (и минимального расхода медного провода) рекомендуется использовать следующие пропорции катушки (Н. Тиле, 1975 г.):

$$D = 2d = 4h.$$

В этом случае индуктивность и сопротивление связаны соотношением

$$L [\text{мкГн}] / R [\text{Ом}] = 8,66 h^2 [\text{мм}^2],$$

а формула (55) принимает вид

$$L [\text{мГн}] = 2,58 \cdot 10^{-6} N^2 h (\text{мм}).$$

Пример 3.  $D = 60 \text{ мм}, h = 15 \text{ мм}, d = 30 \text{ мм}, N = 100$ . «Окно»  $15 \times 15 \text{ мм}$ , т. е. можно в принципе уложить в окне  $10 \times 10 = 100$  витков провода

диаметром (по лаку) 1,5 мм. Реально с учетом ручной намотки при том же количестве витков применить диаметр провода 1,2—1,3 мм. Получим индуктивность  $L = 0,38$  мГн. Сопротивление будет равно примерно  $380/(8,66 \cdot 225) = 0,2$  Ом.



#### Примечание.

По оценкам А. Петрова\*, выигрыш по уменьшению сопротивления составляет всего несколько процентов. Поэтому, если у вас нет возможности выдержать пропорцию  $D = 2d = 4h$  — не страшно.



#### Внимание.

Применяя сердечник из материала с высокой магнитной проницаемостью, можно уменьшить число витков катушки, а значит, длину провода и его активное сопротивление. Однако в высококачественных акустических системах рекомендуется использовать только катушки без сердечников. Применение сердечников может привести кискажениям из-за насыщения материала сердечника при высоких значениях тока.

Если вы планируете устанавливать катушку индуктивности, используя сверху большую шайбу в сочетании с винтом вдоль оси катушки, учтите, что винт должен быть сделан из немагнитного материала, например, из эбонита, фторопласта или гетинакса, в крайнем случае, из алюминиевого или медного сплава.

Еще лучше — сделать нижнее основание большего диаметра или с «ушками», что позволит просто привинтить катушку к плате или к стенке корпуса акустической системы винтами или шурупами без ограничения на параметры материала, из которого они изготовлены.

Обращаю внимание, что катушка индуктивности, включаемая в составе RLC-цепочки для подавления резонанса ВЧ-головки (рис. 5.13) не должна иметь минимальное сопротивление. Допустима величина в пределах 1—3 Ом.

Во-первых, катушка итак включена последовательно с резистором сопротивлением несколько ом.

Во-вторых, повышение ее сопротивления понизит добротность контура в целом и позволит значительно уменьшить резонансный

\* Петров А. А. Звуковая схемотехника для радиолюбителей. — СПб.: Наука и Техника. — 2003.

выброс сопротивления даже в случае неточной настройки LC-контура на резонансную частоту головки.

## 5.11. Советы по выбору конденсаторов



### Внимание.

*Прежде всего, запомните: электролитические конденсаторы в разделительных фильтрах акустических систем применять недопустимо!*

Во-первых, они рассчитаны на работу при наличии внешней разности потенциалов.

Во-вторых, диэлектрическая проницаемость электролита в таком конденсаторе падает с ростом частоты, за исключением небольшого числа высококачественных и поэтому очень дорогих марок (например, Rubycon Black Gate или Elna Cerafine).

«Бюджетный» вариант — отечественные конденсаторы К40У-9 или МБГЧ. Есть много рекомендаций по улучшению их звучания путем удаления металлического корпуса и замены его самодельным пластмассовым корпусом. Можно применять пленочные серии К73 или ФТ, зарубежные, например, Philips, WIMA серии МКР. Это обозначение означает применение в конденсаторе полипропилена в качестве диэлектрика.

Средний по стоимости вариант — пленочные конденсаторы с алюминиевой фольгой, предназначенные для аудиоприменений («Mundorf», «Visaton», «MultiCap», «SuperCap») стоимостью от 100 до 300 росс. руб. (до 10 долл. США). Такие конденсаторы можно приобрести на радиорынках крупных городов, или через сайт <http://samodelka.ru> с доставкой по России и некоторым странам СНГ.

Наконец, вариант для экстремалов — эксклюзивные пленочные или бумаго-масляные конденсаторы с медной или даже серебряной фольгой («Jensen», «Solen»). Стоимость одного такого конденсатора емкостью несколько микрофарад может легко «перевалить» за 100 долл. США.

## 5.12. Последовательные и параллельные фильтры в трехполосных системах

Трехполосная система содержит три излучателя: НЧ-, СЧ- и ВЧ-головки. Рекомендации по подбору динамических головок для трехполосных систем содержатся в разделе 5.5.

На рис. 5.22 показана схема трехполосной акустической системы с *параллельными фильтрами* первого порядка. НЧ-головка подключается через фильтр низких частот (ФНЧ) с частотой среза  $f_1$ . ВЧ-головка подключается через фильтр верхних частот (ФВЧ) с частотой среза  $f_2 > f_1$ .

Дополнительную головку подключают через полосовой фильтр, пропускающий сигналы в интервале от  $f_1$  до  $f_2$ . Такой фильтр представляет собой объединение ФНЧ с частотой среза  $f_1$  и ФВЧ с частотой среза  $f_2$ . Формулы для расчета фильтров указаны на рис. 5.22. Рекомендуемые значения полос разделяния:  $f_1 = 200—250$  Гц,  $f_2 = 4—5$  кГц.



### Примечание.

*Все головки должны иметь одинаковое номинальное сопротивление R. НЧ- и СЧ-головки должны быть снабжены RC-цепочками, компенсирующими индуктивный характер сопротивления (рис. 5.12).*

Рекомендуется применять ВЧ-головку с частотой собственного резонанса не выше 800 Гц и применить RLC-цепочку для компенсации «всплеска» ее сопротивления на частоте резонанса (рис. 5.13)

На рис. 5.23 показана схема трехполосной акустической системы с *последовательными фильтрами 1 порядка*. Как видно, сначала при помощи элементов  $L^*, C^*$  входной сигнал разделяется между НЧ- и (СЧ+ВЧ)-динамиками. Частота раздела  $f_1$  выбирается в диапазоне 200—250 Гц. Емкость конденсатора  $C^*$  рассчитывается для этой частоты и номинального сопротивления СЧ-головки. Индуктивность  $L^*$  рассчитывается для этой же частоты и номинального сопротивления НЧ-головки.

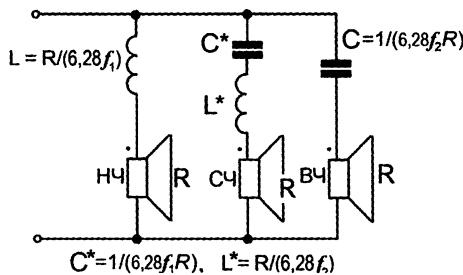


Рис. 5.22. Трехполосная система с параллельными фильтрами первого порядка

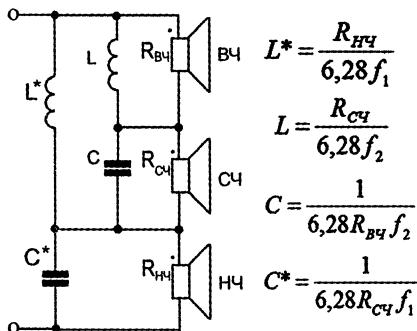


Рис. 5.23. Трехполосная система с последовательными фильтрами первого порядка

Далее элементы  $L$  и  $C$  разделяют (СЧ+ВЧ)-часть сигнала между СЧ- и ВЧ-головками. Частота раздела  $f_2$  выбирается в диапазоне 4—5 кГц. Емкость конденсатора  $C$  рассчитывается для этой частоты и номинального сопротивления ВЧ-головки. Индуктивность  $L$  рассчитывается для этой же частоты и номинального сопротивления СЧ-головки. Расчетные формулы приведены на рис. 5.23. В отличие от параллельных фильтров:

- номинальные сопротивления головок могут различаться;
- индуктивный характер сопротивления НЧ- и СЧ- головок можно не компенсировать;
- можно не добавлять RLC-цепочку для подавления резонанса ВЧ-головки.

Эти возможности являются прямым следствием уникальных свойств последовательных фильтров I порядка. Дополнительным преимуществом *трехполосных* последовательных фильтров является дополнительное шунтирование ВЧ-головки индуктивностью  $L^*$ , уменьшающие проникновение в ВЧ-канал низкочастотных сигналов, вредных для качества звучания, а в случае большой их мощности — даже опасных для ВЧ-головки.



#### Примечание 1.

Рекомендуется применять ВЧ-головку с частотой собственного резонанса не выше 800 Гц, а СЧ-головку — с частотой резонанса примерно 50—65 Гц. В такой системе — это главная головка, ее диаметр не должен быть меньше 16 см (6,5 дюймов). НЧ-головку желательно выбирать диаметром 25 см с резонансной частотой примерно 30 Гц.



#### Примечание 2.

Катушки индуктивности должны иметь сопротивление не более 0,1 Ом. Для этого катушку  $L$  (индуктивность порядка 0,1—0,2 мГн) нужно наматывать проводом диаметром 1,2—1,3 мм, а катушку  $L^*$  (ее индуктивность порядка 1,5—2,5 мГн) — проводом 1,3—1,5 мм.

*Отнеситесь к этому серьезно! Это прямое следствие простоты и уникальности последовательных фильтров.*



#### Совет.

*Необходимо разнести в пространстве катушки индуктивности на расстояние, заметно большее их размера, чтобы исключить их взаимное влияние. Если такой возможности нет, катушки необходимо установить так, чтобы их оси были взаимно ортогональны (рис. 5.24).*

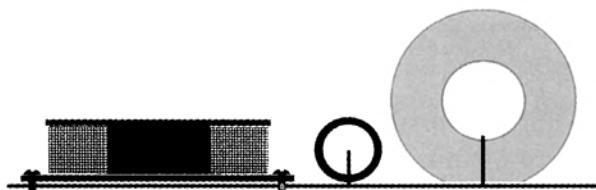


Рис. 5.24. Взаимная ориентация двух катушек индуктивности

### 5.13. Фильтры высоких порядков

#### Последовательные и параллельные фильтры II порядка

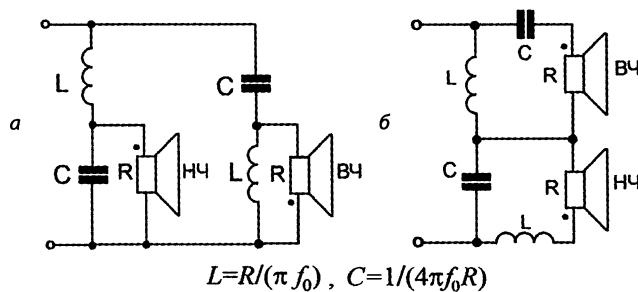
Фильтры второго порядка содержат одну катушку индуктивности и один конденсатор. Схемы двухполосной акустической системы с параллельными и последовательными фильтрами показаны на рис. 5.25. Приведенные на этом рисунке формулы соответствуют т. н. фильтрам «всепропускающего типа», обеспечивающим плоскую суммарную АЧХ по напряжению, малые фазовые искажения, пониженную чувствительность к отклонениям номиналов элементов от расчетных. Фильтры всепропускающего типа были предложены в 1971 г. Ричардом Смоллом\*, их более подробное описание можно найти в книгах\*\*.

Главное и, по-видимому, единственное преимущество фильтров II порядка по сравнению с фильтрами I порядка: *фильтры второго порядка обладают крутизной 12 дБ на октаву.*

Это позволяет по сравнению с фильтрами первого порядка уменьшить проникновение на головки сигналов вне рабочего диапазона. Повышенная

\* R. Small, «Constant Voltage Crossover Network Design». Journ. Audio Engineering Society 1971, v.19, N1, p.12-19.

\*\* Алдошина И.А., Войшвило В.Г. Высококачественные акустические системы и излучатели. М.: Радио и связь. — 1985; Петров А. А. Звуковая схемотехника для радиолюбителей. — СПб.: Наука и Техника. — 2003.



*Рис. 5.25. Двухполосная акустическая система II порядка:  
а — параллельные фильтры; б — последовательные фильтры.  
Головки включаются противофазно*

крутизна особенно благоприятна для ВЧ-головок, так как в этом случае частота раздела может отличаться от резонансной частоты головки не в 4—5 раз, как рекомендовано ранее для фильтров первого порядка, а в 3—4 раза. Это позволяет применить более дешевые ВЧ-головки.

А теперь — о недостатках. Фильтры II порядка последовательного типа по сравнению с параллельными фильтрами II порядка *не имеют ни одного из преимуществ, описанных в разделе 5.9*.

Иначе говоря, схемы на рис. 5.25, а и рис. 5.25, б с точки зрения качества звучания, по-видимому, одинаковы. Это значит, что:

- ♦ все головки должны иметь одинаковое номинальное сопротивление  $R$ ;
- ♦ НЧ-головка должна быть снабжена RC-цепочкой, компенсирующей индуктивный характер сопротивления (рис. 5.12);
- ♦ рекомендуется установить RLC-цепочку, компенсирующую «всплеск» сопротивления ВЧ-головки (рис. 5.13).

Кроме того, фильтры II порядка имеют *сложную фазовую характеристику*. В первом приближении головки надо включать *противофазно*, однако некоторые авторы советуют экспериментально подобрать оптимальную полярность подключения головок. Сложная фазовая характеристика порождает плохую передачу импульсных сигналов.

Фильтры второго порядка обычно используют в акустических системах среднего класса. Они не рекомендуются для изготовления высококачественных систем. Единственный «шанс» для фильтров второго порядка — это применение фильтров «всепропускающего типа» (формулы указаны на рис. 5.25) для склонных к экспериментированию самодельщиков.

В фильтрах второго порядка последовательного типа (в отличие от последовательных фильтров первого порядка) нет жесткого условия

на минимизацию активного сопротивления катушки индуктивности, шунтирующей ВЧ-головку. Это связано с тем, что ВЧ-головка в последовательном фильтре второго порядка защищена от проникновения НЧ-сигналов и постоянного тока дополнительным конденсатором.

### ВЧ-фильтры III порядка

Фильтры третьего порядка содержат две индуктивности и один конденсатор (ФНЧ) или два конденсатора и одну индуктивность (ФВЧ). В высококачественных акустических системах промышленного изготовления часто применяется комбинация НЧ-фильтр I порядка — ВЧ-фильтр III порядка. Схема такой акустической системы показана на рис. 5.26.

В этом случае используется естественное уменьшение отдачи НЧ-СЧ-головки на частотах выше выбранной частоты раздела. Однако комбинация затухания  $-6\text{dB}/\text{oктава}$  для НЧ-фильтра I порядка плюс спад собственной АЧХ НЧ-СЧ-головки часто оказывается недостаточной для обеспечения плоской суммарной АЧХ совместно с ВЧ-фильтром III порядка. Тогда частоту среза НЧ-фильтра I порядка выбирают ниже частоты среза ВЧ-фильтра III порядка. Этот прием используют многие фирмы.

«Идеальные» головки в такой комбинации фильтров включаются противофазно. Однако реальные фазочастотные параметры головок часто приводят к более хорошему звучанию системы при синфазном подключении головок.

Формулы для расчета элементов фильтров представлены на рис. 5.26. ФВЧ III порядка рассчитывается как фильтр «всепропускающего типа». Обращаем внимание, что при использовании схемы, показанной на рис. 5.26, необходимо выполнение следующих условий:

- ◆ номинальные сопротивления НЧ- и ВЧ-головок должны быть равны;
- ◆ индуктивный характер сопротивления НЧ-головки должен быть скорректирован элементами  $C^*$ ,  $R^*$  (рис. 5.12 и комментарий к нему).

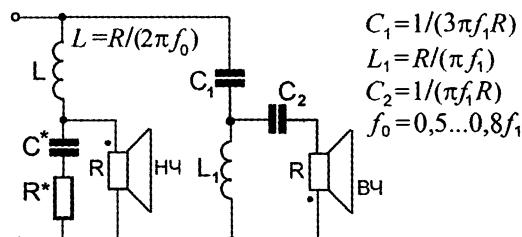


Рис. 5.26. Акустическая система с НЧ-фильтром I порядка и ВЧ-фильтром III порядка «всепропускающего» типа

Схема, показанная на рис. 5.26, используется не только во многих профессиональных, но и в большинстве любительских разработок. Например, такую схему имеют системы, описанные в книге С. Д. Батя.\*

Импульсные характеристики такой акустической системы лучше, чем системы с НЧ- и ВЧ-фильтрами II порядка, но хуже, чем для АС с последовательными фильтрами I порядка. Эта простейшая система по импульсным характеристикам остается недосягаемой для всех альтернативных комбинаций фильтров.

### Подведем итоги

Конструкция разделительных фильтров существенно влияет на динамику звучания. Наилучшую переходную характеристику обеспечивают фильтры первого порядка. Фильтры более высоких порядков такой способностью не обладают. Их применение в подавляющем большинстве коммерческих домашних акустических систем средней ценовой категории (порядка 1 тыс. долл.) связано с желанием «круче» разграничить участки спектра, предназначенные для НЧ-, СЧ- и ВЧ-излучателей, чтобы уменьшить их искажения.

Для использования фильтров первого порядка необходимо иметь запас по полосе воспроизводимых частот для всех динамиков, а это значительно увеличивает стоимость всей системы.

Последовательные фильтры I порядка имеют минимум компонентов и наилучшие импульсные характеристики. Они не требуют ни подбора динамических головок по номинальному сопротивлению, ни добавления цепей, компенсирующих индуктивный характер их сопротивления.

Единственным серьезным недостатком этих фильтров является необходимость выбора ВЧ-головки, а в трехполосных системах — и СЧ-головки с резонансной частотой в 4–5 раз ниже частоты раздела. Частота раздела НЧ-СЧ- и ВЧ-полос выбирается в интервале 4–5 кГц, НЧ- и СЧ-полос в трехполосной системе — 200–250 Гц.

Фильтры второго порядка не рекомендуются для применения.

При отсутствии в вашем распоряжении ВЧ-головки с резонансной частотой ниже 1 кГц применяйте сочетание НЧ-фильтра I порядка с ВЧ-фильтром III порядка. Рекомендуется частоту среза ФНЧ выби-

---

\* Батя С. Любительские громкоговорители. М.: Радиософт. — 2002.

рать ниже частоты среза ВЧ-фильтра. Попробуйте подобрать индуктивность катушки таким образом, чтобы получить достойное звучание без применения RC-цепочки для коррекции импеданса НЧ-СЧ-головки. Так поступают многие «именитые» производители.



### Вывод.

Таким образом, последовательные фильтры I порядка гарантируют надежно ровную частотную характеристику и динамичное звучание при условии применения ВЧ-головки с низкой резонансной частотой. Фильтры II порядка — не для меломанов. Комбинация фильтров I-III-порядков — путь к хорошему звучанию методом проб и ошибок для терпеливых и тщательных самодеятельных конструкторов.

## 5.14. Изготовление корпуса

### Выбор материала для корпуса

Наилучший материал для корпуса акустических систем — натуральный мрамор. Однако ввиду нереальности такого решения для абсолютного большинства читателей этот вариант обсуждаться не будет.

Материал корпуса должен быть плотным и неоднородным, чтобы уменьшить возможность возникновения колебаний стенок корпуса. Мрамор — хороший прототип для представления о подходящем материале. Стенки колонок должны представлять абсолютно глухой, непреодолимый барьер для звуковых волн.

Корпус колонки не должен «петь», как корпус скрипки, контрабаса или гитары. Другой, после мрамора, адекватный образ устройства корпуса колонок — двойные стенки, промежуток между которым заполнен сухим песком. Это — экстремальные варианты.

Обсудим более реальные решения. Прекрасным материалом является березовая многослойная фанера. При изготовлении относительно узких и высоких колонок типа «Т-линия» минимальная толщина — 20 мм, лучше 30 мм. Можно устанавливать дополнительные распорки внутри.

При изготовлении корпуса в виде параллелепипеда с примерно одинаковыми размерами по высоте, длине, и ширине (например,

НЧ-канал в трифонической системе или сабвуфер) 30 мм — это минимальная толщина.

Фанера хороша по механическим и акустическим параметрам, однако ее придется покрывать шпоном для придания достойного внешнего вида. Это может оказаться трудно осуществимым для многих «самодельщиков». В этом случае рекомендуем воспользоваться доступными на строительных рынках щитами из склеенных березовых, а еще лучше — дубовых брусков размером примерно 30×30 мм.

Подходящим материалом по механическим свойством является древесностружечная плита (ДСП) и древесноволокнистая плита (ДВП, по-английски MDF — medium density fiberboard, волокнистая плита средней плотности). Однако их обработка, склеивание и отделка в домашних условиях могут представлять серьезные трудности.

Хороший материал — деревянная доска твердых пород дерева (дуб, карельская береза, береза, клен). Он не требует отделки (просто пропитка красящим составом («морилкой») и при желании — легкая лакировка мебельным лаком из аэрозольного баллончика).

Но по акустическим параметрам клееные из брусков щиты и многослойная фанера предпочтительнее. Щиты из брусков имеют хороший внешний вид с четкой фактурой натурального дерева и требуют лишь минимальной отделки подобно деревянной доске.

### Сборка корпуса

Стенки корпуса колонки необходимо скрепить и склеить, в идеальном случае — с соблюдением всех правил столярных технологий (т. е. пресс, столярный клей). Такая возможность есть не у всех. Тогда рекомендуется скрепить стенки корпуса длинными шурупами-саморезами, предварительно промазав соприкасающиеся поверхности kleem (рис. 5.27).



#### Совет.

*Внимательно читайте инструкцию по применению клея. Многие клеи требуют нанесения предварительного слоя и его просушки, до нанесения основного. Не покупайте клей в маленьких тюбиках! Это увеличит затраты.*

Длина шурупа должна в два и более раз превышать толщину соединяемых панелей. В верхней (рис. 5.27, а) панели для облегчения

вворачивания шурупов можно просверлить предварительно отверстия диаметром примерно 2,5 мм. Их диаметр зависит от твердости выбранного вами типа древесины. Его можно несколько увеличить при использовании дубовых панелей и несколько уменьшить при использовании менее плотных хвойных пород.

Шурупы будут видны снаружи. Это не страшно. Если их вид вас совсем не устраивает, можно утопить шляпки в дереве, а затем закрыть деревянными кружками из дерева той же породы. Хуже, если вы попытаетесь ввинчивать их изнутри, чтобы спрятать шляпки. Шляпки спрячутся, но крепление получится непрочным. Никаких вспомогательных брусков, уголков и т. п. элементов не требуется. Если вам хочется их применить, значит, вы выбрали недостаточную толщину стенок корпуса.

При сборке корпуса сначала наглоухо скрепляются четыре боковые стенки. Нельзя делать заднюю стенку съемной! Это ослабит конструкцию. Верхняя и нижняя стенки укрепляются окончательно только после подбора (на слух!) оптимального виброзвукопоглощающего покрытия и, если нужно, частичного заполнения волокнистым материалом внутреннего объема.

При тестовых прослушиваниях нижняя стенка прижимается весом акустической системы, а верхняя — ящиком, заполненным мелкими камешками или песком массой не менее 25 кг.

Нижняя стенка («днище») всегда делается толще всех остальных стенок. Например, она может просто состоять из двух склеенных и свинченных панелей, толщина которых равна толщине боковых стенок акустической системы. Рекомендуется также переднюю панель делать примерно в 1,5 раза толще боковых и задней панели.

Полезно внутри корпуса устанавливать распорки и другие элементы, повышающие жесткость корпуса, но не нарушающие цельность внутреннего объема.

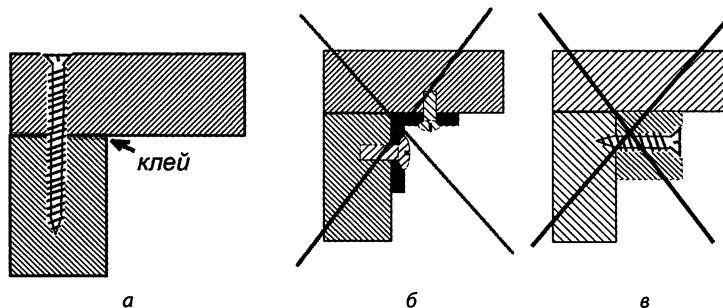


Рис. 5.27. Сборка корпуса

Детали разделительных фильтров размещаются на одной из боковых, а лучше — на нижней или верхней стенках. Эти стенки крепятся последними. Еще лучше разделительные фильтры разместить снаружи (на задней стенке) или снизу, в днище, предусмотрев дополнительное «двойное дно» без уменьшения толщины основной нижней стенки. Такое размещение позволит модернизировать фильтры или заменить по мере возможности его элементы более качественными.

Толщину передней стенки желательно сделать больше, чем всех остальных. Можно делать ее двухслойной для получения увеличенной толщины. Для этого исходные панели склеивают с помощью пресса, либо скрепляют изнутри шурупами, предварительно смазав поверхности kleem.

**Крепление динамических головок — снаружи.** Головки привинчиваются после сборки всего корпуса, если элементы фильтров находятся снаружи, или после сборки всего корпуса за исключением верхней или нижней стенки, если фильтр крепится на одной из них. Окончательное крепление верхней и или нижней стенки производится после завершения подбора компонентов фильтров и оклейки внутренних стенок звуко-вибропоглощающим материалом. Иногда приходится добавлять дополнительные слои материала, особенно часто это бывает в случае трансмиссионной линии. В процессе предварительного прослушивания «ящик» акустической системы должен быть максимально загерметизирован. Не закрепленная окончательно верхняя стенка прижимается тяжелым грузом, например, ящиком с песком массой 20 кг или более.

### **Борьба с отражениями и вибрацией**

Для получения хорошего звучания очень важно оклеить внутреннюю часть корпуса вибро- и звукопоглощающим материалом. Вибро- и звукопоглощение должны такими, чтобы на высоких уровнях громкости, положив снаружи руку на корпус акустической системы, вы не чувствовали никаких вибраций. Акустическая система — это не виолончель и не скрипка, где звучание корпуса играет большую роль. «Петь» должны динамические головки, а не стенки корпуса.

Это требование является общим для всех акустических систем. Для систем типа «трансмиссионная линия» дополнительно может потребоваться подбор плотности и объема звукопоглощающего материала в начальной части линии и в точках поворота воздушного потока.

Вибро-звукопоглощающее покрытие лучше делать многослойным. В качестве первого слоя можно применить любой вибро-шумопоглощающий состав типа мастик или резиноподобных затвердевающих составов. Такие составы продаются в хозяйственных и автомобильных магазинах. Можно применить линолеум, лучше сразу покрытый войлоком. Такой утепленный линолеум доступен в магазинах стройматериалов. Линолеум наклеивается на стенки корпуса.

Второй слой — мягкий ворсистый материал. В идеале — ковер из натуральной шерсти с длинным ворсом, экономичный вариант — искусственное ковровое покрытие с длинным ворсом. Вместо ковра можно применить специальные антишумовые покрытия, прощающиеся в автосалонах. Пример такого покрытия под названием «Шумофф-А» показан на рис. 5.28.

В качестве второго слоя можно использовать самодельные стеганые маты, изготовленные из тонкой ткани и синтепона или файбертека, доступных в магазинах, торгующих постельными принадлежностями или швейными товарами. Эти материалы предназначены для самостоятельного изготовления подушек и одеял. Можно использовать также поролон толщиной примерно 20 мм, но его поверхности желательно придать вид, похожий на рис. 5.28.

Для этого остро заточенной стальной трубкой в листе поролона вырезают периодические отверстия диаметром 15—25 мм. Лист наклеивается на стенку акустической системы поверх мастики или линолеума. Оставшиеся кружочки равномерно наклеиваются на соседнюю стенку.

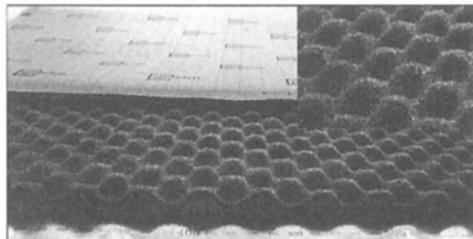
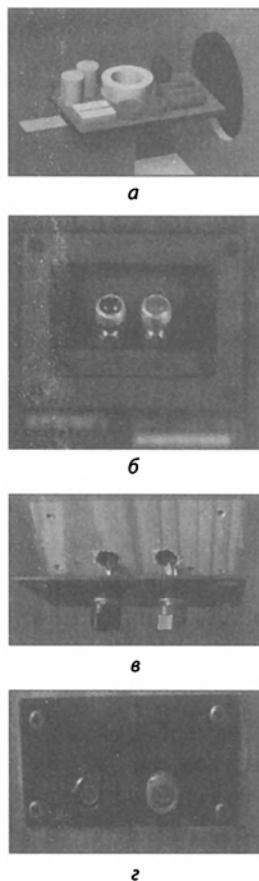


Рис. 5.28. Звукопоглотитель «Шумофф-А»

### Провода и клеммы

Провода в акустической системе должны иметь сечение 2—2,5 мм<sup>2</sup>. Такое же сечение должны иметь и провода, соединяющие акустическую систему с усилителем. Не рекомендуем тратить более 1—2 долл. за метр одиночного провода или более 2—3 долл. за метр двойного кабеля. Иначе потраченные деньги вызовут горечь и разочарование. Если есть возможность, возьмите на время попробовать дорогой акустический кабель и только после прослушивания тратьте деньги. Общее мне-



**Рис. 5.29.**  
Не рекомендуемые  
(*a*, *b*) и рекомендуемая  
(*c*, *d*) конструкции  
для выходных клемм  
акустической системы

системы на источники сигнала. Для этого необходимо применять определенные меры как по развязке акустических систем от пола, так и по развязке лазерного и винилового проигрывателей от пола (и стен).

Акустические системы нельзя просто ставить на пол. Сначала пол необходимо накрыть толстым ковром или его фрагментом по площади акустической системы. Можно использовать слой войлока толщиной примерно 1 см. Толще — лучше! Затем желательно положить либо плиту из мрамора (наилучший вариант), либо тротуарную плиту

ние многих самодельщиков-аудиофилов: лучше использовать большие средства на динамики и конденсаторы, чем на провода.

Не рекомендуется делать большое отверстие для выходных клемм. Многие производители в акустических системах средней (т. е. до 1 тыс. долл.) категории делают в задней стенке большое отверстие, в которое вставляется пластмассовая вставка с выходными клеммами, к этой же детали крепится плата разделительных фильтров (рис. 5.29 *a*, *b*). «Симпатичные» пластмассовые панели вместе с клеммами заполонили многие радиорынки. Воздержитесь от их применения. Не ослабляйте корпус пластмассовой вставкой. Сделайте так, как рекомендовано на рис. 5.29 *c*, *d*: два отверстия под провода диаметром 7—9 мм и панелька из текстолита, гетинакса, оргстекла или пластины с клеммами.

### Шипы

Для качественного воспроизведения низких частот важно обеспечить виброразвязку корпуса акустической системы от пола. Чтобы услышать «пение» барабанов и «быстрый» бас, надо исключить непосредственное «участие» пола и строительных перекрытий и стен в звуковоспроизведении.

Виброразвязка нужна и для того, чтобы исключить передачу вибраций акустической

подходящего размера, либо, в самом крайнем случае, — лист многослойной фанеры толщиной хотя бы 2—3 см (рис. 5.30).



#### Совет.

*Мраморные плиты можно заказать в некоторых мастерских по элитной отделке интерьеров, изготовлению каминов и т. п. Тротуарные плиты доступны в магазинах стройматериалов.*

В днище акустической системы устанавливаются «шипы» — стальные заостренные стержни. Если вместо мрамора или тротуарной плитки используется фанера, под шипы подкладывают стальные плоские пластины. Таким способом сводится до минимума площадь контакта акустической системы с полом. Днище акустической системы делают толще всех остальных ее стенок, также для уменьшения нежелательных колебаний.

Простейшая самодельная конструкция шипов показана на рис. 5.30, б. Для их изготовления не требуется никаких специальных станков и приспособлений кроме ножовки, напильника и дрели. У стандартного стального болта диаметром М8 (8 мм) отпиливается шляпка и один конец заостряется.

К днищу акустической системы привинчивают стальную пластину толщиной 2—3 мм, в центре пластины предварительно делают отверстие диаметром 6,5 мм и нарезают в нем резьбу М8. «Шип» ввинчивается в отверстие и фиксируется гайкой.

Если днище изготовлено из дубовой доски или плиты из склеенных дубовых брусков, можно исключить пластину и ввинчивать шип прямо в дерево, предварительно нарезав в дереве резьбу. В этом случае желательно обеспечить глубину резьбы в дереве не менее 1 см, для этого глухое отверстие должно иметь глубину более 1,5 см.

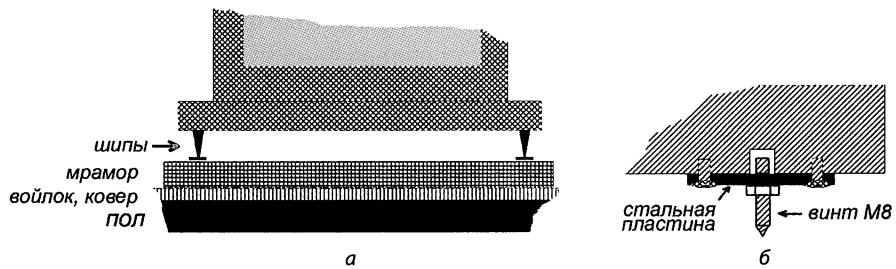


Рис. 5.30. Установка акустической системы:  
а — развязка от пола; б — простейшая конструкция шипов

## 5.15. Подведем итоги

Не рекомендуются для высококачественного звуковоспроизведения:

- ♦ малогабаритные, т. н. «полочные» колонки объемом менее 20 л с основным динамиком 16 см или менее;
- ♦ акустическое оформление типа «фазоинвертор»;
- ♦ разделительные фильтры II порядка;
- ♦ параллельные фильтры I порядка.

Допускается применение параллельных фильтров в сочетании I—III, т. е. фильтр I порядка для НЧ-СЧ-динамика и фильтр III порядка для ВЧ-динамика.

**Вариант 1. Помещение площадью менее 15 м<sup>2</sup>.**

Можно сделать систему типа «трансмиссионная линия», используя овальные автомобильные коаксиальные двухполосные системы. Можно также применить единственный широкополосный динамик диаметром 16,5 см, если такие динамики доступны. Можно сделать двухполосную систему с основным динамиком диаметром 16,5 см и резонансной частотой 50—60 Гц, фильтры последовательные первого порядка, ВЧ-динамик с резонансной частотой не выше 1 кГц, частота раздела 4,5—5,5 кГц. Рекомендуемая мощность усилителя — 10 Вт на канал.

**Вариант 2. Помещение площадью 15—18 м<sup>2</sup>.**

Можно применить вариант 1 с использованием овальных автомобильных коаксиальных двухполосных систем. Рекомендуемая мощность усилителя — до 15 Вт на канал.

**Вариант 3. Помещение площадью примерно 20 м<sup>2</sup>.**

Рекомендуется использовать однополосную (при наличии широкополосного динамика) или двухполосную систему типа «трансмиссионная линия» с основным динамиком диаметром 20 см, частотой собственного резонанса около 40 Гц, в сочетании с ВЧ-головкой с резонансной частотой 500—800 Гц. Разделительные фильтры — последовательные первого порядка, частота раздела 4—5 кГц. Рекомендуемая мощность усилителя — до 20 Вт на канал.

**Вариант 4. Помещение площадью 22—30 м<sup>2</sup>.**

К предыдущей конструкции можно добавить центральный НЧ-канал или сабвуфер с динамиком диаметром 25 или 30 см и резонансной частотой 25—30 Гц. Конструкция НЧ-модуля — закрытый ящик. В этом случае потребуется дополнительный одноканальный усилитель с активными фильтрами на входе.

Для помещений такой площади можно изготовить пару одинаковых трехполосных систем, при этом НЧ-СЧ-динамик должен иметь диаметр не менее 16 см и резонансную частоту не выше 80 Гц. НЧ-динамик должен иметь диаметр 25 см и резонансную частоту 20—30 Гц. Разделительные фильтры — последовательные первого порядка, частоты разделения 200—250 Гц и 4—6 кГц.

В трехполосных системах раздельно проектируется акустическое оформление НЧ- и НЧ-СЧ-головок. Например, трансмиссионная линия для НЧ-динамика и закрытый ящик для НЧ-СЧ-динамика.

Рекомендуемая мощность усилителя — до 25 Вт на канал.

**Вариант 5. Помещение площадью выше 30 м<sup>2</sup>.**

Рекомендуются двухполосные системы «трансмиссионная линия» с основным динамиком диаметром 25 см с резонансной частотой ниже 40 Гц. Можно также изготовить трехполосные системы с НЧ-динамиком диаметром 30 см, с резонансной частотой 20—30 Гц, добротностью 0,3—0,5 в оформлении «закрытый ящик». НЧ-СЧ-динамик диаметром 20—25 см с резонансной частотой 40—55 Гц в оформлении «закрытый ящик» (добротность динамика должна быть в пределах 0,3—0,6) или «трансмиссионная линия». ВЧ-динамик с резонансной частотой 500—700 Гц. Фильтры последовательные первого порядка. Частоты раздела 200—250 Гц и 4,5—5,5 кГц.

Рекомендуемая мощность усилителя — 25—35 Вт на канал.

Корпус акустической системы должен быть изготовлен тщательно с использованием твердых пород дерева или многослойной фанеры. Важно аккуратно оклеить внутреннюю поверхность вибро- и звукоизолирующими материалами. Для виброразвязки от пола акустическая система устанавливается не на пол, а на «подиум», под который подкладывается ковер или войлок. В днище обязательно устанавливаются стальные шипы.

## ГЛАВА 6

# СТЕРЕОФОНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СВОИМИ РУКАМИ: ТРАНСМИССИОННАЯ ЛИНИЯ

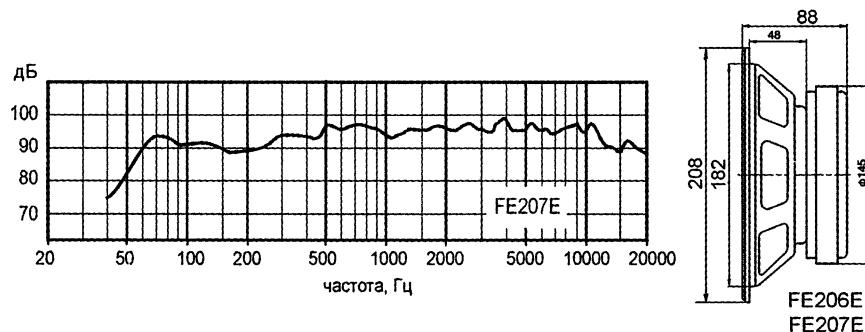
*В этой главе описано несколько практических конструкций напольных акустических систем типа «трансмиссионная линия». Предполагается, что читатель ознакомился хотя бы с разделами «Подведем итоги» в главе 4 и главе 5. Описанные конструкции отличаются хорошим звучанием и не требуют никаких измерений, за исключением измерения индуктивности катушки разделительного фильтра. Выбранные конструкции корпуса и фильтров нечувствительны к замене динамических головок и читатели легко смогут найти головки, подходящие для этих акустических систем.*

## **6.1. Система с единственным широкополосным динамиком**

Для создания цельной звуковой картины и достоверной передачи фронтов звуковых импульсов применение единственного широкополосного динамика — идеальный вариант. Проблема состоит в том, что разработать и изготовить такой динамик очень сложно. Читатели, решившие пойти по этому пути, смогут вступить в виртуальный клуб приверженцев звука из одного источника.\*

Такую систему можно построить на основе динамических головок Fostex 206 или Fostex 207. Параметры этих широкополосных (к сожалению, не дешевых) динамических головок приведены в разделе 1.9 (табл. 1.5). Диффузор этих головок изготовлен из волокон бананового

\* Сайт <http://fullrangedriver.com/singledriver/>



*Рис.6.1. Амплитудно-частотная характеристика головки Fostex 207E и установочные размеры ([www.fostex.jp](http://www.fostex.jp))*

дерева, благодаря чему масса подвижной системы составляет всего 12 г, т. е. примерно в 2 раза меньше, чем у типичных динамиков такого же размера. Динамические головки «Fostex» имеют рекордную чувствительность — в среднем 96 дБ, приближаясь по этому параметру к старинным бумажным динамикам диаметром 12 и более дюймов, так высоко ценимыми адептами лампового ренессанса. АЧХ головки Fostex 206 была показана ранее на рис. 1.6. Пара акустических систем полноценно озвучивает помещение площадью 20 м<sup>2</sup>.

АЧХ головки Fostex 207 показана на рис. 6.1. По-видимому, она не имеет себе равных среди широкополосных головок, доступных для радиолюбителей.

Первый вариант — «нагруженная» трансмиссионная линия. Это укороченная трансмиссионная линия, которая заканчивается не отверстием, а короткой трубой, в которой могут возбуждаться резонансные колебания воздуха. Такая конструкция была предложена М. Кингом. Она подробно обсуждалась в разделе 4.8 (рис. 4.14). Показанное на рисунке заполнение верхней части (примерно на две трети) волокнистым материалом требует серьезного отношения при изготовлении такой системы. Можно использовать файбертек или синтепон, продающиеся в магазинах постельных принадлежностей или принадлежностей для шитья. Эти материалы применяются для изготовления подушек, одеял или утепленной одежды. Для определения плотности (если плотность не указана производителем) необходимо взвесить максимально точно 1 куб. дм материала. Напомним, что 1 куб. дм соответствует 1 л. Для крепления материала внутри корпуса необходимо использовать 1—2 сетки с ячейками площадью не менее 1 см<sup>2</sup>, установленных на разной высоте.

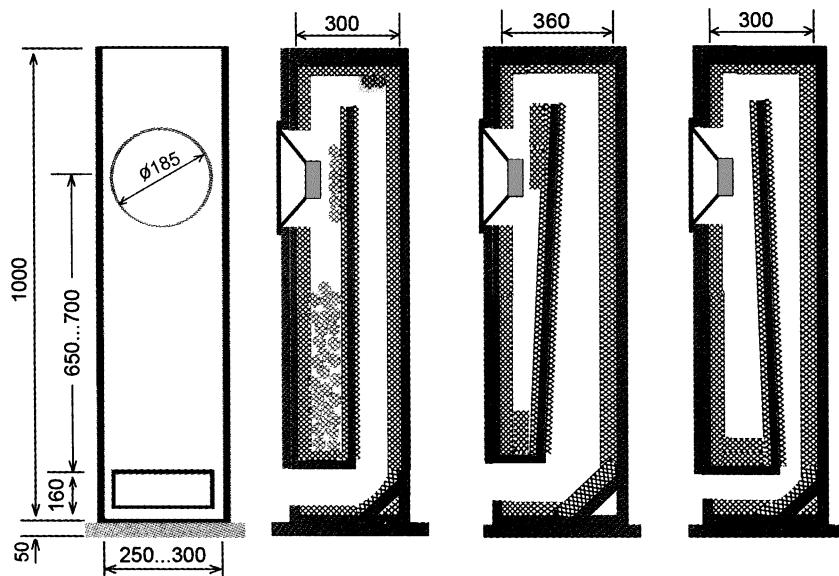
**Внимание.**

Прежде чем браться за изготовление, прочтайте разделы 4.4—4.6, обратив особое внимание на рис. 4.7, 4.8 и описание к ним, а также раздел 5.14 с рекомендациями по изготовлению корпуса.

Второй вариант акустической системы показан на рис. 6.2. Это — «классическая» трансмиссионная линия. Частота настройки — примерно 40 Гц. Можно использовать немного сужающуюся или немного расширяющуюся площадь поперечного сечения «трубы». Это делается просто изменением наклона внутренней панели при соответствующей переделке «устья» трубы. Расширенная труба будет иметь несколько более высокую частоту настройки, однако будет громче звучать.

Автор изготавливал две акустические системы с одинаковыми динамиками и одинаковыми габаритными размерами, но с разным положением внутренней перегородки: строго вертикальным и наклонным, соответствующим расширению примерно в 2 раза. Разница на слух незаметна. Ширина (250—300 см) указана ориентировочно. Чем шире акустическая система — тем лучше!

Увеличение ширины уменьшает дифракцию (огибание корпуса) для низкочастотных колебаний. Узкая акустическая система симметрично



*Рис. 6.2. Акустическая система типа «трансмиссионная линия» с одной динамической головкой диаметром 20 см (Fostex 206, 207)*

излучает низкочастотные звуки вперед и назад. «Низкочастотные» — это значит звуковые колебания с длиной волны, заметно превышающей ширину корпуса. Для корпуса шириной 250 мм огибание корпуса происходит для частот ниже 100 Гц. Повышенная дифракция для низких частот может уменьшить их интенсивность и привести к некомфортному звучанию.

Частота настройки Т-линии постоянного сечения — 42—43 Гц. *Вся внутренняя поверхность* оклеивается вибро- и звукопоглощающим покрытием. Дополнительно на слух подбирается плотность и количество звукопоглощающего материала в начальной части Т-линии, на расстоянии 1/3 ее длины от начала (напротив тыльной части динамической головки) и в ее средней части в местах поворота движения воздушного потока на верхней стенке. Хорошим примером может служить рис. 4.7. Много практических конструкций «Т-линий» с широкополосными динамиками представлено на сайте [www.t-linespeakers.org](http://www.t-linespeakers.org).

Т-линия постоянного сечения наиболее проста в изготовлении в домашних условиях, однако она имеет серьезный недостаток: длинные параллельные вертикальные стенки способствуют образованию стоячих волн. Это создает многочисленные призвуки. Поэтому рекомендуется применить линию переменного сечения с незначительным уменьшением или увеличением сечения (рис. 6.1 б, в). Линия с расширением имеет более высокую частоту настройки (раздел 4.6), однако звучит на низких частотах громче. Расширяющаяся линия требует увеличения глубины акустической системы.

Головка FE207E по сравнению с головкой FE206 имеет меньший подъем в «верхней середине» (выше 2 кГц) и меньшую неравномерность АЧХ, однако и стоит дороже. Вместо этих головок можно применить также головку Fostex FE203En. Она имеет такой же внутренний диаметр и такое же сопротивление (8 Ом), однако отличается от указанных большей установочной глубиной (96 мм) и большей неравномерностью АЧХ в «верхней середине».

Если ли доступная альтернатива широкополосным головкам «Fostex»? С головками Fostex 203 и 206 могут конкурировать коаксиальные головки фирмы «Веутма», состоящие из двух конструктивно объединенных головок: НЧ-головки с полосой пропускания до 8 кГц, и ВЧ-головки, расположенной в ее центре. АЧХ и размеры этих головок указаны на рис. 6.3. Стоимость головок примерно такая же, как головок «Fostex».



### Примечание.

*Обратите внимание на установочную глубину головок «Веута»! Она больше, чем для других головок такого же диаметра из-за дополнительной магнитной системы ВЧ-головки.*

### Коррекция АЧХ широкополосных динамических головок

Проблема широкополосных динамиков «Fostex», а широкополосных динамиков иных производителей — даже в большей степени, — подъем и неравномерность АЧХ на частотах выше 2—5 кГц (рис. 1.6, рис. 6.1, рис. 6.3). Это придает неприятную окраску звучанию. Эффект дополнительно усиливается при работе совместно с ламповым усилителем. Высокое выходное сопротивление лампового усилителя в сочетании с растущим сопротивлением динамической головки дополнительно увеличивает громкость звучания с ростом частоты, приводя, в частности, к «визжанию» медных духовых инструментов. Для борьбы с этим недостатком рекомендуется применить RC-цепочку, подключаемую параллельно катушке динамической головки для выравнивания сопротивления акустической системы.

Кроме того и производитель, и многие самодеятельные конструкторы рекомендуют совместно с динамиками «Fostex» применить сверх-

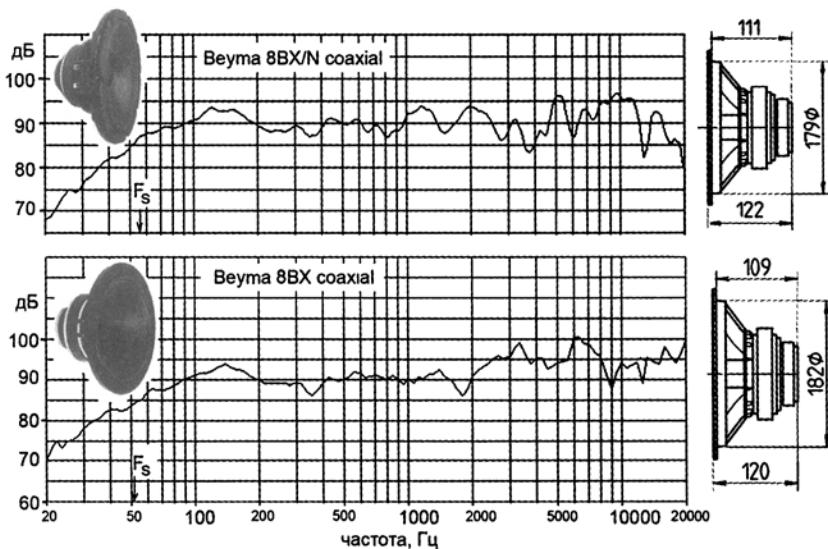


Рис. 6.3. Амплитудно-частотные характеристики и установочные размеры широкополосных динамиков «Веута» (Испания)

высокочастотную головку («супертвиттер») с полосой пропускания до 25—30 кГц, подключаемую через конденсатор емкостью примерно 1 мкФ.

Таким образом, система с единственным широкополосным динамиком постепенно может «обрасти» несколькими дополнительными элементами. Полная схема со всеми «довесками» показана на рис. 6.4. На роль «супертвиттера» рекомендуются динамические головки Vifa, ScanSpeak, Hertz, Morel с шелковым куполом диаметром до 25 мм (1 дюйм) с резонансной частотой в пределах 1000—1500 Гц.

Стоимость пары таких головок ниже, чем тех, что приведены в разделе 1.9 и находится в диапазоне 50—80 долл. Дополнительный динамик в небольшой коробочке устанавливается на акустическую систему сверху.

Каждый из дополнительных компонентов (компенсирующая RC-цепочка и супертвиттер с конденсатором) вначале устанавливаются поодиночке с подстройкой номинала конденсаторов по субъективному улучшению качества звучания.

Можно применить и другой подход для коррекции АЧХ на средних и высших частотах: включить последовательно с акустической системой (т. е. с единственным широкополосным динамиком) LCR-фильтр (рис. 6.5). Для номинального сопротивления головки 8 Ом параметры фильтра:

- индуктивность катушки  $L = 0,8—1,2 \text{ мГн};$
- емкость конденсатора  $C = 5—10 \text{ мкФ};$
- сопротивление резистора  $R = 4—15 \text{ Ом}.$

Расчет и изготовление катушек индуктивности описаны в разделе 5.10, советы по выбору конденсаторов — в разделе 5.11.

Параметры элементов подбираются на слух. Для этого важно представлять, на что влияют параметры каждого элемента.

Индуктивное сопротивление увеличивается с ростом частоты. Поэтому *индуктивность катушки L* задает частоту, выше которой начинается спад АЧХ.

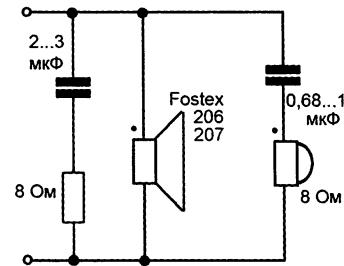


Рис. 6.4. Полная схема акустической системы на основе широкополосного динамика Fostex 206

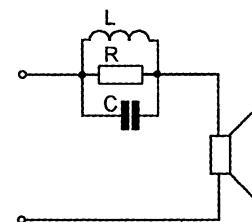


Рис. 6.5. LCR фильтр, поникающий АЧХ в области средних частот

*Сопротивление резистора R* задает уровень, до которого происходит этот спад при неограниченном увеличении частоты. При равных сопротивлениях резистора и динамической головки спад равен  $-3$  дБ.

Сопротивление конденсатора уменьшается с ростом частоты. Поэтому *емкость конденсатора C* задает частоту, выше которой спад отсутствует, т. е. начиная с которой происходит подъем относительно средних частот. Таким образом, три указанных компонента позволяют сформировать провал АЧХ в области примерно  $500$ — $5000$  Гц. Такая форма АЧХ ближе к кривым равной громкости (рис. 1.1), что благоприятно сказывается на звучании. Неравномерность АЧХ динамической головки сохранится, но относительно среднего уровня «выбросов» не будет, а присутствующие на АЧХ провалы достаточно узкие и на слух намного меньше заметны, чем «выбросы».

## 6.2. Двухполосная система с коаксиальными излучателями

В этом разделе описан самый малогабаритный и дешевый вариант хорошо звучащей акустической системы. Несмотря на кажущуюся простоту, пара таких систем при прослушивании музыки в помещении площадью до  $18$  кв. м составляет серьезную конкуренцию «фирменным» колонкам стоимостью примерно  $600$  долл. Изготовить такую систему совсем не сложно. Это — почти конструкция выходного дня!

Рекомендуется использовать доступные в салонах автомобильной аудиотехники двухполосные коаксиальные системы с основным динамиком овальной формы размером  $6\times 9$  дюймов ( $150\times 230$  см). Примеры таких систем приведены в разделе 1.9 (табл. 1.6).



### Внимание.

Прежде чем браться за изготовление, прочтайте разделы 4.4—4.6, обратив особое внимание на рис. 5.7, 5.8 и описание к ним, а также раздел 5.14 с рекомендациями по изготовлению корпуса.



### Примечание.

Применять можно только **двухполосные коаксиальные системы**.

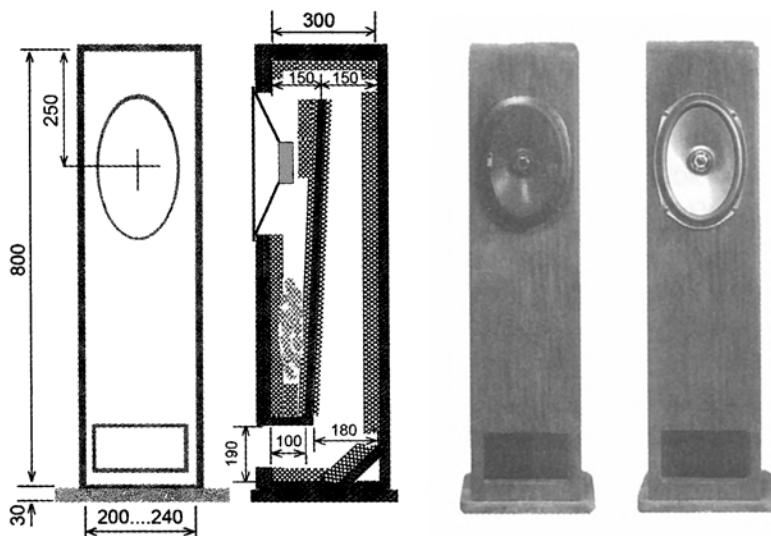
В этом случае реализуется основной принцип, многократно упоминавшийся в этой книге: частотный диапазон примерно до  $3$  кГц, форми-

рующий пространственную звуковую картину, должен воспроизводиться одним динамиком. Кроме того, коаксиальная конструкция приближает систему к идеальному широкополосному излучателю и обеспечивает таким образом лучшую «цельность», «литность» звуковых образов.

Поэтому применять *трехполосные* модули на основе овального динамика нельзя. В них нарушается и коаксиальность, и условие воспроизведения максимально широкого диапазона частот одним излучателем. Кроме того, СЧ-динамик в таких системах — очень слабенький и скорее выполняет роль «помощника» для ВЧ-динамика, не способного из-за высокой резонансной частоты воспроизводить частоты примерно 2000 Гц с фильтром ниже 3-го порядка.

Не рекомендуется применять и двухполосные «коаксиалы» на основе динамика в форме окружности. Самый большой доступный диаметр динамика в таких системах составляет всего 16,5 см, что недостаточно для получения полноценного звучания в помещении площадью более 16 м<sup>2</sup>.

Конструкция и внешний вид готовых систем показаны на рис. 6.6. Расширяющаяся линия рекомендуется с целью подавления нежелательных призвуков, возникающих в ящиках с длинными параллельными стенками. Если расширяющуюся линию вам изготовить сложно — не беда. Делайте линию постоянного сечения. Но придется



*Рис. 6.6. Устройство и внешний вид акустических систем типа «Т-линия» с коаксиальными двухполосными излучателями*

более тщательно подбирать звукопоглощающее покрытие. См. подробные советы в разделе 5.14.

Все размеры — ориентировочные. Точно нужно выдержать только размеры отверстия под головку. Оно вырезается по трафарету, помещенному на упаковке. Высоту корпуса можно увеличить примерно на 10%. Если выбрана максимальная рекомендованная на чертеже ширина (240 мм), можно примерно на 10% уменьшить глубину. «Сглаживающая» наклонная пластина в нижней части корпуса не является необходимой. Минимальные требования к материалу корпуса — березовая фанера толщиной 18 мм или плиты из березового бруска толщиной 20 мм. Толще — лучше. Дуб вместо березы — тоже лучше.

Акустические системы не чувствительны к замене динамических головок из числа рекомендованных в табл. 1.6. Конструкция соответствует рекомендации М. Кинга для динамиков с добротностью 0,6 и более настраивать Т-линию на 5—10 Гц ниже резонансной частоты головки. Именно такую добротность имеют все указанные коаксиальные системы. Частота настройки Т-линии равна примерно 50—52 Гц, что несколько ниже типичных значений резонансной частоты  $F_s$  основного динамика в коаксиальных системах.

Если есть возможность — выбирайте коаксиальные системы с внешними разделительными фильтрами. Например, «Morel 6×9 соах». Обычно это фильтры первого порядка (т. е. один конденсатор и одна катушка индуктивности с сердечником). Частота раздела — около 4 кГц. В этом случае можно попробовать улучшить звучание:

- ♦ заменить штатный конденсатор более качественным (раздел 5.11);
- ♦ измерить индуктивность катушки и заменить ее катушкой без сердечника;
- ♦ перейти от параллельных разделительных фильтров к последовательным (рис. 5.17), но не забудьте, что провод катушки должен иметь диаметр 1—1,3 мм.

Переход от параллельных фильтров к последовательным можно сделать и со штатными компонентами при условии, что сопротивление катушки, измеренное обычным омметром, не превышает 0,2 Ом.

Акустические системы, показанные на рис. 6.6 работают уже несколько лет в помещении площадью примерно 16 кв. м у друзей автора этой книги. Отзывы — стабильно положительные: и от владельцев, и от их гостей. Относительно высокая добротность (но в пределах

рекомендуемой, т. е. ниже 1) и большой размер длинной оси овального динамика делают звучание низких частот «ёмким», наполненным.

### 6.3. Двухполосная система: раздельные НЧ- и ВЧ-головки

#### Выбор основной головки

Если выбрать НЧ головку диаметром 20 см (8 дюймов) с собственной резонансной частотой примерно 40 Гц, то поместив ее в корпус типа трансмиссионная линия, можно обеспечить воспроизведение низкочастотных сигналов начиная с 30—35 Гц при отличной динамической характеристике: бас получается «быстрый», «выпуклый», «хлесткий», а удар барабанов — без преувеличения певучий с четким ощущением затухающих колебаний мембранны барабана после каждого удара.

Частоту раздела следует выбирать выше, примерно 4—5 кГц. **Во-первых**, более широкий диапазон, воспроизводимый одним излучателем, повысит качество звуковой «сцены», **во-вторых**, уменьшится пагубное влияние проникающих низкочастотных составляющих в фильтре 1-го порядка на ВЧ-головку.

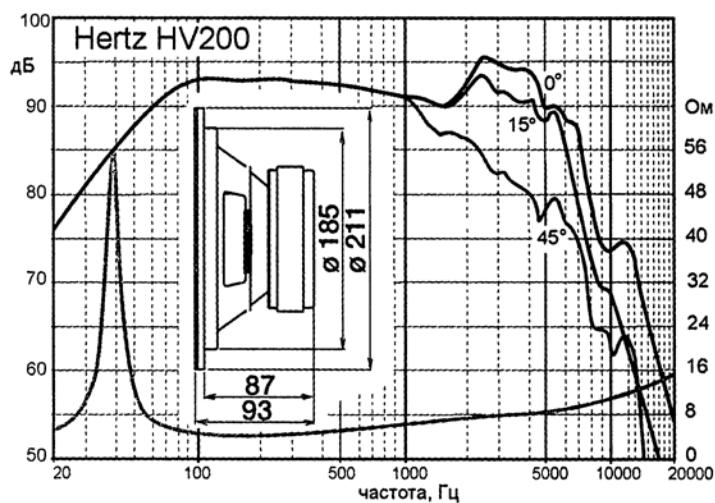
#### Базовая конструкция

В предлагаемой акустической системе использованы 8-дюймовые автомобильные «мидбасы» итальянской фирмы «Hertz» с прекрасными характеристиками (табл. 1.3).

Судите сами:

- чувствительность 92 дБ;
- резонансная частота 40 Гц;
- полная добротность 0,48;
- эквивалентный объем 35 л;
- полоса воспроизводимых частот до 5 кГц.

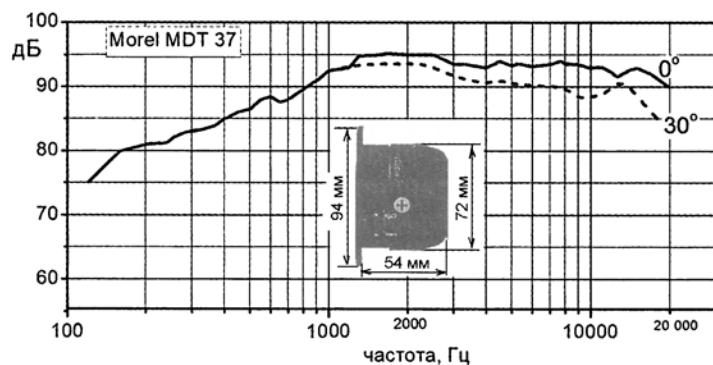
АЧХ головки HV200 показана на рис. 6.7. В диапазоне от 60 Гц до 5 кГц разброс АЧХ укладывается в интервал  $\pm 2,5$  дБ относительно уровня 92,5 дБ. Прекрасный результат! Диффузор этого динамика сделан из прессованной бумажной массы, а гофр имеет не одно, как



*Рис. 6.7. Амплитудно-частотная характеристика, зависимость полного сопротивления от частоты и установочные размеры НЧ-СЧ-головки «Hertz HV200» (данные производителя, [www.hertzaudiovideo.com](http://www.hertzaudiovideo.com))*

обычно, а два концентрических кольца. Вдобавок имеется еще и фазо-выравнивающий колпачок в центре. Фотография этой головки приведена ранее на рис. 1.4 с обозначением «НЧ-СЧ».

В качестве ВЧ-головок были выбраны «Morel MDT37» из-за низкой резонансной частоты (750 Гц), увеличенного диаметра шелкового купола (28 мм) и большого запаса по мощности (до 200 Вт рабочая и 1000 Вт — пиковая мощность). Характеристика этой головки и установочные размеры показаны на рис. 6.8. Головка имеет такую же чувствительность, что и HV200.



*Рис. 6.8. Амплитудно-частотная характеристика и установочные размеры ВЧ-головки «Morel MDT 37» (данные производителя [www.t-audiolab.ru](http://www.t-audiolab.ru))*

Оба типа головок были приобретены в автомобильном салоне в отделе аудиотехники. Это значит, что они доступны практически всем читателям. Вопрос только в том, насколько доступна их цена (60 долл. за 1 шт., см. раздел 1.9). Во всяком случае, они заметно дешевле широкополосных динамиков «Fostex» и «Веута». Их высокая чувствительность позволяет создать систему, способную работать с ламповыми и транзисторными однотактниками класса А мощностью примерно 10 Вт с уровнем громкости, достаточным для типичного жилого помещения.

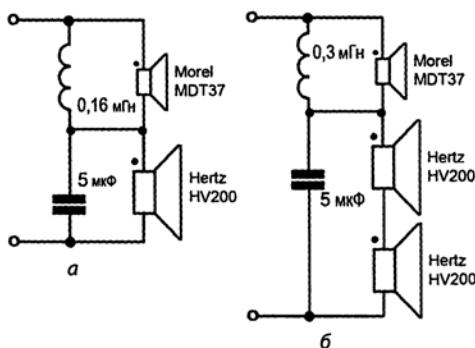
В то же время их высокая перегрузочная способность позволяет работать с усилителями мощностью до 50 Вт. Эта пара головок удовлетворяет всем критериям для создания хорошей двухполосной системы с разделительными фильтрами первого порядка. Естественно — последовательного типа.

Схема показана на рис. 6.9, а, а внешний вид готовой акустической системы — на рис. 6.10, а. Рекомендации по намотке катушек индуктивности — в разделе 5.10, советы по выбору конденсаторов — в разделе 5.11.

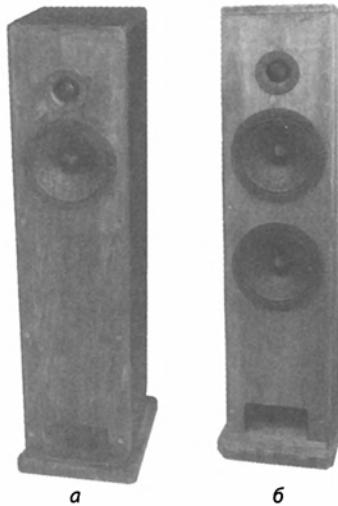


#### Внимание.

Прежде чем браться за изготовление, прочтайте разделы 4.4—4.6, обратив особое внимание на рис. 5.7, 5.8 и описание к ним, а также раздел 5.14 с рекомендациями по изготовлению корпуса.



*Рис. 6.9. Схема двухполосных акустических систем:  
а — с одним НЧ-СЧ-динамиком;  
б — с двумя НЧ-СЧ-динамиками*



*Рис. 6.10. Внешний вид двухполосных акустических систем:  
а — с одним НЧ-СЧ-динамиком;  
б — с двумя НЧ-СЧ-динамиками*

Чертеж корпуса не приводится. Дело в том, что конструкция корпуса совпадает с показанной ранее на рис. 6.1 для широкополосных динамиков такого же диаметра, что и HV200. Даже установочная глубина HV200 и FE206 (207) совпадает. Единственное отличие состоит в дополнительном отверстии для ВЧ-головки, которая должна находиться как можно ближе к НЧ-НЧ-головке. Все советы раздела 6.1 по изготовлению корпуса остаются в силе.

Можно подбирать на слух частоту раздела. Ниже 4 кГц понижать частоту раздела не рекомендуется. Можно проверить, не покажется ли Вам более приятным переход от частоты раздела 4 кГц (параметры указаны на схеме) к более высокой частоте, вплоть до 6 кГц. В этом случае может оказаться благоприятным для звучания спад в области 4—5 кГц вследствие естественного спада АЧХ головки HV200. Дополнительный положительный эффект для ВЧ-головки — уменьшение нежелательного проникновения НЧ-составляющих фонограммы.

Акустические системы показали отличное звучание: напористое, динамичное. Хорошее звучание достигается со всеми усилителями, имеющимися у автора:

- ◆ с твердотельным усилителем с глубокой общей отрицательной обратной связью (ОООС), т. е. с очень низким выходным сопротивлением;
- ◆ с полностью твердотельным усилителем без ОООС, состоящим из двух транзисторных усилителей тока с трансформаторным усилителем напряжения между ними;
- ◆ с полностью ламповым однотактным усилителем мощностью 10 Вт (лампы KT88);
- ◆ с гибридным усилителем (ламповый вход + истоковый повторитель) класса А без ОООС.
- ◆ с гибридным усилителем (ламповый вход + параллельный усилитель тока) класса АВ без ОООС.

Все усилители построены по принципу минимально короткого сигнального тракта и не содержат никаких элементов, корректирующих тембр. Усилители описаны в книге автора.\* Хорошо выстраивается сцена, создается устойчивое впечатление, что источников звука больше, чем два. Отлично звучат голоса и щипковые инструменты.

Но самое сильное впечатление, пожалуй, оставляет звучание ударных инструментов, особенно барабана «бочка». Последнее связано

\* Гапоненко С. В. Лампово-транзисторные усилители своими руками. СПб.: Наука и техника. — 2012.

именно с эффектом трансмиссионной линии. Кратко впечатления можно передать одной фразой: поют не только солисты, но и барабаны. Колонки оказались отличны для помещения 18—20 м<sup>2</sup>!

При работе с ламповым однотактным усилителем потребовалось включать на входе корректирующую цепочку (рис. 6.5: 0,6 мГн, 5 Ом, 8 мкФ).



#### Примечание.

Можно, вообще говоря, попробовать подключить RC-цепочку Цобеля параллельно выводам НЧ-СЧ-динамика (рис. 5.12: R = 4 Ом, C = 8 мкФ).

Интересно, что с параллельными фильтрами первого порядка при той же частоте раздела акустические системы зазвучали явно «навязчиво». А при подключении к ламповому однотактнику с выходным сопротивлением примерно 10 Ом слушать джазовую музыку стало просто невозможно: труба Армстронга приобрела просто-таки «визжащее» звучание.

Это связано с повышением отдачи на средних частотах вследствие индуктивного характера сопротивления головки. Частично помогло подключение цепочки Цобеля (рис. 5.12). Включать цепочку Цобеля совместно с RLC-фильтром представляется нецелесообразным: слишком много дополнительных компонентов. Однако переход от параллельных фильтров к последовательным позволил получить «комфортное» звучание без такой цепочки.

При прослушивании в помещении площадью 26 м<sup>2</sup> возникло ощущение недостаточно глубокого НЧ-компонента при воспроизведении музыки в стиле «бит» и «хард рок». В связи с этим была приобретена еще одна пара динамических головок «Hertz HV200».

Схема модернизированной системы показана на рис. 6.9, б, а внешний вид — на рис. 6.10, б. Корпус не изменился. При проектировании и изготовлении корпуса необходимо только следить, чтобы в случае расширяющейся Т-линии внутри корпуса было достаточно места для установки нижнего динамика. Монтажная глубина динамика HV200 составляет 90 мм минус толщина передней стенки.

Эти колонки работают у автора уже несколько лет в помещении 26 м<sup>2</sup> с самыми разнообразными усилителями, включая ламповый и транзисторный «однотактники» класса А с максимальной мощностью примерно 12 Вт, и неизменно вызывают положительные отзывы друзей-меломанов. Благодаря высокой чувствительности применен-

ных головок и высокому качеству усилителей класса А указанной мощности достаточно для прослушивания музыки любых жанров, включая симфоническую музыку и «хард рок».

#### Рекомендации по применению других динамиков

Выбор подходящей динамической НЧ-СЧ-головки диаметром 200 мм, к сожалению, невелик. Вместо «Hertz HV200» можно применить более новую (к сожалению, и более дорогую) разработку фирмы «Hertz» — динамик SV200L. Качество гарантируется. Все параметры схем и конструкций остаются неизменными.

Можно попробовать применить НЧ-головки фирмы «Веута» 8Woofer/P-V2 (Испания), фирма «Peerless» HDS NOMEX 830869 (Дания), а также фирмы «Morel» MW265 и MW266 (Израиль). Параметры головок приведены в табл. 1.3. Они имеют более низкую резонансную частоту (до 30 Гц) при том же диаметре. Есть опасение, что воспроизведение «верхней середины» для этих головок будет хуже, хотя их АЧХ свидетельствует о пригодности для работы в двухполосной системе.

Сопротивление этих головок 8 Ом. Поэтому при использовании одной головки в акустической системе индуктивность катушки должна быть 0,3 мГн. При использовании двух НЧ-СЧ головок, их надо соединять не последовательно, как на рис. 6.4, *а параллельно (и синфазно)*. В этом случае индуктивность катушки должна быть 0,16 мГн.

Выбор ВЧ-головок намного шире. Пригодны все головки, показанные на рис. 5.14, и все, указанные в табл. 1.4, с частотой собственного резонанса ниже 1 кГц. Надо только учитывать, что головка «Vifa XT19» имеет диаметр купола 19 мм, что может быть недостаточно для помещений более 20 м<sup>2</sup>. Поэтому эту головку следует выбирать только при отсутствии более мощных головок диаметром 25—28 мм. Она не рекомендуется для работы совместно с двумя НЧ-СЧ-динамиками. Кроме того, при использовании головки «Vifa» XT25SC90 рекомендуем сделать частоту раздела 5—5,5 кГц. Емкость конденсатора составит 7—8 мкФ.

## ГЛАВА 7

# СТЕРЕОФОНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СВОИМИ РУКАМИ: ТРЕХПОЛОСНЫЙ ВАРИАНТ

Эта глава описывает «виртуальные» конструкции акустических систем. Она содержит несколько примеров, показывающих, как подойти к разработке трехполосной акустической системы, как выбрать подходящие динамические головки и как рассчитать корпус.

Основные отличия от наиболее распространенных конструкций: никаких фазоинверторов, только «закрытые ящики»; среднечастотный динамик отвечает за формирование звуковой сцены и поэтому должен иметь относительно большой размер и достаточно низкую частоту резонанса, а поэтому для него тоже надо рассчитывать «ящик».

Глава будет полезна читателям, уже имеющим опыт построения акустических систем. Начинающим «колонкостроителям» лучше не рисковать. Комплект из трех пар хороших динамических головок стоит достаточно дорого и в случае неудачного конструирования и изготовления вас ждет разочарование. Но если у вас есть опыт, рекомендуем воспользоваться советами, приведенными в этой главе. Вы получите отличный звук, вплоть до звука от взмахов смычков в большом оркестре.

## **7.1. С чего начать? Выбираем основную головку**

Трансмиссионная линия — уникальная конструкция, позволяющая получить хорошее воспроизведение низких частот в двухполосных системах. Однако переход к трехполосной акустической системе дает больший простор для выбора динамических головок, содержит

более «мягкие» требования к ним и позволяет обеспечить более «глубокие» басы за счет применения специальной НЧ-головки с резонансной частотой 20—30 Гц и полосой воспроизведения примерно до 500 Гц. Что дает полноценный, глубокий бас в домашней акустической системе? Вот характеристика звуков, находящихся по шкале частот ниже 50 Гц:

- контрабас, арфа — пол-октавы;
- большой концертный рояль, орган — полная октава.

Кроме этого, эффективное воспроизведение звуков с частотой ниже 40 Гц позволяет передать в небольшом помещении в буквальном смысле «атмосферу» концертного зала вплоть до осязания дыхания музыкантов и взмахов смычков.

Будем последовательны и по-прежнему остановим выбор на последовательных фильтрах первого порядка, на этот раз — трехполосных (рис. 7.1).

Что дает переход к трехполосной системе? *Во-первых*, облегчается работа ВЧ-головки и ослабляются требования по низкой частоте ее резонанса. Дело в том, что в трехполосном фильтре ВЧ-головка зашунтирована не только «своей» индуктивностью  $L$ , но еще и индуктивностью  $L^*$ , *предотвращающей попадание на ВЧ-головку самой низкочастотной части спектра ниже частоты раздела НЧ- и СЧ-головок*  $f_1$ .

Требования по малости активного сопротивления индуктивностей сохраняются. Катушки надо мотать проводом диаметром не менее 1,2 мм. *Во-вторых*, СЧ-головка (на самом деле ее правильнее назвать НЧ-СЧ) может иметь резонансную частоту не 40—50 Гц, как в случае двухполосной системы, а примерно 60—90 Гц. Можно попробовать в

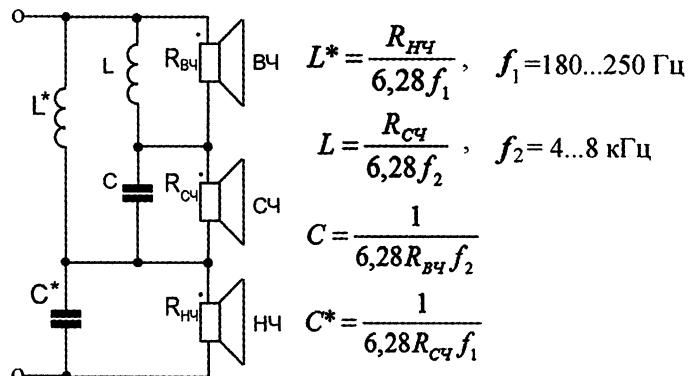


Рис. 7.1. Схема трехполосной акустической системы с последовательными фильтрами первого порядка

этом случае подобрать головку с более широкой полосой пропускания, что позволит расширить диапазон, воспроизводимый одним излучателем (очень важно для формирования звуковой сцены), уменьшить проявление эффекта Допплера, «разгрузить» ВЧ-головку, повысив частоту раздела СЧ- ВЧ-полос.

*В-третьих*, трехполосная система позволит получить меньшую неравномерность АЧХ по сравнению с однополосной (с единственным широкополосным динамиком) и двухполосной системами.

Платой за эти преимущества становятся дополнительные расходы на приобретение НЧ-динамика (от 60 до 100 долл. на каждую акустическую систему), правда при этом можно немного сэкономить на стоимости СЧ-динамика и ВЧ-динамика. Кроме того, трехполосная система требует конструирования акустического оформления и для НЧ- и для СЧ-динамика. Строить две трансмиссионные линии в одной акустической системе — немного «вычурно» и довольно сложно. Поэтому приходим к следующему выводу:

*акустическое оформление СЧ-головки будет иметь тип «закрытый ящик».*

Добавим, что именно СЧ-динамик становится главным в нашей системе. Этот динамик определяет качество звуковой сцены и слитность, цельность звуковых образов. Чем больше его размер и шире полоса частот — тем лучше.

Требования к нему следующие:

- резонансная частота — 60—80 Гц;
- полоса воспроизводимых частот — до 5—8 кГц;
- добротность — не более 0,6;
- эквивалентный объем  $V_{AS}$  — не более 25 л.

Последний параметр важен, чтобы «ящик» НЧ-СЧ-головки имел разумный объем. Рекомендуем внимательно прочитать разделы 3.1—3.3 в главе 3. При помещении головки в закрытый ящик одновременно и в одинаковое число раз повышаются добротность и резонансная частота.

Оптимальная результирующая добротность  $Q_{TC}$  находится в интервале от 0,5 до 1, рекомендуемое значение  $Q_{TC} = 0,707$ , хорошие характеристики также описаны для  $Q_{TC} = 0,5$  и  $Q_{TC} = 0,577$ . Для того, чтобы резонансная частота не повышалась слишком сильно, можно принять, что объем ящика  $V$  примерно равен  $V_{AS}$ .

Тогда для получения значения  $Q_{TC} = 0,707$  собственная добротность головки должна составлять  $Q_{TS} = 0,5$ , для получения  $Q_{TC} = 0,577$

добротность головки должна быть равна  $Q_{TS} = 0,41$ , для получения  $Q_{TC} = 0,5$  надо иметь  $Q_{TS} = 0,34$  (см. рис. 3.4). Эти цифры дают примерное представление о том, какой динамик нужен на роль «главного» в акустической системе.

Поиски в главе 1 (раздел 1.9), в сети интернет и на сайтах samodelka.ru и audiomania.ru показали, что выбор, на самом деле, не очень велик. Если ввести еще и ограничение по стоимости, число вариантов сводится буквально в 2-3 моделям (табл. 7.1).

Динамические НЧ-СЧ-головки диаметром 200 см (8 дюймов)

Таблица 7.1

Марка	Активное сопротивление $Re$ , Ом	Резонансная частота $F_{sr}$ , Гц	Эквивалентный объем, $V_{AS}$ , л	Полоса частот, Гц	Полная добротность $Q_{TS}$	Чувствительность $Spl$ , дБ	Стоимость, долл.
Динамики фирмы «Hertz» (Италия), номинальное сопротивление 4 Ом							
HV 200	3	40	35	40—5 000	0,48	94	80
SV 200 L	4	44	31	40—5 000	0,33	94	150
Динамики фирмы «Peerless» (Дания), номинальное сопротивление 8 Ом							
HDS NOMEX 830869	6	30	76	30—4 500	0,29	90	70
Динамики фирмы «Веута» (Испания), номинальное сопротивление 8 Ом							
8M60/N	6	87	11	90—8 000	0,60	95	70

Недостатком головки Hertz HV200 является небольшой, но все же заметный подъем АЧХ выше 2 кГц: в двухполосной системе он принимался как неизбежный компромисс, в трехполосной системе целесообразно число компромиссов уменьшить. Кроме того, комбинация добротность — эквивалентный объем приводит к необходимости объема закрытого ящика примерно 35 л, т. е. неразумно много! Остальные параметры подходят.

Головка Hertz SV200L имеет низкую добротность и может работать в малом объеме. Добротность  $Q_{TC} = 0,707$  реализуется в объеме  $0,3V_{AS} = 10$  л (рис. 3.4). При этом ее резонансная частота увеличится примерно в 2 раза и составит около 90 Гц.

Но... головка Hertz SV200L, к сожалению, имеет выброс примерно +5 дБ на частоте 3,5 кГц. И хотя он формально укладывается в допуск  $\pm 3$  дБ, если среднее значение АЧХ брать на уровне 94 дБ, иметь выброс при высокой стоимости головки нет желания. Вывод: недостатком головки Hertz SV200L следует признать ее высокую стоимость\*.

\* Обращаю внимание, что использовать головку более дешевую Hertz SV200 вместо Hertz SV200L нельзя: она имеет другие параметры: более высокую резонансную частоту и недопустимо высокую неравномерность АЧХ выше 1 кГц.

Поиски среди продукции фирм «Vifa», «Visaton» не дали результатов для динамиков диаметром 200 мм. Более подходящими показались продукты испанской фирмы «Веута» и датской фирмы «Peerless».

Динамики «Веута» 8M60/N имеют относительно высокую резонансную частоту (87 Гц), но очень малый эквивалентный объем (11 л!) и гладкую АЧХ в диапазоне от 100 Гц до 8 кГц. Полная добротность относительно велика, но с учетом малого эквивалентного объема реально получить  $Q_{TC} = 0,7$  при разумных размерах ящика. Обращаясь к рис. 3.4, находим, что требуемая добротность реализуется в ящике объемом 26 л. Это требует внутренних размеров отдельного изолированного от остального корпуса герметичного ящика примерно 300×300×300 мм, или, например, 300×250×350 мм. Для СЧ-головки! Как видим, «искусство требует жертв».

Из рис. 3.1 получаем, что резонансная частота возрастет примерно до 100 Гц. Лучше бы пониже.



#### Примечание.

Можно попробовать сделать открытый (т. е. без задней стенки) ящик такого объема и оценить качество звучания. Затем установить (плотно!) заднюю стенку и сравнив звучание с предыдущим вариантом, выбрать лучший из двух.

Динамики HDS NOMEХ 830869 фирмы «Peerless» имеют добротность 0,29, резонансную частоту 30 Гц, хорошую частотную характеристику примерно до 4 кГц. Эта головка также имеет выброс на частоте примерно +5дБ на частоте около 3 кГц, однако при незначительном отклонении от оси головки он исчезает.

Недостатком головки является большой эквивалентный объем — 76 л. Но, с другой стороны, низкая добротность и низкая резонансная частота гарантируют хорошую работу в ящике, объем которого существенно меньше  $V_{AS}$ . Оценим с помощью рис. 3.1 и рис. 3.4, при каком объеме получится результирующая добротность  $Q_{TC} = 0,707$ , и какой при этом окажется резонансная частота головки в ящике  $F_{BOX}$ . Ответ:  $V = 15$  л,  $F_{BOX} = 73$  Гц. По совокупности параметров (полоса пропускания, гладкость АЧХ, необходимый объем ящика, резонансная частота в ящике) и цене эта головка — явный лидер в нашем виртуальном тесте.

Вариантов среди головок диаметром 16,5 см намного больше. Некоторые из них представлены в табл. 7.2.

Динамические НЧ-СЧ-головки диаметром 16,5 см (6,5 дюймов)

Таблица 7.2

Марка	Активное сопротивление $R_e$ , Ом	Резонансная частота, $F_s$ , Гц	Эквивалентный объем, $V_{AS}$ , л	Полоса частот, Гц	Полная добротность $Q_{TS}$	Чувствительность $Spl$ , дБ
<b>Динамики фирмы «Hertz» (Италия), номинальное сопротивление 4 Ом</b>						
HV165L	3	55	12	55—5 000	0,42	92
<b>Динамики фирмы «Peerless» (Дания), номинальное сопротивление 8 Ом</b>						
HDS Exclusive 830883	6,0	42	22	42—8 000	0,36	88
<b>Динамики фирмы «Scanspeak» (Дания), номинальное сопротивление 4 Ом</b>						
18w/4424G00	3,2	49	24	50—10 000	0,38	92
<b>Динамики фирмы «Веута» (Испания), номинальное сопротивление 8 Ом</b>						
6B30/P	6	55	18	90—10 000	0,60	90

## 7.2. Система «10"+8"+1"»

Обозначение «10"+8"+1"» означает, что самая низкочастотная головка имеет диаметр 10 дюймов (25 см), «основная» СЧ-головка — диаметр 8 дюймов (20 см), и ВЧ-головка — 1 дюйм (2,5 см, наиболее распространенная версия ВЧ-головок). Пара таких систем способна озвучить помещение площадью примерно 30 м<sup>2</sup>.

### Вариант 1

В качестве низкочастотной головки рекомендуется «Hertz ES 250». Аргументы в пользу такого выбора: сочетание параметров резонансная частота — добротность — эквивалентный объем (табл. 7.3).

Параметры НЧ-головок диаметром 25 см (10 дюймов)

Таблица 7.3

Марка	Диаметр D, мм	Активное сопротивление $R_e$ , Ом	Резонансная частота, $F_s$ , Гц	Эквивалентный объем, $V_{AS}$ , л	Масса подвижной системы, $M_{MS}$ , г	Полная добротность $Q_{TS}$	Чувствительность $Spl$ , дБ	Стоимость, долл.
<b>Динамики фирмы «Hertz» (Италия), номинальное сопротивление 4 Ом</b>								
ES 250	250	2,6	27	55	106	0,37	93	120
<b>Динамики фирмы «Peerless» (Дания), номинальное сопротивление 8 Ом</b>								
SLS 830668	250	6,3	33	69	51	0,51	88,7	100

Если в качестве «основной» выбрана головка с полосой пропускания до 4,5—5 кГц, рекомендуется применять ВЧ-головку с частотой резонанса ниже 1 кГц. Такие головки представлены на рис. 5.14.

Рекомендуемые частоты раздела — 200 Гц и 4—5 кГц. Если вы выбираете в качестве «основной» головку «Веутма» 8M60/N, то можно применить любую из ВЧ-головок, представленных в табл. 1.4 или иную доступную головку без ограничения на величину резонансной частоты. Рекомендуемые частоты раздела в этом случае — 250 Гц и 7 кГц. Акустическое оформление НЧ-головки — «закрытый ящик» внутренним объемом 24 л. Нижняя граничная частота по уровню  $-3$  дБ составит примерно 50 Гц, по уровню  $-6$  дБ — примерно 30 Гц. Акустическое оформление 20-сантиметровой НЧ-СЧ-головки — также закрытый ящик, его внутренний объем — 28 л.

Электрическая схема и конструкция акустической системы показаны на рис. 7.2. Поскольку объем НЧ-модуля оказался немного меньше объема СЧ-ВЧ-модуля, НЧ-модуль можно сделать меньшей глубины и свободное пространство на задней стенке использовать для размещения разделительных фильтров.

Внутренний объем модулей должен быть параллелепипедом с неравными длиной, высотой и шириной. Форма в виде куба недопустима. Рекомендации по расчету и изготовлению катушек даны в разделе 5.10, советы по выбору конденсаторов — в разделе 5.11, советы по изготовлению корпуса — в разделе 5.14.

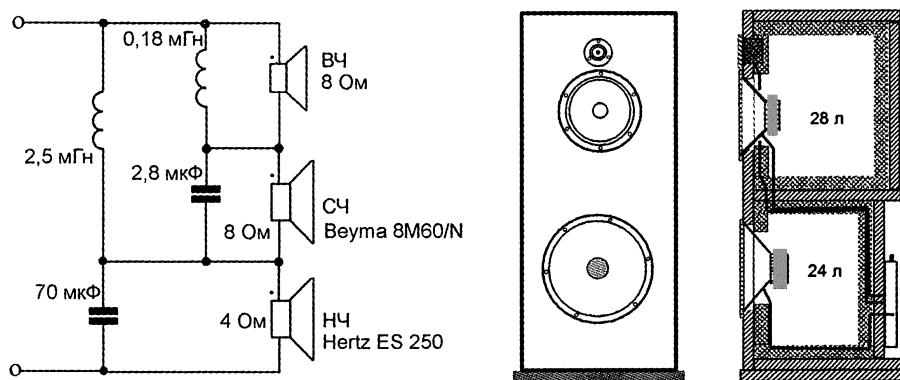


Рис. 7.2. Схема и конструкция трехполосной акустической системы «10"+8"+1"»

**Совет.**

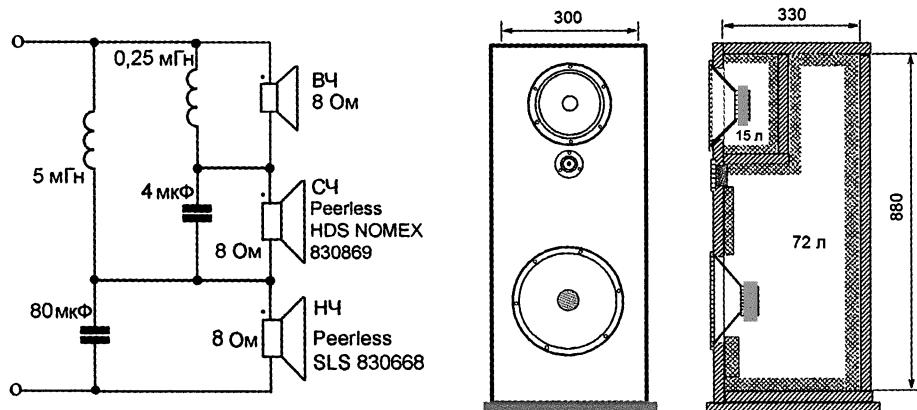
*Последовательно с СЧ-динамиком в любом случае можно попробовать включить резистор сопротивлением 3—5 Ом. Это может повысить естественность звучания на малых уровнях громкости за счет снижения уровня СЧ-компоненты по сравнению с НЧ- и ВЧ-компонентами.*

При работе с ламповым однотактником такой резистор может уменьшить нежелательную резкость при воспроизведении медных духовых инструментов. Однако в этом случае необходимо увеличить индуктивность катушки (0,18 мГн) пропорционально результирующему сопротивлению «СЧ-головка+резистор».

**Вариант 2**

В этом варианте использована НЧ-головка «Peerless» SLS 830668, требующая относительно большой объем закрытого ящика (70 л) для получения добротности 0,707. Совместно с ней применена НЧ-СЧ головка с HDS NOMEX 830869 фирмы «Peerless», работающая в объеме 15 л. Частоты раздела — 250 Гц и 5 кГц.

Схема и конструкция показаны на рис. 7.3. Размеры могут быть изменены при условии сохранения объема отсеков (72 и 15 л). Напомним, что ящик должен иметь неравные длину, высоту и ширину. Форма в виде куба недопустима. При желании можно СЧ- и ВЧ-головки выполнить конструктивно в отдельном небольшом ящике.



*Рис. 7.3. Схема и конструкция трехполосной акустической системы на основе НЧ-динамика «Peerless»*

На этом примере очень хорошо видна серьезная проблема трехполосных акустических систем: «увесистая» катушка индуктивности 5 мГн и большая батарея конденсаторов общей емкостью 80 мкФ. Электролитические конденсаторы недопустимы. Бюджетный вариант — батарея из конденсаторов типа МБГЧ до 90% нужной емкости и 10% емкости, сформированной пленочными (полипропиленовыми или фторопластовыми) конденсаторами.

«Уйти» от проблемы больших катушек индуктивности и «батареи» конденсаторов в трехполосной системе можно только одним способом: использовать для каждого из стереоканалов двухканальный усилитель с встроенными активными разделительными фильтрами. Для этого надо либо построить четырехканальный усилитель сстроенными активными фильтрами, либо использовать два раздельных стереоусилителя и сделать к ним вспомогательный модуль, содержащий активные фильтры. Эти фильтры должны разделять НЧ- (от 0 до 200—250 Гц) и СЧ-ВЧ-диапазоны (выше 200—250 Гц). При этом акустическая система должна иметь два раздельных входа: прямой вход на клеммы НЧ-головки и вход на последовательно соединенные СЧ- и ВЧ-головку с разделительными фильтрами.

### 7.3. Система «10"+6"+1"»

#### Параметры ящика для СЧ-головки

Предлагаем несколько вариантов трехполосных систем с применением СЧ-динамика диаметром 6,5 дюймов (16,5 см). Можно использовать любой из динамиков, указанных в табл. 7.2. Рекомендуемые значения объема СЧ-ящика и резонансная частота  $F_{\text{вок}}$  для каждого из них приведены в табл. 7.3.

Параметры ящика для СЧ-головки

Таблица 7.3

Тип СЧ-головки	Сопротивление, Ом	Объем ящика, л	$F_{\text{вок}}, \text{Гц}$
Hertz HV165L	4	7	85
Scanspeak 18w/4424G00	4	10	85
Peerless HDS Exclusive 830883	8	8	85
Beyma 6B30/P	8	45	65

### Вариант 1

Первые три головки, указанные в табл. 7.3, практически взаимозаменяемы: необходимый объем ящика находится в интервале 7—10 л, при этом резонансная частота в ящике для всех головок одинакова и составляет 85 Гц. Использование этих головок иллюстрируется на рис. 7.4.

При использовании СЧ-головки вместо Peerless HDS Exclusive 830883 головки Hertz или Scanspeak вместо конденсатора емкостью 80 мкФ необходимо использовать конденсатор емкостью 40 мкФ. В этих системах может работать любой ВЧ-динамик из представленных на рис. 5.14. Частоты раздела — 250 Гц и 5 кГц.

### Вариант 2

Интересная ситуация возникает с головкой Вейта 6B30/P. Ее особенность — сравнительно высокая добротность (0,6). Для получения результирующей добротности 0,707 потребуется ящик объемом 45 л. Можно пойти на этот вариант, если в качестве НЧ-головки применить головку Hertz ES250 (рис. 7.2 и табл. 7.3). Для нее нужен ящик объемом 24 л. Поэтому общий объем акустической системы составит около 70 л. Несколько странной, однако, представляется конструкция, в которой объем СЧ-модуля почти в 2 раза превышает объем НЧ-модуля. Значит ли это, что головка Вейта 6B30/P не представляет никакого интереса для конструирования трехполосных систем?

У головки Вейта 6B30/P есть интересное преимущество: она уверенно воспроизводит диапазон до 10 кГц. Это значит, что при ее

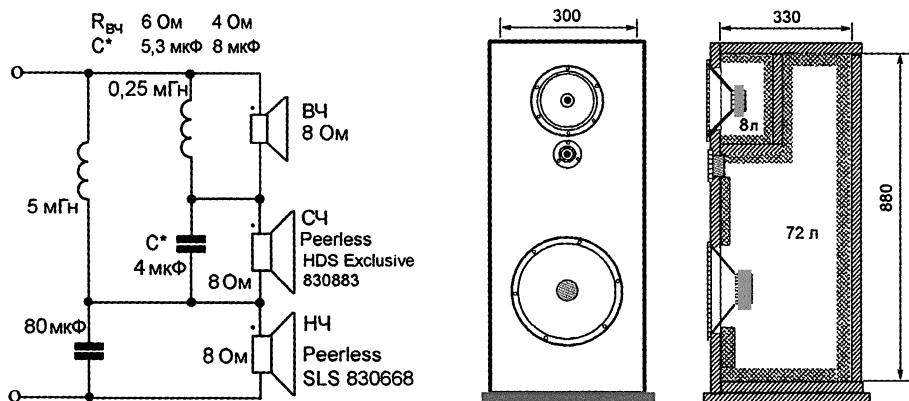


Рис. 7.4. Акустическая система «10"+6"+1"»: вариант 1

использовании можно повысить частоту раздела СЧ- и ВЧ-полос до 7 кГц.

Что это даст? *Во-первых*, уменьшится емкость разделительного конденсатора. Можно будет либо сэкономить на его стоимости, либо применить более качественный экземпляр.

*Во-вторых*, можно выбрать ВЧ-головку, не ограничиваясь экземплярами с низкой частотой резонанса. Пригодны все ВЧ-головки из табл. 1.4. Можно выбирать головки меньшей мощности. Возможно, удастся при этом выбрать головку меньшей стоимости или лучшего качества. Можно при выборе сосредоточиться на максимальной высокой верхней граничной частоте.

*В-третьих*, расширение вверх спектра частот, воспроизводимых основным динамиком, благоприятно скажется на «литности», «цельности» звуковой картины, приблизив свойства акустической системы к эксклюзивным моделям с единственным излучателем.

Головку Вейта 6B30/P можно использовать в оформлении «акустический экран». В этом случае желательно увеличить ширину акустической системы. Такой вариант показан на рис. 7.5.

Возможно, такая система кому-то покажется некрасивой, кому-то старомодной, кому-то — слишком большой. Но все принципы качественного воспроизведения звука здесь соблюдены. Единственное жесткое требование по размерам — внутренний объем НЧ-модуля должен быть равен 24 л. Остальные размеры — чем больше, тем лучше. СЧ-динамик должен быть немного ниже уровня ушей сидящего человека.

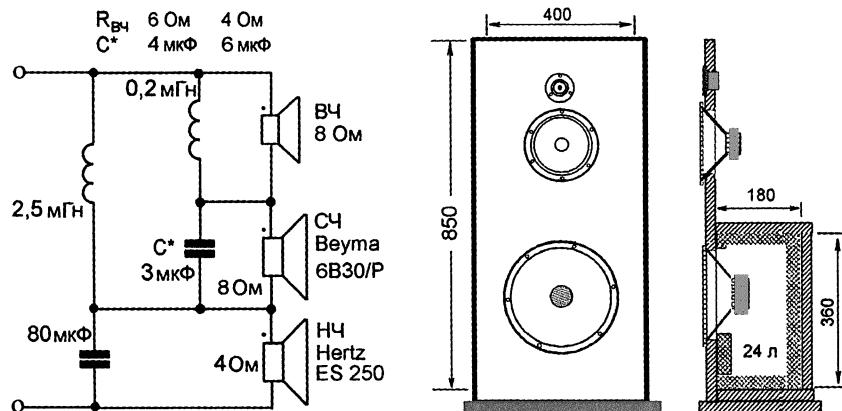


Рис. 7.5. Акустическая система с СЧ-блоком в виде экрана

## ГЛАВА 8

# ТРИФОНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СВОИМИ РУКАМИ

*В этой главе описывается система звукоусиления, состоящая из трех усилительных каналов и трех акустических систем: одной низкочастотной, общей для правого и левого стереоканалов, и двух одинаковых сателлитов. Такая система позволяет получить очень мощный, глубокий бас при относительно невысоких затратах. Такой подход может применяться для улучшения уже имеющейся стереотракта с акустическими системами относительно небольшого объема и невысокой стоимости.*

## 8.1. Принцип работы

Принцип работы трифонической системы состоит в следующем. В области самых низких частот длина звуковых волн настолько велика по сравнению с расстоянием между нашими ушами, что положение источника звука в пространстве практически невозможно определить. Поэтому для этой области без ущерба для стереоэффекта применяется общий для обоих стереоканалов низкочастотный излучатель с дополнительным усилителем. Такое подключение можно осуществить двумя способами (рис. 8.1). Дополнительно вносимые элементы выделены серым фоном.

### Два варианта трифонического тракта

*В первом варианте (рис. 8.1, а) звуковой тракт имеет следующий вид.*

1. Источник музыкального электрического сигнала.
2. Электронные разделительные НЧ- (СЧ+ВЧ) фильтры.
3. Три канала усиления сигналов: моно-НЧ-канал и стерео- (СЧ+ВЧ)-каналы.
4. Три акустические системы.

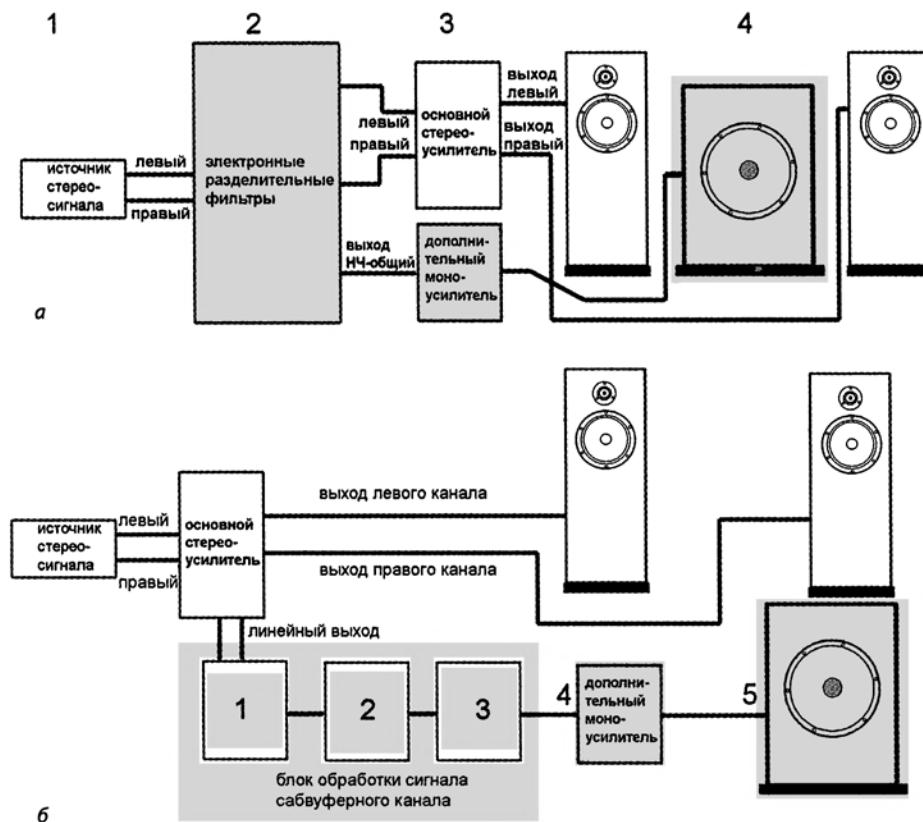


Рис. 8.1. Два варианта трифонической системы:  
а — с общим НЧ-каналом; б — с сабвуферным каналом

Этот вариант можно назвать истинным трифоническим трактом. Полоса частот *делится* между общим НЧ-каналом и стереоканалами. Мощность усилителя НЧ-канала может в 2–3 раза превышать мощность каждого из стереоканалов. Для домашнего прослушивания в зависимости от эффективности (к.п.д.) используемого НЧ-излучателя мощность усилителя общего НЧ-канала может составлять от 20 до 50–70 Вт.

Частота раздела выбирается в интервале 150–250 Гц. Используются электронные разделительные фильтры второго порядка. Акустические системы стереоканалов при таком варианте трифонического тракта «разгружаются» за счет того, что самая низкочастотная часть сигнала «перенаправляется» в общий НЧ-канал.

НЧ-излучатель устанавливается *в центре* между двумя акустическими стереосистемами. Частота раздела соответствует линейному участку амплитудно-частотной характеристики СЧ-головки, что значительно облегчает ее согласование по фазе с дополнительной НЧ-головкой.

**Основным недостатком** трифонической системы этого типа является «внедрение» в базовый стереотракт дополнительного электронного модуля. Необходимо очень тщательно отнести к его конструированию и выбору активных и пассивных элементов. **Дополнительным недостатком** можно считать необходимость дополнительного места для довольно объемного и массивного ящика дополнительной низкочастотной акустической системы.

**Во втором варианте** (рис. 8.1, б) прохождение сигнала в исходном стереофоническом тракте от источника до каждой из двух акустических систем *не нарушается*. Полоса воспроизводимых частот расширяется вниз за счет **добавления** НЧ-канала, включающего:

- входной буфер и смеситель;
- электронный НЧ-фильтр второго или более высоких порядков;
- фазовращатель (иногда заменяется простым переключателем фазы);
- усилитель;
- акустическую систему с НЧ-динамиком.

Частота среза НЧ-фильтра выбирается в интервале 60—120 Гц. Мощность усилителя — 50—100 Вт. Такой дополнительный НЧ-канал называют *сабвуферным*, а дополнительную низкочастотную акустическую систему — *сабвуфером*.

Длина волны звуков, воспроизводимых сабвуфером, соизмерима с размерами жилого помещения, поэтому точное место его расположения при прослушивании не имеет значения. Однако во многих случаях приходится использовать фазовращающий электронный модуль для согласования излучения сабвуферного динамика с НЧ-динамиками стереоканалов.

Как видим, сабвуферный канал дополняет звучание основной стереосистемы, расширяя полосу воспроизведения в область низких частот.



#### Примечание.

*Основной стереотракт при этом не удлиняется. В этом состоит достоинство трифонической системы с сабвуфером.*

**Основным недостатком** сабвуферного варианта трифонического тракта является неизменная нагрузка на акустические системы правого и левого каналов с неизбежными искажениями в случае применения акустических систем небольшого объема (менее 50 литров) с НЧ-динамиками с резонансной частотой выше 40 Гц. Все присутствовавшие в исходном стереотракте искажения в области низких частот при этом сохраняются.

**Дополнительным недостатком** сабвуферной трифонической системы является сложность согласования сабвуферного динамика и стереосателлитов. Полноценное согласование по фазе дополнительного НЧ-динамика с исходными НЧ-СЧ-головками оказывается всегда достаточно сложной задачей, так как согласование необходимо провести в области спада амплитудно-частотной характеристики НЧ-СЧ динамика, где фазочастотная характеристика всегда неравномерна.



#### Примечание.

Трифоническая система — это всегда компромисс с целью улучшить звучание стереотракта. Для больших стереоколонок (50 и более литров) с хорошими НЧ-головками (диаметр 25 см, резонансная частота 30—35 Гц) для прослушивания музыки в жилом помещении переход к трифоническому тракту не требуется.

## 8.2. Трифоническая система с общим низкочастотным излучателем на два канала

Можно рекомендовать систему из двух акустических систем с умеренным воспроизведением низких частот (сателлиты) и общий НЧ канал с хорошим низкочастотным динамиком диаметром 25 или 30 см (10 или 12 дюймов). Сателлиты содержат либо по одному широкополосному излучателю диаметром 16 или 20 см с резонансной частотой 60—90 Гц, либо выполняются по двухполосной схеме с последовательными фильтрами первого порядка.

Можно применить в качестве стереосателлитов конструкции, ранее описанные в разделах 6.1—6.3 (рис. 6.8, а). Учитывая их неплохие показатели в области низких частот, рекомендуем совместно с ними

применять НЧ-динамик диаметром 30 см с резонансной частотой ниже 30 Гц, а частоту раздела выбирать в интервале 150—180 Гц.

Можно выбрать в качестве сателлитов СЧ-ВЧ-модули трехполосных систем, описанных в главе 7. Совместно с ними рекомендуется использовать НЧ-головку диаметром 30 см, с резонансной частотой ниже 30 Гц. Частоту раздела рекомендуется выбирать в диапазоне 180—240 Гц.

Сателлиты в этом случае выполняются в акустическом оформлении типа «закрытый ящик». Исключение составляет вариант с головкой Beuma 6B30/P, для которой делается оформление типа «акустический экран». Высота СЧ-динамика должна быть немного ниже головы сидящего человека.

Поэтому может потребоваться установка сателлитов на подставки. Отнеситесь к этому максимально серьезно! Наилучший вариант: в основании — березовая фанера толщиной не менее 40 мм или плита из склеенных дубовых брусков такого же размера. Под ней — толстый ковер или слой войлока. Стойка — полая труба, заполненная сухим песком.

Если у вас уже есть стереофонические акустические системы, но вам не нравится качество воспроизведения низких частот, можно добавить к ним дополнительную акустическую систему. Однако, это имеет смысл делать только для двух- или однополосных систем хороших производителей с основным динамиком диаметром не менее 16 см.

Стоимость пары таких систем — от 400 долл. и выше. Плохие коммерческие акустические системы (двухполосные или трехполосные) ценовой категории ниже 300 долл. улучшить невозможно. В лучшем случае, да и то не всегда, можно использовать корпуса от таких систем, установив в них новые динамические головки.

Вполне приличные корпуса по качеству изготовления и толщине стенок имеют многие акустические системы «советского» периода, в то время как многие зарубежные производители в системах стоимостью примерно 200 долл. используют древесноволокнистые плиты недостаточной толщины и плотности. При этом внешний вид таких систем часто вполне «внушительный» и создает ложное впечатление о качестве изготовления «ящика».

### 8.3. Превращение стандартного стереокомплекса в трифоническую систему

#### Электронные разделительные фильтры

Наиболее удобно изготавливать активные разделительные фильтры на основе высокачественных интегральных операционных усилителей. Пример такого решения представлен на рис. 8.2.

Каждый из двух стереоканалов блока фильтров состоит из входного буфера, фильтра низких частот (ФНЧ) второго порядка, и дифференциального усилителя, формирующего для каждого из стереоканалов разностный сигнал между входным сигналом и сигналом, пропущенным НЧ-фильтром.

Сигнал для общего НЧ-канала формируется сумматором, в котором складываются сигналы, прошедшие через ФНЧ правого и левого каналов. Таким образом обеспечивается равномерная суммарная АЧХ трифонического тракта.

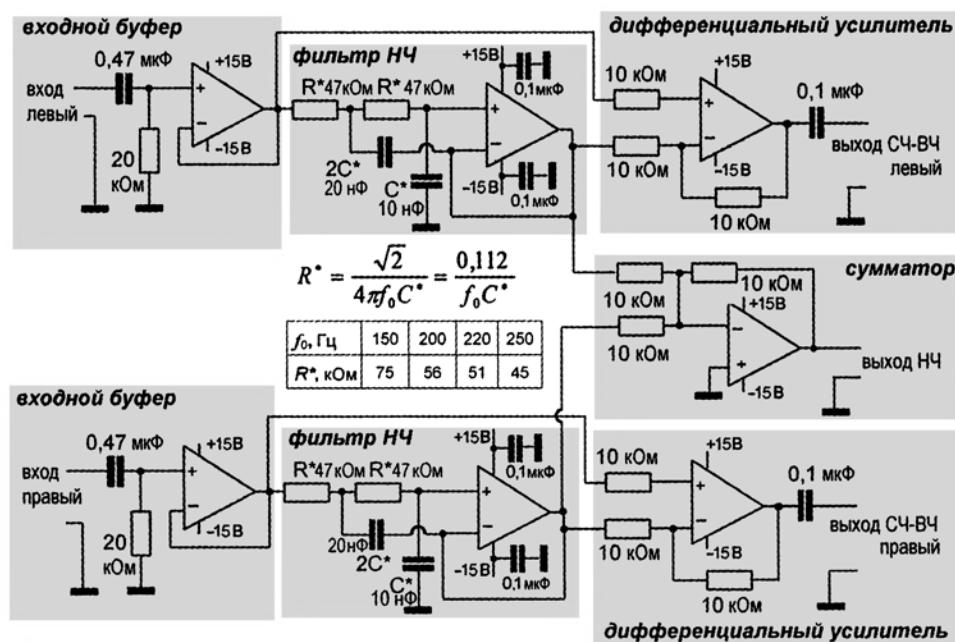


Рис. 8.2. Схема электронных разделительных фильтров трифонической системы

В схеме использован ФНЧ Баттервота второго порядка. Параметры фильтра  $R^*, C^*$  для заданной частоты среза  $f_0$  задаются формулой

$$R^* = \frac{\sqrt{2}}{4\pi f_0 C^*} = \frac{0,112}{f_0 C^*}, \quad (57)$$

где частота выражается в герцах, емкость в фарадах, а сопротивление — в омах. Сопротивление резисторов для нормальной работы схемы должно составлять несколько десятков килоом. Удобно выбрать расчетное значение емкости  $C^*$  из стандартного ряда, например, 10 нФ. Тогда емкость второго конденсатора составит 20 нФ, а значения каждого из сопротивлений  $R^*$  47—75 кОм (табл. 8.1).

Значения сопротивлений в фильтре низких частот

Таблица 8.1

$f_0, Гц$	150	200	220	240
$R^*, кОм$	75	56	51	47

### Рекомендации по выбору компонентов

Автор этих строк, как и многие аудиофилы-радиоконструкторы, придерживается твердого убеждения, что для обеспечения высокой верности звуковоспроизведения необходимо использовать максимально короткий электронный тракт с минимумом активных и пассивных элементов.

Поэтому, «внедрение» в базовый стереотракт дополнительного электронного модуля является серьезным недостатком трифонической системы. Для достижения положительного эффекта необходимо очень тщательно отнести к выбору активных и пассивных элементов электронных разделительных фильтров.

Рекомендуемые операционные усилители представлены в табл. 8.2 и на рис. 8.3. Микросхемы AD825, AD797 и OPA627 (одиночные высококачественные широкополосные усилители) относительно дороги и дефицитны. Тем не менее, они настоятельно рекомендуются истинным аудиофилам из-за высокого качества.

Это самый разумный выбор, если в вашем распоряжении имеется готовый фирменный стереоусилитель ценовой категории более 500 долл. США (у честных производителей прослеживается прямая корреляция между ценой и качеством звучания) или высококачественный самодельный усилитель высокого класса (например, не ниже по уровню, чем уси-

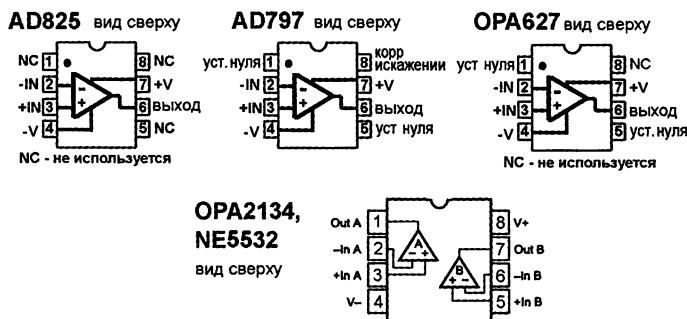


Рис. 8.3. Цоколевка микросхем

лители, описанные в главе 9 настоящей книги, усилители, изготовленные по рекомендациям из книги\* или рекомендациям автора в книге\*\*.

Микросхемы OPA2134 и NE5532 (сдвоенные усилители с низким уровнем искажений) — самые качественные из дешевых и доступных. Они используются многими серьезными фирмами в CD-проигрывателях и усилителях.

*Операционные интегральные усилители, рекомендуемые для разделения СЧ-ВЧ и НЧ каналов в трифонической системе*

Таблица 8.2

Тип	Примерная стоимость, росс. руб.	Примечание
AD825	200	одиночный, только для поверхностного монтажа
AD797	200	одиночный
OPA627	350	одиночный
OPA2134	50	сдвоенный
NE5532	30	сдвоенный

Рекомендуемые конденсаторы — советские слюдяные (СГ), фторопластовые (ФТ), К73, К40У9, из зарубежных — «WIMA», «Philips» или другие, желательно серии МКР (полипропилен). **Недопустимо использовать керамические или электролитические конденсаторы.** Последние пригодны только в качестве фильтров в блоке питания, при этом они должны быть зашунтированы пленочными конденсаторами (например, серии К73).

\* Андреев Д. А., Торопкин М. В. Аудиосистема класса Hi-Fi своими руками. СПб.: Наука и Техника. — 2006.

\*\* Гапоненко С. В. Лампово-транзисторные усилители своими руками. СПб.: Наука и Техника. — 2012.

Резисторы — советские МЛТ, С2-23, ВС мощностью 0,25 или 0,5 Вт. *Недопустимо использовать современные «компьютерные» резисторы китайского производства.* Если есть возможность, рекомендуем применить зарубежные резисторы марок «Dale», «Vishay».

Блок питания изготавливается с применением полупроводникового мостового выпрямителя и стабилизаторов на микросхемах серий 7812, 7912, 7815, 7915 или LM317, LM337.

### Советы по изготовлению низкочастотной акустической системы

При построении трифонической системы нет необходимости подбирать НЧ-динамик с такой же, как у сателлитов, чувствительностью. Наличие дополнительного НЧ-канала усиления с регулятором уровня позволяет не только успешно совместить динамики с несовпадающей чувствительностью, но и приблизить спектр воспроизведения к кристалм равной громкости за счет увеличения уровня общего НЧ-канала по сравнению с правым и левым стереоканалами.

Рекомендуется применить динамическую головку диаметром 25 или 30 см с резонансной частотой ниже 30 Гц. Многочисленные примеры таких динамических головок представлены в табл. 1.2 (глава 1). Можно применять и другие головки, кроме указанных в таблице. Рекомендуемое оформление — закрытый ящик. Расчет оформления типа «закрытый ящик» подробно описан в главе 3. Там же приведены конкретные примеры расчета для нескольких различных динамических головок.



#### Примечание.

Обратите внимание, что для расчета объема ящика необходимо знать полную добротность динамической головки и ее эквивалентный объем. Лучше их измерить.

Как это сделать, было описано в разделе 5.5. В крайнем случае, можно использовать значения, указанные производителем. Если добротность и эквивалентный объем неизвестны, и ящик сделан «наугад», хорошего баса вы не получите.

При изготовлении корпуса тщательно следуйте рекомендациям, приведенным в разделе 5.14 (глава 5), обращая особое внимание на выбор материала для изготовления корпуса, способа борьбы с вибрациями, способа развязки акустической системы от пола.

### Простой усилитель мощности НЧ канала

Самый простой способ сделать усилитель для НЧ-канала мощностью до 100 Вт — применить интегральный усилитель фирмы STMicroelectronics TDA7293. Стоимость такой «микросхемы» — менее 200 росс. руб. «Обвязка» включает всего несколько элементов плюс блок питания. «Энергетические» параметры усилителя TDA7293 следующие.

- Макс. вых. мощность  $W_{\text{MAX}}$  при коэф-те гармоник (КНИ) 10% :
  - на нагрузке 4 Ом при напряжении питания  $U_{\text{пит}} = \pm 29$  В. .... 100 Вт;
  - на нагрузке 8 Ом при  $U_{\text{пит}} = \pm 40$  В. .... 100 Вт.
- КНИ при  $W = 0,1—50$  Вт в полосе 20—15000 Гц на нагрузке 8 Ом  $< 0,1$  %.
- КНИ при  $W = 5$  Вт на частоте 1 кГц на нагрузке 8 Ом — менее 0,005 %.
- Ток покоя 30 мА.

Усилитель имеет встроенную защиту от короткого замыкания и перегрузок, срабатывающую при выходном токе 6,5 А.

Типовая схема включения и внешний вид интегрального усилителя показаны на рис. 8.4. Подробное описание, можно найти, например, в статье.\* Коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  равен

$$K_U = (R_1 + R_2) / R_2.$$

При указанных на схеме значениях он составляет около 30. Изменением значений резисторов его можно изменять, однако производитель не рекомендует делать  $K_U < 20$ , так как в этом случае слишком глубокая обратная связь может вызвать неустойчивость работы усилителя.

Усилитель работоспособен при напряжении питания, начиная от  $U_{\text{пит}} = \pm 12$  В. Рекомендуемые значения напряжения питания для получения максимальной выходной мощности  $U_{\text{пит}} = \pm 30$  В при номинальном сопротивлении акустической системы 4 Ом и  $U_{\text{пит}} = \pm 40$  В при номинальном сопротивлении акустической системы 8 Ом. Хотя работоспособность усилителя сохраняется до  $U_{\text{пит}} = \pm 50$  В, превышение значений  $U_{\text{пит}}$  по сравнению с рекомендуемыми не позволит получить большую мощность, а только приведет к повышенному тепловыделению и срабатыванию системы защиты.

\* Ганичев Г. Новые мощные УМЗЧ класса Hi-Fi от «Мастер Кит». Радиохобби №5, с. 46. — 2003.

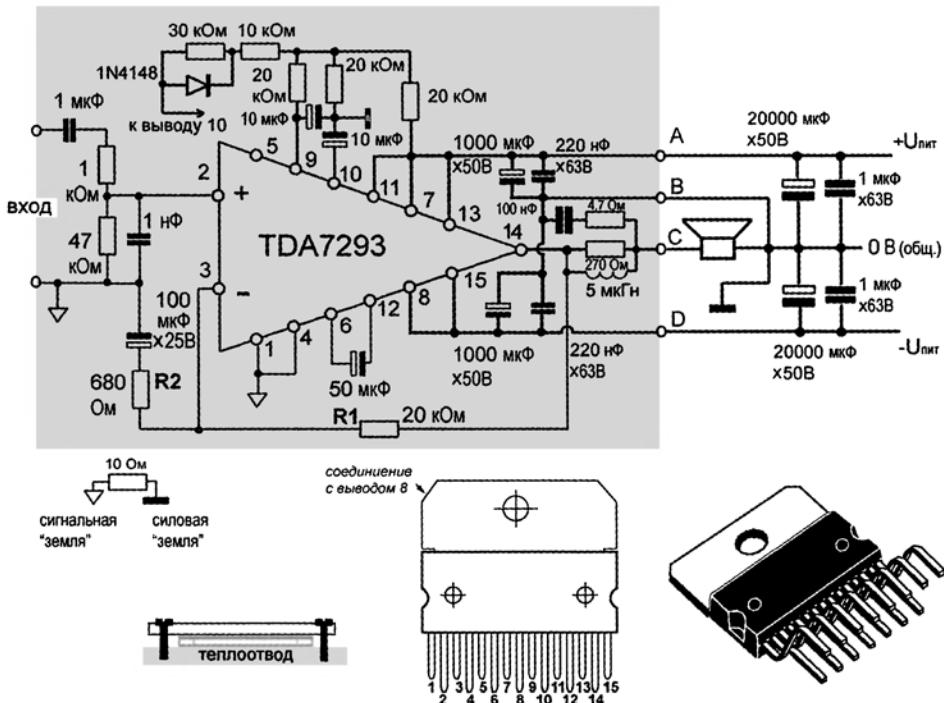


Рис. 8.4. Усилитель низкочастотного канала на микросхеме TDA7293

При изготовлении усилителя необходимо уделить серьезное внимание блоку питания и теплоотводу. Силовой трансформатор должен иметь мощность 150—250 Вт, емкость конденсаторов в фильтре блока питания, указанная на схеме — минимальная, ее рекомендуется увеличить в 2—2,5 раз для получения глубокого баса. Интегральный усилитель («микросхема») TDA7293 устанавливается на радиатор площадью примерно 600 см<sup>2</sup>.

Лучше вместо стандартного варианта в виде одного винта М3 применить металлическую (медь, латунь или алюминиевый сплав) пластину или уголок с двумя винтами, как показано на рис 8.4.

Рекомендуется использовать радиатор, предназначенный для охлаждения с использованием естественной конвекции воздуха, без принудительного охлаждения с помощью вентилятора. Такой радиатор имеет периодически расположенные ребра или стержни с расстоянием примерно 1 см.

При отсутствии такого радиатора можно воспользоваться доступными радиаторами для компьютерных процессоров. Необходимо

использовать радиаторы максимальной эффективной площади, можно в комплекте с вентилятором («кулером») и встроенным датчиком температуры. К двигателю вентилятора подается напряжение 12 В.

Благодаря встроенному датчику температуры, он включается только при повышенной температуре радиатора. Рекомендуем применить появившиеся недавно компьютерные радиаторы с тепловыми трубами и медным теплоотводом. Лучше — с естественным охлаждением, без «кулера». В таких радиаторах используют специальную жидкость, которая испаряется при нагревании медного теплоотвода и устремляется по трубам в виде пара к множественным алюминиевым ребрам. Пар, охлаждаясь, конденсируется в жидкое состояние и возвращается по другим трубам вниз к медному теплоотводу.

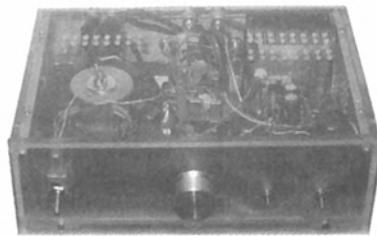


#### Внимание.

*Внутри медного теплоотвода проходят трубы, поэтому отверстия в нем для крепления микросхемы TDA7293 надо сверлить только при полной уверенности, что трубы не будут задеты сверлом! Если такой уверенности нет, используйте вспомогательную медную пластину с размерами, равными размеру процессора, для которого предназначен радиатор. К этой пластине крепится микросхема TDA7293, а затем пластина крепится к теплоотводу с помощью штатных элементов, входящих в его комплект. Не забывайте применять теплопроводящую пасту!*

Удобно объединить в одном корпусе модуль разделительных фильтров и усилитель мощности общего НЧ-канала с регулятором громкости. Такое устройство можно легко сопрягать с любой стандартной стереосистемой (стереоусилитель плюс две акустические системы), минимизируя не только время подключения, но и длину сигнальных проводов. Пример такого решения показан на рис. 8.5.

Этот НЧ-модуль изготавливается для проверки самой «идеи» трифонической системы. Для удобства изготовления и монтажа использовано оргстекло (удобный, но не лучший вариант). Применен торOIDальный трансформатор мощностью 200 Вт, электролитический



*Рис. 8.5. НЧ-модуль трифонической системы: активные фильтры, усилитель на микросхеме TDA7293 с регулятором уровня*

ские конденсаторы суммарной емкостью 60000 мкФ, радиатор с вентилятором и термодатчиком от компьютерного процессора. Регулятор уровня — дискретный на 12 положений на резисторах МЛТ и реле РЭС-49 с позолоченными контактами.

### Улучшенный усилитель мощности НЧ канала

Этот усилитель содержит интегральный операционный усилитель (ОУ) с повышенным допустимым напряжением питания и четыре транзистора. По сравнению с усилителем на микросхеме TDA7293 он обеспечивает лучшую динамику при воспроизведении мощных низкочастотных звуков благодаря отсутствию общей отрицательной обратной связи.

Схема показана на рис. 8.6. Каскад на операционном усилителе является усилителем напряжения, а каскад на четырех транзисторах — усилителем тока. Коэффициент усиления по напряжению равен 20 (отношение сопротивлений резисторов 10 кОм и 510 Ом в цепи обратной связи ОУ).

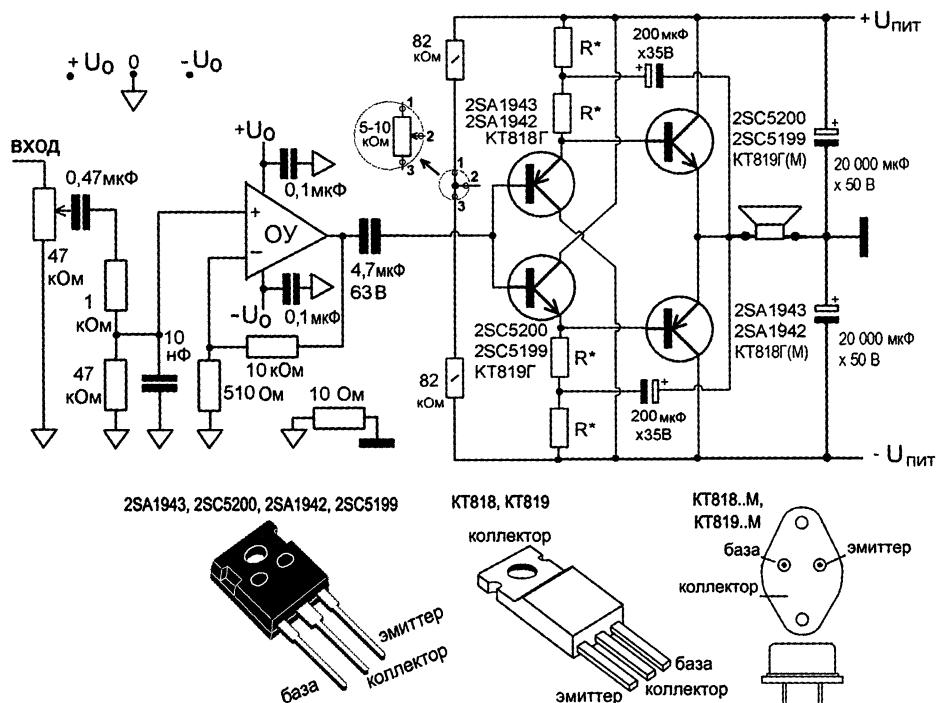


Рис. 8.6. Схема усилителя

Напряжение питания  $\pm U_{\text{пит}} = \pm 28 \dots \pm 40$  В определяется наличием в вашем распоряжении интегральных ОУ (табл. 8.3, табл. 8.4). Необходимым условием при выборе ОУ кроме повышенного напряжения питания  $\pm U_0 = \pm 24 \dots \pm 40$  В является способность обеспечивать максимальный размах выходного напряжения на нагрузке примерно 5 кОм. Все приведенные ОУ являются одиночными.

*Операционные интегральные усилители, рекомендуемые для применения в НЧ-усилителе трифонической системы*

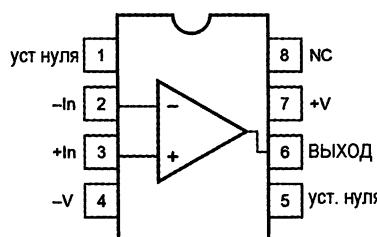
*Таблица 8.3*

Тип	Примерная стоимость, росс. руб.	Максимальное напряжение питания, В
OPA604	160	$\pm 24$
OPA551, OPA552	200	$\pm 30$
OPA445	250	$\pm 45$

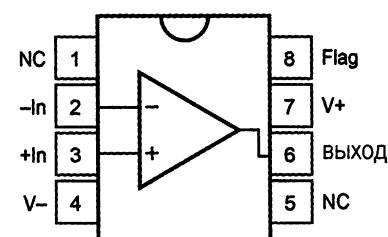
Цоколевка ОУ показана на рис. 8.7. Фактически, полезные выводы (входы, выход, питание) у всех ОУ совпадают. Выводы 1, 5, 8 в приведенных схемах не используются. Вывод «8» (Flag) ОУ OPA551, OPA552 выдает логический сигнал при срабатывании встроенной системы защиты от перегрузки и перегрева и может использоваться для индикации такого отключения.

Выходной каскад является параллельным усилителем тока. Это — редкий пример транзисторной схемы, хорошо работающей без применения общей отрицательной обратной связи. Схема известна как минимум несколько десятилетий и широко применяется в маломощных усилителях напряжения для обеспечения хорошей работы на относительно низкоомную нагрузку. Примером может служить ОУ AD797.

**OPA604, OPA445 вид сверху**

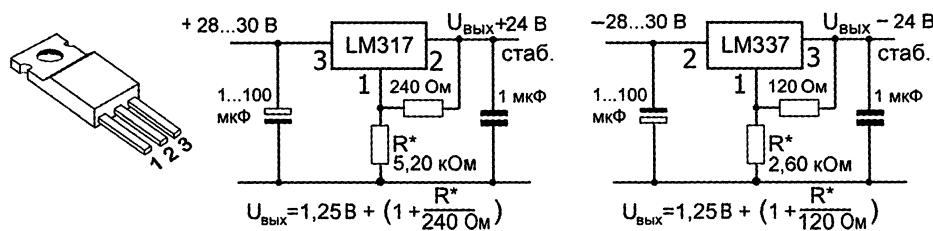


**OPA551, OPA552 вид сверху**



NC - не используется

*Рис. 8.7. Цоколевка операционных усилителей с повышенным напряжением питания*

Рис. 8.8. Стабилизатор  $\pm 24$  В для питания ОУ

Применение параллельного усилителя тока в оконечном каскаде мощного усилителя было стимулировано публикациями А. Агеева, В. Ульянова и С. Лачиняна. Схема и особенности ее работы, реализации и модификации подробно описаны в книге автора (см. сноску на стр. 213).

Варианты усилителя по схеме рис. 8.6 и его параметры

Таблица 8.4

	Напряжение питания $U_{пит}$	Тип ОУ	Питание ОУ	$R^*, \Omega$ (W, Вт)	Максим. вых. мощность, Вт
1	$\pm 30$ В	OPA604, OPA551, OPA552, OPA445	$\pm 24$ В стабил.	150 (7)	60 (4 Ом) 30 (8 Ом)
2	$\pm 28$ В	OPA551, OPA552, OPA445	$\pm 28$ В нестабил.	150 (7)	75 (4 Ом) 37 (8 Ом)
3	$\pm 40$ В	OPA445	$\pm 40$ В нестабил.	220 (10)	100 (4 Ом) 80 (8 Ом)

Варианты усилителя для различных значений напряжения питания и различных типов микросхем приведены в табл. 8.4. При напряжении питания  $\pm 40$  В целесообразно увеличить сопротивление резистора цепи обратной связи ОУ (между выходом ОУ и его инвертирующим входом) с 10 до 15 кОм, что повысит коэффициент усиления по напряжению с 20 до 30 раз.

Усилитель не содержит никакой специальной защиты от короткого замыкания в нагрузке или от перегрузки по выходной мощности. Схема выходного каскада устроена таким образом, что максимальный ток в нагрузке не может превысить значения, равного произведению тока покоя выходного каскада на коэффициент усиления по току выходных транзисторов.

При токе покоя 60 мА и коэффициенте усиления по току 100 максимальный ток составит 6 А. Благодаря тому, что допустимый максимальный ток выходных транзисторов значительно выше этого значения, усилитель выдерживает кратковременное короткое замыкание в нагрузке.

Транзисторы выходного каскада необходимо попарно подобрать с одинаковыми коэффициентами усиления по току. Перед первым подключением акустической системы необходимо подключить резистор сопротивлением 3—10 Ом и убедиться, что постоянное напряжение на выходе не превышает 50 мВ. В противном случае необходимо применить переменный резистор на входе, как показано на рис. 8.6 и выставить нулевое постоянное напряжение на выходе.

**Совет.**

*Работоспособность выходного каскада можно проверить, подключив на его вход (левый по схеме на рис. 8.6 вывод разделительного конденсатора емкостью 4,7 мкФ) сигнал непосредственно от проигрывателя компакт-дисков.*

Недостатком усилителя является относительно большая потребляемая мощность в режиме покоя. Ток покоя составляет примерно 250 мА, что при напряжении питания  $\pm 40$  В приводит к непрерывно потребляемой мощности около 20 Вт.

Это требует увеличения площади радиаторов и обеспечения хорошей вентиляции не только для радиаторов выходных транзисторов, но также для силового трансформатора и резисторов  $R^*$ . Если в вашем распоряжении нет подходящих резисторов достаточной мощности, можно каждый из резисторов  $R^*$  составить из 5 параллельно соединенных двухваттных резисторов ВС или МЛТ номиналом 750—820 Ом (при напряжении питания  $\pm 30$  В и 1,1—1,3 кОм (при напряжении питания  $\pm 40$  В).

Мощность силового трансформатора — 150—250 Вт, суммарная площадь радиаторов — не менее 800 см<sup>2</sup> при напряжении питания  $\pm 30$  В и не менее 1200 см<sup>2</sup> при напряжении питания  $\pm 40$  В.

## 8.4. Что такое «сабвуфер»?

Сабвуфером называют низкочастотную акустическую систему, которая подключается в дополнение к стандартному стереофоническому тракту без изменения режимов его работы и полосы воспроизводимых им частот. Сабвуферный канал включает:

- ♦ входной стереобуфер и смеситель;
- ♦ регулятор уровня;

- фильтр НЧ с регулируемой частотой среза в интервале 60—150 Гц;
- фазовращатель (часто заменяется дискретным переключателем фазы);
- усилитель мощностью 50—100 Вт.

Иногда все электронные блоки объединяют конструктивно с акустической системой, располагая их внутри или на задней стенке сабвуферной акустической системы. По такому принципу сделаны типичные фирменные сабвуферы. Сабвуфер может подключаться либо к линейному выходу основного стереоусилителя, либо непосредственно к его выходным клеммам, т. е. параллельно акустическим стереосистемам. В последнем случае на входе сабвуферного канала устанавливается резистивный делитель напряжения с коэффициентом ослабления примерно 10.

Простейший вариант входного блока сабвуферного канала показан на рис. 8.9. Он рассчитан на подключение к линейному выходу стереоусилителя и состоит из входного стереобуфера, сумматора и перестраиваемого фильтра низких частот второго порядка. При подключении к выходным клеммам стереоусилителя можно отказаться от входного буфера заменив его двумя резистивными делителями напряжения с коэффициентом ослабления примерно 10 раз.

Учитывая малую полосу пропускания и незначительную амплитуду выходного напряжения, можно рекомендовать для применения в

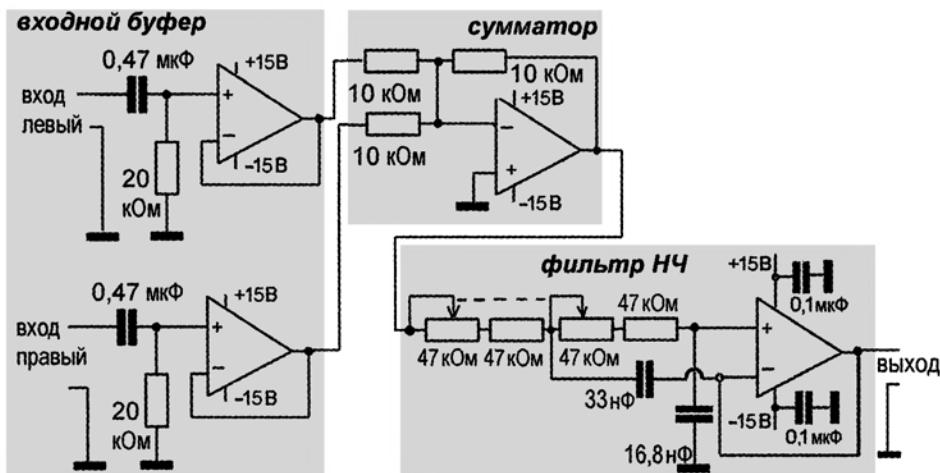


Рис. 8.9. Входной блок сабвуферного канала

схеме на рис. 8.9 практически любые операционные усилители, например, широко распространенные и недорогие TL072 (2 ОУ в одном корпусе) и TL074 (4 ОУ в одном корпусе), а также советские К140УД6, К140УД7.

Сабвуфер воспроизводит звуки, длина волн которых сопоставима с размерами жилого помещения, или даже превышает их. Поэтому расположение сабвуфера по отношению к слушателю и к стереофоническим акустическим системам не влияет на звуковую картину.

Сабвуфер можно располагать в любом месте комнаты, кроме углов и закрытых набольших объемов. Нельзя располагать сабвуфер под столом. Нельзя ставить его вплотную к стене. Наилучшее положение сабвуфера выбирается экспериментально по слитности, цельности, наполненности звучания на самых низких частотах (нижние регистры органа, большой барабан, контрабас).

Желательно в электронный тракт добавить фазовращатель для временного согласования сабвуфера с сателлитами.



#### Примечание.

*Сабвуферный канал не облегчает работу сателлитов. Они работают в полную силу, т. е. со всеми присущими небольшим акустическим системам проблемами при воспроизведении низких частот. Поэтому включение сабвуфера в звуковой тракт является признаком того, что вы не вполне удовлетворены своими стереофоническими акустическими системами. Плохим «сателлитам» сабвуфер не поможет. А очень хорошим стереоколонкам сабвуфер просто не нужен.*

Сабвуферный канал стал неотъемлемой частью многоканальных домашних кинотеатров. В аудиотракте кинофильма сабвуферу отводится функция воспроизведения вовсе не музыкальных, а главным образом «шумовых» сигналов типа выстрелов, грома, рокота самолета или танка и т. п., причем важно понимать, что эти сигналы в фонограмме фильма формируются, как правило, искусственно, с помощью цифровой техники.

## ГЛАВА 9

# СОВЕТЫ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗГОТОВЛЕНИЮ УСИЛИТЕЛЕЙ

*В этой главе приведены рекомендации по изготовлению качественных стереофонических усилителей мощности. В простейшем варианте применяется хорошо зарекомендовавший себя недорогой интегральный усилитель фирмы «National Semiconductors». Улучшенный вариант представляет собой несложный усилитель без общей отрицательной обратной связи, построенный по принципам «Hi-End»-систем.*

*Наконец, наиболее сложный из предлагаемых вариантов позволяет ощутить очарование «лампового» звука: это гибридные лампово-транзисторные конструкции с усилителем напряжения на высококачественных российских лампах на входе и транзисторным каскадом усиления тока на выходе.*

## **9.1. Простейший вариант: усилитель на интегральных схемах**

Фирма «National Semiconductors» разработала серию недорогих (несколько долларов США за штуку) интегральных усилителей для построения высококачественных аудиоусилителей мощностью до 50 Вт. Применение таких микросхем позволяет построить в домашних условиях вполне приличный аппарат буквально за пару выходных дней.

Микросхемы LM3886 фирмы «National Semiconductors», ее предшественники LM1875, LM3876, а также последующая двухканальная версия LM4870 приобрели популярность не только у радиолюбителей, но и у профессиональных разработчиков.

Так, например, фирма «Sacura Systems» (Япония) предлагает усилитель мощностью 25 Вт на канал по цене выше 1 тыс. долл. США на микросхемах LM1875, а фирма «Jeff Rowland» (США) — усилитель мощностью 300 Вт на канал с использованием 6 корпусов LM3886 в каждом канале (мостовое включение трех параллельных каналов усиления в каждом из стереоканалов) по цене 12 тыс. долл. США. Обе упомянутые разработки получили восторженные отзывы профессиональных экспертов и журналистов, а для радиолюбителей была написана даже специальная книга по разработке усилителей на этих микросхемах\*.

Приведем основные параметры лучшей микросхемы этой серии — LM3886Г. Микросхема с индексом «Г» имеет металлический корпус без изоляции, который обеспечивает лучший теплоотвод и более высокую выходную мощность, а с индексом «TF» — изолированный корпус с худшим теплоотводом. Преимущество последней версии — в простоте конструктивного оформления. В этом случае не требуется изолировать радиатор от корпуса и других металлических элементов усилителя.

Интегральный усилитель LM3886Г развивает максимальную мощность 68 Вт на нагрузке 4 Ом (напряжение питания должно составлять при этом  $\pm 28\text{В}$ ) и 50 Вт на нагрузке 8 Ом (напряжение питания  $\pm 35\text{В}$ ). Для версии «TF» показатели мощности немного скромнее. Коэффициент гармоник во всем звуковом диапазоне — примерно 0,01%.

Интегральный усилитель LM3886 имеет встроенную защиту от перегрузок и короткого замыкания в нагрузке, а также возможность задержки подключения нагрузки на несколько секунд для предотвращения неприятных (и опасных для наших ушей и акустических систем!) переходных процессов, типичных для всех усилителей с общей отрицательной обратной связью.

Схема одного канала усилителя на микросхеме LM3886 показана на рис. 9.1. Для изготовления усилителя можно использовать навесной монтаж или воспользоваться макетной печатной платой. Можно изготовить и специальную печатную плату. Важно обеспечить минимальное количество паяных соединений и минимальную длину соединительных проводников.

\* Ю. В. Авраменко. Качественный звук — сегодня это просто. «МК-Пресс», Киев, 2007.

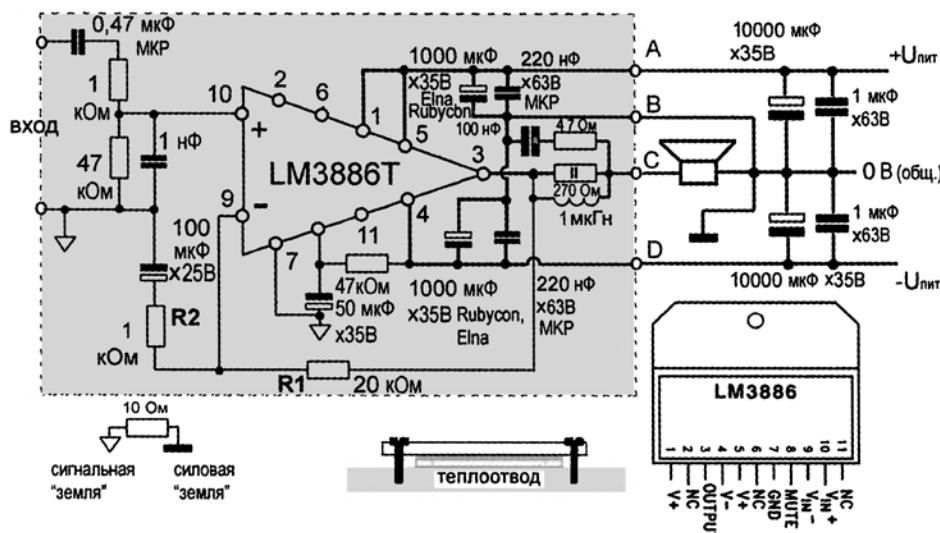


Рис. 9.1. Схема одного канала усилителя на микросхеме LM3886

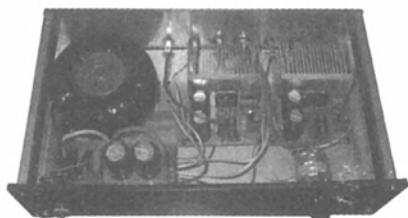


Рис. 9.2. Простой стереоусилитель начинающего аудиофила на микросхемах LM3886

Резистор R1 цепи обратной связи распайкается непосредственно на ножках микросхемы. Емкость конденсаторов в блоке питания по 10 тыс. мкФ следует рассматривать как минимальную. Рекомендуемое значение — до 100 тыс. мкФ в целом для стереоусилителя. Лучшее решение — двойное моно с полным разделением питания по каналам. Простейший вариант с общим блоком питания показан на рис. 9.2.

Полная стоимость всех компонентов не превышает 50 долл. Усилитель в стандартном включении по рис. 9.1 в варианте двойное моно «переиграл» вполне приличный фирменный аппарат «Technics» середины 90-х годов ценовой категории около 500 долл.



#### Совет.

Улучшения звучания можно добиться с помощью инвертированного включения микросхемы LM3886 и добавлением входного буфера на высококачественном операционном усилителе (например, OPA627, NE5532, OPA2134).

Усилитель в инвертированном включении, изготовленный по схеме «двойное моно», с напряжением питания  $\pm 32$  В, трансформатором мощностью 100 Вт и суммарной емкостью конденсаторов 40 тыс. мкФ в каждом канале «переиграл» при сравнительных прослушиваниях современный «Harman Kardon» для домашнего кинотеатра ценовой категории более 500 дол.

## 9.2. Улучшенный вариант: полупроводниковый усилитель без общей обратной связи

Этот несложный усилитель обеспечивает «полнокровное», насыщенное, открытое звучание, сопоставимое с лучшими аудиофильскими усилителями при условии применения качественных конденсаторов, транзисторов, резисторов и операционных усилителей.

Схема показана на рис. 9.3, а внешний вид готового усилителя — на рис. 9.4. Принципиально схема не отличается от ранее рассмотренной схемы на рис. 8.6. Отличие состоит в применении широкополосных высококачественных операционных усилителей на входе.



### Примечание.

Основное достоинство усилителя — *отсутствие общей отрицательной обратной связи*.

Питание входного каскада — стабилизированное. Схема стабилизированного источника показана ранее на рис. 8.8. Обратите внимание на формулы для расчета необходимого сопротивления резисторов, задающих выходное напряжение.

Мощность усилителя определяется напряжением питания операционного усилителя. При указанных на рис. 9.3 номиналах она составляет 25 Вт на нагрузке 4 Ом и вдвое меньше на нагрузке 8 Ом. Транзисторы выходного каскада необходимо попарно подобрать с одинаковыми коэффициентами усиления по току.

Перед первым подключением акустической системы необходимо подключить резистор сопротивлением 3—10 Ом и убедиться, что постоянное напряжение на выходе не превышает 50 мВ. В противном случае необходимо применить переменный резистор на входе, как показано на рис. 8.6 и выставить нулевое постоянное напряжение

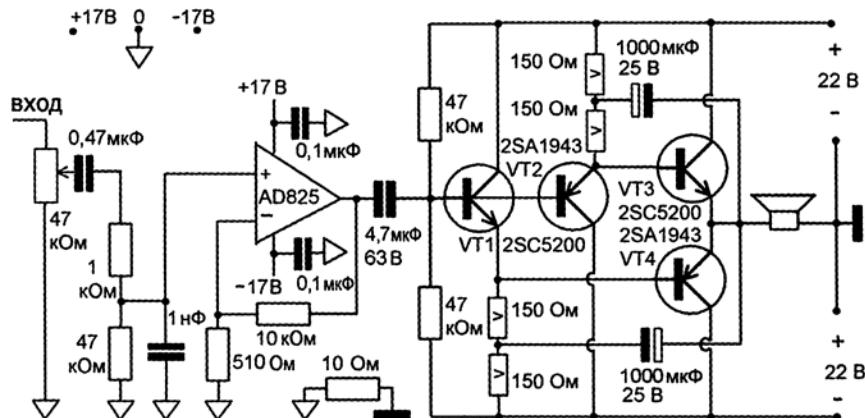


Рис. 9.3. Схема усилителя без общей отрицательной обратной связи



Рис. 9.4. Внешний вид усилителя

Рекомендуемые операционные усилители для входного каскада в порядке убывания прогнозируемого качества звучания

Таблица 9.1

Тип	Макс. напряжение питания, В	Примерная стоимость, руб. РФ	Примечание
AD825	± 18	200	одиночный, только для поверхностного монтажа
AD797	±18	200	одиночный
OPA627	±18	350	одиночный
AD744	±18	50	одиночный
NE5532	±22	30	сдвоенный
OPA604	±24	50	одиночный
OPA2134	±18	30	сдвоенный
OPA551, OPA552	±30	160	одиночный

### 9.3. На пути к «ламповому звуку»: несложные гибридные усилители

В конце прошлого века неожиданно для многих в звукотехнике произошел «ламповый ренессанс».

Оказалось, что ламповые усилители — большие, громоздкие, но содержащие предельно короткий тракт (всего 2-3 лампы и выходной трансформатор) — в сравнении с транзисторными схемами, содержащими десятки транзисторов, лучше передают «музыкальность» звуков. Ламповые усилители создают не только пространственную сцену, но и «вовлеченность» слушателя в музыкальное «действо».

В недавней книге автора<sup>\*</sup> анализируются причины лампового ренессанса и обосновывается бюджетное решение на пути к т. н. ламповому звуку. Решение состоит в построении усилителя без общей отрицательной обратной связи, в котором входной усилитель напряжения собран на лампе (лампах), а выходной усилитель тока собран на транзисторах.

В качестве выходного каскада рекомендуется применить параллельный усилитель тока на четырех транзисторах, представленный ранее на рис. 8.6 и рис. 9.3. Варианты входных усилителей напряжения показаны на рис. 9.5 — 9.7. Ламповый усилитель напряжения подключается вместо каскада на операционном усилителе непосредственно к базам входных транзисторов выходного каскада.

Показанный на схемах резистор 200—220 кОм, подключаемый с выхода лампового каскада к «земле», используется при отладке и проверке работоспособности лампового каскада. При сопряжении лампового каскада с транзисторным «оконечником» это резистор исключается из схемы.



#### Примечание.

Применять иные лампы вместо тех, что указаны на схемах, нельзя. Критерии отбора ламп — низкое внутреннее сопротивление (примерно 1 кОм), значительный рабочий ток (30 мА) и отличное звучание.

Коэффициент усиления по напряжению с подключенным параллельно катодному резистору конденсатором составляет примерно 12

\* С. В. Гапоненко. Лампово-транзисторные усилители своими руками. СПб.: Наука и техника. — 2012.

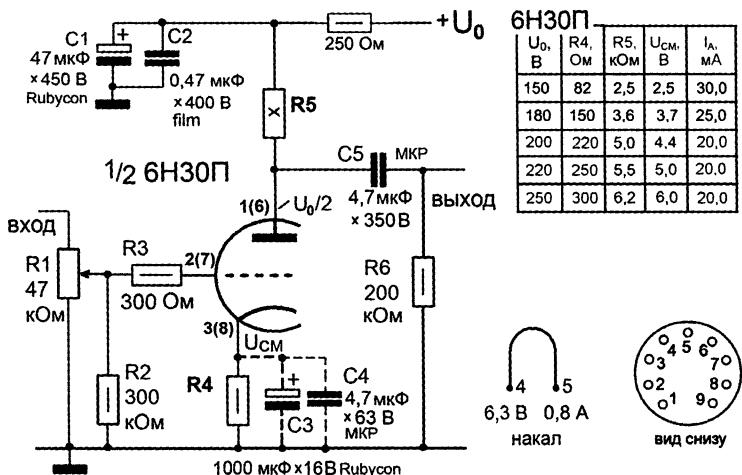


Рис. 9.5. Входной усилитель напряжения на лампе 6Н30П

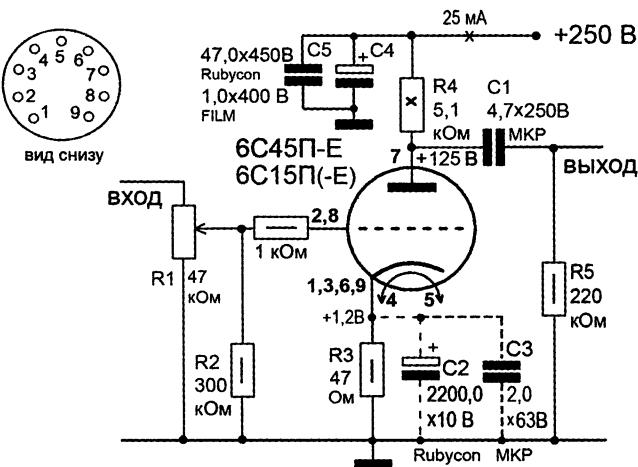


Рис. 9.6. Входной усилитель напряжения на лампе 6С45 П

для 6Н30П, 30 для 6С45П, 25 для 6Э6П. Шунтирующие конденсаторы можно не подключать. Это уменьшит коэффициент гармоник с одновременным уменьшением коэффициента усиления по напряжению примерно в полтора раза.

Наилучшее звучание обеспечивает лампа 6Н30П, к сожалению дефицитная и не очень дешевая (500 руб. РФ). Интересно отметить, что эта российская лампа, по-видимому, не имеет ни аналогов, ни

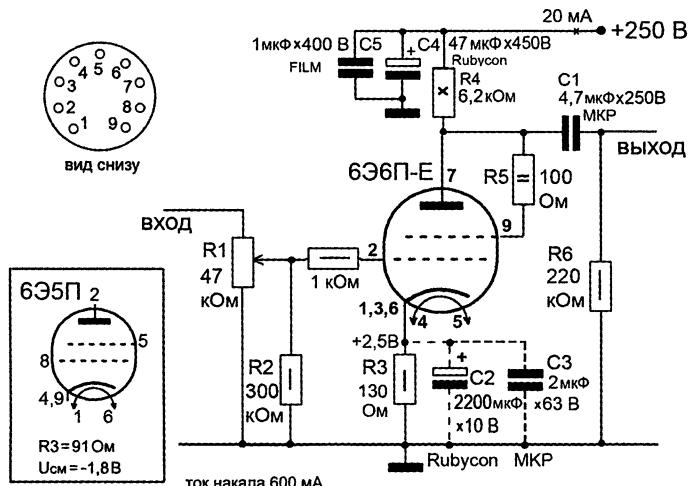


Рис. 9.7. Входной усилитель напряжения на тетроде 6Э6П

прототипов среди зарубежных ламп. Ее единственный недостаток — незначительный коэффициент усиления и, соответственно, ограниченная мощность всего усилителя на ее основе.

При расчетной чувствительности усилителя 1 В эту лампу можно использовать в усилителях мощностью до 25 Вт на нагрузке 4 Ом. При этом напряжение питания выходного каскада может составлять примерно  $\pm 22$  В— $24$  В. Лампы 6С45П и 6Э6П (6Э5П) недороги (примерно 100 росс. руб.) и недефицитны. 6С45П имеет американский аналог WE417A («Western Electric»). С этими лампами при чувствительности 1 В можно получить мощность более 50—60 Вт на нагрузке 4 Ом. Напряжение питания оконечного транзисторного усилителя для получения такой мощности должно составлять  $\pm 30$  В— $32$  В.



#### Примечание.

Все рекомендуемые лампы очень долговечны: 3 тыс. час. для 6С45П и 10 тыс. час. для 6Н30П и 6Э6П.

Схема блока питания показана на рис. 9.7. Рекомендуемый вариант: кенотрон и дроссель. Вариант с диодным выпрямителем показан на вставке. Показанный для этого случая дополнительный выключатель предназначен для включения анодного напряжения после прогрева ламп. При использовании кенотронного выпрямителя задержка

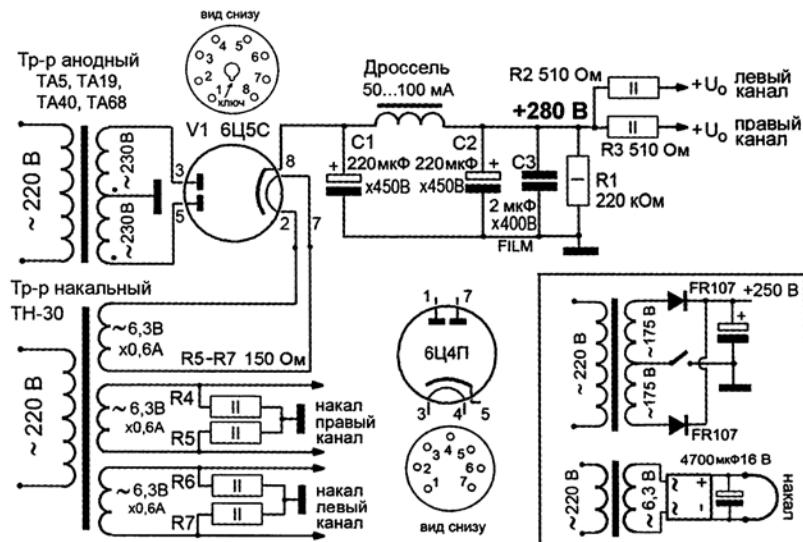


Рис. 9.8. Блок питания лампового усилителя напряжения

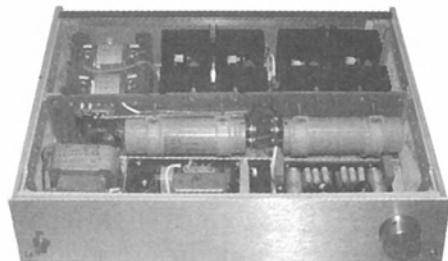


Рис. 9.9. Гибридный усилитель в сборе со снятой верхней крышкой

При предельно кратком сигнальном тракте усилитель требует тщательного отбора качественных компонентов, применения достаточно больших радиаторов для выходных транзисторов, трансформаторов транзисторного блока и лампового блока с 2-3-кратным запасом по мощности, качественных электролитических конденсаторов большой емкости. Вариант гибридного усилителя, изготовленного автором, показан на рис. 9.9. На переднем плане в левой части виден силовой анодно-накальный трансформатор, кенотрон, дроссель.

Справа, вблизи регулятора громкости находятся лампы 6Э6П. В задней части виден силовой трансформатор транзисторного блока

подачи анодного напряжения по отношению к напряжению накала ламп обеспечивается за счет времени, необходимого для прогрева кенотрона.

Уделите достаточно внимания отбору компонентов и процессу изготовления и вы не пожалеете о затратах времени и средств! Простота лампово-транзисторных усилителей кажущаяся.

и четыре одинаковых радиатора, на которых распаяны все элементы транзисторной части: по 4 транзистора, по 4 резистора и по 2 конденсатора в каждом канале. В центре усилителя видны два конденсатора емкостью по 40 тыс. мкФ для питания транзисторного блока. Желаю вам успешного аудиотворчества и удовлетворения от его результатов.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$C$  — емкость конденсатора  
 $C_{MS}$  — гибкость подвижной системы динамической головки  
 $D$  — диаметр  
 $f$  — частота  
 $F_{BOX}$  — частота резонанса динамической головки в ящике  
 $F_s$  — частота собственного резонанса динамической головки  
 $F_t$  — частота основной моды трубы (трансмиссионной линии)  
 $F_3$  — нижняя граничная частота  
 $i$  — мнимая единица  
 $I$  — интенсивность звука  
 $I$  — сила тока  
 $L$  — индуктивность  
 $l$  — длина  
 $L$  — длина трансмиссионной линии  
 $L_{PORT}$  — длина порта фазоинвертора  
 $M_{MS}$  — масса подвижной системы динамической головки  
 $P$  — звуковое давление  
 $Q$  — добротность  
 $Q_{BOX}$  — добротность системы «головка + закрытый ящик»  
 $Q_{ES}$  — электрическая добротность динамической головки  
 $Q_{MS}$  — механическая добротность динамической головки  
 $Q_{TS}$  — полная добротность динамической головки  
 $R$  — электрическое сопротивление  
 $R_E$  — активное сопротивление динамической головки  
 $R_C$  — сопротивление конденсатора емкостью  $C$   
 $R_L$  — сопротивление катушки индуктивностью  $L$   
 $S$  — площадь  
 $S_d$  — эффективная площадь диффузора динамической головки  
 $S_{MS}$  — упругость подвижной системы динамической головки  
 $T$  — период колебаний  
 $U$  — электрическое напряжение  
 $v$  — скорость звука  
 $V_{AS}$  — эквивалентный объем динамической головки  
 $V_{BOX}$  — объем ящика акустической системы  
 $W$  — мощность

$Z$  — полное сопротивление динамической головки  
 $\lambda$  — длина волны  
 $\rho$  — удельное сопротивление  
 $\omega$  — циклическая частота,  $\omega = 2\pi f$

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АС — акустическая система  
АЧХ — амплитудно-частотная характеристика  
ВАХ — вольтамперная характеристика  
ВЧ — высокочастотный  
КНИ — коэффициент нелинейных искажений  
НЧ — низкочастотный  
ОС — обратная связь  
ООС — отрицательная обратная связь  
ОООС — общая отрицательная обратная связь  
ОУ — операционный усилитель  
СЧ — среднечастотный  
ФЧХ — фазочастотная характеристика

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cordesman A. H.* Who stole the bass // Stereophile. — 1987. — v.10, No 5.
2. *Fletcher N. H., Rossing T. D.* The Physics of Musical Instruments (2nd ed.). — New York: Springer. — 1999.
3. *Klippel W., Schlechter, J.* Measurement and Visualization of Loudspeaker Cone Vibration. Электр.ресурс: <http://www.klippel.de/know-how/literature/papers.html>
4. *Levine H., Schwinger J.* On the radiation of sound from an untangled circular pipe // Physical Review. — 1948. — v.73. — p. 383-406.
5. *Small R.H.* Constant Voltage Crossover Network Design // J. Audio Engineering Soc. — 1971. — V.19, N1. — p.12.
6. *Small R.H.* Direct-radiator loudspeaker system analysis // J. Audio Engineering Soc. — 1972. — V.20. — p.383.
7. *Small R.H.* Closed-box loudspeaker systems. Part I: Analysis // J. Audio Engineering Soc. — 1972. — V. 20, N12 — p. 798.
8. *Small R.H.* Closed-box loudspeaker systems. Part II: Synthesis // J. Audio Engineering Soc. — 1972. — V. 20, N12 — p. 798.
9. *Small R.H.* Vented-box loudspeaker systems. Part I: Small-signal analysis // J. Audio Engineering Soc. — 1973. — V. 21, N7 — p. 363.
10. *Small R.H.* Vented-box loudspeaker systems. Part II: Large-signal analysis // J. Audio Engineering Soc. — 1973. — V. 21, N7 — p. 438.
11. *Thiele A. N.* Loudspeakers in vented boxes. Part I // Proceed. IRE Australia. — 1961 (Aug.). — V.22. — p. 487. Reprinted in *J.Audio Eng. Soc.* —1971 (May). — V.19. — p. 382.
12. *Thiele A. N.* Loudspeakers in vented boxes. Part II // Proceed. IRE Australia. — 1961(Aug.) — V.22. — p.500. Reprinted in *J.Audio Eng. Soc.* — 1971 (June). — V.19. —p. 471.
13. *Авраменко Ю.* Качественный звук — сегодня это просто. — К.: МК-Пресс. — 2007.
14. *Акустика. Справочник* (под ред. Сапожкова М. А.). — М.:Радио и связь. — 1989.
15. *Андреев Д. А., Торопкин М. В.* Аудиосистема класса Hi-Fi своими руками. — СПб.: Наука и Техника. — 2006.
16. *Алдошина И. А., Войнивилло В. Г.* Высококачественные акустические системы и излучатели. — М.: Радио и связь. — 1985.

17. *Бать С.* Любительские громкоговорители. — М.: Радиософт. — 2002.
18. *Виноградова Э. Л.* Конструирование громкоговорителей со сглаженными частотными характеристиками. — М.: Энергия. — 1978.
19. *Ганичев Г.* Новые мощные УМЗЧ класса Hi-Fi от «Мастер Кит». Радиохобби №5, с. 46 — 2003.
20. *Гапоненко С. В.* Лампово-транзисторные усилители своими руками. СПб.: Наука и техника. — 2012.
21. *Елютин А.* Последовательный кроссовер // Автозвук. — 2010. — №1.
22. *Иоффе В. К., Лизунков М. В.* Бытовые акустические системы. — М.: Радио и связь. — 1982.
23. *Кошелев В.* Громовержцы // Салон AV. — 2007. — №11. — с.42.
24. *Петров А. А.* Звуковая схемотехника для радиолюбителей. — СПб.: Наука и Техника. — 2003.
25. *Стретт Дж. В. (Лорд Рэлей)* Теория звука (в 2-х томах). — М.: Гостехиздат. — 1955.
26. *Тарасов Р.* Эмоции и трезвый расчет // Салон AV. — 2005. — №1. — с. 28.
27. *Тарасов Р.* Пределы совершенства // Салон AV. — 2011. — №5. — с. 40.
28. *Тарасов Р.* Материализация духов // Салон AV. — 2004. — №10. — с. 26.
29. *Шихатов А. И.* Концертный зал на колесах. — М.: ДМК-Пресс. — 2005.
30. *Фурдуев В. В.* Электроакустика. — М.: Гостехиздат. — 1948.
31. *Эфрусси М.М.* Громкоговорители и их применение. — М.: Энергия. — 1976.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ РЕСУРСОВ ИНТЕРНЕТ**

<http://www.beyma.com/>  
<http://www.fostex.jp/>  
<http://www.noema.ru/>  
<http://www.gajdar.nm.ru/>  
<http://www.bowers-wilkins.com/>  
<http://samodelka.ru/>  
<http://www.audiomania.ru/>  
<http://www.quarter-wave.com/>  
<http://www.t-linespeakers.org/>  
<http://www.thielesmall.com/>  
<http://www.carstereo.com/>  
[http://brinesacoustics.com/Pages/Quarter\\_Wave\\_Resonators.html#Augspurger/](http://brinesacoustics.com/Pages/Quarter_Wave_Resonators.html#Augspurger/)  
<http://sound.westhost.com/>  
<http://www.lowthervoigtmuseum.org.uk/index.html>  
<http://www.lowtherloudspeakers.co.uk/>  
<http://fullrangedriver.com/singledriver/>  
<http://www.t-audiolab.ru/>  
<http://www.pmc-speakers.com/>  
<http://www.tannoy-rus.ru/>  
<http://www.avtozvuk.com/>  
<http://www.national.com/>  
<http://www.klippel.de/>



издательство

## Книжный магазин

издательства «Наука и Техника»

приглашает за покупками

... ➤ Предлагаем широкий ассортимент  
технической литературы ведущих  
издательств (более 2000 наименований):

- Компьютерная литература
- Радиоэлектроника
- Телекоммуникации и связь
- Транспорт, строительство
- Научно-популярная медицина,  
педагогика, психология

... ➤ Чем привлекателен наш магазин:

- низкие цены;
- ежедневное пополнение ассортимента;
- поиск книг под заказ;
- обслуживание за наличный  
и безналичный расчет;
- гибкая система скидок;
- комплектование библиотек;
- обеспечение школ учебниками  
по информатике;
- возможна доставка.

**Наш адрес:** г. Санкт-Петербург  
пр. Обуховской Обороны д. 107  
ст. метро Елизаровская

**Справки о наличии книг по тел. 412-70-25**

**E-mail: admin@nit.com.ru**

(рассылка ассортиментного прайс-листа по запросу)

Мы работаем с 10 до 19 часов без обеда и выходных  
(в субботу и воскресенье до 18 час)

**Уважаемые господа!**  
**Книги издательства «Наука и Техника»**

Вы можете заказать наложенным платежом  
в нашем интернет-магазине  
**www.nit.com.ru,**  
а также приобрести

**➤ в крупнейших магазинах г. Москвы:**

ТД «БИБЛИО-ГЛОБУС»	ул. Мясницкая, д. 6/3, стр. 1, ст. М «Лубянка»	тел. (495) 781-19-00, 624-46-80
Московский Дом Книги,	ул.Новый Арбат, 8, ст. М «Арбатская», «ДК на Новом Арбате»	тел. (495) 789-35-91
Московский Дом Книги,	Ленинский пр., д.40, ст. М «Ленинский пр.», «Дом технической книги»	тел. (499) 137-60-19
Московский Дом Книги,	Комсомольский пр., д. 25, ст. М «Фрунзенская», «Дом медицинской книги»	тел. (499) 245-39-27
Дом книги «Молодая гвардия»	ул. Б. Полянка, д. 28, стр. 1, ст. М «Полянка»	тел. (499) 238-50-01
Сеть магазинов «Новый книжный»	тел. (495) 937-85-81, (499) 177-22-11	

**➤ в крупнейших магазинах г. Санкт-Петербурга:**

Санкт-Петербургский Дом Книги	Невский пр. 28
«Энергия»	т. (812) 448-23-57
«Аристотель»	Московский пр. 57 т. (812) 373-01-47
Сеть магазинов «Книжный Дом»	ул. А. Дундича 36, корп. 1 т. (812) 778-00-95 т. (812) 559-98-28

**➤ в регионах России:**

г. Воронеж, пл. Ленина д. 4	«Амиталь»	(4732) 24-24-90
г. Екатеринбург, ул. Антона Валека д. 12	«Дом книги»	(343) 253-50-10
г. Екатеринбург	Сеть магазинов «100 000 книг на Декабристов»	(343) 353-09-40
г. Нижний Новгород, ул. Советская д. 14	«Дом книги»	(831) 277-52-07
г. Смоленск, ул. Октябрьской революции д. 13	«Кругозор»	(4812) 65-86-65
г. Челябинск, ул. Монакова, д. 31	«Техническая книга»	(904) 972 50 04
г. Хабаровск	Сеть книжно-канцелярских магазинов фирмы «Мирс»	(4212) 26-87-30

**➤ и на Украине (оптом и в розницу) через представительство издательства**

г. Киев, ул. Курчатова 9/21, «Наука и Техника», ст. М «Лесная»  
(044) 516-38-66  
e-mail: nits@voliacable.com, nitkiev@gmail.com



**Мы рады сотрудничеству с Вами!**

# Лучшие книги для радиолюбителей от лучших авторов



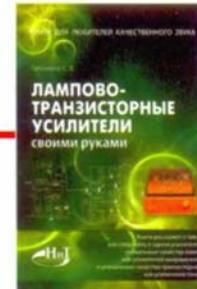
Гаврилов С. А.



Гаврилов С. А.



Торопкин М. В.



Гапоненко С. В.



Шмаков С. Б.



Вербицкий Л. И.



Сухов Н. Е.



Сухов Н. Е.



Гапоненко С. В.



Шмаков С. Б.



Шустов М. А.



Белов А. В.

ПОДРОБНОСТИ О КНИГАХ НА [www.nit.com.ru](http://www.nit.com.ru)

Россия: Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, д.107  
Для писем: 192029 Санкт-Петербург, а/я 44

+7 (812) 412-70-25, 412-70-26, e-mail: [admin@nit.com.ru](mailto:admin@nit.com.ru)

Украина: 02166, Киев -166, ул. Курчатова, д. 9/21  
+38 (044) 516-38-66, e-mail: [nits@voliacable.com](mailto:nits@voliacable.com)

ISBN 978-5-94387-829-9

