



С. Бать

ЛЮБИТЕЛЬСКИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ 3





С.Д. Бать

Любительские громкоговорители-3

**ТЕХНОСФЕРА
Москва
2008**

Бать С.Д.

Любительские громкоговорители-3

Москва: Техносфера, 2008. — 112 с. ISBN 978-5-94836-193-2

Цель книги — в популярной форме рассказать о построении громкоговорителей в любительских условиях.

Просто и наглядно изложен подход к выбору динамических головок, теория построения и методика проектирования кроссоверов на основе компьютерной технологии. Изложение теории и методики по кроссоверам базируется на графическом материале, полученном в результате измерений и обработки характеристик реальных динамических головок. Применение методики иллюстрируется примерами проектирования двухполосных и трехполосных кроссоверов.

Книга рассчитана на широкий круг любителей техники звуковоспроизведения.

© 2008, Бать С.Д.

© 2008, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-193-2

Содержание

Предисловие	4
Глава 1. Динамические головки	5
1.1. Параметры динамических головок	5
1.2. Выбор динамических головок для любительского громкоговорителя	14
Глава 2. Кроссоверы громкоговорителей	28
2.1. Термины и понятия	28
2.2. Фазовые соотношения	30
2.3. Задержки	33
2.4. Фильтры	34
2.5. Корректирующие и компенсирующие цепи	45
2.6. Схема коррекции фазы	50
2.7. Разработка кроссовера	54
Глава 3. Примеры разработок кроссоверов громкоговорителей	56
3.1. Двухполосный громкоговоритель на динамических головках AUDAX HM170Z18 и MOREL MDT30	56
3.2. Взаимодействие фильтра нижних частот с басовой головкой	68
3.3. Трехполосный громкоговоритель на динамических головках SEAS H1288, H1262, H1149	79
3.4. Модульный громкоговоритель с комбинированным кроссовером	95
Список литературы	111

Предисловие

Целью написания этой работы является желание поделиться опытом построения громкоговорителей в любительских условиях. В монографиях «Любительские громкоговорители» и «Любительские громкоговорители 2» основное внимание уделялось описанию конструкций громкоговорителей, ориентированных на повторение в домашних условиях. На мой взгляд, основной недостаток этих работ состоял в том, что через довольно короткое время динамические головки, используемые в конструкциях, снимались с производства и брошюры оказывались практически бесполезными для любителей, поскольку информация по проектированию громкоговорителей не была систематизирована. В этой книге сделана попытка в популярной форме изложить подход к выбору динамических головок, теорию построения и методику проектирования кроссоверов на основе компьютерной технологии. Изложение теории и методики по кроссоверам базируется на графическом материале, полученном в результате измерений и обработки характеристик реальных динамических головок. Применение методики иллюстрируется примерами проектирования двухполосных и трехполосных кроссоверов.

Автор благодарит редакции журналов за предоставленные фотографии и за публикацию статей, ссылки на которые позволили иллюстрировать ряд положений, изложенных в этой работе. Хочется также выразить благодарность и признательность коллективу компании VA и генеральному директору компании М. Ежгурову, под руководством которого автору удалось довести некоторые из своих идей до реальных громкоговорителей, Г. Крылову за помощь в организационных вопросах, Д. Демьяненко за предоставленные материалы, В. Пронскому за ценные советы и замечания по качеству звучания громкоговорителей.

Заранее благодарю читателей, которые пришлют замечания и вопросы по этой работе.

С. Бать
sdsbatti@mail.ru

ДИНАМИЧЕСКИЕ ГОЛОВКИ

1.1. Параметры динамических головок

Информация по параметрам динамических головок приводится в каталогах фирм-производителей, торговых компаний и на сайтах в интернете. Ниже будут рассмотрены параметры динамических головок, которые обычно содержатся в указанных источниках.

Мощность динамических головок характеризуется рядом параметров.

Short term maximum power (P_{st}) — кратковременная максимальная тепловая мощность. Это предельное значение мощности, при которой не разрушится звуковая катушка от импульса заданной длительности, например, 1 или 20 мсек. Параметр по существу характеризует теплоемкость и механическую прочность звуковой катушки.

Long term maximum power (P_{lt}) — длительная максимальная тепловая мощность. Это предельное значение мощности, при котором температура звуковой катушки не превысит допустимого значения. Параметр характеризует тепловое сопротивление между звуковой катушкой и окружающей средой. В современных динамических головках звуковые катушки могут работать при достаточно высоких температурах, например, 200 градусов Цельсия, если используются термостойкие материалы (Capton, алюминий и т.п.). Если допустимая рабочая температура звуковой катушки составляет 200 градусов, а изготовитель указывает величину $P_{lt} = 100$ Вт, можно считать, что тепловое сопротивление между звуковой катушкой и окружающей средой равно примерно 1,8 градуса на ватт. Это означает, что перегрев звуковой катушки относительно окружающей среды составит примерно 18 градусов при подводимой мощности 1 Вт.

P_{lt} измеряется на шумовом сигнале с использованием взвешивающего фильтра, который приближает спектральную мощность измерительного сигнала к музыкальному. Для СЧ и ВЧ головок дополнительно указывается частота среза и крутизна спада

передаточной характеристики фильтра высоких частот, ограничивающего снизу полосу испытательного сигнала. Например, для ВЧ головки может оговариваться длительная тепловая мощность 90 Вт при условии использования фильтра с частотой среза 3000 Гц и крутизной спада 12 дБ на октаву.

При использовании подобного фильтра мощность, попадающая на головку, существенно меньше мощности на входе фильтра. В справочных данных изготовителей указывается мощность на входе фильтра, при этом фильтр может не упоминаться. Результатом такого способа указания мощности в справочных данных является частый выход из строя ВЧ головок из-за перегрузки частотами, для работы на которых они не предназначены.

Ознакомившись с каталогами, можно убедиться, что у многих изготовителей динамические головки разного размера, но с одинаковыми звуковыми катушками имеют одинаковые значения *Plt*.

Любителю, который подбирает головки для своей конструкции, интересно знать, какую мощность музыкальной программы он сможет подавать на динамическую головку при искажениях, не слишком сильно заметных на слух. К сожалению, эта величина слабо связана с *Plt*, она сильно зависит от конструкции динамической головки, акустического оформления и характера музыкальной программы. Ориентировочно можно считать, что в удачно выполненном акустическом оформлении на динамик высокого качества можно подавать 0,25 *Plt*.

В отдельных случаях изготовители динамических головок приводят график зависимости урона звукового давления от мощности шумового сигнала, подобный показанному на рис. 1.1. На небольших мощностях этот график имеет вид прямой линии, выходящей из начала координат с некоторым наклоном. По мере увеличения мощности линейный прирост звукового давления прекращается, и график начинает постепенно загигаться, отклоняясь от прямой. Величина мощности, соответствующая границе линейного участка, является максимальной неискаженной мощностью.

Operating power — рабочая мощность. Этот параметр указывается для динамических головок, предназначенных для бытовой аппаратуры. Рабочая мощность соответствует звуковому давлению 96 дБ на расстоянии 1 м.

Characteristic sensitivity (*SENS*) — характеристическая чувствительность. Этот параметр показывает среднее по ряду частот звуковое давление в дБ, которая создает динамическая головка вдоль оси на расстоянии 1 м при подводимой мощности 1 Вт. В некоторых ката-

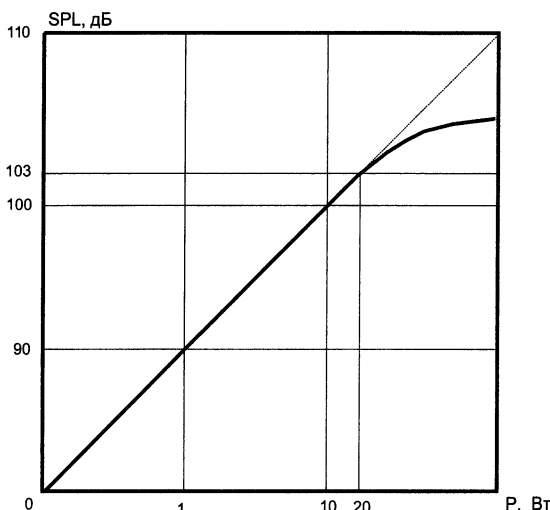


Рис. 1.1. Зависимость звукового давления от мощности шумового сигнала

логах торговых фирм, например, Madisound, характеристическая чувствительность указана при напряжении 2,83 В независимо от сопротивления головки. Для динамических головок, имеющих сопротивление меньше 8 Ом, значение характеристической чувствительности при таком подходе получается завышенным. Для низкочастотных головок чувствительность указывается, как правило, на средних частотах. На низких частотах, для воспроизведения которых предназначены такие головки, чувствительность оказывается значительно меньше. Изготовитель не может оговаривать чувствительность на низких частотах, поскольку она существенно зависит от акустического оформления. Для любителя важно знать, что НЧ головка, например, диаметром 200 мм за счет сужения диаграммы направленности на средних частотах способна концентрировать звуковое давление вдоль оси. На низких частотах, когда длина волны значительно больше диаметра диффузора, диаграмма направленности становится очень широкой, соответственно уровень звукового давления падает. Разница между чувствительностью, указанной в справочных данных, и чувствительностью, которую реально может обеспечить головка на низких частотах, может достигать 6 дБ.

Полное сопротивление динамических головок характеризуется рядом параметров, которые указываются в справочных данных.

Nominal impedance Z_n — номинальное сопротивление. Обычно Z_n указывается изготовителями в соответствии с принятым рядом значений, т.е. 4, 6, 8, 16 Ом. Номинальный импеданс является некоторой усредненной величиной, используемой для оценочных расчетов.

Voice coil resistance ($Revc$) — активное сопротивление звуковой катушки.

Фактический импеданс динамической головки Z всегда больше $Revc$. Это связано с тем, что $Revc$ измеряется на постоянном токе, когда звуковая катушка неподвижна.

Z измеряется на переменном напряжении, обычно на частоте 1000 Гц. В этом случае в величину модуля полного импеданса вносят вклад ЭДС, возникающая в звуковой катушке за счет ее движения в магнитном поле, и индуктивность звуковой катушки.

Voice coil inductance ($Levc$) — индуктивность звуковой катушки изготовители обычно указывают в справочных данных на частоте 1000 Гц. Кроме того, в справочных данных приводится зависимость от частоты модуля полного сопротивления динамической головки в графическом виде, подобно изображенной на рис. 1.2.

Величина индуктивности звуковой катушки зависит от частоты и от положения звуковой катушки относительно магнитной системы. Свойство $Levc$ изменять величину в зависимости от частоты и амплитуды сигнала является нелинейностью, приводящей к возникновению линейных (фазовых) и нелинейных (гармонических и интермодуляционных) искажений. Сила, создающая движение звуковой катушки, пропорциональна протекающему через нее току. Если напряжение на выходе усилителя строго соответствует закону изменения воспроизводимого сигнала, то ток через звуковую катушку и, соответственно, сила, приложенная к звуковой катушке, будут точно повторять закон изменения входного сигнала только в том случае, когда нагрузкой усилителя является активное сопротивление. Когда усилитель нагружен на динамическую головку, это условие не выполняется, поскольку входное сопротивление динамической головки имеет индуктивную составляющую. Степень и характер отклонения закона изменения тока от закона изменения напряжения будут определяться соотношением между активной и реактивной составляющими входного сопротивления динамической головки. Индуктивная составляющая сопротивления звуковой катушки возрастает с увеличением частоты. Соответственно влияние нелинейности индуктивности звуковой катушки на качество воспроизведения звука будет возрастать с увеличением частоты. Применительно к НЧ-СЧ динамическим головкам, работающим в двух-

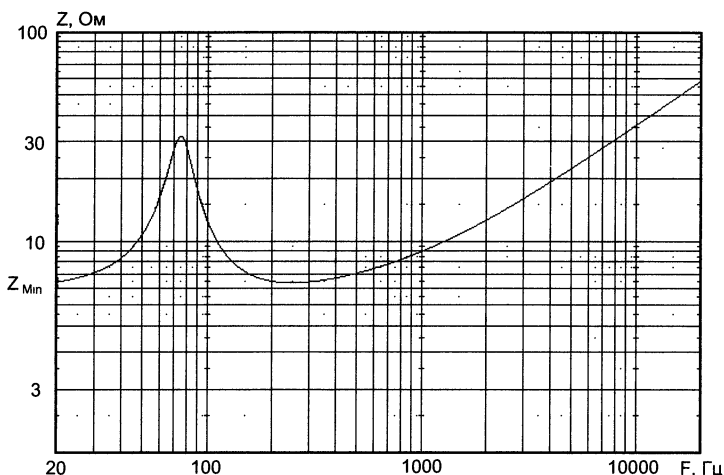


Рис. 1.2. Зависимость от частоты модуля полного сопротивления динамической головки

полосных системах, нелинейность индуктивности может заметно сказываться на средних частотах. Для расчета частоты, выше которой приходится принимать во внимание влияние индуктивности звуковой катушки, можно использовать формулу:

$$F = \frac{R}{6,28L}.$$

В формуле приняты следующие обозначения: F — частота в Гц, R — сопротивление в Ом, L — индуктивность в Гн. В качестве примера можно сравнить частоты, рассчитанные по этой формуле для двух типов динамических головок:

SEAS H1215 ($R_{vc} = 5,8$ Ом, $L_{vc} = 1,2$ мГн) $F = 770$ Гц.

SEAS W18NX 001 ($R_{vc} = 6,3$ Ом, $L_{vc} = 0,43$ мГн) $F = 2330$ Гц.

Читателям, заинтересовавшимся вопросом, связанным с влиянием нелинейности входного сопротивления динамических головок на качество воспроизведения звука, рекомендую ознакомиться со статьей С. Агеева «Должен ли УМЗЧ иметь малое выходное сопротивление?», опубликованной в журнале «Радио», № 4, 1997.

В справочных материалах изготовители указывают ряд параметров, характеризующих положение звуковой катушки относительно магнитной системы.

Voice coil height — длина намотки звуковой катушки.

Air gap height — длина воздушного зазора магнитной системы.

Linear coil travel — линейный размах движения звуковой катушки. Предполагается, что в пределах линейного размаха магнитное поле, взаимодействующее со звуковой катушкой, остается постоянным.

Многие изготовители указывают половину линейного размаха, обозначая этот параметр X_{max} . По существу X_{max} является максимальной амплитудой колебаний звуковой катушки, при которой сохраняется линейный характер взаимодействия с магнитным потоком, т.е. равные приращения тока вызывают равные приращения силы, действующей на катушку.

Рассмотренные параметры связаны простым соотношением:

$$X_{max} = 0,5 (H_{vc} - H_{ag}).$$

Это соотношение справедливо для динамических головок, у которых длина звуковой катушки больше длины зазора магнитной системы. X_{max} является весьма важным параметром, характеризующим перегрузочную способность динамической головки.

Как показывает практика, перегрузка динамической головки в большинстве случаев происходит в результате выхода амплитуды колебаний звуковой катушки из линейного участка, т.е. в результате превышения величины X_{max} . В большинстве случаев такой режим наступает гораздо раньше, чем происходит превышение мощностных и тепловых параметров. В первую очередь, это связано с тем, что амплитуда колебаний звуковой катушки имеет тенденцию возрастать обратно пропорционально квадрату частоты.

Возможность перегрузки по X_{max} важно иметь в виду применительно к СЧ и ВЧ головкам, поскольку они имеют, как правило, малую величину линейного участка хода звуковой катушки. Выход амплитуды колебаний звуковой катушки за пределы линейного участка сопровождается значительным ростом искажений. В связи с этим мне представляется разумным следовать рекомендациям изготовителей по использованию ВЧ головок с фильтрами не ниже второго порядка, так, как это оговаривается в мощностных параметрах. Кроме обеспечения эксплуатационной надежности подобные рекомендации способствуют снижению искажений на повышенных мощностях сигнала.

Maximum coil travel — максимальный размах движения звуковой катушки, не вызывающий ее повреждения. Он превышает линейный размах движения, следовательно, искажения при максимальном размахе могут быть весьма велики. Музыкальная программа со-

держит широкий спектр частот. Если, предположим, СЧ головка вышла в режим максимального размаха под воздействием частоты 200 Гц, скорее всего, искажения на частоте 200 Гц заметны на слух не будут из-за маскировки неискаженным сигналом НЧ головки, но на частотах более высоких, где излучение НЧ головки сильно ослаблено, искажения за счет нелинейного режима будут весьма заметны.

Effective piston area (S_d) – эффективная площадь диффузора вычисляется как площадь окружности, диаметр которой включает диаметр диффузора и часть ширины подвеса. Этот параметр обычно имеется в справочных данных изготовителей. Эффективная площадь диффузора совместно с X_{max} характеризует способность динамика смещать объем воздуха в пределах линейного участка движения звуковой катушки. Смещаемый объем воздуха является важным предельным показателем низкочастотной головки, поскольку он определяет максимальное значение звукового давления, которое может обеспечить динамическая головка на низких частотах при нормированных искажениях.

Например, динамическая головка Peerless 830432 имеет линейно смещаемый объем 0,000441 куб. м, что позволяет получить на частоте 30 Гц амплитудное значение звукового давления 99,6 дБ на расстоянии 1 м.

Moving mass (M_{ms}) – подвижная масса динамической головки включает массу диффузора, массу звуковой катушки, часть массы подвеса и присоединенную к диффузору массу воздуха. Без присоединенной массы воздуха подвижная масса обозначается M_{md} . Это полезно знать при использовании компьютерных программ, когда при построении модели динамической головки неточность в указании массы приводит к дополнительной погрешности результатов расчета.

Suspension compliance (C_{ms}) – гибкость подвеса. C_{ms} показывает, насколько сместится диффузор при воздействии на него единичной силы, приложенной в направлении движения звуковой катушки. Являясь отношением смещения к силе, C_{ms} измеряется в миллиметрах на ньютон.

В рабочем режиме динамической головки сила, прикладываемая к звуковой катушке, образуется в результате взаимодействия тока, протекающего через звуковую катушку с магнитным полем в зазоре. Это взаимодействие характеризуется параметром, который носит название силовой фактор – Force factor (BL). BL измеряется либо в ньютонах на ампер, показывая силу, действующую на звуковую катушку, приведенную к единице тока, либо в

тесла метрах, показывая произведение эффективной длины провода на индукцию в зазоре магнитной системы. Оба варианта равноценны, цифры при этом тоже совпадают.

Некоторые производители, например, AUDAX и SCAANING, в справочных данных приводят параметр под названием Acceleration factor (A) — фактор ускорения. Этот параметр является мерой ускорения, сообщаемого подвижной массе единицей тока в звуковой катушке, и вычисляется по формуле:

$$A = \frac{BL}{Mms}, \text{ размерность фактора ускорения } \frac{\text{М}}{\text{сек}^2 \text{А}}.$$

Ускорение звуковой катушки, совершающей синусоидальные колебания, имеет тенденцию роста пропорционально квадрату частоты, если амплитуда колебаний остается постоянной. В связи с этим фактор ускорения НЧ, СЧ и ВЧ головок сильно отличается.

Например, НЧ головки диаметром 260 мм SESAS W26FX 001 и W26FX002 имеют фактор ускорения соответственно 180 и 236. НЧ головки W22NY 001 и H1288 имеют фактор ускорения 440 и 334. СЧ-НЧ головка H1215–514. Величина фактора ускорения среднечастотных головок диаметром 100 мм может лежать в пределах от 800 до 1500.

Для ВЧ головок требуется фактор ускорения существенно выше. Например, ВЧ головки MOREL MDT30 и MDT 33 имеют фактор ускорения соответственно 7950 и 14300. Величину фактора ускорения полезно учитывать при подборе комплекта динамиков для громкоговорителя. В двухполосных системах СЧ-НЧ головку приходится выбирать по совокупности параметров, при этом фактор ускорения не является приоритетным параметром. При выборе СЧ и ВЧ головок фактор ускорения играет более существенную роль. С увеличением фактора ускорения возрастает детальность звучания, в звуковой картине большого оркестра лучше дифференцируются отдельные инструменты. В любительской среде можно услышать, что головку характеризуют как медленную или как быструю. Я предполагаю, что подобные характеристики достаточно хорошо коррелируют с величиной фактора ускорения.

Thiele-Small parameters ($T-S$) — параметры Тиле-Смолла. Группа параметров Тиле-Смолла обычно приводится в справочных данных и для расчета акустического оформления НЧ и СЧ головок.

Free air resonance (F_s) — резонансная частота динамической головки в свободном пространстве. Для НЧ головок F_s определяет частоту среза в нижней части звукового диапазона, которая

может быть получена для данной головки в выбранном типе акустического оформления.

Equivalent volume (V_{as}) — объем, эквивалентный гибкости подвеса. Физический смысл этого параметра легче понять, если представить себе поршень с площадью S_d , который может двигаться, сжимая воздух в цилиндре. Под действием единичной силы смещение поршня будет зависеть от объема воздуха в цилиндре. С увеличением объема воздуха в цилиндре смещение поршня под действием единичной силы будет возрастать. Если объем воздуха подобрать так, чтобы смещение поршня от единичной силы было бы равно смещению диффузора от этой же силы, то этот подобранный объем и есть V_{as} . Эквивалентный объем пропорционален площади диффузора и гибкости подвеса. При прочих равных условиях объем акустического оформления динамической головки типа «закрытый корпус» или фазоинвертор пропорционален V_{as} .

Mechanical Q factor (Q_{ms}) — механическая добротность. Q_{ms} характеризует потери энергии в динамической головке, как в механической колебательной системе. Механические колебания на резонансной частоте динамической головки связаны с переходом кинетической энергии подвижной массы в потенциальную энергию деформированного подвеса и наоборот. Колебательный процесс сопровождается потерями энергии на трение в подвесе и рядом других потерь, в том числе и на излучение звука. Механическая добротность есть отношение запасенной энергии (реактивной) к энергии рассеянной (активной). Отношение берется за один период колебаний. Для многих современных НЧ динамических головок это отношение, т.е. Q_{ms} , лежит в пределах от 2 до 10. Добротность как отношение двух величин с одинаковой размерностью является безразмерной величиной.

Electrical Q factor (Q_{es}) — электрическая добротность. Этот параметр характеризует потери энергии при колебательном процессе, которые имеют место за счет протекания тока в цепи звуковой катушки. При движении звуковой катушки в магнитном поле на ее выводах возникает ЭДС. Если выводы разомкнуты, ЭДС не оказывает влияния на потери энергии в колебательном процессе. Ситуация меняется, если выводы звуковой катушки замкнуты, в катушке под воздействием ЭДС протекает ток. Ток, протекающий через катушку, создает магнитное поле, взаимодействующее с магнитным полем в зазоре.

Результатом взаимодействия является сила, тормозящая движение звуковой катушки. Энергия, которая тратится на торможе-

ние движения, в конечном счете рассеивается в виде выделения тепла от протекания тока. Происходит нагрев звуковой катушки. Q_{es} для динамических головок, пригодных для работы в закрытом акустическом оформлении или в фазоинверторе, лежит в пределах 0,25–0,8. По определению Q_{es} предполагает нулевое сопротивление в цепи звуковой катушки. Включение активного сопротивления в цепь звуковой катушки приводит к увеличению Q_{es} . Нагрев звуковой катушки от мощности входного сигнала приводит к увеличению активного сопротивления и, соответственно, к увеличению электрической добротности головки.

Total Q factor (Q_{ts}) – добротность. Полная добротность характеризует суммарные потери в колебательной системе, вызванные как механическими, так и электрическими процессами. Полная добротность вычисляется по формуле:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}.$$

T - S параметры используются для расчета акустического оформления НЧ и НЧ-СЧ динамических головок с помощью номограмм, таблиц и компьютерных программ.

1.2. Выбор динамических головок для любительского громкоговорителя

Разработка и изготовление громкоговорителей в любительских условиях представляют собой интересное и увлекательное занятие. Первые шаги на этом пути нередко начинаются с повторения готовых конструкций, но, как мне кажется, в любом случае у любителя присутствует желание построить громкоговоритель, звучание которого в максимальной степени отвечало бы его индивидуальным предпочтениям. Индивидуальные предпочтения любителей характеризуются весьма широким разнообразием как специфических требований к особенностям звучания, так и способов описания этих требований, которые в большинстве случаев не имеют ничего общего с инженерно-технической терминологией. Такая ситуация вполне понятна, поскольку прослушивание музыки связано с эмоциональным восприятием, индивидуальные особенности которого – предмет весьма деликатный и плохо поддается формализации.

Возможно, что желание построить собственный мостик между эмоциональным миром музыки и техническими средствами сис-

темы звуковоспроизведения приводит любителей на путь создания собственными силами усилителей, громкоговорителей и других аудиокомпонентов. Создание громкоговорителей — это движение по пути достижения заведомо недостижимого идеала, трудно по-другому оценить стремление заставить один или несколько кусочков бумаги (кевлара, полипропилена, фольги) звучать, как симфонический оркестр. Тот факт, что многим взыскательным меломанам и аудиофилам удастся получать удовлетворение от прослушивания музыки в домашних условиях, является, я полагаю, результатом создания музыкальной иллюзии, адекватной индивидуальным предпочтениям. В связи с этим для выбора динамических головок весьма желательно иметь представление о характере их звучания. Многие модели динамических головок SEAS, MOREL, SCANSPEAK, VIFA используются в громкоговорителях SONUS FABER, PROAC, BC ACOUSTIC, OPERA, VIRTUAL ACOUSTICS и других производителей. Прослушивание динамических головок в промышленных громкоговорителях позволяет получить весьма ценную информацию в виде сущностного опыта, что для многих любителей значительно важнее при выборе комплекта динамических головок, чем инженерный анализ параметров.

Возможности приобретения любителями динамических головок ограничены, с одной стороны, номенклатурой компаний, которые производят динамики для продажи, с другой стороны, наличием в России дистрибьюторов или дилеров этих компаний. Большинство компаний, которые разрабатывают и изготавливают динамические головки для собственного производства громкоговорителей, отдельно динамические головки не продают. Ситуация на рынке динамических головок, доступных для приобретения любителями, постоянно меняется, имея, к сожалению, тенденцию к сокращению номенклатуры динамических головок, пригодных для построения громкоговорителей высокого класса. Отмеченная тенденция не является основанием для пессимистической оценки ситуации, так как рыночная экономика характеризуется стремлением к заполнению ниш, где имеется спрос, а спрос на высококачественные комплектующие для любительских громкоговорителей имеет тенденцию роста. Моя оптимистическая оценка ситуации базируется также на опыте последних пяти лет, когда я активно занимался разработкой громкоговорителей, взаимодействуя всего с тремя российскими компаниями-поставщиками динамических головок и других комплектующих изделий для громкоговорителей. За этот период у меня

не создало ощущения, что исчерпалась номенклатура динамических головок и двигаться дальше нельзя. Напротив, меня не покидало сожаление о том, что не реализовано много интересных проектов и не обследовано много новых динамических головок.

Ниже в порядке обмена опытом я попытаюсь кратко охарактеризовать номенклатуру динамических головок трех компаний-поставщиков, с которыми мне пришлось взаимодействовать.

АВ-Центр представляет на российском рынке продукцию немецкой компании VISATON и итальянской компании CIARE. Компания VISATON предлагает любителям широкую номенклатуру динамических головок для громкоговорителей класса HI-FI и HI-END, высококачественные комплектующие изделия для кроссоверов и все необходимые аксессуары для построения громкоговорителя, включая натуральную шерсть для заполнения рабочих объемов и крепежные изделия. Изучение каталога компании VISATON оставляет впечатление, что маркетологи компании серьезно позаботились о том, чтобы любитель мог приобрести в одном месте все необходимое для построения громкоговорителя любого класса. Сайт компании www.visaton.com содержит информацию о большом количестве профессионально разработанных моделей громкоговорителей, ориентированных на изготовление в любительских условиях. Изучая информацию на сайте компании VISATON, я нашел для себя много нового и интересного. В московских аудиосалонах мне не встречались громкоговорители иностранных компаний, построенные с применением динамиков VISATON. Российская компания VIRTUAL ACOUSTICS выпустила серию громкоговорителей на головках VISATON.

На фото 1 показан монитор, разработанный компанией VIRTUAL ACOUSTICS, на основе динамической головки AL130. Насколько мне известно, звучание этого монитора получило положительную оценку многих любителей, несмотря на некоторые предубеждения против использования динамических головок с металлическими диффузорами, которые имеют место в среде московских аудиофилов. Заключение аудиоэксперта по этому монитору опубликовано в журнале «Audio Music», № 2, 1994 г.

Динамические головки и другие комплектующие изделия фирмы VISATON используются также в трехполосном громкоговорителе, внешний вид которого показан на фото 2. Экспертное заключение по этой модели громкоговорителя, разработанной также VIRTUAL ACOUSTICS, опубликовано в журнале «DVD Эксперт» за апрель 1995 г. Предположение о том, что использо-

вание информации и поставок комплектующих фирмы VISATON способствовало успешному старту компании VA на рынке не кажется мне преувеличением. Для любителя, вступающего на путь построения громкоговорителей, информация и поставки от фирмы VISATON могут также помочь успешному старту.

После ознакомления с каталогом изделий фирмы CIARE не остается сомнений в том, что вы имеете дело с очень солидным, слегка консервативным производителем, сохраняющим опыт и традиции нескольких поколений инженеров-разработчиков. Только в каталоге фирмы CIARE можно найти вместе с современными динамическими головками для малогабаритных театральных громкоговорителей басовые головки диаметром 380 и 450 мм для домашних стереосистем. Взяв в руки купольный среднечастотник CIARE HM600 с магнитом из альнико, я невольно перенесся в семидесятые годы прошлого века, когда мне пришлось познакомиться с уникальной динамической головкой GOODMAN'S AXIOM 80. Любители ламповых однотоктников найдут немало интересного для решения своих проблем с громкоговорителями, ознакомившись с каталогом фирмы CIARE.

Компания «Аркада» www.arkada.com представляет на российском рынке динамические головки фирм VIFA, ETON, SEAS, SCANSPEAK, PEERLESS. Продукция перечисленных европейских фирм в моих комментариях не нуждается. Эти динамики можно прослушать в громкоговорителях многих известных производителей. В период с 1998 по 2003 г. мне удалось опубликовать описания около двадцати моделей громкоговорителей, большая часть которых была укомплектована динамическими головками из номенклатуры компании «Аркада». На момент написания этого материала московское представительство компании «Аркада» возглавляет к.т.н. Г. Крылов, который сумел не только организовать оперативное обеспечение любителей динамическими головками и другими комплектующими для громкоговорителей, но и разработал немало интересных моделей любительских громкоговорителей.

Компания «Аудиомания» представляет на российском рынке динамические головки израильской фирмы MOREL, комплектующие для кроссоверов датской фирмы JANTZEN и немецкой фирмы MUNDORF. Кроме того, в офисе компании можно приобрести множество других вещей, необходимых для изготовления громкоговорителей: соединительные провода, терминалы, клеммы, звукопрозрачные ткани, звукопоглощающие материалы, припой, шипы и т.п. Практикующие любители знают, как досадно бывает потра-

тить несколько дней в поисках недостающего конденсатора для кроссовера или крепежа для пылезащитной рамки. Приобретая много раз ВЧ головки Morel в магазине «Аудиомании», я не сразу открыл для себя, что множество необходимых мне вещей можно приобрести в центральном офисе компании, а когда открыл, сожалел о массе потраченного времени в предыдущие годы.

На этом можно закончить рассмотрение аспекта выбора динамических головок, связанного с возможностями прослушивания и приобретением.

При выборе динамических головок может в отдельных случаях использоваться инженерный подход, связанный со сравнительным анализом технических характеристик динамических головок. К сожалению, в технических характеристиках не содержится информация об окраске и характере звучания динамических головок, а сведений о материале диффузора, которые имеются в справочных данных, для выяснения этого важного вопроса явно недостаточно. Несмотря на все недостатки анализа технических характеристик в сравнении с сущностным опытом, инженерный подход представляет определенный интерес, поскольку позволяет, по крайней мере, выявить и отбросить заведомо неприемлемые варианты. В качестве примера проведем сравнительный анализ десяти типов динамических головок для двухполосного громкоговорителя, параметры которых сведены в табл. 1.

Таблица 1

Модель динамической головки	BL/m	SPL	X_{max}	F_s	V_{as}	Q_{ts}	L_{vc}	V_b	F_3
AUDAX HM170Z18	752	89	3,75	42	48,5	0,35	0,34	21	58
SEAS H1217	636	90	5,0	43	37,0	0,40	1,0	28	46
VISATON AL170	533	88	6,0	38	33,0	0,34	0,91	14	52
CIARE HW 161N	530	90	3,0	47,4	19,9	0,37	0,69	12,6	48
SEAS H1215	514	88,5	6,0	35	33,0	0,31	1,2	11	56
SEAS W18NX001	510	87,5	7,0	40	24,0	0,34	0,43	11	55
SKAANING SK170-308	493	87	5,0	37	47,7	0,30	0,25	14	61
MOREL MW168	487	87,5	4,25	49,9	17,7	0,47	0,49	23	41
MOREL MW166	419	86,0	4,25	46	15,6	0,58	0,61	32	30
SCANSPEAK 18W/8535	362	86,5	5,0	26	72	0,38	0,30	50	30

В табл. 1 используются следующие обозначения:

BL/m — фактор ускорения,

SPL — характеристическая чувствительность в дБ на расстоянии 1 м при мощности 1 Вт,

X_{max} — максимальная амплитуда колебаний звуковой катушки на линейном участке в мм,

F_s — резонансная частота динамической головки в Гц,

V_{as} — объем, эквивалентный гибкости подвеса в л,

Q_{ts} — полная добротность,

L_{evc} — индуктивность звуковой катушки в мГн, измеренная на частоте 1 кГц,

V_b — рабочий объем фазоинвертора в л, рассчитанный по параметрам TS,

F_3 — частота среза по уровню минус 3 дБ.

В целях упрощения анализа в табл. 1 приведены динамические головки примерно одного диаметра, т.е. мало отличающиеся по площади диффузора. Это позволяет их корректно сравнивать как по фактору ускорения — BL/m , так и по величине X_{max} . Фактор ускорения, как мне представляется, является весьма важным параметром для НЧ-СЧ головки в двухполосной системе, поскольку он в значительной степени определяет верность воспроизведения средних частот. Здесь имеется в виду способность дифференцированно воспроизводить одновременно звучащие инструменты и сохранять детальность звучания при снижении уровня сигнала. Недостаток фактора ускорения приводит к заметному ухудшению качества воспроизведения на малых громкостях.

По своей физической сути фактор ускорения определяет связь между процессами на механической и электрической сторонах преобразователя электрической энергии в звуковую, которым является динамическая головка. Поэтому фактор ускорения — это весьма информативный показатель, опираясь на который можно вполне обоснованно найти компромисс между качеством воспроизведения средних и низких частот.

При одинаковых площадях диффузора линейный участок свободного хода звуковой катушки X_{max} позволяет корректно сравнить динамические головки по способности воспроизводить без искажений музыкальный сигнал, содержащий низкочастотные составляющие повышенной мощности.

Характеристическая чувствительность — SPL включена в таблицу для информации, этот параметр достаточно жестко коррелирует с фактором ускорения, и в поиске технического компромисса по выбору динамической головки использоваться не будет.

Параметры T - S (F_s , V_{as} , Q_{ts}) введены в таблицу для расчета объема акустического оформления и частоты среза на нижнем крае звукового диапазона. Рабочий объем акустического оформления необходимо принять во внимание при выборе динамической головки в качестве показателя, важность которого зависит от габаритных ограничений в тех случаях, когда таковые имеют место. Частота среза F_3 является показателем, который влияет на артикуляцию баса. Но низкие значения этого расчетного показателя на практике реализуются в полной мере только при очень тщательной настройке фазоинвертора и при высокой добротности корпуса, кроме того, получить реально плоскую АЧХ с низким значением F_3 удастся только ценой значительной потери чувствительности. (Более подробно этот вопрос рассмотрен на конкретных примерах в главе 3). Индуктивность звуковой катушки — L_{vc} введена в таблицу, поскольку ее величина заметно влияет на искажения в области средних частот, особенно при повышении уровня сигнала. Приступая к анализу данных табл. 1, заметим, что динамические головки в расположены в порядке убывания фактора ускорения. Рассмотрение табл. 1 позволяет нам выявить некоторые тенденции, отражающие взаимосвязь параметров динамических головок. Заметные отклонения от средних значений отдельных параметров, как мне кажется, характеризуют некоторые специфические особенности динамической головки. Например, динамические головки AUDAX HM170Z18 и SCANSPEAK18W/8535 имеют весьма низкие значения индуктивности звуковой катушки. Это несомненно результат специально принятых мер при конструировании магнитной системы. Разработчики этих высококлассных головок позаботились о снижении искажений на средних частотах.

Можно также заметить, что динамические головки SEAS H1215 из серии PRESTIGE и SEAS W18NX 001 из серии EXCEL (они имеют даже одинаковые корзины) по параметрам ничем существенно не отличаются, кроме индуктивности звуковой катушки. (Цена этих головок отличается примерно в два раза). Из сравнительного анализа параметров становится ясно, что, приобретая головку из серии EXCEL, мы удваиваем затраты с целью уменьшить искажения на средних частотах. Динамическая головка SKAANING SK170-308 имеет самое низкое значение индуктивности звуковой катушки (и самую высокую цену из числа головок, приведенных в табл. 1).

Сравним по совокупности параметров AUDAX HM170Z18 и SCANSPEAK18W/8535, занимающих крайние положения в таблице. Резонансные частоты F_s этих головок отличаются почти в два

раза. В два раза отличается и фактор ускорения. Высокое значение фактора ускорения и низкая резонансная частота отражают противоположные тенденции в конструировании динамической головки. Эти противоположные тенденции выражаются в том, что повышение фактора ускорения приводит к снижению уровня параметров, обеспечивающих расширение полосы воспроизведения низких частот. Повышение фактора ускорения можно получить за счет уменьшения подвижной массы головки, но уменьшение подвижной массы приводит к повышению резонансной частоты. С другой стороны, увеличение X_{max} за счет увеличения длины звуковой катушки приводит к увеличению подвижной массы, что, в свою очередь, снижает фактор ускорения. Сравнение данных табл. 1 по головкам AUDAX HM170Z18 и SCANSPEAK18W/8535 показывает, что каждая из головок является результатом технического компромисса с разными приоритетами важности, оптимизированного в рамках конструктивно-технологического направления, которым владеет компания-производитель. Вопрос о том, какую из сравниваемых головок выбрать для построения двухполосного громкоговорителя, можно решить только исходя из индивидуальных предпочтений.

В порядке обмена опытом приведу некоторые соображения, которыми я руководствовался, оказавшись перед подобным выбором. Располагая комнатой для прослушивания музыки 20 кв. м с высотой потолка 3 м, в которой резонанс стоячей волны полпотолок приходится на частоту 55 Гц, я полагал, что не смогу реализовать преимущества головки SCANSPEAK18W/8535 в части воспроизведения низких частот. Кроме того, с головкой SCANSPEAK18W/8535, имеющей площадь диффузора 145 кв. см и ход 5 мм, возможность получить звуковое давление на низких частотах, достаточное для воспроизведения симфонической музыки и саундтреков DVD, представлялась мне сомнительной. В объеме 50 л, который требуется для SCANSPEAK18W/8535, можно успешно использовать головку диаметром 260 мм, которая обеспечит более убедительное воспроизведение низких частот. В итоге было отдано предпочтение головке AUDAX HM170Z18, преимущества которой, связанные с высоким фактором ускорения, как мне казалось, более важны для воспроизведения симфонической музыки. Такой выбор не оставлял сомнений относительно необходимости использования басовой поддержки. На фото 3 показан двухполосный громкоговоритель на базе динамической головки AUDAX HM170Z18. На рис. 1.3 показана АЧХ громкоговорителя, измеренная микрофоном, установленным в месте прослушивания системы,

которая показана на фото 4. Подъем АЧХ вблизи частоты 55 Гц связан с акустическим резонансом пол-потолок. В качестве подставок для двухполосных громкоговорителей используются громкоговорители басовой поддержки. У меня нет никаких оснований, чтобы рекомендовать рассмотренный выше выбор динамических головок и способ построения системы громкоговорителей широкому кругу любителей в качестве наилучшего решения. Такой пример приведен в качестве иллюстрации варианта выбора на основе индивидуальных предпочтений. Мне известно, что двухполосный громкоговоритель на основе динамической головки SCANSPEAK 18W/8535, разработанный фирмой PROAC, имел успех на рынке, и, полагаю, немало аудиофилов вполне удовлетворены его качеством звучания несмотря на низкое значение фактора ускорения НЧ-СЧ головки.

Влияние низкого значения фактора ускорения НЧ головки на качество воспроизведения средних частот в двухполосном громкоговорителе можно несколько ослабить за счет использования широкой области совместного излучения, подключив ВЧ головку через электрический фильтр первого порядка. ВЧ головка, имеющая, как правило, весьма высокое значение фактора ускорения, «поддерживает» звучание «медленной» НЧ головки на средних частотах. При широкой области совместного излучения такая «поддержка» устраняет ощущение раздельно звучащих головок, и становятся более отчетливо слышны затухаю-

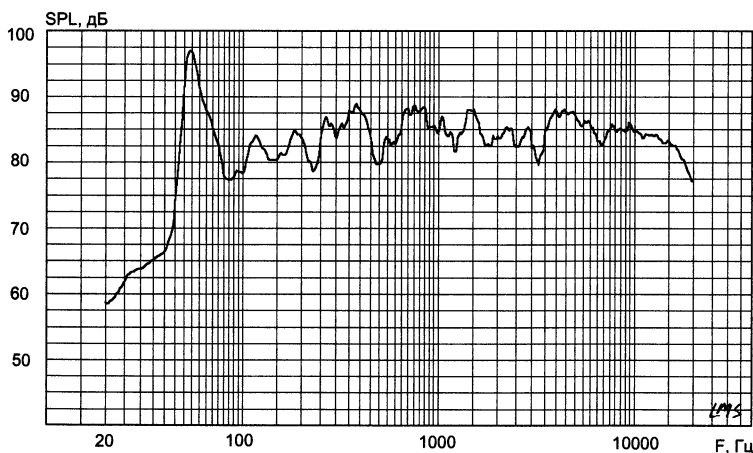


Рис. 1.3. АЧХ по звуковому давлению громкоговорителя на основе НМ170Z18, измеренная в месте прослушивания

щие звуки. Использование широкой области совместного излучения требует плавного спада АЧХ НЧ головки на верхнем крае частотного диапазона. От ВЧ головки требуется низкая резонансная частота и высокая перегрузочная способность. Такими свойствами в полной мере обладают динамические головки, которые используются в двухполосных громкоговорителях фирмы DYNAUDIO. Из числа динамических головок, приведенных в табл. 1, SCANSPEAK18W/8535, AUDAX HM170Z18 и SKAANING SK170-308 имеют достаточно плавный спад АЧХ, пригодный для работы в широкой области совместного излучения. Из числа доступных для любителей ВЧ головок высокой перегрузочной способностью обладают ВЧ головки MDT 30, MDT 33 компании MOREL. Сведениями по перегрузочной способности других типов ВЧ головок я не располагаю.

Возвращаясь к динамическим головкам из табл. 1, могу поделиться отрицательным опытом в части построения двухполосного громкоговорителя на динамических головках MOREL MW168 и MOREL MDT 30. Двухполосный громкоговоритель на указанном комплекте динамиков достаточно хорошо для своих габаритов воспроизводит низкие частоты, но приемлемого качества воспроизведения средних частот, на мой взгляд, получить не удалось, несмотря на подключение ВЧ головки через электрический фильтр первого порядка. После этой работы у меня осталось впечатление, что MOREL MW168 и MOREL MDT 30 — неудачный комплект для двухполосного громкоговорителя, впрочем, это моя частная точка зрения, я знаю специалистов, которые ее не разделяют.

SEAS H1215 находится в середине табл. 1 и имеет совокупность параметров, близкую к оптимальной. Мне кажется, что эту головку можно рассматривать как базовую, а головки SEAS H1217 и SEAS W18NX 001 — как ее модификации. Основной недостаток H1215 состоит в относительно высоком значении индуктивности звуковой катушки. В головке W18NX 001 этот недостаток в значительной степени устранен. SEAS H1217 в сравнении с H1215 позволяет построить громкоговоритель с более низкой частотой среза, соответственно потребуются существенно больший рабочий объем. Прослушать H1215 можно в составе громкоговорителя Studio 110 фирмы PROAC. На рис. 1.4 показана АЧХ по звуковому давлению Studio 110, измеренная на расстоянии 1 м вдоль оси ВЧ головки.

Особенность АЧХ состоит в том, что в полосе частот от 2000 до 3500 Гц имеет место провал около 4 дБ. Осмелюсь высказать предположение, что этот провал в АЧХ громкоговорителя Studio 110

появился не случайно, а с целью уменьшения резкости звучания головки H1215, связанной с проявлением нелинейности индуктивности звуковой катушки. Мне кажется, что изложенной выше информации по сравнительному анализу динамических головок из табл. 1 вполне достаточно, чтобы любители с инженерным подходом к проектированию громкоговорителей самостоятельно сделали выводы относительно динамических головок VISATON AL170 и CIARE 161N.

Продолжая сравнительный анализ, рассмотрим 10 моделей низкочастотных динамических головок, параметры которых показаны в табл. 2.

Табл. 2 ориентирована на три основных показателя низкочастотной головки:

SPL 50 Гц — максимальный уровень звукового давления на расстоянии 1 м, который может обеспечить динамическая головка на частоте 50 Гц, не выходя за пределы X_{max} ;

V_b — рабочий объем акустического оформления в л;

F_3 — частота среза в Гц на нижнем крае частотного диапазона по уровню минус 3 дБ.

Таблица 2

Модель динамической головки	X_{max} , мм	S_d , кв. см	SPL 50 Гц, дБ	F_s , Гц	Q_{ts}	V_{as} , литр	Sealed V_b/F_3	Vented V_b/F_3
SCANSPEAK 25W/8565	6,5	330	100,9	19	0,35	222	60/41	—
SEAS W26FX 001	7,0	330	101,6	20	0,35	162	45/43	—
SEAS H1209	7,0	330	101,6	20	0,33	171	50/45	—
CIARE HW250	5,0	339	97,1	23	0,48	275	182/37	—
SEAS H1305	7,0	350	102 (+3)	29	0,34	129	—	62/40
CIARE HW251	4,0	346	97,0 (+3)	29	0,33	111	—	50/42
AUDES 75W104	4,5	320	97,4 (+3)	31	0,28	100,5	—	30/56
VISATON W250S	5,0	346	97,2 (+3)	31	0,4	140	—	115/33
SEAS W26FX 002	7,0	330	101,6 (+3)	31	0,39	87,0	—	65/31
VISATON TIW 250SX	8,0	314	102,2 (+3)	31	0,3	73,0	—	40/44

Последние два показателя указаны через косую черту в графах SEALED и VENTED, которые обозначают рекомендованный тип акустического оформления для данной головки. Наличие цифр в графе указывает на рекомендованный тип акустического оформления для данной головки. В остальных столбцах табл. 2 приведены параметры, по которым рассчитаны основные показатели. Плюс 3 в скобках в столбце SPL 50 Гц означает, что использование фазоинвертора обеспечивает прибавку в звуковом давлении на низких частотах, что позволяет прибавить к расчетному значению показателя в среднем 3 дБ.

В табл. 2 динамические головки расположены в порядке возрастания резонансной частоты. Мне кажется, что при выборе НЧ головки существенную роль играют габаритные показатели, связанные с рабочим объемом акустического оформления. Изготовить достаточно жесткий корпус большого объема, в котором действительно реализуются расчетные показатели, не очень просто. Имея в виду это обстоятельство, я без колебаний отдал бы предпочтение динамику SEAS W26FX 001, которому требуется рабочий объем 45 л, перед CIARE HW251, которому требуется 182 л, имея все основания предполагать, что в хорошо исполненном корпусе CIARE HW251 будет звучать лучше. В книге «Любительские громкоговорители 2» описана конструкция корпуса, с помощью которой удалось приблизить реальные параметры низкочастотного звена к расчетным. Опыт этой работы является основной причиной того, что в табл. 2 имеются всего две головки, требующие рабочий объем больше 100 л. При рассмотрении данных табл. 2 возникает вопрос: «Стоит ли при выборе динамической головки стремиться получить низкую частоту среза, если громкоговоритель будет использоваться в помещении, где резонанс пол-потолок приходится на частоты 55–60 Гц?» Несмотря на определенные трудности реализации низкой частоты среза, мне кажется, что стремиться к этому стоит. Снижение частоты среза громкоговорителя в большинстве случаев дает выигрыш в качестве воспроизведения низких частот, даже если частота среза оказывается ниже частоты резонанса пол-потолок. Скорее всего, это связано с разделением сигналов по времени. Сначала к слушателю приходит сигнал прямого излучения громкоговорителя, резонансные явления, связанные с помещением, воспринимаются с некоторой задержкой. В частности, разделение по времени позволяет воспринять улучшение передачи характера звукоизвлечения акустических инструментов при снижении частоты среза. В моей комнате прослушивания резонанс пол-потолок дает подъем АЧХ в месте прослушивания порядка 14 дБ на частоте 55 Гц (см. рис. 1.3). Несмотря на такой значительный подъем на АЧХ,

связанный с резонансными явлениями в помещении, введение в систему громкоговорителей басовой поддержки с частотой среза 35 Гц существенно улучшило качество воспроизведения музыкальных программ. АЧХ по звуковому давлению, показанная на рис. 1.3, измерена на синусоидальном сигнале, частота которого медленно изменялась во времени. Результат подобного измерения не отражает временное разделение прихода сигнала к месту прослушивания.

Все приведенные выше рассуждения относительно выбора частоты среза предполагают использование для прослушивания высококачественных фонограмм. К сожалению, качество записи низких частот на многих CD оставляет желать лучшего. Это связано не с техническими возможностями CD как формата, а с подходом к сведению фонограмм, ориентированным на приемлемое звучание при использовании компактной переносной аппаратуры. Такой подход диктуется экономическими соображениями, но в результате вместо должного качества записи низких частот получается избыток их количества в верхней части басового регистра, в чем можно убедиться, используя спектроанализатор. Снижение частоты среза при использовании подобных фонограмм скорее всего приведет к ухудшению впечатления от прослушивания.

Возвращаясь к содержанию табл. 2, мы можем заметить, что динамические головки, для которых рекомендуется в качестве акустического оформления фазоинвертор, расположились в нижней части таблицы. Это обстоятельство, по-видимому, отражает некоторую закономерность, поскольку в табл. 2 головки расположены в порядке увеличения резонансной частоты. Читатель, который решится потратить время на вычисление фактора ускорения динамических головок из табл. 2, сможет убедиться, что динамики, для которых рекомендовано акустическое оформление закрытого типа, имеют фактор ускорения порядка 200. Акустическое оформление типа фазоинвертор рекомендовано для динамиков, фактор ускорения которых лежит в интервале 250–300.

Для закрытых систем, рассчитанных на получение полной добротности головки в корпусе 0,7, появляется тенденция увеличения рабочего объема при увеличении фактора ускорения головки.

Для фазоинверторов также присутствует подобная тенденция, но выражена она несколько менее явно вследствие влияния большего числа параметров на конечный результат расчета акустического оформления. Например, головка AUDES 75W104 не подчиняется этой тенденции, поскольку ее полная добротность слишком мала для получения частоты среза, приемлемой для динамика диамет-

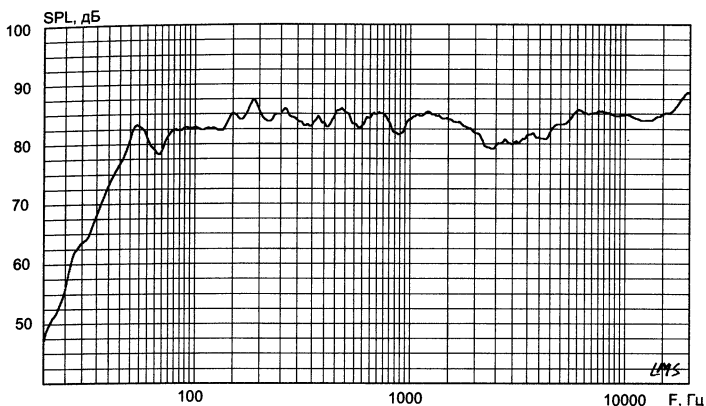


Рис. 1.4. АЧХ по звуковому давлению громкоговорителя Studio-110

ром 260 мм. Кратко подвести итог этим рассуждениям легче всего на языке любительского жаргона: «чем быстрее динамик, тем больше требуется рабочего объема». В журнале STEREO&VIDEO за ноябрь 2006 г. опубликовано экспертное заключение о качестве звучания громкоговорителя, в котором используется НЧ головка SEAS W26FX 001. Внешний вид громкоговорителя показан на фото 5. На фото 6 показан внешний вид четырехполосного громкоговорителя, разработанного Д. Демьяненко, качество звучание которого получило высокую оценку многих взыскательных аудиофилов. Этот громкоговоритель является примером тщательно продуманного выбора комплекта динамических головок. Низкочастотная головка VISATON W250 с фактором ускорения 287 работает в фазоинверторе с рабочим объемом около 120 л, обеспечивая частоту среза порядка 33 Гц. Среднечастотный диапазон воспроизводится двумя динамическими головками SEAS H1215 и VIFA D75. Такое решение исключает негативное влияние нелинейности индуктивности звуковой катушки H1215, поскольку на частотах, где это заметно сказывается, работает головка D75. Для высоких частот выбрана головка MOREL MDT 33 с фактором ускорения 14300.

Кроссовер громкоговорителя спроектирован на основе электрических фильтров первого порядка, что обеспечивает широкие области совместного излучения динамических головок. При широких областях совместного излучения происходит «поддержка» звучания более «медленных» головок более «быстрыми», в результате создается впечатление слитности звучания всех головок.

КРОССОВЕРЫ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

2.1. Термины и понятия

Во введении полезно определиться с некоторыми терминами и понятиями.

Заимствованное из английского языка слово «*кроссовер*» в дальнейшем изложении будет употребляться для обозначения электрического устройства, которое в громкоговорителе выполняет функции разделения спектра звуковых частот между динамическими головками и согласования динамических головок по уровню звукового давления.

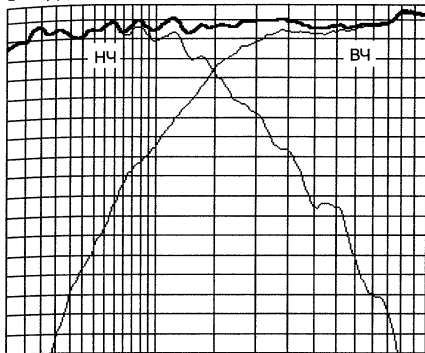
Для реализации указанных функций в кроссоверах используются фильтры, корректирующие и согласующие устройства.

Область совместного излучения динамических головок — это интервал частот, в котором амплитудно-частотная характеристика громкоговорителя по звуковому давлению формируется за счет излучения двух динамических головок.

Частота раздела находится в центре области совместного излучения и используется в качестве некоторой опорной величины для расчета фильтров. В идеальном случае АЧХ динамических головок пересекаются на частоте раздела, обеспечивая равное по величине звуковое давление. В реальных громкоговорителях, как правило, точка пересечения немного отличается от частоты раздела из-за волнистой формы АЧХ. На рис. 2.1 показана область совместного излучения двухполосного громкоговорителя с частотой раздела 1500 Гц.

На любой частоте, находящейся в области совместного излучения, АЧХ громкоговорителя является результатом сложения АЧХ двух (или нескольких) головок. Исходя из этого факта, задача построения кроссовера состоит в формировании таких спадов АЧХ по звуковому давлению, которые при сложении позволяют получить сумму заданной формы. Следовательно, для проектирова-

SPL, дБ



F, Гц

Рис. 2.1. Область совместного излучения

ния кроссовера нужно знать, как суммируются АЧХ и как получать спады АЧХ заданной формы.

Электрические и акустические сигналы, с которыми мы имеем дело в громкоговорителях, во многом сходны. Их разная физическая природа определяет основное различие, которое состоит в скорости распространения. В электрических цепях сигналы распространяются со скоростью света, акустические сигналы распространяются в пространстве со скоростью звука. Разница на шесть порядков в скорости приводит к тому, что задержки распространения электрических сигналов по цепям кроссоверов не влияют на фазовые соотношения сигналов, а для фазовых соотношений между излучениями динамических головок *задержки распространения* играют существенную роль. В связи с необходимостью учитывать задержки распространения мы будем пользоваться понятием «акустический центр динамической головки».

Акустический центр динамической головки — это точка, в которой задержка излучения считается равной нулю. Акустический центр используется в качестве точки отсчета для вычисления задержек прихода сигнала от динамических головок к измерительному микрофону или к месту прослушивания (рис. 2.2). В первом приближении можно считать, что акустический центр располагается в месте соединения диффузора и звуковой катушки.

Для формирования определенных спадов АЧХ нам потребуется знать свойства электрических фильтров. Названия многих фильтров связаны с именами специалистов, которые провели их подробный математический анализ. Например, фильтры Бесселя (Bessel)

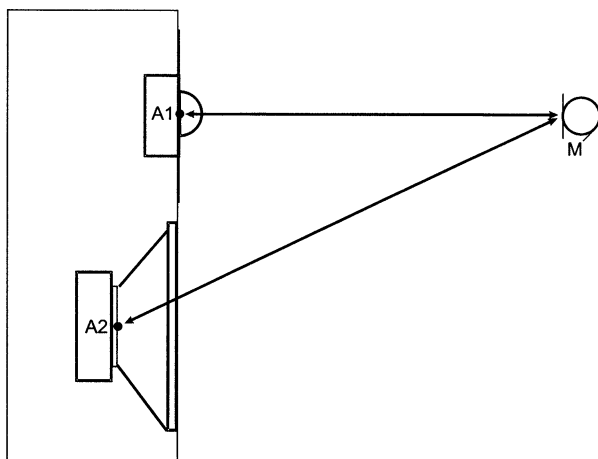


Рис. 2.2. Задержки распространения отсчитываются от акустических центров динамических головок A1 и A2

или фильтры Линквица-Рейли (Linkwitz-Riley). Такие фильтры для краткости изложения мы будем называть *каноническими*. Формулы для расчета канонических фильтров имеются в справочниках.

Методики анализа и проектирования кроссоверов базируются на аналогии свойств АЧХ по звуковому давлению динамических головок и передаточных характеристик электрических фильтров. Используя свойства фильтров для разработки кроссоверов, нужно постоянно иметь в виду, что происходит сложение не электрических сигналов, а излучений динамических головок.

2.2. Фазовые соотношения

Излучения динамических головок (как и переменные напряжения) складываются с учетом фазы, как векторы (рис. 2.3). В связи с этим при проектировании кроссоверов необходимо учитывать три основных фактора, влияющих на фазу излучений в точке суммирования:

- фазочастотные характеристики (ФЧХ) динамических головок,
- задержки распространения сигнала,
- ФЧХ фильтров и других узлов кроссовера.

Амплитудно-частотная характеристика и фазочастотная характеристики связаны между собой. Преобразование Гильберта-Бодэ (Hilbert-Bode transform) позволяет вычислить ФЧХ по известной АЧХ.

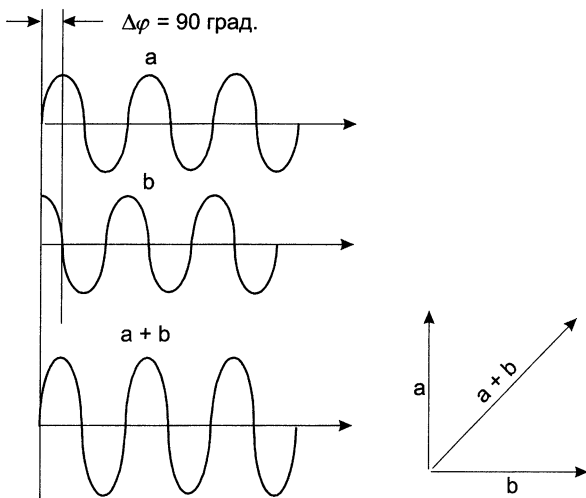


Рис. 2.3. Излучения динамических головок складываются векторно

ФЧХ, вычисленная таким образом, не содержит информации ни о взаимном расположении динамических головок, ни о фазовом сдвиге между электрическим и акустическим сигналами. Программное обеспечение измерительных систем на базе персональных компьютеров позволяет вычислять ФЧХ с помощью преобразования Гильберта-Боды. В соответствующем меню программы эта операция обычно носит название Minimum Phase transform. На рис. 2.4 показана минимально фазовая ФЧХ, вычисленная по АЧХ с помощью программного обеспечения LMS.

На рис. 2.5 показана зависимость фазы излучения динамической головки относительно электрического сигнала. На резонансной частоте динамика F_s излучение, т.е. акустический сигнал, запаздывает по фазе на 90 градусов относительно электрического сигнала на выводах звуковой катушки. По мере роста частоты запаздывание по фазе увеличивается и стремится к величине 180 градусов. Поскольку мы имеем дело с запаздыванием по фазе, на графике фаза указана со знаком минус. Крутизна фазочастотной характеристики зависит от добротности динамической головки. С увеличением добротности растет крутизна ФЧХ. Интервал частот выше $2F_s$, где фаза изменяется слабо, называют областью с вырожденной фазой. При проектировании кроссовера запаздывание излучения по фазе относительно электрическо-

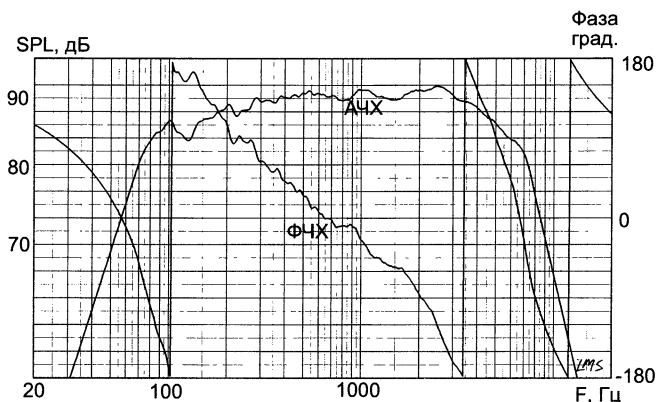


Рис. 2.4. Измеренная АЧХ и вычисленная ФЧХ

го сигнала можно не учитывать, если все головки громкоговорителя работают в области частот с вырожденной фазой. Влияние фазового сдвига между электрическим и акустическим сигналами может стать существенным, если резонансная частота динамической головки окажется в области совместного излучения.

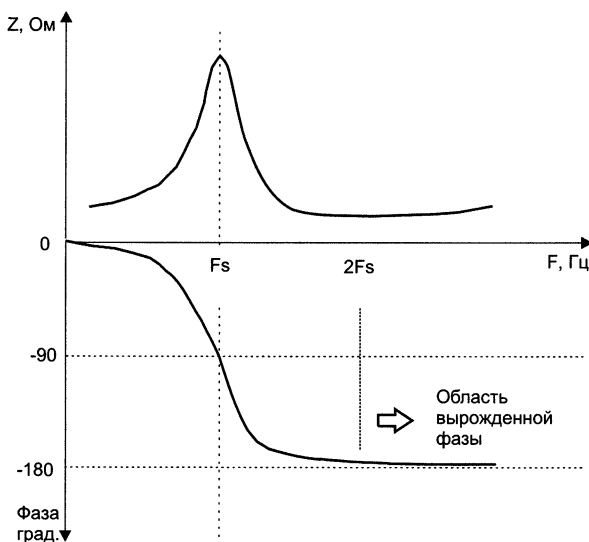


Рис. 2.5. Фазочастотная характеристика динамической головки

2.3. Задержки

В большинстве случаев акустические центры динамических головок располагаются на разных расстояниях от точки суммирования, в которую мы помещаем измерительный микрофон при тестировании или в которой находится голова слушателя, точка М1 на рис. 2.6. Имеются и такие точки, где разность хода равна нулю, например, положение М2 на рис. 2.6, где $D1^* = D2^*$.

При работе двух динамиков разность хода до точки суммирования приводит к тому, что один из сигналов приходит с временной задержкой. Задержка сигнала проявляет себя как фазовый сдвиг, который линейно растет с увеличением частоты.

Оценим количественно величину фазового сдвига. Предположим, что частота раздела между головками, показанными на рис. 2.6, равна 2500 Гц, а разность хода $D2 - D1 = 5$ см. На частоте раздела фазовый сдвиг от задержки составляет 132 градуса. Рассмотренный пример является вполне типичным для двухполосных громкоговорителей, в которых на вертикальной передней панели расположена НЧ головка диаметром 160–170 мм и ВЧ головка. На рис. 2.7 показана фазочастотная характеристика (ФЧХ) разности хода 5 см, по которой мы можем определить, что в интервале частот 1500–3000 Гц фазовый сдвиг от задержки изменяется от 80 до 180 градусов. Нелинейная ФЧХ получилась вслед-

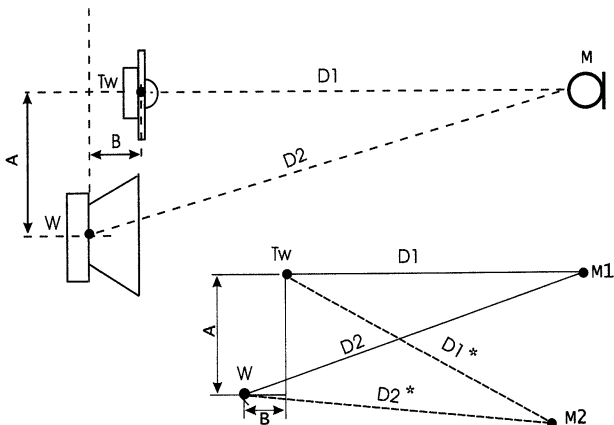


Рис. 2.6. Акустические центры динамических головок в большинстве случаев располагаются на разных расстояниях от измерительного микрофона

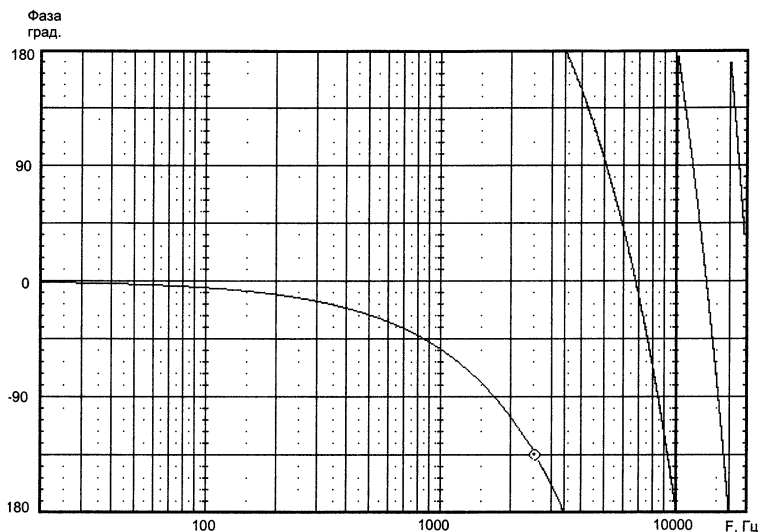


Рис. 2.7. Фазочастотная характеристика задержки 5 см (147 мксек)

ствие того, что ось частоты имеет логарифмический масштаб, а пилообразная форма кривой выше 3000 Гц связана с условностью отображения фазы на шкале плюс-минус 180 градусов. Количественная оценка приводит нас к выводу: при прочих равных условиях влияние задержек на фазовые соотношения при суммировании сигналов увеличивается с увеличением частоты раздела.

Фазочастотные характеристики фильтров мы рассмотрим ниже.

2.4. Фильтры

В этом разделе мы рассмотрим электрические фильтры под углом зрения использования в кроссоверах. Зависимость от частоты коэффициента передачи фильтра принято называть передаточной функцией, или передаточной характеристикой.

Одинаковые законы суммирования акустических и электрических сигналов позволяют нам выяснить ряд важных моментов о суммировании излучения динамических головок с помощью теории фильтров. При этом придется учитывать, что подключение электрического фильтра к динамику дает на выходе акустический сигнал, АЧХ которого представляет собой произведение передаточной функции фильтра на АЧХ по звуковому давлению динамика. Результирующая ФЧХ является суммой ФЧХ фильтра

и ФЧХ динамика. В связи с этим далеко не все, что хорошо получается с электрическими сигналами, можно реализовать с сигналами акустическими. В первую очередь это относится к фильтрам первого порядка, которые в среде аудиофилов пользуются широким признанием, как мне кажется, за счет простоты и некоторых преимуществ звучания систем с широкой областью совместного излучения.

Фильтры первого порядка рассчитываются по формулам (1) и (2).

$$C = 1/6,28Rf. \quad (1)$$

$$L = R/6,28f. \quad (2)$$

В формулах приняты следующие обозначения:

C — емкость конденсатора фильтра верхних частот,

L — индуктивность катушки фильтра нижних частот

R — сопротивление нагрузки,

f — частота среза.

На частоте среза коэффициент передачи фильтра равен 0,707, или минус 3 дБ. Крутизна спада передаточной характеристики фильтра первого порядка составляет 6 дБ на октаву, или 20 дБ на декаду. Такое определение крутизны спада предполагает отображение передаточной функции фильтра в логарифмическом масштабе. Для линейного масштаба это означает, что на спаде передаточной характеристики изменение частоты в два раза уменьшает в два раза коэффициент передачи фильтра.

Фазочастотные характеристики фильтров первого порядка показаны на рис. 2.8.

На рис. 2.9 показано сложение АЧХ, имеющих спады первого порядка с частотой среза 2500 Гц. Эта идеализированная ситуация дает прекрасный результат сложения, суммарная характеристика получается плоской, суммарный продукт не имеет фазовых искажений. К сожалению, реализовать в полной мере преимущества фильтров первого порядка (рис. 2.9) можно только для электрических сигналов. Для акустических сигналов появляются существенные трудности, связанные с задержками распространения. При широкой области совместного излучения, свойственной фильтрам первого порядка, задержки сильно влияют на АЧХ. Рассмотрим пример.

Выше мы говорили о задержках и выяснили, что разность хода 5 см (147 ксек) — достаточно типичный случай для двухполосной системы. На рис. 2.10 показано сложение АЧХ со спадами первого

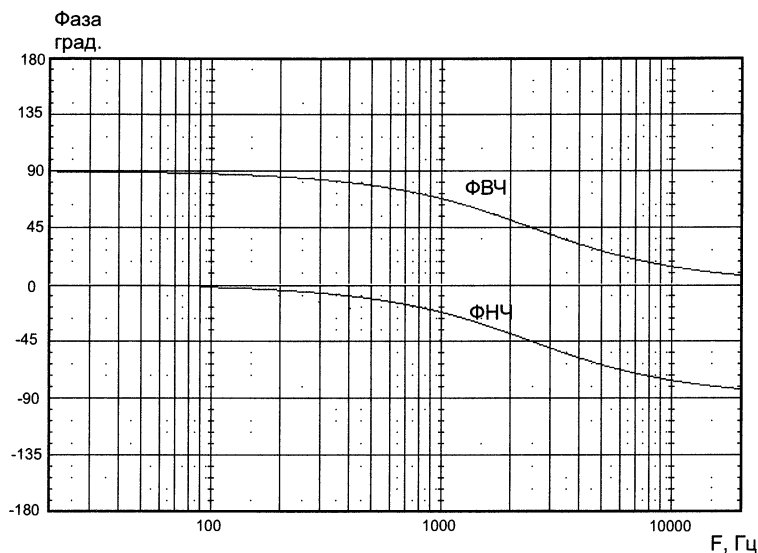


Рис. 2.8. Фазочастотные характеристики фильтров первого порядка

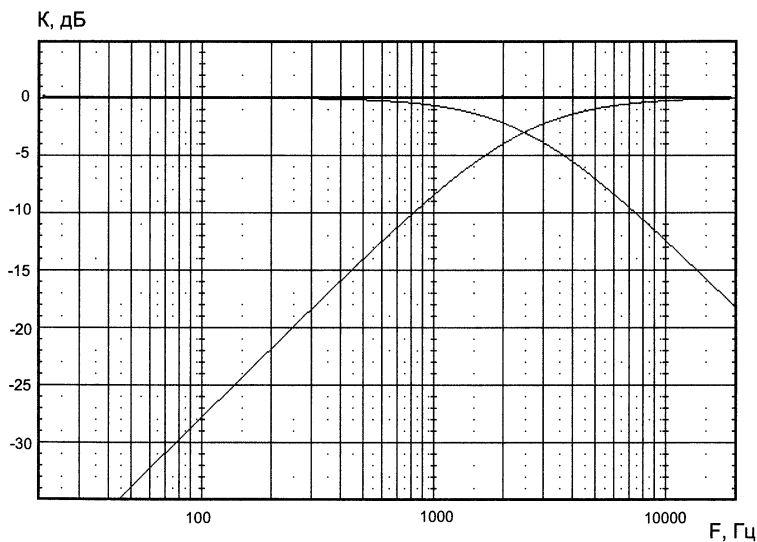


Рис. 2.9. Сложение спадов АЧХ первого порядка, $F = 2500 \text{ Гц}$,
 $T_{зд} = 0 \text{ мксек}$

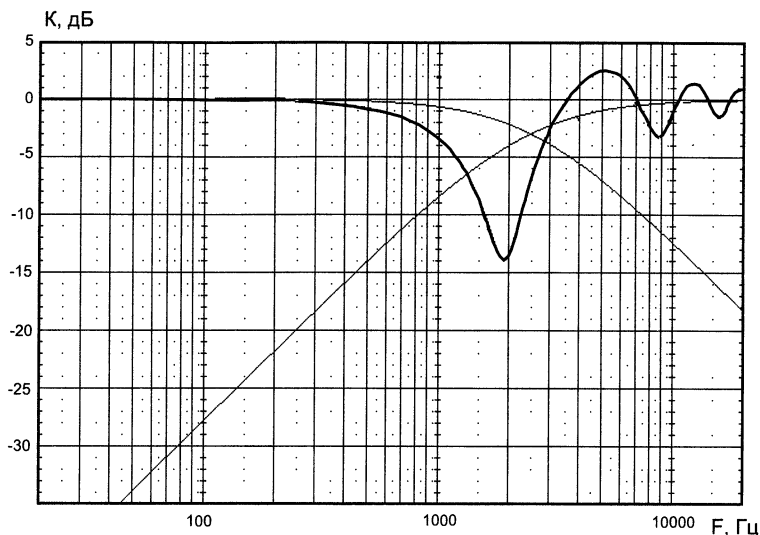


Рис. 2.10. Сложение спадов АЧХ первого порядка, $F = 2500$ Гц,
 $T_{зд} = 147$ мксек

порядка с учетом задержки излучения НЧ головки 147 мксек. Суммарная АЧХ получилась не слишком привлекательная. Сдвиг фазы за счет задержки явился причиной интерференции в области совместного излучения.

Возвращаясь к рис. 2.6, где в положении М2 разность хода равна нулю, мы можем вспомнить о корпусах с наклонными передними панелями и о других приемах конструирования корпусов, направленных на компенсацию задержек распространения. Кроме конструктивных мер приходится использовать и фазокорректирующие цепи, которые являются не очень простыми устройствами.

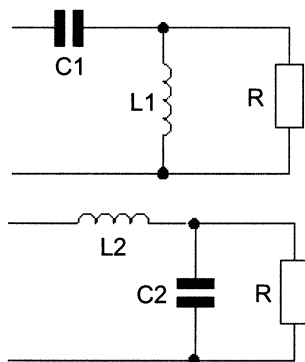
Получить формы спадов АЧХ первого порядка очень трудно из-за того, что они являются результатом перемножения АЧХ динамика на передаточную характеристику фильтра. Для получения спадов первого порядка по звуковому давлению необходимо резко повысить требования к широкополосности динамиков. По-видимому, не случайно на рынке не очень много промышленных громкоговорителей с фильтрами первого порядка, и стоят они не дешево. Очень мало производителей могут изготавливать головки, пригодные для работы с фильтрами первого порядка,

и успешно решать проблемы, связанные с широкой областью совместного излучения.

В любительской практике полезно иметь в виду, что плавные спады фильтров первого порядка слабо защищают ВЧ головки от перегрузки средними частотами. Не случайно многие компании в справочных данных указывают мощность на ВЧ головки при условии использования фильтра второго порядка.

Электрические схемы и расчетные формулы для фильтров второго порядка показаны на рис. 2.11. Коэффициенты расчетных формул для всех фильтров предполагают следующие размерности: C — фарады, L — генри, f — герцы, R — омы. При проектировании кроссоверов приходится учитывать, что формулы для расчета фильтров справедливы для чисто активной нагрузки, в то время как входные сопротивления динамических головок имеют явно выраженную реактивную составляющую.

Схемы фильтров второго порядка



Расчетные формулы канонических фильтров второго порядка

Линквист-Рейли	$Q = 0,49$	$C1 = C2 = 0,079/Rf$	$L1 = L2 = 0,318R/f$
Бессель	$Q = 0,58$	$C1 = C2 = 0,091/Rf$	$L1 = L2 = 0,276R/f$
Баттерворд	$Q = 0,707$	$C1 = C2 = 0,112/Rf$	$L1 = L2 = 0,225R/f$
Чебышев	$Q = 1,0$	$C1 = C2 = 0,159/Rf$	$L1 = L2 = 0,159R/f$

Рис. 2.11. Схемы и расчетные формулы фильтров второго порядка

Фильтры второго порядка характеризуются частотой среза f и добротностью Q . На рис. 2.12 показаны передаточные характеристики фильтров второго порядка с частотой среза 2500 Гц, имеющих добротность 0,49, 0,58, 0,7, 1,0. Добротность фильтра влияет на форму передаточной характеристики вблизи частоты среза. Это свойство фильтров можно использовать для корректировки АЧХ динамической головки.

На частоте среза фильтры второго порядка дают запаздывание по фазе на 90 градусов для ФНЧ и опережение на 90 градусов для ФВЧ. В результате суммирование выходных сигналов ФНЧ и ФВЧ происходит в противофазе, что приводит к провалу на суммарной АЧХ. Противофазное включение динамиков устраняет провал, но для получения плоской суммарной АЧХ приходится разносить частоты среза. На рис. 2.13 показано сложение спадов Баттерворда второго порядка с противофазным включением динамических головок. При частоте раздела 2500 Гц частоты среза 1920 Гц и 3250 Гц обеспечивают плоскую форму суммарной АЧХ. Частоты 1920 и 3250 Гц получены путем деления и умножения частоты раздела 2500 Гц на коэффициент 1,3. Рис. 2.14 иллюстрирует сложение спадов АЧХ второго порядка с учетом задержки.

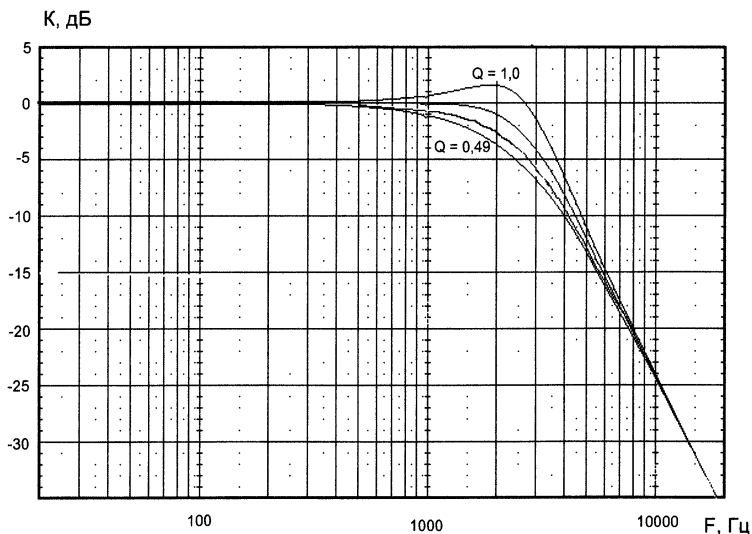


Рис. 2.12. Передаточные характеристики фильтров второго порядка

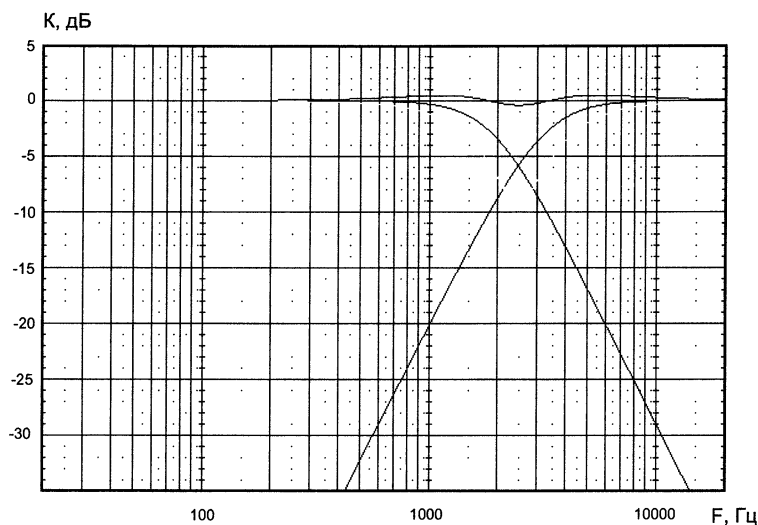


Рис. 2.13. Сложение спадов фильтров Баттерворда второго порядка, ФНЧ 1920 Гц, ФВЧ 3250 Гц

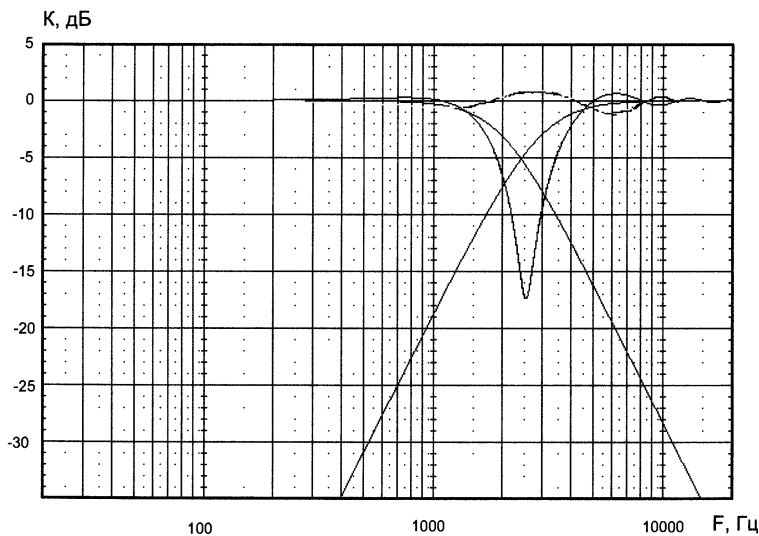
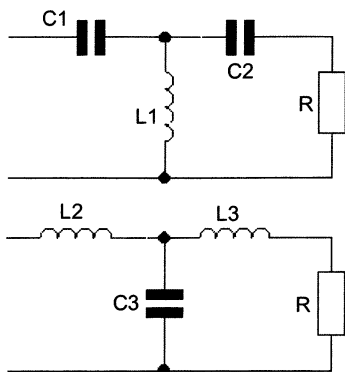


Рис. 2.14. Сложение спадов Баттерворда 2-го порядка в фазе и в противофазе, $T_{зд} = 147$ мксек, ФНЧ 2000 Гц, ФВЧ 3000 Гц



$$C1 = 0,106/Rf$$

$$L1 = 0,119R/f$$

$$C2 = 0,318/Rf$$

$$L2 = 0,238R/f$$

$$C3 = 0,212/Rf$$

$$L3 = 0,079R/f$$

Рис. 2.15. Схемы фильтров третьего порядка и расчетные формулы для фильтров Баттерворда

Синфазное включение динамических головок дает слегка волнообразный, почти плоский результат суммирования. Противофазное включение дает сильно выраженный провал суммарной АЧХ. При относительно высоких частотах раздела, характерных для двухполосных систем, использовать спады второго порядка не стоит, поскольку изменение задержки приводит к большому разбросу АЧХ вблизи частоты раздела. В трехполосных системах при относительно низких частотах раздела (300–600 Гц), когда влияние задержек на ФЧХ не велико, часто используются спады второго порядка и противофазное включение динамиков.

На рис. 2.15 показана схема фильтров третьего порядка и приведены расчетные формулы для фильтра Баттерворда. На частоте среза ФНЧ третьего порядка дает запаздывание по фазе 135 градусов. ФВЧ дает опережение 135 градусов. В результате на частоте раздела при сложении в фазе и в противофазе сигналы суммируются со сдвигом в 90 градусов.

Суммарная АЧХ получается плоской, как показано на рис. 2.16. Сложение в фазе предпочтительнее, поскольку дает меньшие фазовые искажения. Спады АЧХ третьего порядка имеют крутизну 18 дБ на октаву. С увеличением крутизны спадов сокращается область совместного излучения и ослабляется влияние задержек на суммарную АЧХ. На рис. 2.17 показано сложение в фазе спадов третьего порядка при задержке 74 мксек. Суммарная характеристика получа-

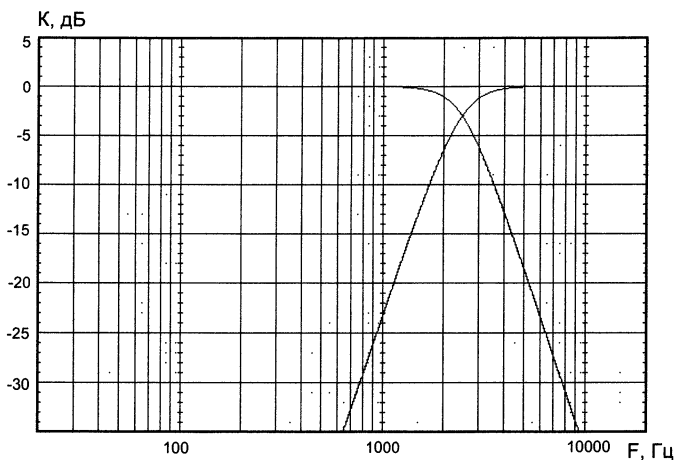


Рис. 2.16. Сложение спадов Баттерворда 3 го порядка в фазе, $T_{зд} = 0$, ФВЧ и ФНЧ 2500 Гц

ется достаточно плоской. При частоте раздела 2500 Гц частоты среза фильтров разнесены с коэффициентом 1,2. Ситуация, показанная на рис. 2.17, может быть реализована в двухполосном громкоговорителе с электрическими фильтрами второго порядка.

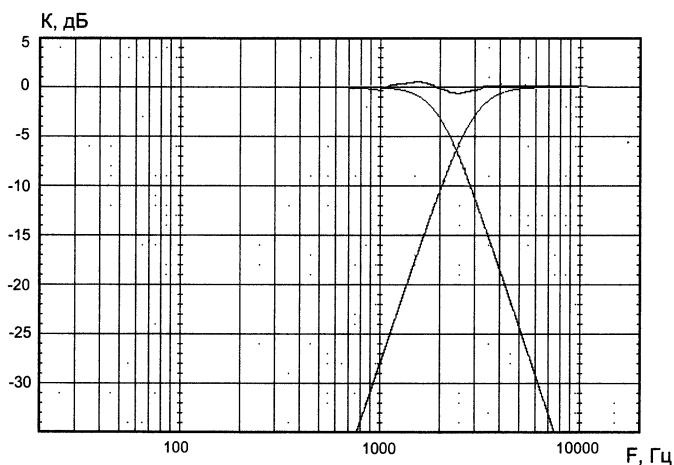
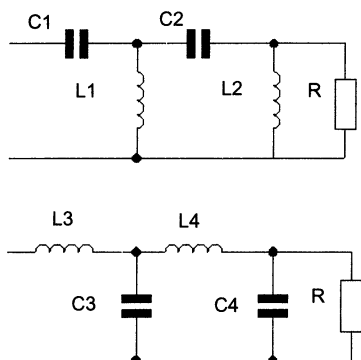


Рис. 2.17. Сложение спадов Баттерворда 3-го порядка в фазе, $T_{зд} = 74$ мксек, ФНЧ 2000 Гц, ФВЧ 3000 Гц



Формулы для расчета
фильтров Линквица-Рейли

$$C1 = 0,084/Rf \quad L1 = 0,10R/f$$

$$C2 = 0,168/Rf \quad L2 = 0,45R/f$$

$$C3 = 0,253/Rf \quad L3 = 0,30R/f$$

$$C4 = 0,563/Rf \quad L4 = 0,15R/f$$

Рис. 2.18. Схемы и расчетные формулы фильтров 4-го порядка

На рис. 2.18 показаны схемы фильтров четвертого порядка и приведены расчетные формулы для фильтров Линквица-Рейли. Фильтры четвертого порядка имеют крутизну спадов 24 дБ на октаву. Высокая крутизна спадов способствует сокращению области совместного излучения, соответственно снижается влияние задержек на форму АЧХ. На частоте среза фильтры четвертого порядка сдвигают фазу на 180 градусов: ФНЧ дает запаздывание, ФВЧ — опережение. В результате при суммировании сигналы складываются в фазе, противофазное включение динамиков дает провал на частоте раздела. Суммирование спадов Линквица-Рейли четвертого порядка показано на рис. 2.19. Синфазное включение динамиков дает плоскую АЧХ в области совместного излучения, противофазное включение приводит к узкому провалу на частоте раздела. Влияние задержек на результат суммирования спадов четвертого порядка иллюстрируется рис. 2.20 и 2.21. Задержки 74 и 147 мксек приводят к увеличению неравномерности АЧХ в области совместного излучения не более 2,5 дБ.

Низкая чувствительность к задержкам делает привлекательным использование спадов четвертого порядка для построения кроссоверов громкоговорителей. Французская компания JM Lab в рекламной литературе указывает в качестве одного из важных достоинств своих громкоговорителей использование кроссоверов

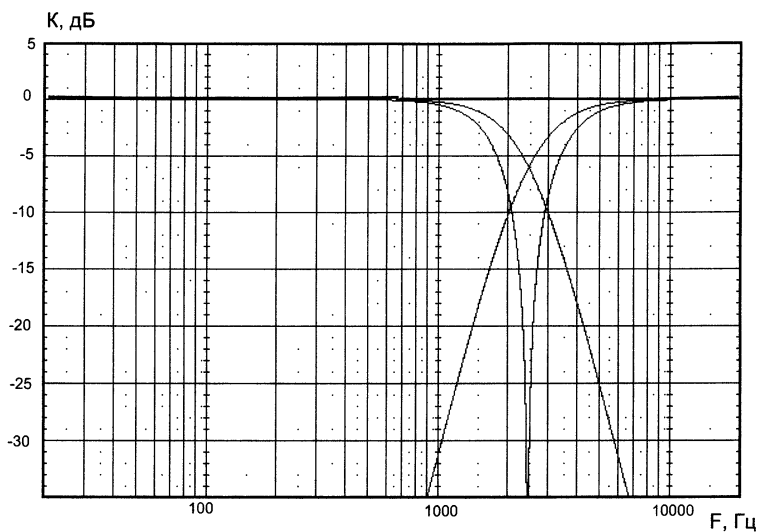


Рис. 2.19. Сложение в фазе и в противофазе спадов Линквица-Рейли 4-го порядка, $T_{зд} = 0$ мсек, ФНЧ и ФВЧ 2500 Гц

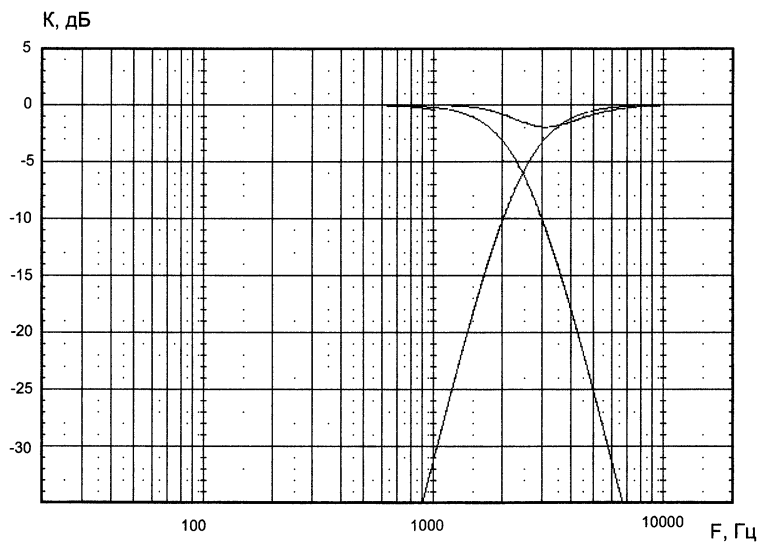


Рис. 2.20. Сложение в фазе спадов Линквица-Рейли 4-го порядка, $T_{зд} = 74$ мсек, ФНЧ и ФВЧ 2500 Гц

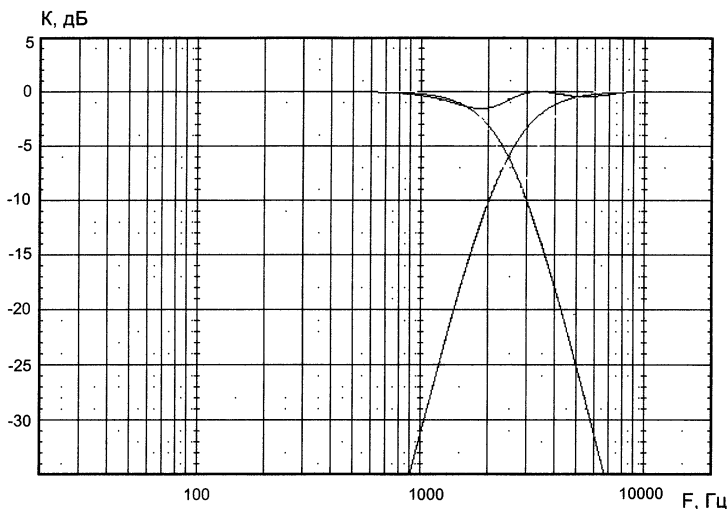


Рис. 2.21. Сложение в фазе спадов Линквица-Рейли 4 порядка, $T_{зд} = 147$ мксек, ФНЧ и ФВЧ 2500 Гц

четвертого порядка. В любительской практике вполне себя оправдывает использование кроссоверов с формой спада АЧХ четвертого порядка, которые могут быть получены с электрическими фильтрами второго, третьего и четвертого порядка в зависимости от свойств динамических головок.

2.5. Корректирующие и компенсирующие цепи

Корректирующие цепочки, как и другие узлы пассивных кроссоверов, представляют собой частотнозависимые делители напряжения. В реальном кроссовере подобные цепи используются совместно с фильтрами, на работу фильтров и корректирующих цепей заметное влияние оказывает индуктивность звуковой катушки динамика. Все перечисленные факторы автоматически учитываются при использовании современных компьютерных программ, позволяющих быстро просчитать множество вариантов. При таком подходе требуются только знание основных свойств корректирующих цепей и выработка стратегии выбора вариантов.

В связи с этим мы ограничимся качественным рассмотрением работы корректирующих и компенсирующих цепей.

На рис. 2.22 показаны схема, АЧХ и ФЧХ корректирующей RC цепи, которая чаще всего используется совместно с ВЧ головками для выравнивания АЧХ громкоговорителя на высокочастотном участке звукового диапазона.

ВЧ головка, как правило, имеет запас по чувствительности и включается через делитель напряжения. Сделав делитель частотнозависимым, мы имеем возможность в небольших пределах откорректировать АЧХ. На схеме (рис. 2.22) R_H представляет собой параллельно включенные резистор делителя и сопротивление динамика. В первом приближении мы можем считать R_H не зависящим от частоты. Вторая, частотнозависимая часть делителя, включает $C1$, $R1$ и $R2$. В области низких частот сопротивление емкости $C1$ велико в сравнении с $R2$, цепочка $C1$, $R1$ не влияет на коэффициент передачи делителя. В области высоких частот, начиная с 3000 Гц, коэффициент передачи делителя плавно возрастает с увеличением частоты за счет уменьшения сопротивления емкости $C1$.

АЧХ и ФЧХ на рис. 2.22 рассчитаны с помощью программы LEAP для следующих значений номиналов: $R1 = 2 \text{ Ом}$, $R2 = R_H = 8 \text{ Ом}$, $C1 = 4,7 \text{ мкФ}$.

На рис. 2.23 показаны схема, АЧХ и ФЧХ корректирующей цепочки RL. Частотнозависимый делитель напряжения в этом случае использует рост полного сопротивления индуктивности L с ростом

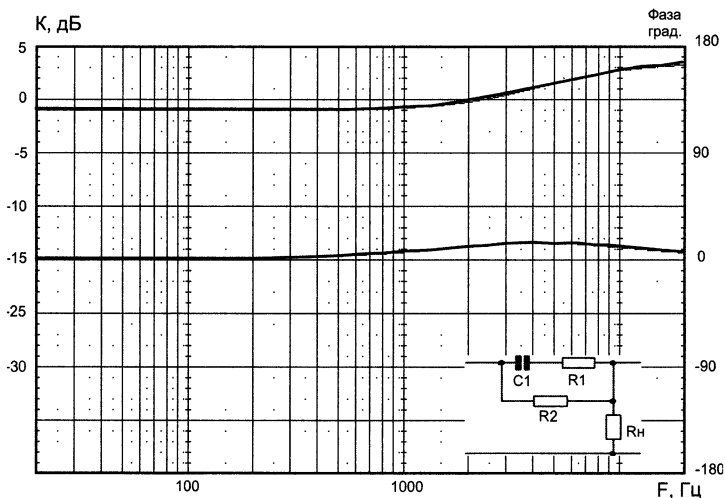


Рис. 2.22. АЧХ и ФЧХ корректирующей RC цепочки

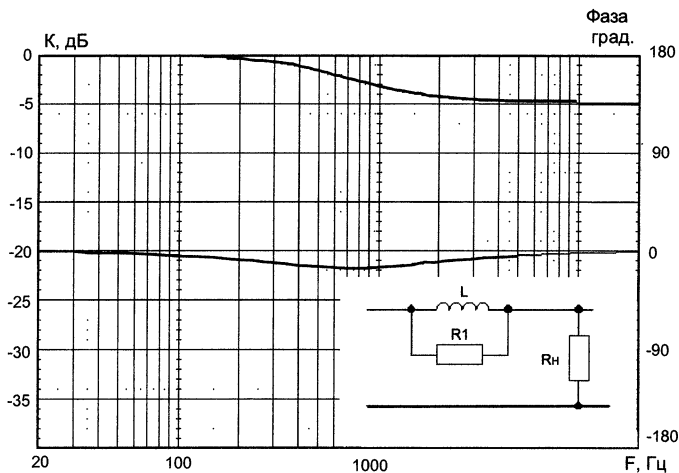


Рис. 2.23. АЧХ и ФЧХ корректирующей LR цепочки

частоты. В области низких частот резистор R_1 зашунтирован малым сопротивлением индуктивности, в результате коэффициент передачи делителя близок к единице. По мере роста сопротивления индуктивности с увеличением частоты коэффициент передачи делителя приближается к величине, определяемой соотношением R_1 и R_n . АЧХ и ФЧХ на рис. 2.23 рассчитаны для следующих значений номиналов: $L = 1$ мГн, $R_1 = 6$ Ом, $R_n = 8$ Ом. Рассмотренная схема может использоваться для компенсации подъема АЧХ громкоговорителя, связанного с переходом от всенаправленного излучения к излучению в полупространство.

На рис. 2.24 показаны схема, АЧХ и ФЧХ корректирующей цепи с использованием параллельного резонансного контура $R L C$. На низких частотах резистор R зашунтирован низким сопротивлением индуктивности L , на высоких частотах — низким сопротивлением емкости C . На резонансной частоте сопротивление контура возрастает, и коэффициент передачи делителя напряжения определяется соотношением резисторов R и R_n , образуя на резонансной частоте контура максимальный провал передаточной характеристики. При использовании рассмотренной коррекции совместно с фильтрами необходимо учитывать увеличение входного сопротивления схемы на резонансной частоте контура.

На рис. 2.25 показана компенсация увеличения полного сопротивления динамической головки с увеличением частоты. Уве-

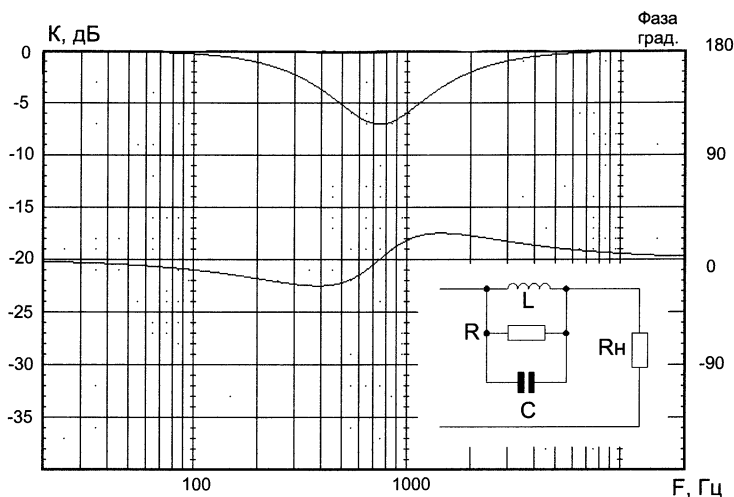


Рис. 2.24. АЧХ и ФЧХ корректирующей цепи на основе LRC контура

ление полного сопротивления динамической головки связано с индуктивностью звуковой катушки. Для компенсации используется последовательная RC цепочка, которую в технической литературе принято называть цепочкой Зобеля. Индуктивность звуковой катушки динамической головки нелинейна, т.е. ее величина изменяется с изменением частоты.

Это снижает точность компенсации, но даже не очень точная компенсация роста полного сопротивления координально меняет условия работы фильтра, подключенного к динамической головке. Для расчета компенсирующей цепочки нужно знать величины активного сопротивления звуковой катушки R_{vc} и индуктивность L_{vc} . Большинство производителей динамиков указывают эти параметры в справочных данных.

Порядок расчета следующий:

- выбираем $R = 1,25R_{vc}$,
- C рассчитываем по формуле:

$$C = \frac{L_{vc}}{R^2}.$$

Размерности: сопротивления в омах, индуктивность в генри, емкость в фарадах.

Рис. 2.25 показывает, что подключение цепочки Зобеля приводит к некоторому смещению резонансного пика. Влияние элементов кроссовера на работу динамической головки вблизи резонансной частоты мы рассмотрим более подробно в главе 3.

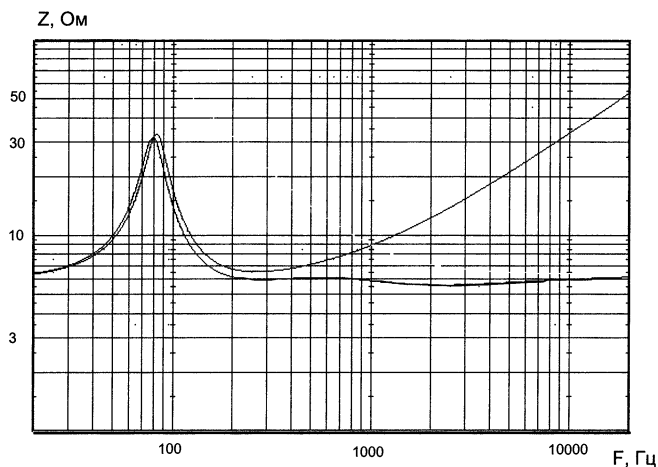


Рис. 2.25. Компенсация индуктивной составляющей полного сопротивления динамической головки

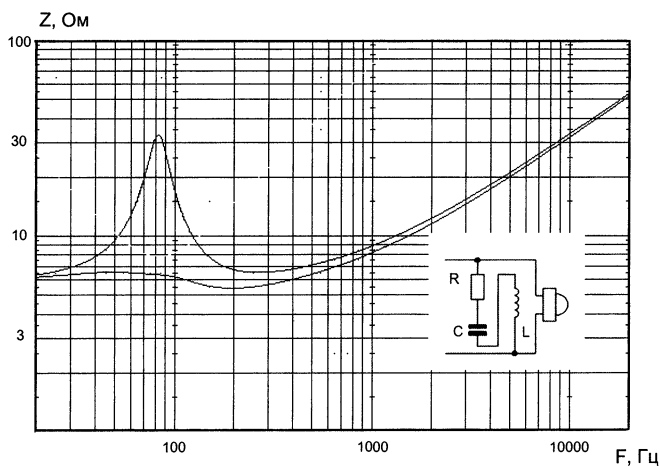


Рис. 2.26. Компенсация резонансного пика последовательным контуром

Рис. 2.26 иллюстрирует компенсацию резонансного пика динамика путем подключения последовательного резонансного контура. Компенсация резонансного пика ВЧ или СЧ головки, работающей с фильтром первого порядка или с фильтрами более высокого порядка, но вблизи резонансной частоты, в ряде случаев оказывается весьма эффективным средством защиты от перегрузки. ВЧ головки без магнитной жидкости имеют слабо затемированные резонансные пики, во много раз превышающие номинальное значение импеданса. В таких условиях ослабление фильтра на резонансной частоте оказывается недостаточным и приходится использовать компенсацию. Расчет компенсирующих контуров лучше всего выполнять с помощью специализированных программ, имеющих специальное меню для подобных целей. Пользуясь такой программой, можно сравнить несколько вариантов и посмотреть возможность использования стандартных элементов в компенсирующем контуре. Для защиты от перегрузок особо точная компенсация не нужна, значительно важнее может оказаться использование стандартных элементов.

2.6. Схема коррекции фазы

На рис. 2.27 показана схема, которая может использоваться в кроссоверах для корректировки фазочастотной характеристики. В руководстве по применению программы LEAP 4.6 имеется раздел «Lattice LC Networks», в котором рассматривается принцип работы подобной схемы. Англоязычный термин «Lattice LC Network» произвольно заменен мной на «Фазокорректирующий мост». Описание работы фазокорректирующего моста составлено с использованием информации, содержащейся в указанном источнике.

Особенность схемы (рис. 2.27) состоит в том, что имеются два пути прохождения сигнала от усилителя к динамику: через конденсаторы $C1$, $C2$ и через индуктивности $L1$, $L2$. На рис. 2.28

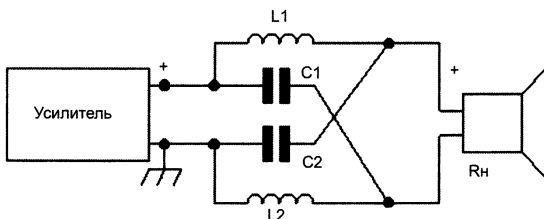


Рис. 2.27. Схема фазокompенсирующего моста

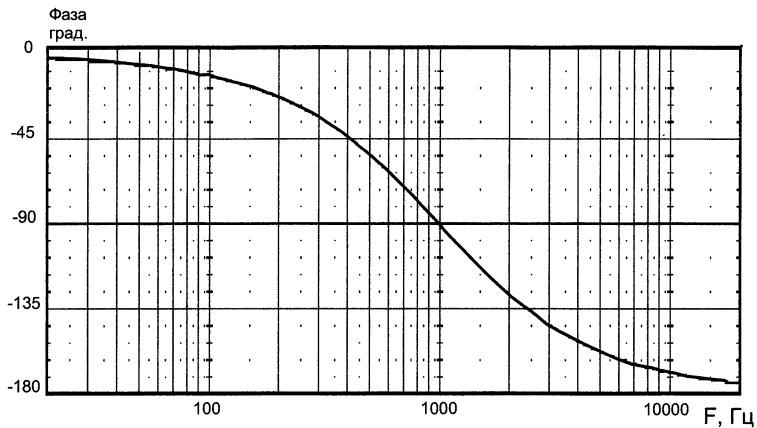


Рис. 2.28. Фазочастотная характеристика мостовой схемы

показана фазочастотная характеристика мостовой схемы. На краях звукового диапазона, когда оказывается задействованным один из путей прохождения сигнала, фазовый сдвиг на выходе принимает значения 0 или 180 градусов. На резонансной частоте F_0 фазовый сдвиг равен минус 90 градусов. При изменении частоты в разной степени задействуются пути прохождения сигнала, соответственно фазовый сдвиг между входным и выходным сигналом изменяется в интервале от 0 до 180 градусов. Мостовую схему можно рассматривать как совокупность двух последовательных резонансных контуров, имеющих определенную резонансную частоту F_0 и добротность Q . Для практического применения представляют интерес только схемы с $Q = 1$, у которых коэффициент передачи по напряжению не зависит от частоты. ФЧХ на рис. 2.28 рассчитана для схемы с резонансной частотой 1 кГц и добротностью 1. Чтобы получить $Q = 1$, нужно выбирать соотношение между R_n , L и C в соответствии с формулой (1):

$$2\pi F_0 L = \frac{1}{2\pi F_0 C} = R_n. \quad (1)$$

С учетом соотношения (1) величины L и C рассчитываются по формулам:

$$C = \frac{1}{2\pi F_0 R_n}, \quad (2)$$

$$L = \frac{R_n}{2\pi F_0}. \quad (3)$$

Для расчета элементов по формулам (2) и (3) нужно знать сопротивление нагрузки R_n и резонансную частоту F_0 . R_n определяется по параметрам динамической головки, работающей совместно с фазокомпенсирующим мостом. Реактивную составляющую входного сопротивления динамика необходимо скомпенсировать, поскольку мостовая схема требует чисто активной нагрузки.

Для компенсации фазового сдвига, связанного с задержкой распространения, фазокорректирующий мост включается в цепь ВЧ головки. Запаздывание сигнала по фазе, создаваемое корректирующей схемой, компенсирует запаздывание по фазе излучения НЧ головки. Компенсация возможна только в ограниченном интервале частот, где совпадают ФЧХ задержки и корректирующей схемы. Выбор F_0 зависит от величины задержки и интервала частот, в котором наиболее желательна компенсация. При выборе F_0 приходится учитывать множество различных факторов, связанных со свойствами фазокомпенсирующего моста, фильтров и динамических головок.

В качестве примера использования фазокорректирующей схемы я попытаюсь прокомментировать разработку фирмы DYNAUDIO. На рис. 2.29 показана схема кроссовера, взятая из описания набора динамиков и других комплектующих для сборки в домашних условиях, который продавался 10–12 лет тому назад. В описании набора указано, что фазокомпенсирующая схема используется для снижения взаимной интерференции динамических головок.

В кроссовере используются электрические фильтры первого порядка.

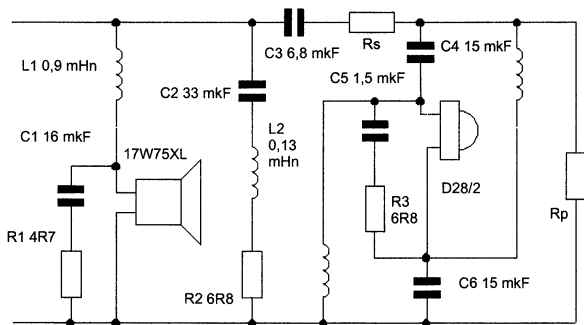


Рис. 2.29. Схема кроссовера Kit Foccus DYNAUDIO

В фильтре нижних частот работает индуктивность L_1 , нагруженная на динамическую головку сопротивлением 4 Ом, у которой индуктивная составляющая импеданса скомпенсирована цепочкой R_1, C_1 . Частота среза ФНЧ составляет 700 Гц. Плавный спад электрического фильтра первого порядка компенсируется подъемом АЧХ динамика, поэтому спад АЧХ по звуковому давлению НЧ головки начинается значительно выше частоты 700 Гц, ориентировочно с 1500 Гц.

В фильтре верхних частот работает емкость C_3 . Величины резисторов R_s и R_p не указаны.

Если предположить, что эквивалентное сопротивление нагрузки для C_3 равно 8 Ом, то частота среза фильтра получается 2900 Гц. ВЧ головка включена через фазокорректирующий мост C_4, L_3, L_4, C_6 . Индуктивная составляющая импеданса ВЧ головки скомпенсирована цепочкой C_5, R_3 . Расчет по формулам, приведенным выше, показывает, что мост имеет резонансную частоту 1730 Гц, добротность моста равна единице при нагрузке 6 Ом.

Оценка запаздывания сигнала НЧ головки в точке суммирования на расстоянии 1 м вдоль оси ВЧ головки дает величину в пределах 120–150 мксек. При рассмотрении фильтров первого порядка мы выяснили, что фазовый сдвиг, связанный с задержкой

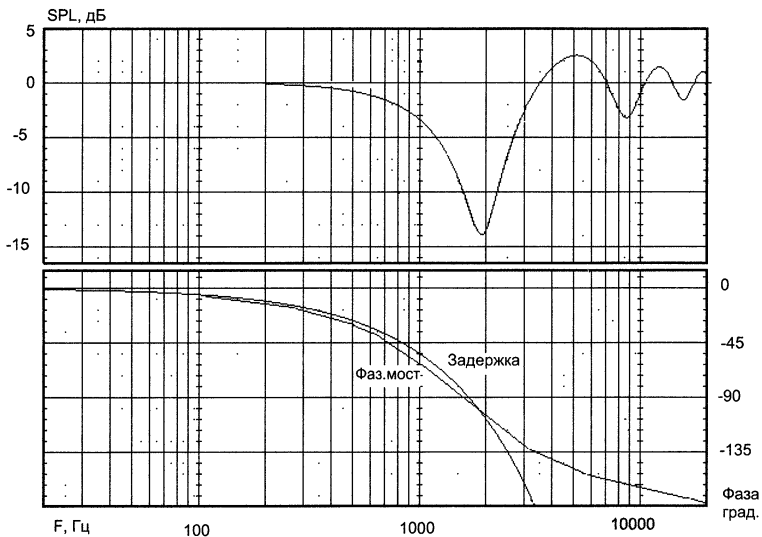


Рис. 2.30. Компенсация провала АЧХ возможна в интервале частот, где совпадают ФЧХ задержки и ФЧХ мостовой схемы

прихода сигнала НЧ головки, приводит к интерференции в области совместного излучения. Интерференционная картина характеризуется глубоким провалом на АЧХ по звуковому давлению, расположенным немного ниже середины области совместного излучения. На рис. 2.30 показана интерференционная картина ФЧХ задержки 150 мксек и ФЧХ фазокомпенсирующего моста с резонансной частотой 1730 Гц. Графики совмещены по оси частот. Сравнение ФЧХ позволяет нам сделать вывод о том, что компенсация имеет место в полосе частот, где возможен максимальный провал АЧХ, когда не используется коррекция фазы. Оценочные расчеты, которые изложены выше, не претендуют на точность, они выполнены с целью объяснить принцип работы фазокорректирующего моста. Интерференционная картина рассчитана для спадов АЧХ первого порядка. В реальном громкоговорителе спады АЧХ существенно отличаются от передаточных функций фильтров первого порядка. Собственный спад АЧХ НЧ головки 17W-75 XL на частотах выше 4000 Гц имеет крутизну не меньше 12 дБ на октаву. В связи с этим в реальном громкоговорителе интерференция на частотах выше 4000 Гц не имеет место. Рассмотренный пример показывает, как решается проблема взаимной интерференции динамических головок с помощью фазокорректирующей схемы.

2.7. Разработка кроссовера

После рассмотрения принципа суммирования излучений динамических головок, основных свойств фильтров и корректирующих цепей можно конкретизировать задачу разработки кроссовера, сформулированную во введении. В разработке кроссовера можно выделить два основных этапа:

- выбор спадов АЧХ по звуковому давлению в области совместного излучения;
- получение выбранных спадов АЧХ, которые считаются заданными.

Выбор спадов канонических фильтров в качестве заданных дает прогнозируемый результат сложения и влияния задержек распространения. Выдать четкие и «правильные» рекомендации по выполнению первого этапа, как мне кажется, не представляется возможным. Принятие решения по выбору заданных спадов (и, соответственно, частоты раздела) требует анализа АЧХ конкретных динамических головок и учета множества других технических характеристик. Даже при наличии некоторого опыта поиск приемлемого компромисса требует нескольких попыток, т.е. произ-

водится методом проб и ошибок. Метод проб и ошибок также приходится использовать для получения заданных спадов АЧХ.

На этапе первой пробы, рассчитав фильтры и другие цепи кроссовера по формулам, мы имеем очень мало шансов получить приемлемый результат. Формулы, которыми мы пользуемся, справедливы для электрических фильтров, они не учитывают особенности динамических головок, излучения которых суммируются в пространстве. Кроме того, формулы не учитывают взаимное влияние различных цепей кроссоверов и реактивностей входных сопротивлений динамиков. Только использование компьютерных программ позволяет производить вычисления с учетом взаимовлияния узлов кроссовера и особенностей динамических головок. Такие программы ориентированы на обработку оцифрованных результатов акустических и электрических измерений в совокупности с моделированием электрических цепей кроссовера. Специализированные программы позволяют существенно сократить трудоемкость разработки кроссоверов методом проб и ошибок. Высокая достоверность расчетов (т.е. хорошее совпадение результатов расчетов с результатами измерений), выполненных на основе измеренных АЧХ и импедансных характеристик, позволяет корректно оценить множество вариантов и выбрать для макетирования и прослушивания наиболее оптимальный.

Одна из возможных методик разработки кроссовера с использованием метода проб и ошибок может состоять в следующем:

- на основе анализа АЧХ динамических головок и других технических характеристик выбирается частота раздела,
- задается форма спадов АЧХ по звуковому давлению, которые будут суммироваться в области совместного излучения,
- спады АЧХ динамических головок, работающих совместно с элементами кроссовера, методом проб и ошибок подгоняются под заданные путем варьирования параметров фильтров, корректирующих и компенсирующих цепей,
- проверяется суммарная АЧХ с учетом задержек в точке суммирования.

Дальнейшая работа состоит в макетировании и оценке результатов компьютерного моделирования путем измерений и прослушивания.

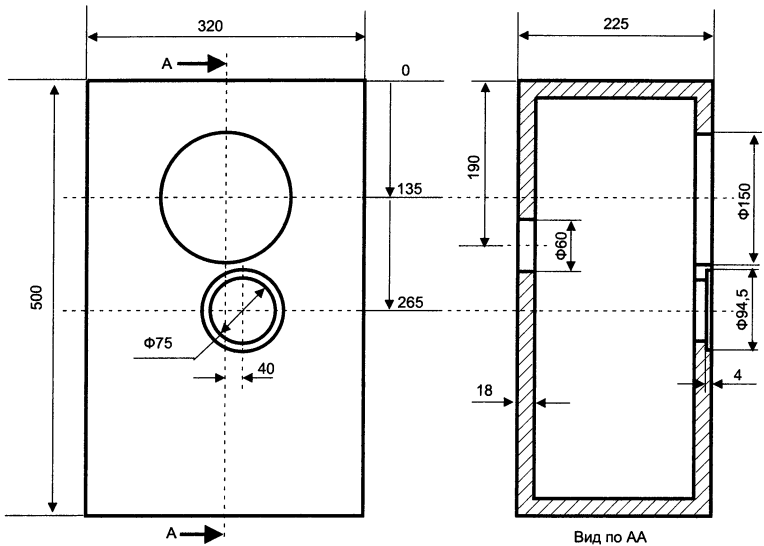
Доступность измерительных средств на основе компьютерных звуковых карт и широкое распространение программ для проектирования позволяют автору надеяться, что описание примеров разработок кроссоверов на основе компьютерных технологий окажется своевременным и полезным.

ПРИМЕРЫ РАЗРАБОТОК КРОССОВЕРОВ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Сформулированная в общем виде в предыдущей главе методика разработки кроссоверов методом проб и ошибок станет более понятной после рассмотрения нескольких конкретных примеров. Описание нескольких моделей громкоговорителей с акцентированием внимания на проектирование кроссоверов, а также анализ отдельных фрагментов кроссоверов, выявляющих специфические вопросы проектирования, составляет содержание настоящей главы.

3.1. Двухполосный громкоговоритель на динамических головках AUDAХ HM170Z18 и MOREL MDT30

На рис. 3.1 показан чертеж корпуса громкоговорителя и схема для определения разности хода акустического сигнала от динамических головок до измерительного микрофона, расположенного в точке А1. С учетом условий использования громкоговорителя было принято решение при проектировании кроссовера получить минимальную неравномерность АЧХ вдоль оси НЧ головки. Соответственно для проектирования кроссовера будут использоваться АЧХ, измеренные микрофоном, расположенным в точке А1, и величина задержки распространения будет определяться по схеме, показанной на рис. 3.1. Анализ АЧХ по звуковому давлению, показанных на рис. 3.2, и Z характеристик, показанных на рис. 3.3, приводит к выводу о возможности выбора частоты раздела 2200 Гц. Выбор частоты раздела обусловлен двумя основными факторами: резонансной частотой ВЧ головки и спадом АЧХ НЧ головки. Спад АЧХ НЧ головки начинается с 3500 Гц, а резонансная частота ВЧ головки равна примерно 1000 Гц. Частота раздела 2200 Гц представляется вполне приемлемым компромиссом, позволяющим хорошо защи-



Корпус громкоговорителя на динамических головках НМ170Z18, МDT30

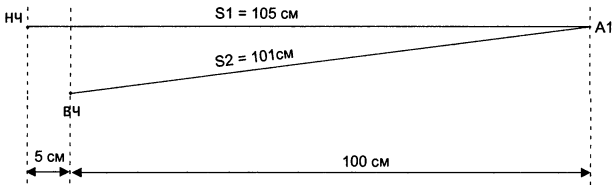


Рис. 3.1. Эскиз корпуса громкоговорителя и схема для определения разности хода до измерительного микрофона

тить ВЧ головку от перегрузки средними частотами, при этом остается еще некоторый запас по широкополосности НЧ головки.

За счет разности хода 4 см (рис. 3.1) акустический сигнал НЧ головки запаздывает относительно ВЧ головки на 120 мксек. Запаздывание излучения НЧ головки относительно ВЧ головки на 120 мксек будет учтено при моделировании суммарной АЧХ громкоговорителя.

На следующем этапе проектирования определимся с чувствительностью громкоговорителя, исходя из допустимой неравномерности АЧХ в области нижних частот. АЧХ по звуковому давлению НЧ головки, показанная на рис. 3.2, в полосе частот от 100 до 500 Гц

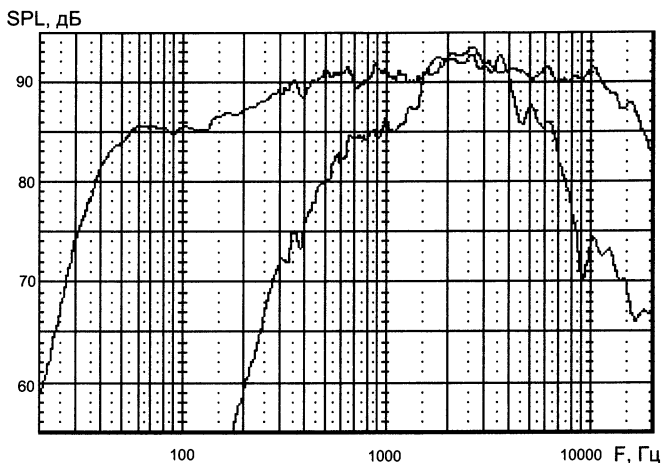


Рис. 3.2. АЧХ HM170Z18, MDT30, измеренные вдоль оси НЧ головки

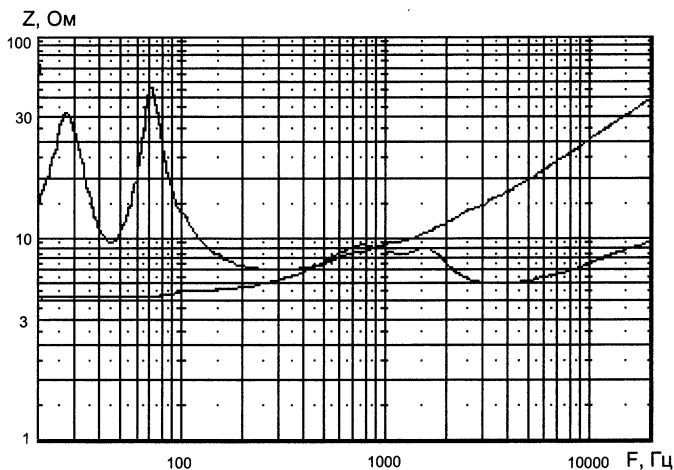


Рис. 3.3. Зависимость от частоты сопротивлений HM170Z18, MDT30

имеет плавный подъем от 85 до 91 дБ, связанный с переходом от всенаправленного излучения к излучению в полупространство. Плоская АЧХ громкоговорителя может быть получена, если выбрать чувствительность громкоговорителя 85–86 дБ. В этом случае

завал АЧХ на частоте 50 Гц составит 2–3 дБ, что для громкоговорителя с полезным объемом 20 литров и диаметром НЧ головки 170 мм можно считать достаточно хорошим результатом. Для получения такого результата необходимо компенсировать подъем АЧХ НЧ головки. Попытаемся компенсировать подъем АЧХ, подключив к НЧ головке корректирующую RL цепочку 2,7 мГн, 3,9 Ом. Рис. 3.4 показывает, что подключение корректирующей цепочки привело к уменьшению подъема АЧХ в области средних частот на 3,5 дБ. Будем считать полученный результат удовлетворительным, полагая осуществить более точную компенсацию за счет спада передаточной характеристики фильтра нижних частот, который потребуется для формирования заданного спада АЧХ в области совместного излучения. В качестве заданных спадов АЧХ по звуковому давлению, формирующих область совместного излучения, выберем спады фильтров Линквица-Рилея 4-го порядка.

Следующий этап разработки кроссовера состоит в получении АЧХ заданной формы, т.е. подгонке АЧХ под передаточные характеристики фильтров Линквица-Рилея 4-го порядка путем подбора параметров электрических фильтров. Поскольку спады АЧХ динамических головок, работающих без фильтров, располагаются недалеко от частоты раздела, попытаемся сформировать заданные спады (четвертого порядка) с помощью фильтров второго

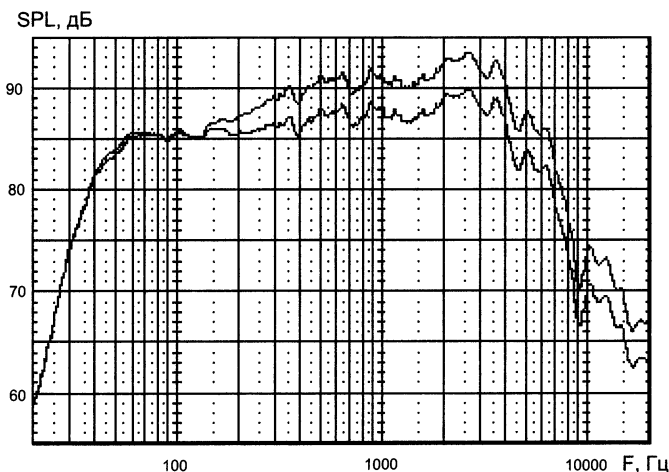


Рис. 3.4. Подключение корректирующей цепочки уменьшило подъем АЧХ на 3,5 дБ

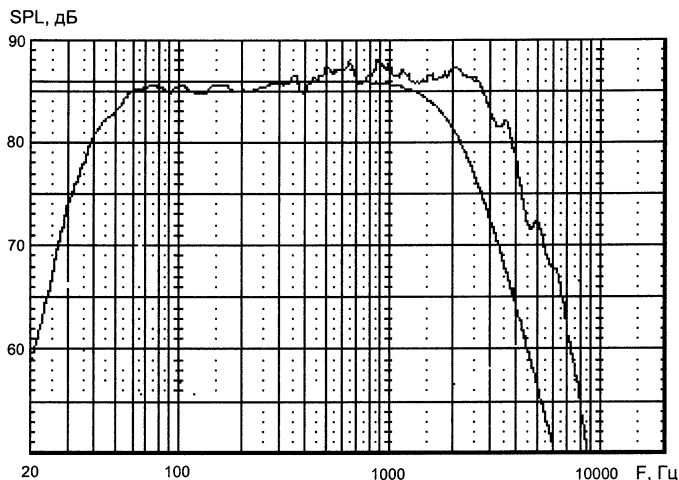


Рис. 3.5. АЧХ НЧ головки с фильтром 2-го порядка (2200 Гц, $Q = 0,7$) в сравнении с заданной

порядка. Начнем с НЧ головки. В качестве первого приближения используем фильтр второго порядка (0,82 мГн, 6,4 мкФ), который имеет частоту среза 2200 Гц и добротность 0,7. Результат моделирования АЧХ по звуковому давлению НЧ головки, работающей с указанным фильтром нижних частот и с корректирующей LR цепочкой, показан на рис. 3.5. Полученная АЧХ имеет форму спада, близкую к заданной, но располагается по частоте несколько выше. Оптимизация параметров фильтра нижних частот, выполненная методом проб и ошибок, дает результат, показанный на рис. 3.6. Приемлемый результат оптимизации, ориентированной на формирование заданной АЧХ по звуковому давлению, получился с фильтром (2 мГн, 15 мкФ), имеющим частоту среза 900 Гц, т.е. значительно ниже частоты раздела. Существенное снижение частоты среза фильтра по отношению к частоте раздела, обеспечивающего заданный спад АЧХ, связано с двумя факторами: подъемом АЧХ динамической головки и влиянием индуктивности звуковой катушки НЧ головки, которая не была скомпенсирована до оптимизации фильтра.

Аналогичным способом проведем подгонку формы АЧХ по звуковому давлению ВЧ головки. Первый шаг состоит в подборе делителя напряжения, обеспечивающего снижение звукового давления ВЧ головки до уровня 86 дБ. В качестве первого прибли-

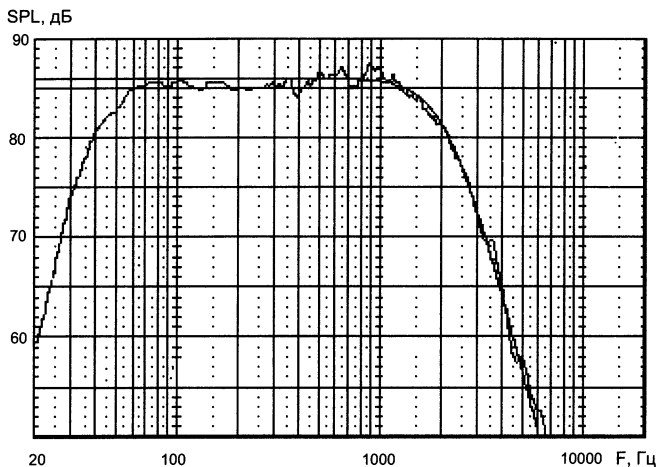


Рис. 3.6. АЧХ НЧ головки с оптимизированным фильтром второго порядка в сравнении с заданной

жения моделируем АЧХ ВЧ головки, работающей с делителем напряжения и фильтром второго порядка на частоту 2200 Гц. Полученная АЧХ в сравнении с заданной показана на рис. 3.7. После оптимизации параметров фильтра получаем АЧХ, показанную

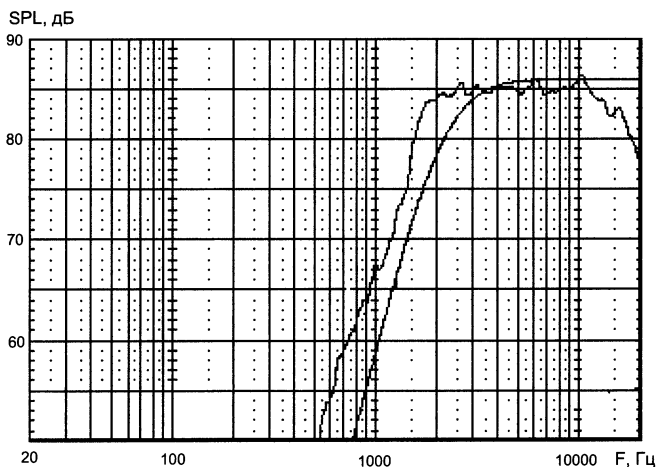


Рис. 3.7. АЧХ ВЧ головки с фильтром 2-го порядка (2200 Гц, $Q = 0,7$) в сравнении с заданной

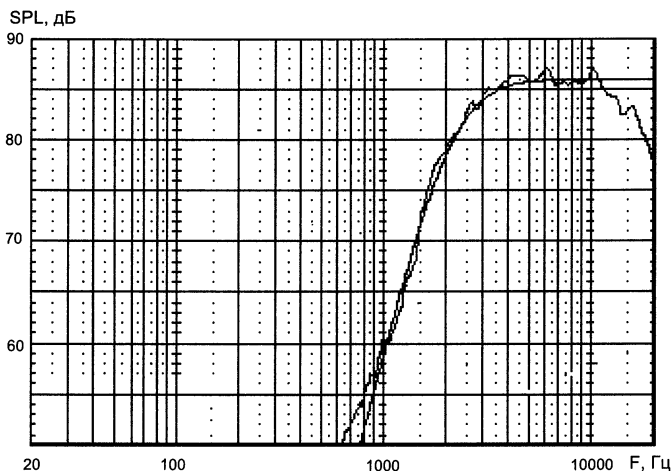


Рис. 3.8. АЧХ ВЧ головки с оптимизированным фильтром 2-го порядка в сравнении с заданной

на рис. 3.8. Хорошее приближение к заданной АЧХ получилось с фильтром (5,6 мкФ, 0,4 мГн), имеющим частоту среза 3400 Гц. Здесь мне кажется уместным обратить внимание на то, что параметры фильтров, обеспечивающие АЧХ по звуковому давлению заданной формы, весьма трудно получить каким-либо способом, кроме метода проб и ошибок. Снижение трудоемкости за счет компьютерного моделирования, заменившего многократные перепайки элементов и измерения, позволяет эффективно пользоваться методом проб и ошибок в повседневной практике.

В результате оптимизации параметров фильтров получилась схема кроссовера, которая показана на рис. 3.9. На рис. 3.10 показаны передаточные характеристики фильтров кроссовера. Передаточные характеристики фильтров не имеют подъемов вблизи частоты среза, что обеспечивает апериодический переходной процесс в электрических цепях кроссовера.

Следующий этап разработки состоит в моделировании суммарной АЧХ громкоговорителя с учетом запаздывания излучения НЧ головки на 120 мксек. Результат моделирования показан на рис. 3.11. Суммарная АЧХ громкоговорителя, полученная в результате моделирования, имеет небольшой подъем в области совместного излучения. Этот подъем можно устранить путем оптимизации параметров фильтра нижних частот (L3, C2 рис. 3.9) по

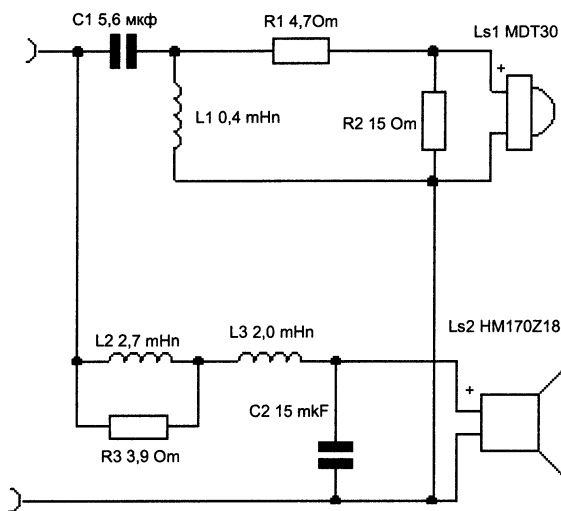


Рис. 3.9. Схема кроссовера

критерию минимальной неравномерности суммарной АЧХ. На этом этапе проводить дополнительную оптимизацию представляется нецелесообразным, поскольку форма АЧХ в области совместного излучения зависит от фазовых соотношений суммируемых сигналов. Подъем АЧХ 1,2 дБ при моделировании может быть результатом

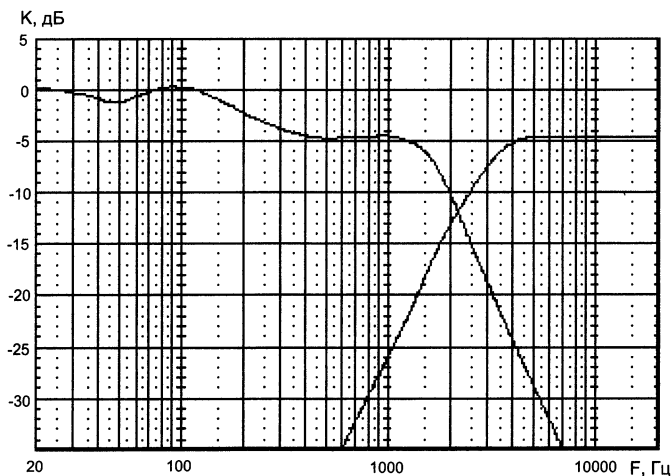


Рис. 3.10. Передаточные характеристики фильтров кроссовера

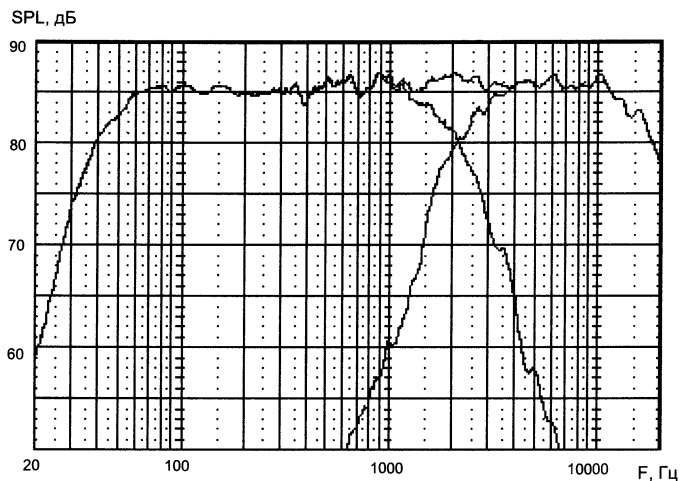


Рис. 3.11. Моделирование АЧХ НЧ и ВЧ головок, работающих с фильтрами и суммарной АЧХ громкоговорителя

погрешностей определения задержки, которая сильно влияет на фазовые соотношения. Корректировка фильтра приведет к отклонению формы спада АЧХ от канонической. В связи с этим целесообразно принять решение о корректировке фильтров по результатам измерений.

Собрав макет кроссовера, проведем контрольные измерения. На рис. 3.12 и 3.13 показаны АЧХ по звуковому давлению, измеренные вдоль оси НЧ и вдоль оси ВЧ головок. Сравнение результатов моделирования (рис. 3.11) и измерений (рис. 3.12) показывает небольшое различие АЧХ. Подъем в области средних частот, о котором говорилось выше, уменьшился примерно на 1 дБ. Наиболее вероятно, что различие в результатах измерений и моделирования связано с погрешностями в определении задержки излучения НЧ головки. Кроме того, при моделировании не учтена фазовая погрешность, возникающая за счет того, что резонансная частота ВЧ головки находится недалеко от частоты раздела.

АЧХ, измеренная вдоль оси ВЧ головки, не имеет подъема в области совместного излучения. Результаты измерений АЧХ показывают, что корректировка фильтров кроссовера не требуется.

На рис. 3.14 показана зависимость от частоты модуля полного сопротивления громкоговорителя (Z характеристика), измеренная в режиме генератора тока. Немонотонный характер зависимости

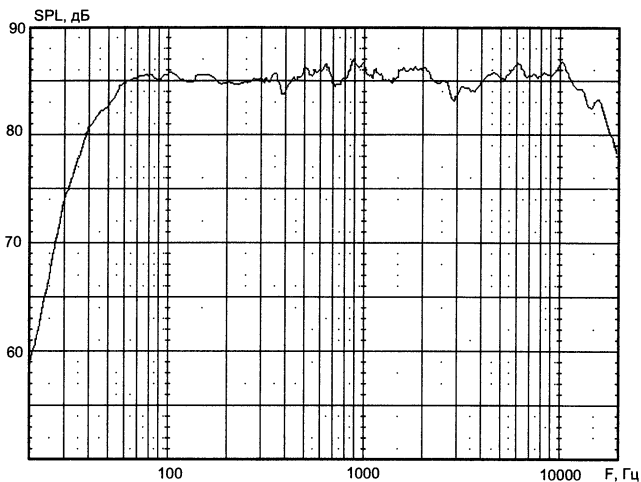


Рис. 3.12. АЧХ громкоговорителя, измеренная вдоль оси НЧ головки

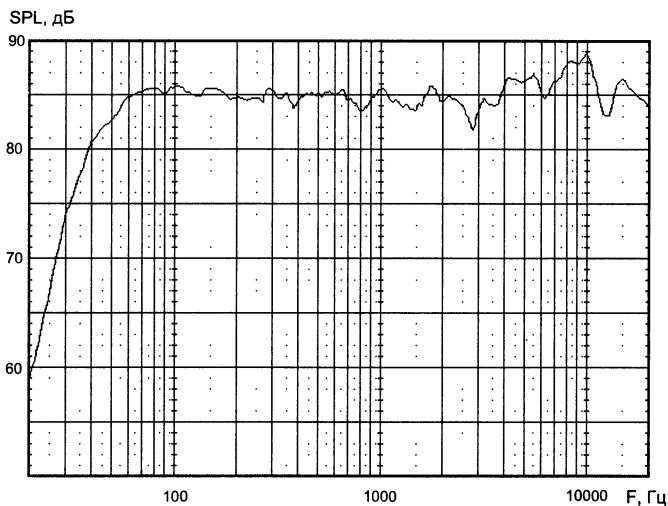


Рис. 3.13. АЧХ громкоговорителя, измеренная вдоль оси ВЧ головки

от частоты полного сопротивления громкоговорителя с максимумом в области средних частот создает неоптимальные условия для работы усилителя и может отрицательно сказаться на качестве воспроизведения звука. Компенсация максимума, требующая

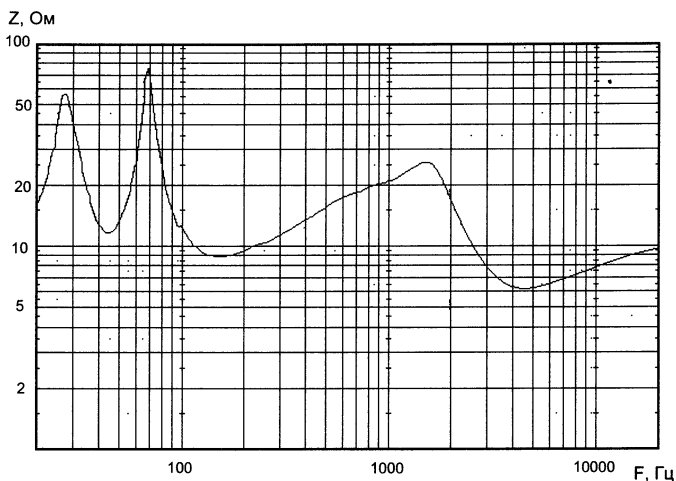


Рис. 3.14. Зависимость от частоты полного сопротивления громкоговорителя

включения в кроссовер трех дополнительных элементов, представляется вполне оправданной мерой по облегчению режима работы усилителя.

На рис. 3.15 показана Z характеристика громкоговорителя после подключения компенсирующей цепочки 10 Ом, 0,35 мГн, 33 мкФ. В результате компенсации в полосе частот 100–20000 Гц максимальное значение фазового угла входного сопротивления снизилось с 50 до 15 градусов. Откорректированная схема кроссовера показана на рис. 3.16. На фото 7 показан внешний вид макета громкоговорителя

Макетный образец громкоговорителя, проектирование кроссовера которого рассмотрено выше, имеет высокие электроакустические характеристики, в том числе, неравномерность АЧХ по звуковому давлению вдоль оси НЧ головки плюс-минус 1,5 дБ в полосе частот 60–10000 Гц при небольшом разбросе АЧХ в пределах телесного угла 30 градусов. Хорошие электроакустические характеристики вовсе не являются гарантией комфортного звучания громкоговорителя, они говорят лишь о том, что с помощью измерительных средств объективно зафиксированы значения ряда параметров. Целью этой разработки было создание прототипа громкоговорителя, пригодного для дальнейшей доработки совместно с аудиоэкспертом. В процессе создания громкоговорителей инже-

нерная проработка, ориентированная на получение максимально высоких электроакустических характеристик, дает возможность эксперту выявить особенности звучания и принять решение о возможности реализовать фирменную концепцию подачи звука на имеющемся комплекте динамических головок.

Макет, показанный на фото 7, использовался в качестве прототипа для нескольких моделей громкоговорителей на базе динамической головки AUDAX HM170Z18. В журнале «DVD Эксперт» за апрель 2006 г. опубликовано экспертное заключение по модели громкоговорителя в мраморном корпусе на динамических головках HM170Z18 и MDT30, разработанной компанией VIRTUAL ACOUSTICS. Внешний вид громкоговорителя в корпусе из мрамора показан на фото 8.

В заключение хотелось бы отметить, что проектирование кроссовера, ориентированного на формирование спадов АЧХ заданной формы, приводит к электрической схеме, параметры которой получить путем расчетов по формулам не представляется возможным. Рассмотренный пример показывает, что кроссовер с частотой раздела 2200 Гц на основе фильтров Линквица-Рилея 4-го порядка реализован на электрических фильтрах 2-го порядка с частотами среза 900 и 3400 Гц.

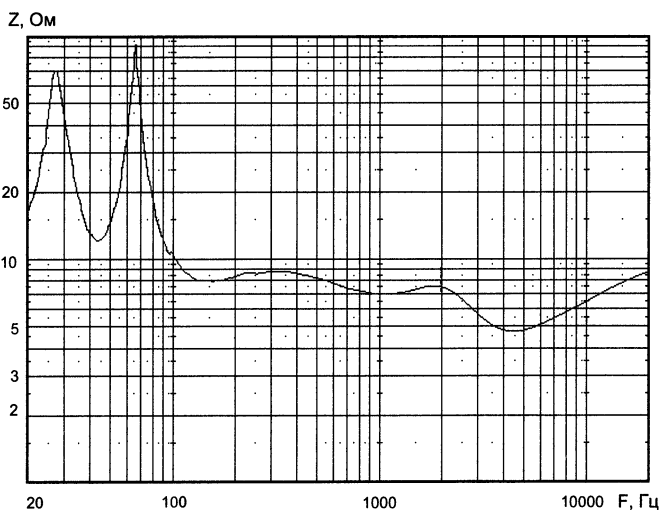


Рис. 3.15. Зависимость от частоты сопротивления громкоговорителя после компенсации подъема на средних частотах

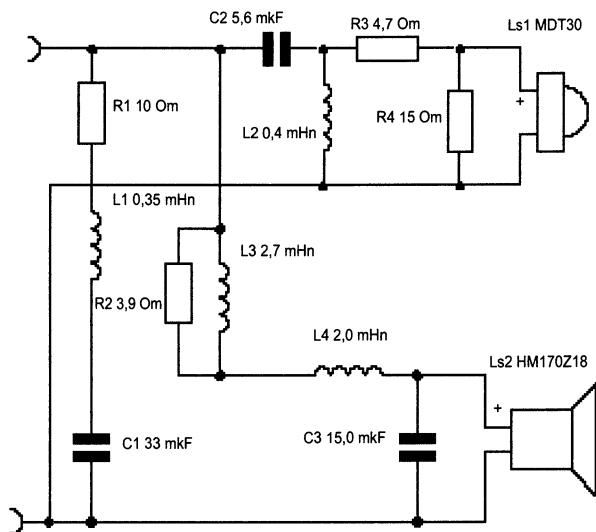


Рис. 3.16. Схема кроссовера с компенсирующей цепочкой R1, C1, L1

3.2. Взаимодействие фильтра нижних частот с басовой головкой

В процессе разработки и изготовления громкоговорителей мне неоднократно приходилось встречаться с ситуацией, когда подключение фильтра нижних частот к НЧ головке, помещенной в тщательно спроектированное и хорошо изготовленное акустическое оформление, приводило к значительному ухудшению воспроизведения басов.

Изменение воспроизведения звука, связанное с подключением фильтра, характеризовалось ослаблением самых низких частот, подчеркиванием составляющих сигнала в полосе 80–150 Гц и появлением бубнения, т.е. явно выраженного колебательного характера переходного процесса. Это нежелательное явление наиболее резко проявлялось в трехполосных системах с фазоинверторным акустическим оформлением НЧ головки. Изменение частоты настройки фазоинвертора после подключения фильтра в большинстве случаев не давало желаемого результата. Проблема решалась только путем использования электронного кроссовера, обеспечивающего разделение низких и средних частот на входе

усилителя. В результате пришлось разбираться в вопросе взаимодействия фильтра нижних частот с динамической головкой.

Компьютерное моделирование и анализ эквивалентной схемы динамической головки позволили найти приемлемые решения для ряда разработок. Материал по этому вопросу помещен в одну главу с примерами разработок, чтобы было понятно назначение некоторых элементов в схемах кроссоверов. Для популярного изложения вопроса начнем с широко известных вещей. Основное назначение динамической головки состоит в преобразовании электрической энергии переменного тока в механические колебания диффузора, обеспечивающие излучение звукового сигнала. Нам известно также, что динамическая головка может работать в качестве микрофона, преобразуя в электрический сигнал воздействие звуковой энергии на диффузор. Другими словами, динамическая головка является обратимым преобразователем энергии. Обратимый преобразователь характеризуется взаимовлиянием электрических и механических процессов. Теория обратимых преобразователей дает строгое математическое описание связи между процессами на механической и на электрической сторонах преобразователя, что позволяет представить совокупность электрических и механических параметров единой эквивалентной схемой. Не углубляясь в теорию, попытаемся рассмотреть вопрос, опираясь на факты, которые хорошо известны из практики широкому кругу любителей.

Механический резонанс подвижной системы динамической головки измеряется на электрической стороне. Это оказывается возможным потому, что механические элементы головки, способные запасать энергию, проявляют себя на электрической стороне как реактивности, т.е. как индуктивности и емкости. Механический резонанс подвижной системы проявляет себя на электрической стороне как параллельный резонансный контур. По результатам электрических измерений мы можем также судить об изменении резонансной частоты, которое происходит при помещении динамической головки в корпус. Подсоединяя к динамику электрические цепи, содержащие реактивные элементы, например, цепочку Зобеля для компенсации индуктивной составляющей сопротивления, мы можем обнаружить смещение резонансного пика динамика в область более низких частот.

При проектировании кроссоверов громкоговорителей в ряде случаев приходится учитывать взаимодействие фильтра нижних частот с эквивалентными реактивностями низкочастотной головки. Для дальнейших рассуждений полезно оценить количественно

но порядок величин реактивностей, т.е. индуктивностей и емкостей, в виде которых проявляются механические элементы динамической головки, работающей в акустическом оформлении.

На рис. 3.17 показана зависимость от частоты модуля полного сопротивления динамической головки SEAS H1305, помещенной в фазоинвертор объемом 62 литра, настроенный на частоту 33 Гц. Фазоинвертор в совокупности с динамической головкой на электрической стороне проявляют себя как система связанных между собой колебательных контуров. Кривая имеет два резонансных пика с максимумами на частотах 17 Гц и 56 Гц. В первом приближении резонанс на частоте 17 Гц может быть представлен эквивалентными электрическими элементами в виде соединенных параллельно 47 мГн, 1800 мкФ и 30 Ом. Для частоты 56 Гц — 20 мГн, 400 мкФ и 34 Ом. В интервале частот 60–140 Гц входное сопротивление динамической головки имеет емкостной характер. В частности, на частоте 70 Гц активная составляющая входного сопротивления равна 11,7 Ом, реактивная соответствует емкости 236 мкФ. Для частоты 90 Гц соответственно 8,1 Ом и 386 мкФ. Установив порядок величин эквивалентных реактивностей динамической головки, работающей в фазоинверторе, приступим к проектированию кроссовера. На рис. 3.18 показана АЧХ по звуковому давлению, измеренная вдоль оси НЧ головки. Предположим, что для разрабатываемого громкоговорителя между НЧ и СЧ головкой выбрана частота раз-

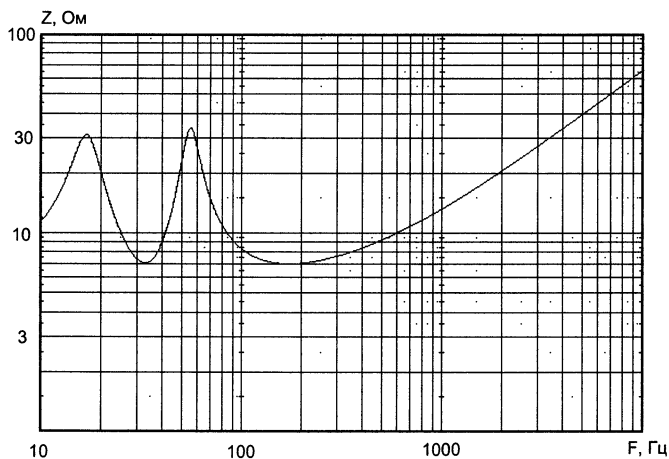


Рис. 3.17. Зависимость от частоты сопротивления H1305 в фазоинверторе 62 литра 32 Гц

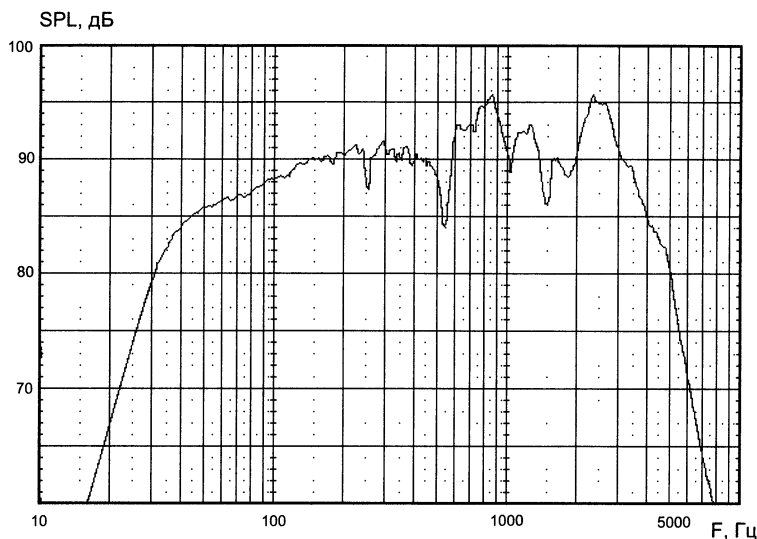


Рис. 3.18. АЧХ, измеренная вдоль оси головки H1305

дела 300 Гц, а в области совместного излучения принято решение использовать спады Баттерворда 2-го порядка. Задавшись чувствительностью низкочастотного звена 86 дБ, попытаемся оптимизировать параметры фильтра по критерию минимального отклонения спада АЧХ от заданного. Результат оптимизации показан на рис. 3.19. В результате оптимизации фильтра достигнуто приближение спада АЧХ к заданному, но в полосе прозрачности фильтра образовался подъем АЧХ с максимумом на частоте 85 Гц. Воспроизведение низких частот громкоговорителем с такой АЧХ будет неудовлетворительным. На рис. 3.20 показаны исходная АЧХ и АЧХ после подключения фильтра. В полосе частот 55–120 Гц АЧХ динамической головки с фильтром лежит выше исходной АЧХ. Нежелательная прибавка звукового давления, которую мы обнаружили путем сравнения АЧХ на рис. 3.20, требует объяснения и, если это возможно, устранения.

Для этой цели полезно рассмотреть зависимости от частоты входных сопротивлений динамической головки без фильтра (1) и после включения фильтра (2), показанные на рис. 3.21. Сравнение кривых на рис. 3.21 показывает, что в результате включения фильтра в интервале частот 55–120 Гц входное сопротивление заметно уменьшилось. Это произошло несмотря на то, что последовательно

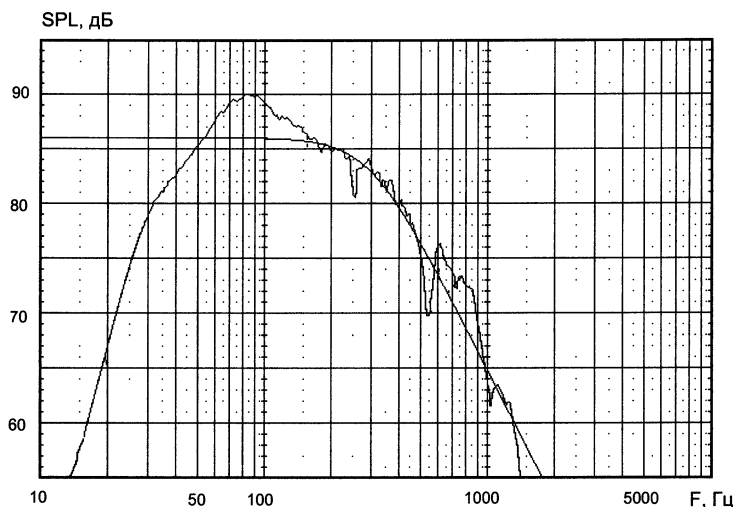


Рис. 3.19. АЧХ Н1305 с фильтром в сравнении с заданной

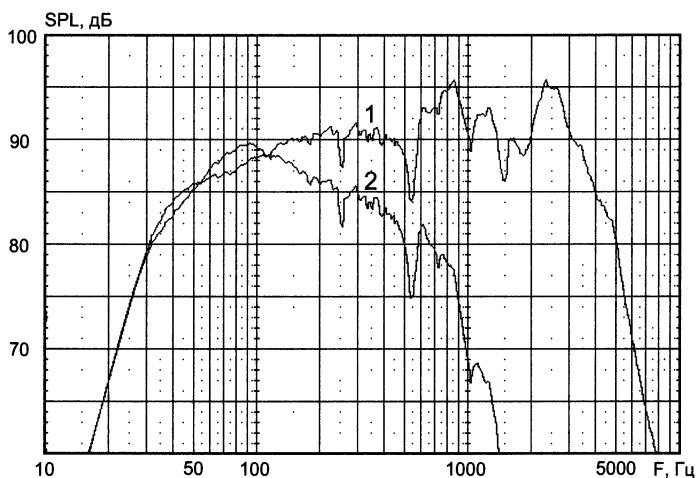


Рис. 3.20. АЧХ Н1305 с фильтром (2) и без фильтра (1)

с динамической головкой включена индуктивность фильтра с активным сопротивлением 0,5 Ом. Можно заметить, что интервалы частот, в которых происходит прибавка звукового давления и падение входного сопротивления, совпадают. Прибавка в звуковом

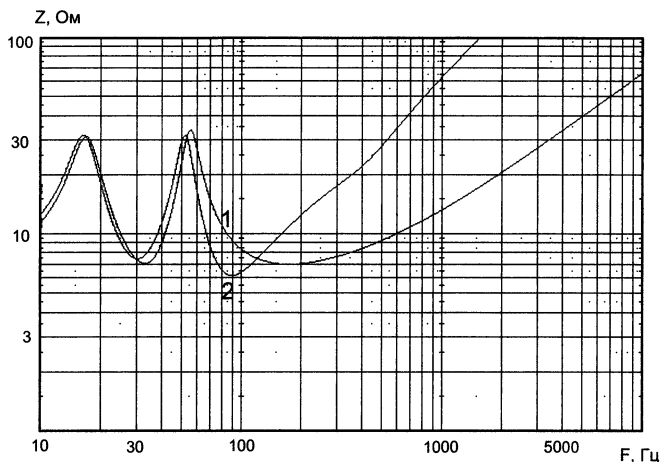


Рис. 3.21. Зависимость от частоты сопротивления Н1305 с фильтром (2) и без фильтра (1)

давлении получилась в результате отбора дополнительной мощности от усилителя за счет падения входного сопротивления системы фильтр-головка. На рис. 3.22 показана передаточная характеристика фильтра нижних частот, подключенного к динамической головке.

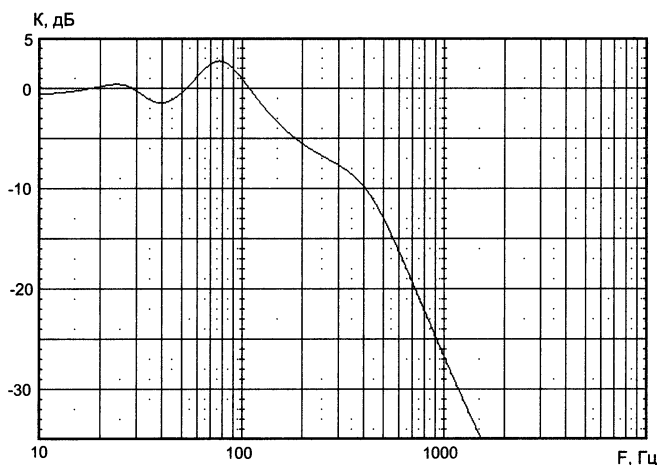


Рис. 3.22. Передаточная характеристика фильтра, нагруженного на головку Н1305

Передаточная характеристика имеет характерный подъем в интервале частот 55–120 Гц. Весьма вероятно, что форма передаточной характеристики фильтра является причиной бубнения на низких частотах, о котором говорилось выше. Следующим шагом в прояснении ситуации был расчет передаточной характеристики фильтра нижних частот, работающего на нагрузку в виде последовательно соединенных резистора 8 Ом и емкости 380 мкФ. Рассчитанная передаточная характеристика имела форму весьма сходную с характеристикой, показанной на рис. 3.22. Проведенные рассуждения позволяют сделать вывод о том, что причиной нежелательного эффекта является работа фильтра нижних частот на емкостную нагрузку. Емкостная нагрузка получается в некотором интервале частот за счет проявления на электрической стороне обратимого преобразователя механических элементов, способных запасать энергию. Степень проявления эффекта нежелательного взаимодействия в каждом конкретном случае зависит от соотношения параметров фильтра и эквивалентных реактивностей динамической головки. На рис. 3.23 показаны передаточные функции трех фильтров с разными частотами среза, подсоединенных к динамической головке Н1305. Сравнение формы передаточных характеристик показывает, что проявление нежелательного взаимодействия фильтра с головкой уменьшается с увеличением частоты среза фильтра. Частота среза фильтра

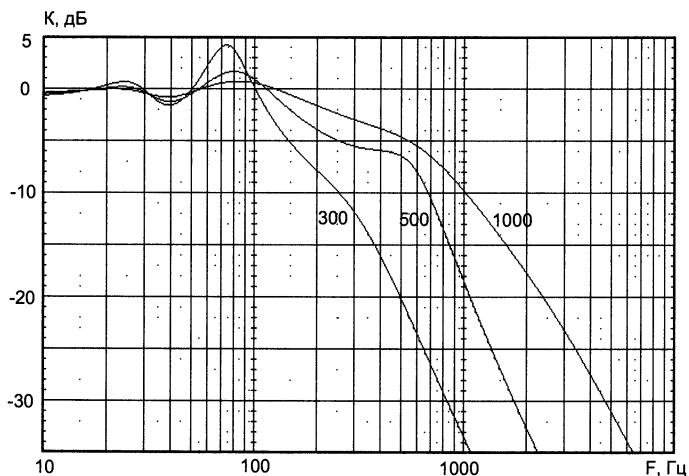


Рис. 3.23. Передаточные характеристики фильтров с частотами среза 300, 500 и 1000 Гц

увеличивается с увеличением частоты раздела. Сравнение рассматриваемого кроссовера с предыдущим (HM170Z18, MDT30) подтверждает эту закономерность. В рассматриваемом примере, где эффект взаимодействия не позволяет получить приемлемое воспроизведение низких частот, фигурирует кроссовер с частотой раздела 300 Гц и резонансная частота пика 56 Гц. Отношение частот равно 5,3.

В предыдущем громкоговорителе частота раздела 2200 Гц, частота резонансного пика 80 Гц, отношение частот равно 27,5. При соотношении частот 27,5 взаимодействие фильтра и головки не создает нежелательных эффектов. Отношение частоты раздела к частоте резонансного пика можно использовать в качестве ориентировочного критерия возникновения нежелательного взаимодействия. Если отношение частот меньше 15, скорее всего придется принимать меры по ослаблению нежелательного взаимодействия фильтра и динамической головки. Это можно сделать путем снижения реактивной составляющей нагрузки фильтра. В качестве первого шага попробуем скомпенсировать резонансный пик последовательным контуром.

Для компенсации резонансного пика потребовались соединенные последовательно резистор 8,2 Ом, индуктивность 20 мГн и емкость 400 мкФ. На рис. 3.24 показана АЧХ в сравнении с заданной, которую удалось получить после компенсации резонансного

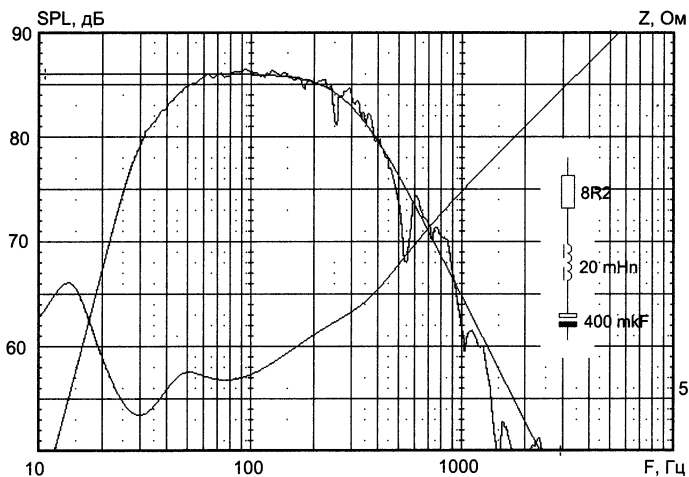


Рис. 3.24. Компенсация резонансного пика последовательным контуром позволила получить заданную АЧХ

пика, и зависимость от частоты входного сопротивления фильтра, нагруженного на динамическую головку. АЧХ свидетельствует об устранении нежелательных эффектов и с достаточной точностью, за исключением частот паразитных резонансов диффузора, соответствует заданной. В результате компенсации входное сопротивление в интервале частот 60–100 Гц снизилось до 7 Ом, минимальное значение входного сопротивления достигло 4 Ом на частоте 30 Гц. Указанные значения параметров находятся в пределах допустимых норм. Передаточная характеристика фильтра, нагруженного на головку с компенсированным резонансным пиком, показана на рис. 3.25. На частотах выше 30 Гц передаточная характеристика располагается ниже уровня 0 дБ, что свидетельствует об отсутствии нежелательных эффектов. На частоте ниже 30 Гц передаточная характеристика имеет подъем 0,9 дБ, являющийся результатом взаимодействия фильтра с резонансным пиком на частоте 17 Гц, который остался некомпенсированным.

Это взаимодействие не оказывает заметного влияния на качество воспроизведения низких частот. Основным недостатком рассмотренного технического решения является необходимость использования емкости 400 мкФ и индуктивности 20 мГн. В связи с этим целесообразно рассмотреть другие возможности

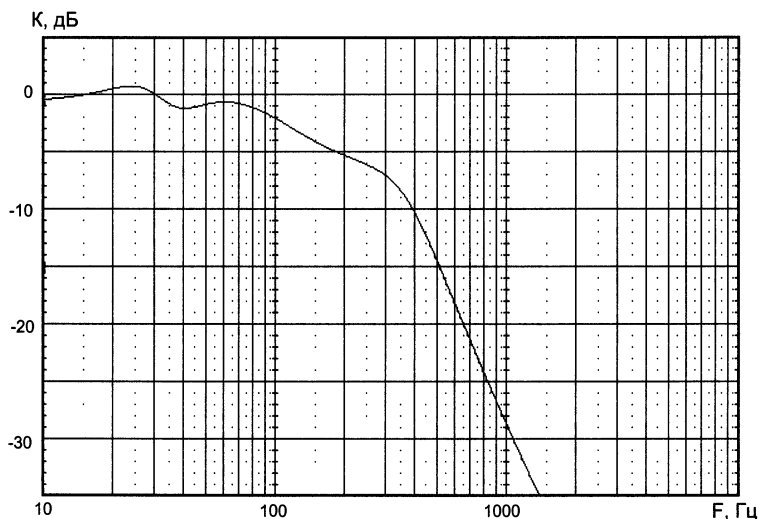


Рис. 3.25. Передаточная характеристика фильтра, обеспечивающего заданный спад АЧХ

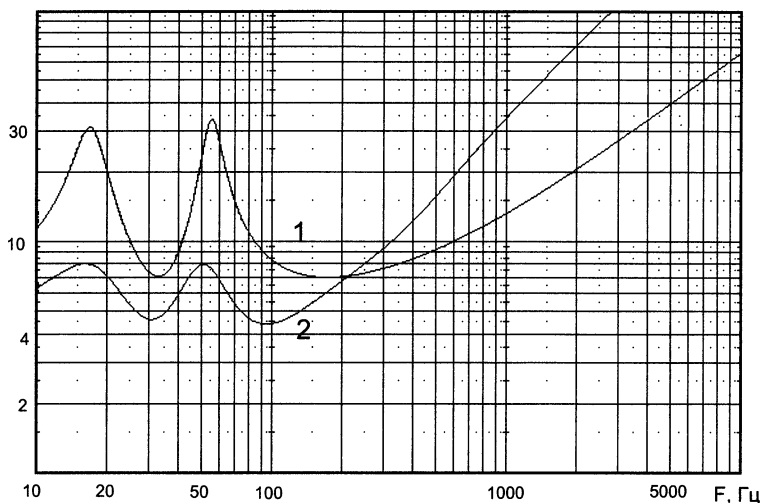
Z , Ом

Рис. 3.26. Зависимость от частоты сопротивлений с фильтром (2) и без фильтра (1)

снижения реактивности нагрузки, например, включение резистора параллельно динамической головке. Включив параллельно динамической головке резистор 10 Ом и проведя оптимизацию параметров фильтра, можно оценить полученные результаты. На рис. 3.26 показаны зависимости от частоты входного сопротивления системы фильтр-головка в сравнении с входным сопротивлением головки без фильтра. Входное сопротивление системы фильтр-головка находится в допустимых пределах при минимальном значении 4,5 Ом на частоте 90 Гц. Сравнение АЧХ, полученной в результате оптимизации фильтра, с исходной АЧХ головки Н1305 показывает (рис. 3.27), что полного устранения взаимодействия не произошло. В интервале частот 65–85 Гц имеет место нежелательная накачка дополнительной мощности в динамическую головку. Уровень накачки дополнительной мощности в динамическую головку очень мал, АЧХ головки с фильтром превышает исходную менее чем на 0,5 дБ. Передаточная характеристики фильтра, приведенная на рис. 2.38, имеет в указанном интервале частот подъем порядка 0,3 дБ, что также указывает на неполное устранение нежелательных эффектов взаимодействия. Несмотря на отмеченные недостатки, использование резистора для уменьшения реактивности

SPL, дБ

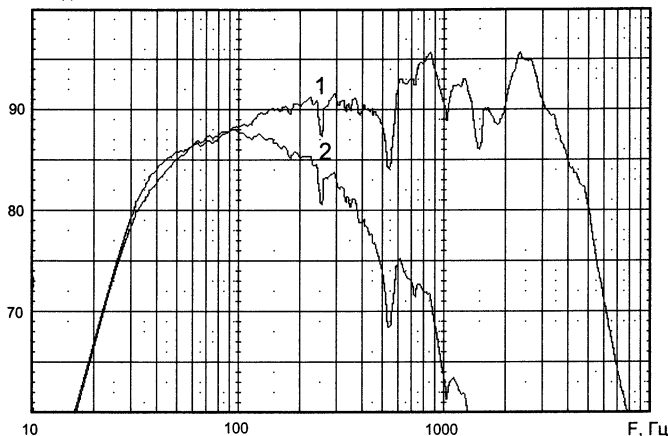


Рис. 3.27. АЧХ Н1305 без фильтра (1) и с фильтром (2) и резистором для снижения реактивности (2)

K, дБ

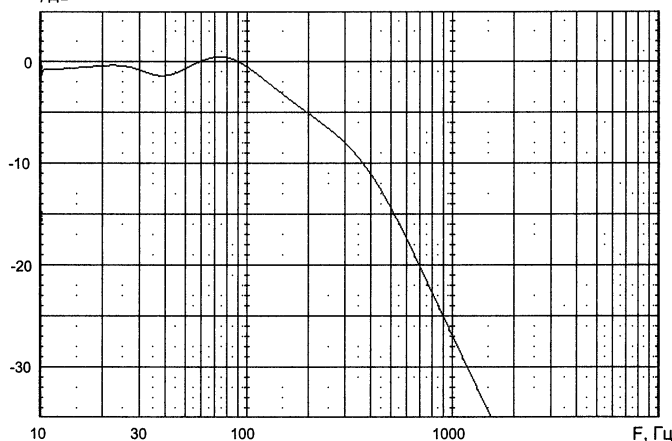


Рис. 3.28. Передаточная характеристика фильтра при использовании резистора для уменьшения реактивности

нагрузки фильтра является вполне удовлетворительным решением проблемы. Недостатки этого технического решения сказываются на качестве воспроизведения звука не сильнее, чем нелинейность подвеса или изменение добротности от прогрева звуковой катуш-

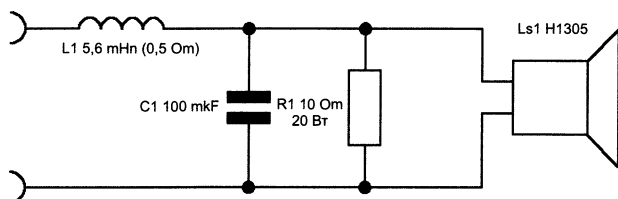


Рис. 3.29. Схема фильтра. R1 уменьшает реактивность нагрузки

ки. Отказ от дорогостоящих элементов ценой незначительного ухудшения качества представляется вполне приемлемым компромиссом. Схема фильтра с использованием шунтирующего резистора показана на рис. 3.29.

3.3. Трехполосный громкоговоритель на динамических головках SEAS H1288, H1262, H1149

В этом разделе будет рассмотрен трехполосный громкоговоритель на динамических головках средней ценовой категории. Использование динамических головок одного производителя упрощает их приобретение. Более того, на момент написания этого материала в московском представительстве фирмы «Аркада» кроме динамических головок можно приобрести элементы для кроссовера, соединительные провода, крепеж, терминалы и другие комплектующие для изготовления громкоговорителя.

Чертеж корпуса показан на рис. 3.30. Корпус изготовлен из МДФ толщиной 18 мм.

В верхней части корпуса предусмотрен отсек объемом около 5 литров, в котором размещены СЧ и ВЧ головка. Объем отсека служит акустическим оформлением СЧ головки. В задней панели отсека до сборки корпуса нужно просверлить отверстия для проводов, соединяющих СЧ и ВЧ головки с кроссовером. Отсек заполняется звукопоглотителем, для этой цели подходит синтепон, ватин или хлопчатобумажная вата.

В нижней части корпуса имеется перемычка с отверстием диаметром 180 мм. Перемычка служит не только для повышения жесткости корпуса, но также используется для дополнительного подавления стоячей волны между верхней и нижней стенками. Для этого отверстие в перемычке затянуто тканью, приклеенной по периметру. Затяжку тканью можно выполнить через отверстие для

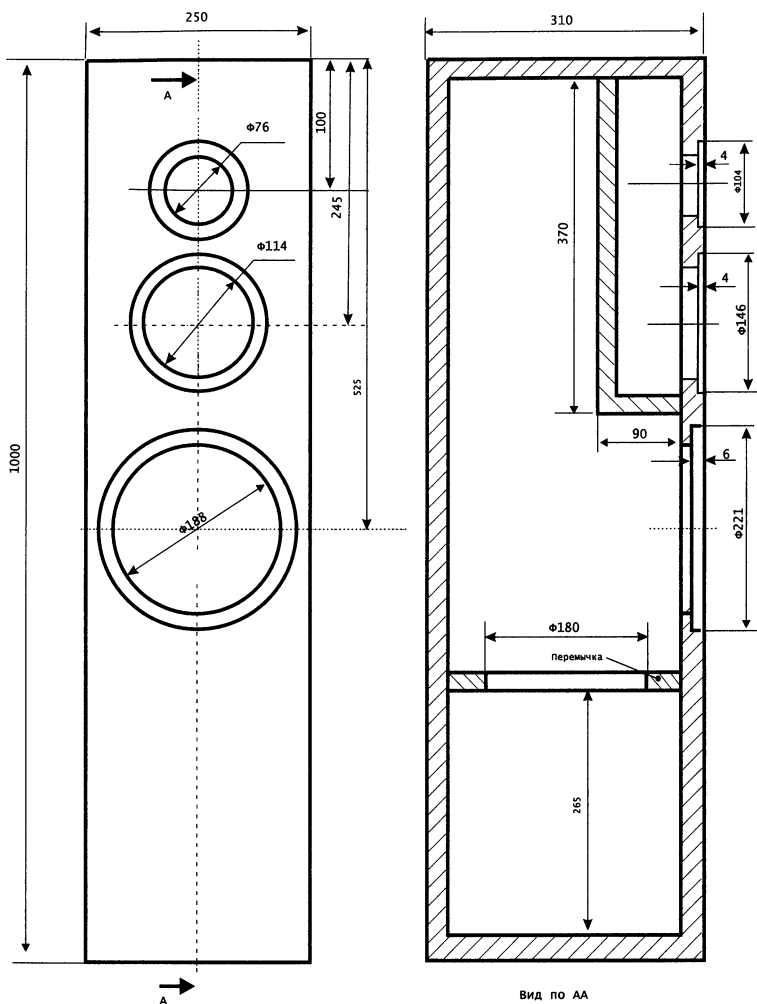


Рис. 3.30. Чертеж корпуса

НЧ головки. Натянуть ткань до сборки корпуса значительно легче, но этого делать нельзя, поскольку объем под перемычкой необходимо заполнить звукопоглотителем. АЧХ по звуковому давлению (рис. 3.32) и Z характеристика (рис. 3.35) свидетельствуют о том, что натянутая на отверстие ткань и заполнение корпуса звукопоглотителем оказались достаточно эффективными мерами

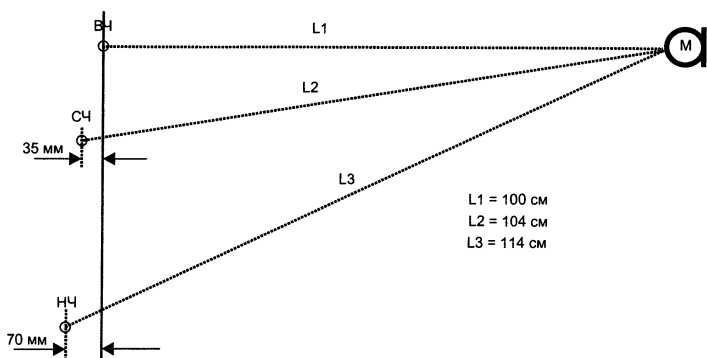


Рис. 3.31. Схема для определения для определения разности хода акустического сигнала

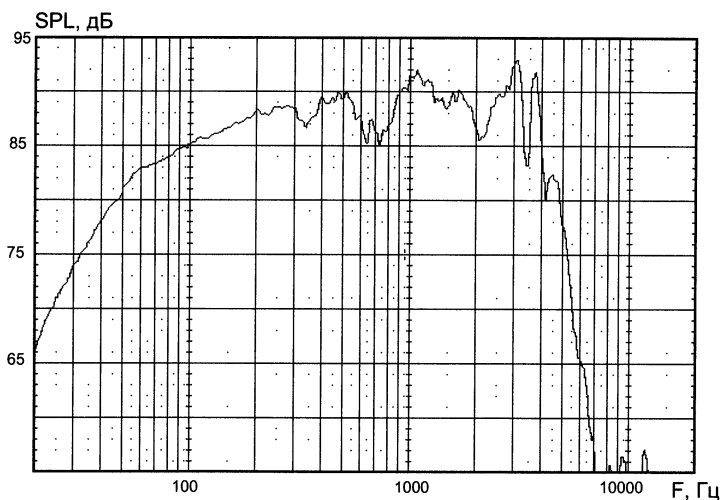


Рис. 3.32. АЧХ по звуковому давлению динамической головки Н1288

подавления стоячей волны между верхней и нижней стенками корпуса. На Z характеристике и на АЧХ по звуковому давлению вблизи частоты 150 Гц отсутствуют признаки проявления стоячей волны.

Выходные клеммы желательно разместить выше переключки, чтобы упростить разводку проводов. На боковые стенки корпуса наклеены полосы герлена, используемого в качестве вибропоглотителя. Объем корпуса выше переключки заполнен синтепоном.

Проектирование кроссовера начнем с определения задержек распространения акустического сигнала. На рис. 3.31 показана схема для определения разности хода акустического сигнала до измерительного микрофона, который располагается вдоль оси ВЧ головки на расстоянии 1 м. Поделив разность хода на скорость звука, мы получим задержки прихода сигнала от НЧ и СЧ головок относительно ВЧ головки. При моделировании суммарной АЧХ для головки Н1288 будет использоваться значение задержки 400 мксек, для Н1262 – 120 мксек. При моделировании кроссовера будут использоваться АЧХ, показанные на рис. 3.32, 3.33, 3.34, и Z характеристики, показанные на рис. 3.35, 3.36, 3.37. Определимся с чувствительностью громкоговорителя по АЧХ НЧ головки Н1288, которая показана на рис. 3.32. Выбор чувствительности 85 дБ представляется приемлемым компромиссом. При указанном значении чувствительности получается завал не более 5 дБ на частоте 50 Гц. При выборе частоты раздела между НЧ и СЧ головками Н1288 и Н1262 учтем, что НЧ головка выходит из поршневого режима работы на частотах выше 500 Гц. С другой стороны, СЧ головка имеет величину X_{max} 0,7 мм, что препятствует выбору низкой частоты раздела.

Расчеты показывают, что на частоте 500 Гц при звуковом давлении 93 дБ на расстоянии 1 м головка Н1262 находится на гра-

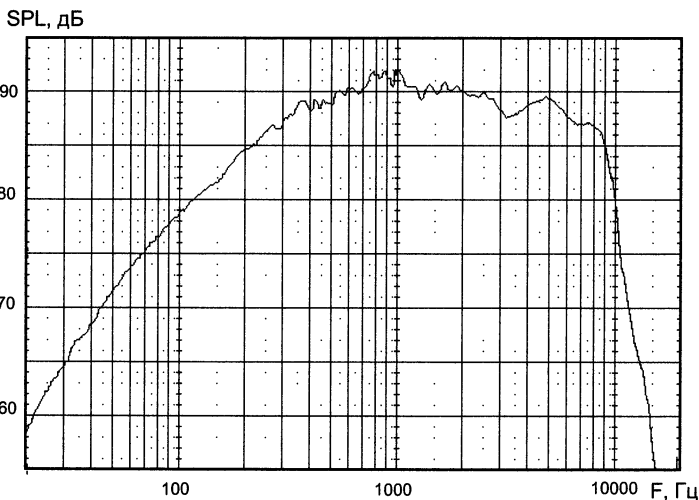


Рис. 3.33. АЧХ по звуковому давлению динамической головки Н1262

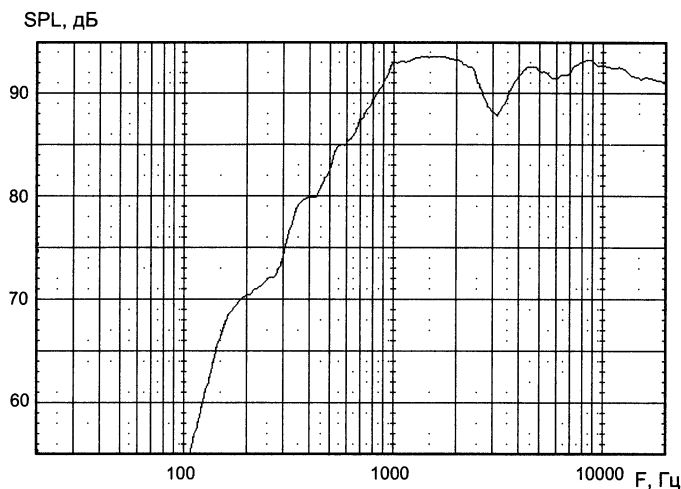


Рис. 3.34. АЧХ по звуковому давлению динамической головки Н1149

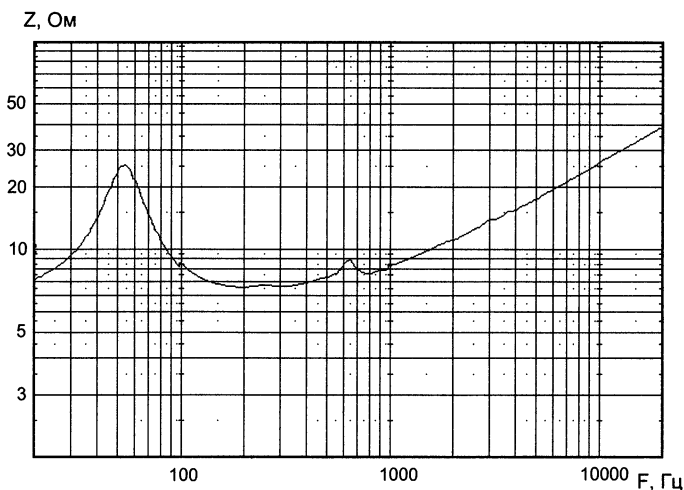


Рис. 3.35. Z характеристика динамической головки Н1288

нице линейного участка, т.е. амплитуда колебаний звуковой катушки составляет 0,7 мм. Выбор частоты раздела порядка 400 Гц со спадами Баттерворда второго порядка потребует для НЧ головки спада АЧХ с частотой среза 350 Гц, при этом излучение

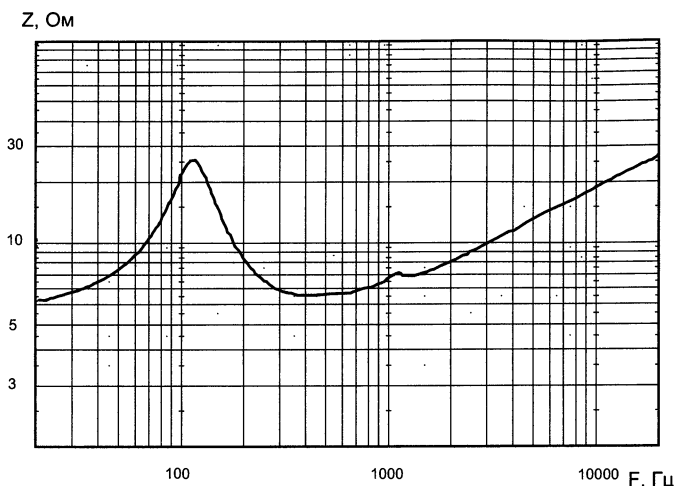


Рис. 3.36. Z характеристика динамической головки Н1262

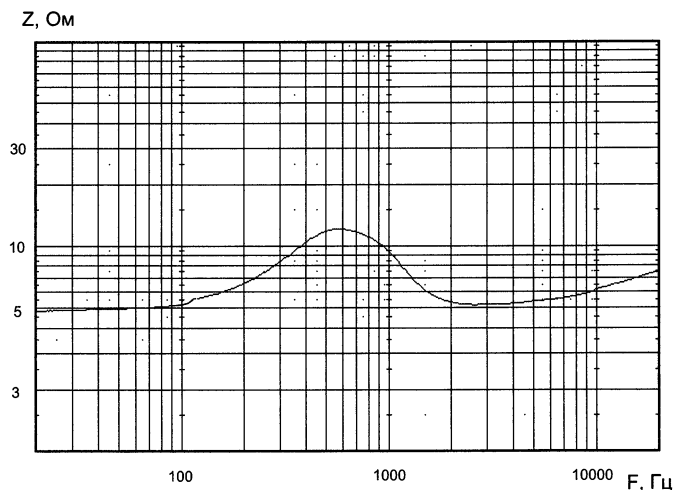


Рис. 3.37. Z характеристика динамической головки Н1149

в области выхода головки из поршневого режима будет заметно ослаблено фильтром. Для СЧ головки потребуется спад АЧХ с частотой среза 500 Гц. Учитывая некоторую напряженность ситуации с перегрузкой СЧ головки низкими частотами, в качестве



дополнительной меры по защите от перегрузки, примем решение скомпенсировать ее резонансный пик последовательным RLC контуром. При выборе частоты раздела между СЧ и ВЧ головками нам придется в основном учитывать ограничения, связанные с параметрами СЧ головки Н1262: высокое (0,74 мГн) значение индуктивности звуковой катушки и сужение диаграммы направленности на частотах выше 3000 Гц. Негативное влияние указанных ограничений ослабевает при снижении частоты раздела. С другой стороны, взаимное влияние ФВЧ и ФНЧ, ограничивающих полосу рабочих частот СЧ головки, возрастает с увеличением порядка фильтров и уменьшением отношения частот среза. Это обстоятельство не позволяет снизить частоту раздела по критерию предельных возможностей ВЧ головки, как это делается в двухполосных системах. С учетом изложенных выше соображений будем считать приемлемым компромиссом соотношение частот среза ФВЧ и ФНЧ для СЧ головки равным 5, а в качестве заданных, выберем спады Баттерворда 3-го порядка с частотой среза 2500 Гц. С учетом разноса частот среза для фильтров 3-го порядка, заданная АЧХ для ВЧ головки будет иметь частоту среза 3000 Гц. В таком случае частота раздела между СЧ и ВЧ головкой окажется в интервале между 2500 и 3000 Гц, точнее 2730 Гц. Здесь, мне кажется, уместно отметить, что выбор частот раздела базируется на чисто технических соображениях, связанных с возможностями динамических головок. Для выбора частот раздела на основе требований музыкального характера нужны динамические головки более высокого класса. В первую очередь это относится к СЧ головке Н1262, параметры которой фактически определили выбор частот раздела.

Определившись с частотами раздела и характеристиками заданных АЧХ, приступаем к оптимизации фильтров. В процессе оптимизации будем по возможности стремиться к использованию номиналов резисторов, конденсаторов и индуктивностей из стандартного ряда.

В трехполосных системах оптимизацию фильтров удобно начинать со среднечастотного звена. Среднечастотное звено наиболее сложное из-за взаимного влияния фильтров. Это повышает вероятность корректировки частот раздела. Подстроить НЧ и ВЧ звенья громкоговорителя под откорректированное СЧ звено проще, чем выполнить это в обратном порядке.

Первый этап проектирования состоит в подборе делителя напряжения, обеспечивающего чувствительность 85 дБ, и в компенса-

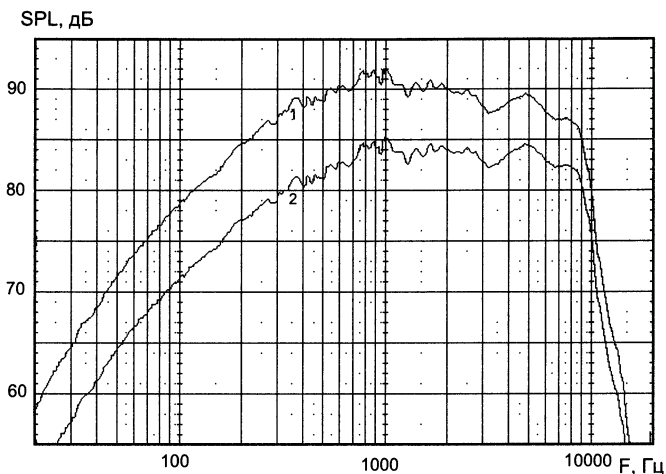


Рис. 3.38. АЧХ Н1262 после приведения к уровню 85 дБ и компенсации резонансного пика (2) в сравнении с исходной (1)

ции резонансного пика на Z характеристике. На рис. 3.38 и 3.39 показаны АЧХ и Z характеристика динамической головки Н1262 после приведения к уровню 85 дБ и компенсации резонансного пика. Следующий этап состоит в подгонке АЧХ под заданную. Заданная АЧХ соответствует передаточным характеристикам фильтров Баттерворда: ФВЧ — второго порядка с частотой среза 500 Гц, ФНЧ — третьего порядка с частотой среза 2500 Гц. Для формирования спада ФВЧ второго порядка можно использовать электрический фильтр первого порядка, поскольку собственный спад АЧХ Н1262 (рис. 3.33) внесет существенный вклад в формирование заданной АЧХ. Для формирования спада ФНЧ третьего порядка попытаемся использовать электрический фильтр второго порядка. Результат оптимизации показан на рис. 3.40. Спады АЧХ, сформированные в результате оптимизации фильтров, лежат несколько выше заданной кривой. Выполняя условие использования номиналов элементов кроссовера из стандартного ряда, не удалось с более высокой точностью подогнать АЧХ под заданную. На рис. 3.41 показана схема среднечастотного звена кроссовера, работающего на головку Н1262. Все номиналы элементов соответствуют стандартному ряду значений.

Разработку фильтра для НЧ головки Н1288 проводим с учетом специфического взаимодействия с фильтром нижних частот, поскольку резонансная частота динамической головки в акустичес-

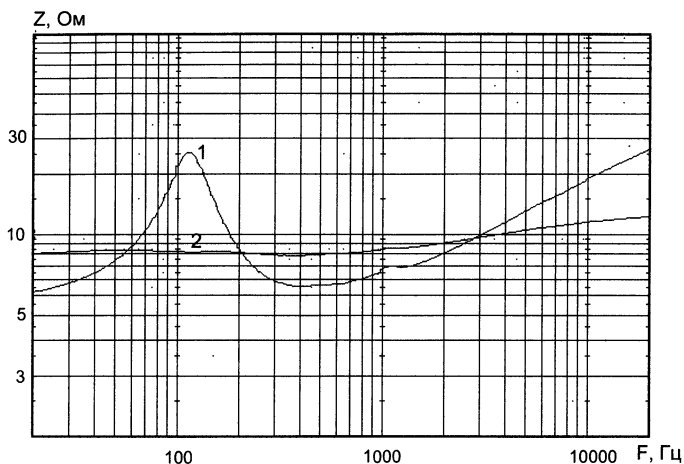


Рис. 3.39. Z характеристика H1262 после приведения к уровню 85 дБ и компенсации резонансного пика (2) в сравнении с исходной (1)

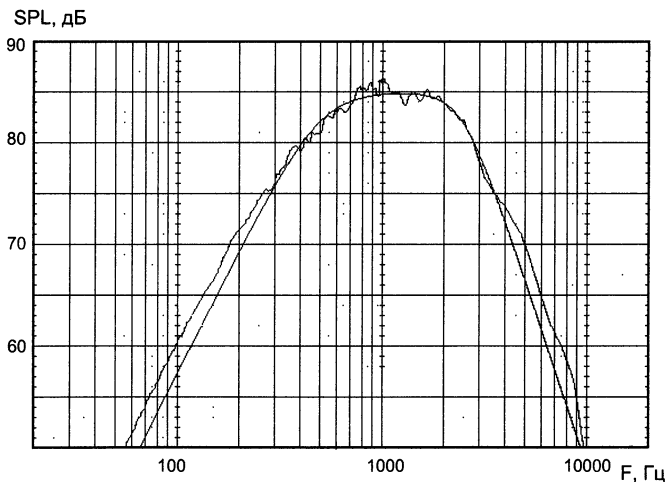


Рис. 3.40. АЧХ H1262 после оптимизации фильтров в сравнении с заданной

ком оформлении 55 Гц, частота среза заданной АЧХ 350 Гц и отношение частот 6,36. Подключение параллельно динамической головке H1288 резистора 10 Ом позволило сформировать заданную

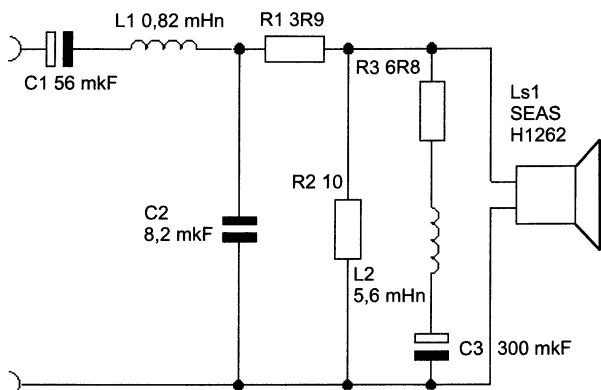


Рис. 3.41. Схема фильтра для динамической головки H1262

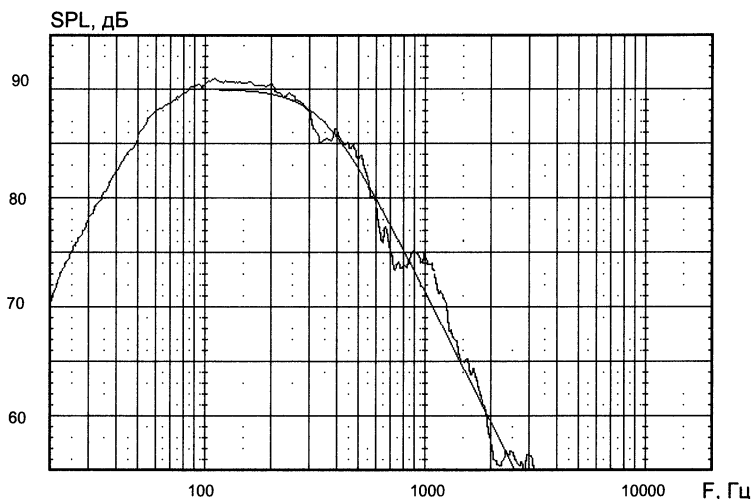


Рис. 3.42. АЧХ H1288 после оптимизации фильтров в сравнении с заданной

АЧХ 9 (рис. 3.42). Уровень накачки дополнительной мощности не превышает 1 дБ. На рис. 3.43 показана схема фильтра для динамической головки H1288. Все элементы фильтра имеют номиналы, соответствующие стандартному ряду значений. «Плюс» НЧ головки подсоединен к земляной шине, что указывает на противофазное включение НЧ и СЧ головки.

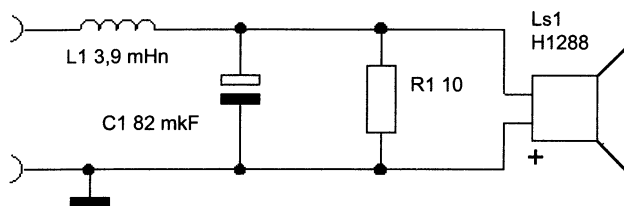


Рис. 3.43. Схема фильтра для динамической головки H1288

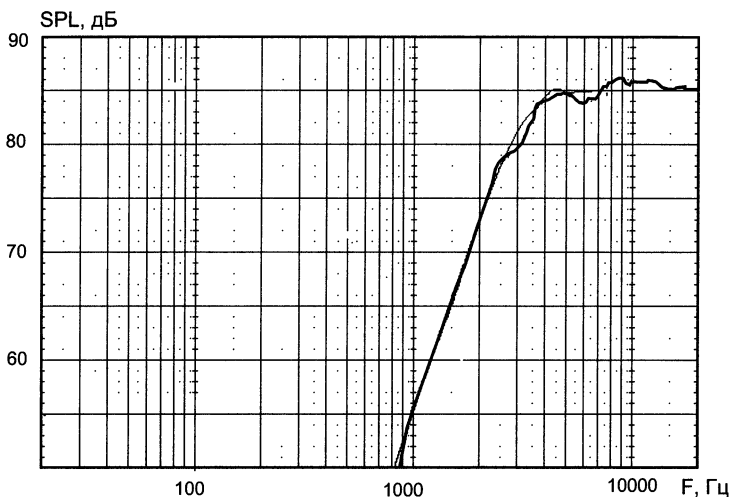


Рис. 3.44. АЧХ H1149 после оптимизации фильтров в сравнении с заданной

Для ВЧ головки H1149 требуется сформировать заданную АЧХ, соответствующую передаточной характеристике ФВЧ Баттерворда третьего порядка с частотой среза 3000 Гц. Для этой цели потребуются делитель напряжения, приводящий звуковое давление к уровню 85 дБ, и электрический фильтр третьего порядка. Возможность использования электрического фильтра второго порядка представляется сомнительной из-за формы АЧХ, показанной на рис. 3.34. При формировании заданной АЧХ заметно скажется провал на частоте 3000 Гц и подъем в интервале частот 1000–2500 Гц. АЧХ H1149, полученная после оптимизации параметров фильтра, в сравнении с заданной показана на рис. 3.44. Схема фильтра для динамической головки H1149 показана на рис. 3.45.

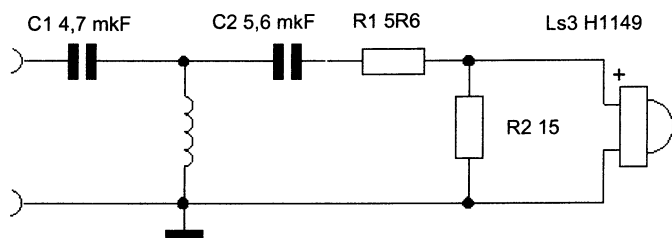


Рис. 3.45. Схема фильтра для динамической головки H1149

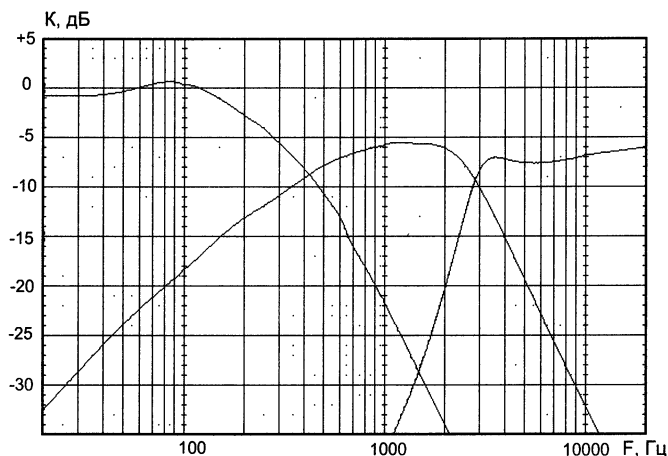


Рис. 3.46. Передаточные характеристики фильтров кроссовера

На рис. 3.46 показаны передаточные характеристики фильтров кроссовера. Передаточная характеристика фильтра верхних частот, работающего с ВЧ головкой H1149, имеет небольшой подъем на частоте 3500 Гц, который может оказать влияние на характер звучания ВЧ головки. Это обстоятельство нужно принять во внимание при контрольных прослушиваниях прототипа громкоговорителя. Не исключено, что придется использовать фильтр с меньшей добротностью, даже если это приведет к увеличению неравномерности АЧХ. На рис. 3.47 показан результат моделирования суммарной АЧХ с учетом задержек, рассчитанных согласно схеме (рис. 3.31).

На следующем этапе работы проводим измерения, собрав макет кроссовера в соответствии с разработанными схемами.

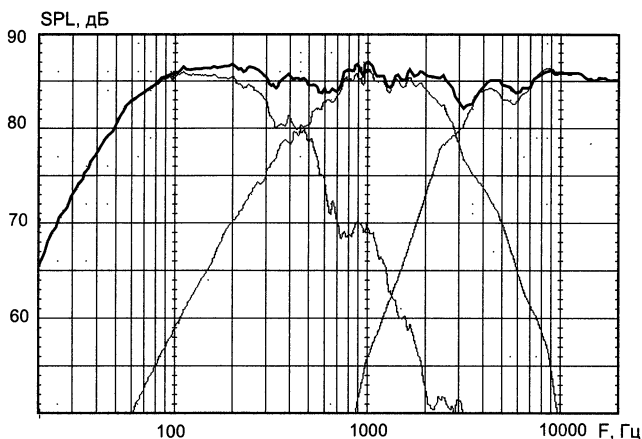


Рис. 3.47. Результат моделирования суммарной АЧХ с задержками H1288 — 400 мксек, H1262 — 120 мксек

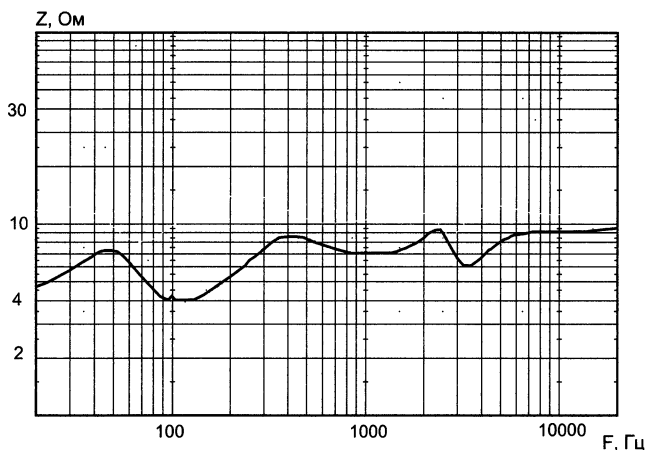


Рис. 3.48. Z характеристика громкоговорителя, измеренная в режиме генератора тока

На рис. 3.48 показана Z характеристика громкоговорителя, измеренная LMS в режиме генератора тока. Модуль импеданса громкоговорителя укладывается в интервал от 4 до 9,5 Ом. Фазовый угол, характеризующий реактивную составляющую импеданса, не превышает 45 градусов.

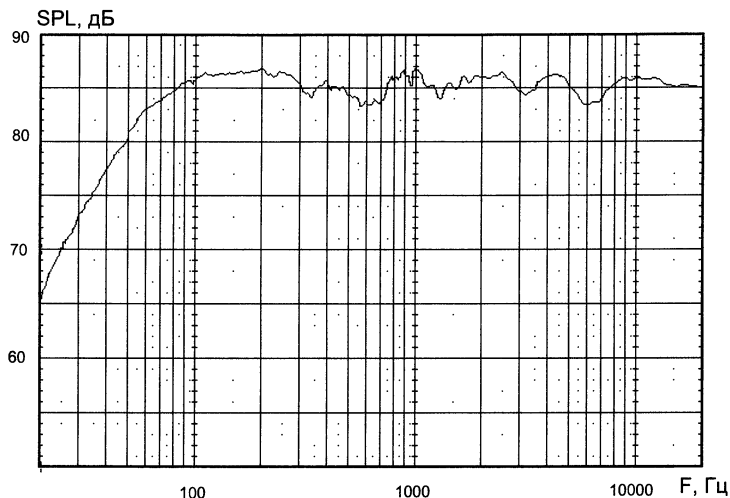


Рис. 3.49. АЧХ трехполосного громкоговорителя, измеренная вдоль оси ВЧ головки Н1149

Z характеристика громкоговорителя выглядит несколько необычно, поскольку на ней сильно сглажен резонансный пик НЧ головки. Это связано с подключением параллельно НЧ головке резистора 10 Ом. В целом параметры Z характеристики лежат в пределах, обеспечивающих комфортную нагрузку усилителя.

На рис. 3.49 показана АЧХ громкоговорителя, измеренная вдоль оси ВЧ головки.

Сравнение измеренной АЧХ с результатом моделирования показано на рис. 3.50.

Различия в измеренной и промоделированной АЧХ находятся в интервале частот 2000–6000, который является областью совместного излучения СЧ и ВЧ головок. Наиболее вероятно, что эти различия связаны с погрешностями определения задержек распространения акустических сигналов.

В заключение рассмотрим второй вариант фильтра для ВЧ головки Н1149. Выше при рассмотрении передаточных характеристик фильтров кроссовера было высказано предположение о том, что немонотонный характер передаточной характеристики фильтра ВЧ головки может привести к специфической окраске звучания на высоких частотах. В связи с этим целесообразно разработать второй вариант фильтра с монотонной передаточной

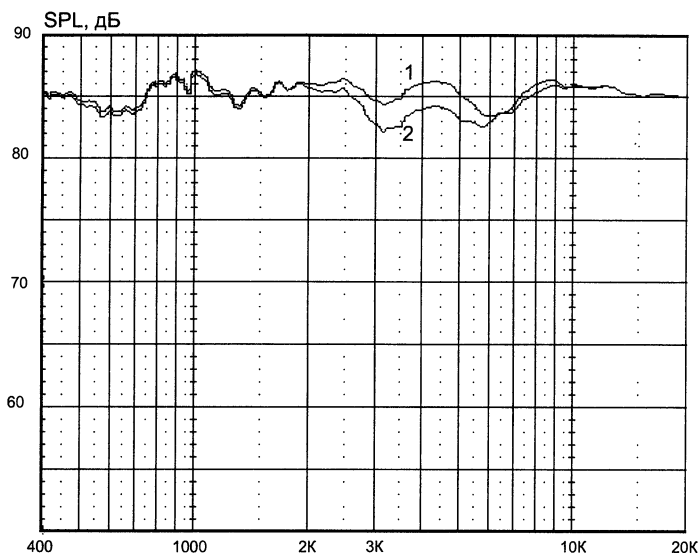


Рис. 3.50. Сравнение измеренной АЧХ (1) с результатом моделирования (2)

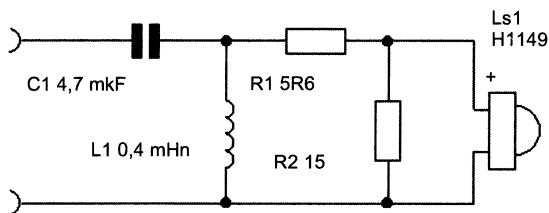


Рис. 3.51. Второй вариант схемы фильтра ВЧ головки Н1149

характеристикой. При желании читатели могут попробовать оба варианта фильтров и по результатам прослушивания выбрать наилучший. На рис. 3.51 показана схема второго варианта фильтра. На рис. 3.52 показана передаточная характеристика второго варианта фильтра для головки Н1149. На рис. 3.53 показана АЧХ Н1149 со вторым вариантом фильтра, которая имеет значительные отклонения от заданной. Использование второго варианта фильтра приведет к некоторому увеличению неравномерности АЧХ громкоговорителя. Оценить в полной мере преимущества и недостатки вариантов фильтра можно только по результатам прослушивания.

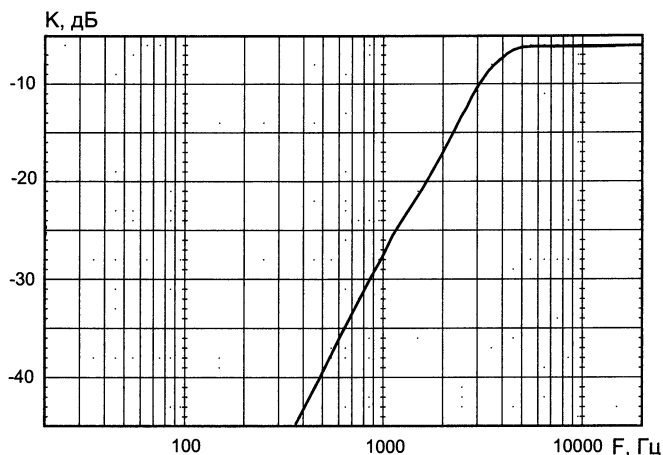


Рис. 3.52. Передаточная характеристика фильтра ВЧ головки Н1149 (второй вариант)

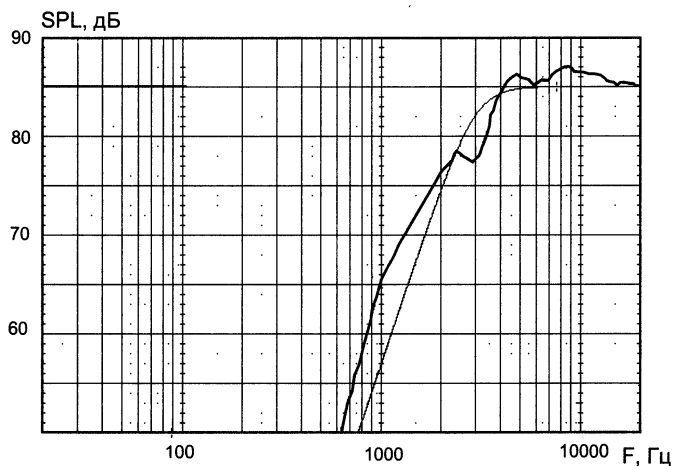


Рис. 3.53. АЧХ Н1149 со вторым вариантом фильтра в сравнении с заданной

А. Семенов, работавший над этим проектом с помощью автора, отдал предпочтение второму варианту фильтра для ВЧ головки, несколько изменив номиналы резисторов делителя напряжения с целью увеличения уровня звукового давления ВЧ головки. Внешний вид громкоговорителя А. Семенова показан на фото 9.

3.4. Модульный громкоговоритель с комбинированным кроссовером

Ниже мы рассмотрим принцип построения громкоговорителя с комбинированным кроссовером, использующим пассивные элементы для разделения частот и согласования по звуковому давлению СЧ и ВЧ головок. Для низкочастотного звена громкоговорителя в комбинированном кроссовере используется электронный фильтр, работающий на отдельный усилитель мощности. Блок-схема громкоговорителя с комбинированным кроссовером показана на рис. 3.54. На входные клеммы громкоговорителя подается сигнал с усилителя мощности, который поступает на пассивный кроссовер СЧ-ВЧ блока и на масштабирующий усилитель. Переменный резистор в масштабирующем усилителе позволяет регулировать уровень звукового давления низкочастотного звена. Для интеграции в систему звуковоспроизведения громкоговорителя с комбинированным кроссовером не требуется предварительный усилитель, поскольку он отличается от обычного громкоговорителя

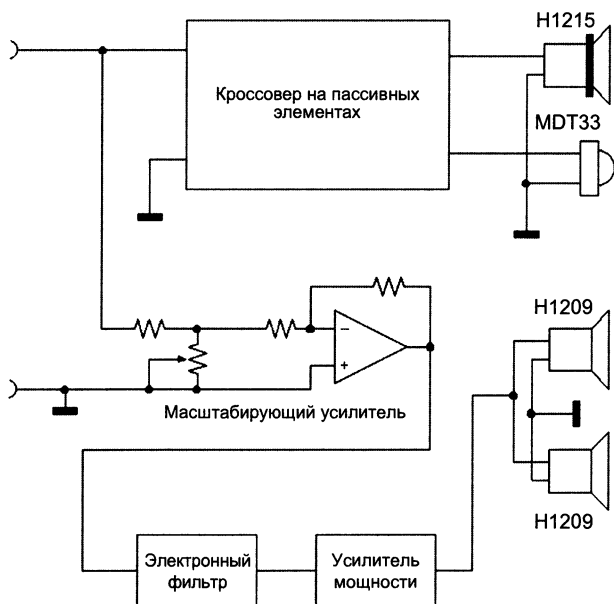
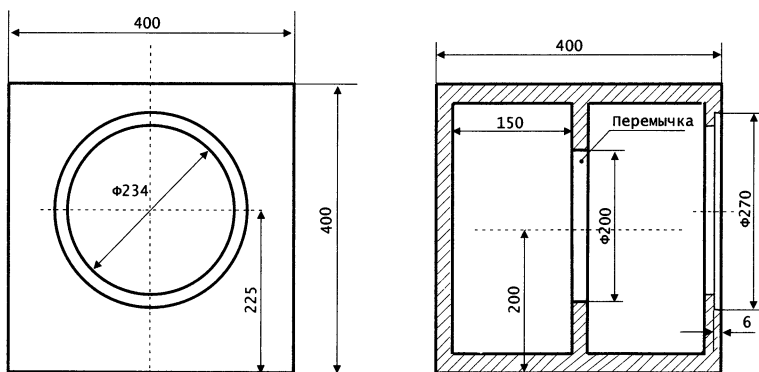


Рис. 3.54. Блок-схема громкоговорителя с комбинированным кроссовером

только наличием кабеля для подключения к сети и выключателя питания. В промышленных изделиях подобная структура практически не используется по экономическим соображениям, так как требует дополнительного усилителя мощности с источником питания. Для любительских целей подобное техническое решение может быть вполне приемлемо, поскольку снимает ряд технических трудностей, связанных с воспроизведением низких частот, и позволяет легко проводить модернизацию конструкции. В целях удобства модернизации корпус громкоговорителя выполнен в виде набора модулей. На рис. 3.55 и 3.56 показаны чертежи корпусов модулей. На фото 10 показан набор модулей громкоговорителя. Для воспроизведения низких частот в громкоговорителе используются динамические головки SEAS H1209, для средних — SEAS H1215 и для высоких частот — MOREL MDT33. Низкочастотные головки работают в закрытых корпусах объемом 40 литров, заполненных изовором. Для среднечастотной головки используется закрытый корпус с полезным объемом 6 литров, заполненный синтепоном.

Выбор динамических головок для громкоговорителя сделан с учетом возможности его использования в помещении площадью 40–50 кв. м, при этом особое внимание было уделено качественному воспроизведению низких частот. В связи с этим была проведена оценка согласования НЧ и СЧ головок по предельным значениям максимального звукового давления. Среднечастотная головка H1215 по критерию смещаемого объема воздуха на частоте 300 Гц может обеспечить звуковое давление 108 дБ на рас-



Материал МДФ 25 мм

Рис. 3.55. Чертеж корпуса низкочастотного модуля

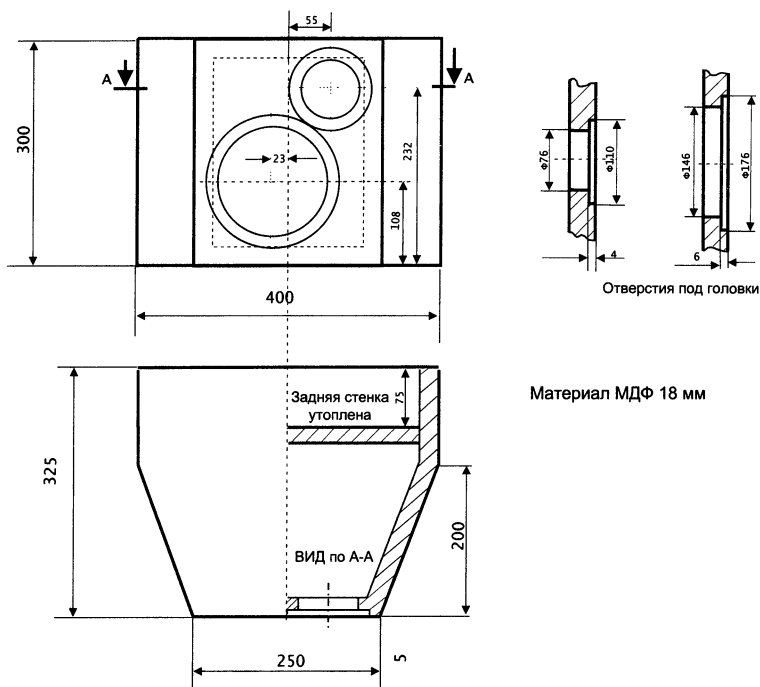


Рис. 3.56. Чертеж корпуса среднечастотного модуля

стоянии 1 м. Две НЧ головки Н1209 способны обеспечить на частоте 50 Гц звуковое давление 107,5 дБ. Для помещений площадью не более 20 кв. м, мне представляется, можно ограничиться предельным уровнем звукового давления 101,5 дБ на расстоянии 1 м и использовать в громкоговорителе одну НЧ головку.

Приведенная выше оценка предельных значений звукового давления СЧ и НЧ головок по критерию смещаемого объема вовсе не означает, что СЧ головка Н1215 будет качественно воспроизводить музыкальную программу с уровнем звукового давления 108 дБ. Оценка предельного уровня звукового давления по критерию смещаемого объема применима только для воспроизведения низких частот и для СЧ головки Н1215 означает, что амплитуда колебаний ее звуковой катушки не выйдет из линейного участка хода на частотах выше 300 Гц. Наиболее вероятно, что на средних частотах при больших уровнях сигналы искажения головки Н1215 будут определяться нелинейностью индуктивности

звуковой катушки, которая на частоте 1000 Гц имеет величину 1,2 мГн. Модернизация громкоговорителя в этом направлении возможна путем замены Н1215 на W18NX 001 (E0042) из серии EXCEL, индуктивность звуковой катушки которой уменьшена до величины 0,43 мГн за счет введения в зазор медных колец. Такая модернизация не потребует переделки корпуса, поскольку Н1215 и E0042 имеют одинаковые корзины. Кроссовер при такой модернизации также не потребует существенных изменений.

При проектировании кроссовера мы будем пользоваться схемой для определения разности хода акустического сигнала, которая показана на рис. 3.57. Для моделирования суммарной АЧХ громкоговорителя с одной низкочастотной головкой примем величину задержки 176 мксек, что соответствует разности хода 6 см.

Для двух низкочастотных головок примем усредненное значение задержки 443 мксек, что соответствует разности хода 16 см. Усредненное значение задержки позволяет для моделирования пользоваться суммарной АЧХ двух параллельно соединенных НЧ головок, измеренной вдоль оси ВЧ головки. Усреднение значений задержки для двух динамических головок не совсем корректно, но, как показывает практика использования программы LEAP, дает лучшее совпадение с результатами измерений, чем суммирование АЧХ громкоговорителей по отдельности с разными задержками.

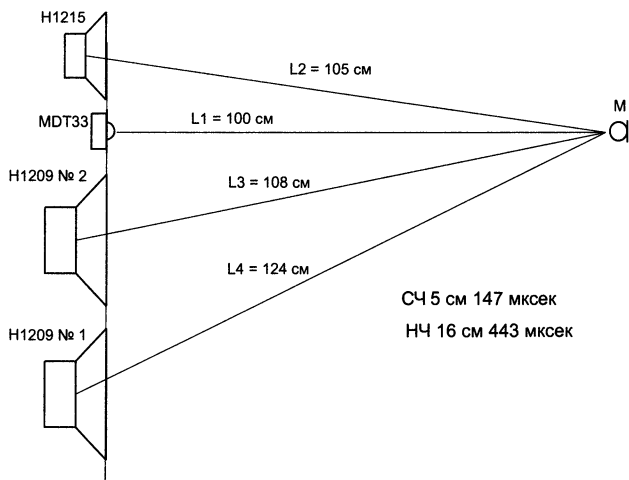


Рис. 3.57. Схема для определения разности хода акустического сигнала

Суммирование АЧХ громкоговорителей по отдельности с разными задержками с помощью программы LEAP дает большую погрешность при расчете интерференционной картины, связанную с ошибками вычисления фазы и с математическим описанием динамической головки как устройства, работающего в поршневом режиме. При использовании для моделирования непосредственно измеренной АЧХ двух головок эта погрешность устраняется.

Ошибка моделирования, связанная с некорректным определением задержки, для НЧ головок получается небольшой, поскольку на низких частотах (как мы выяснили в главе 2) влияние задержки на форму АЧХ невелико.

Исходными данными для проектирования кроссовера являются АЧХ по звуковому давлению и Z характеристики динамических головок, которые показаны на рис. 3.58–3.63. Проектирование кроссовера начнем со среднечастотной части громкоговорителя. Для разделения сигнала между среднечастотным и низкочастотным звеном воспользуемся электрическими фильтрами первого порядка, чтобы получить широкую область совместного излучения СЧ и НЧ головок. Расширение области совместного излучения обеспечит при воспроизведении низких частот поддержку «медленных» НЧ головок ($BL/m = 190$) относительно «быстрой» ($BL/m = 514$) СЧ головкой.

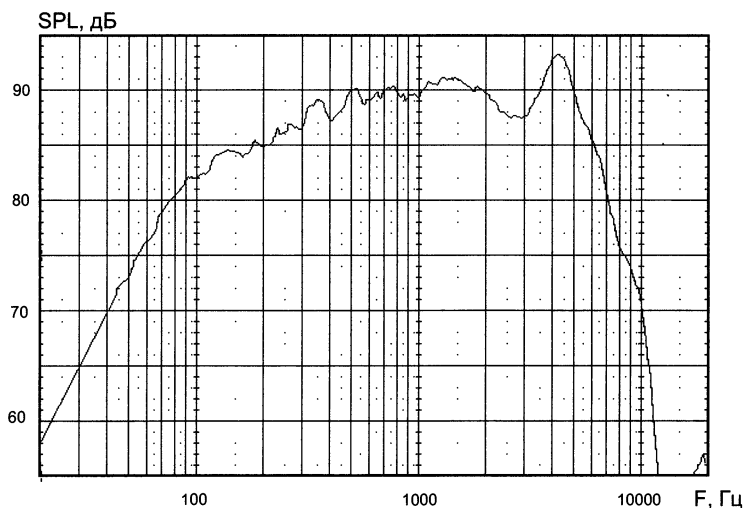


Рис. 3.58. АЧХ СЧ головки Н1215, измеренная вдоль оси ВЧ головки

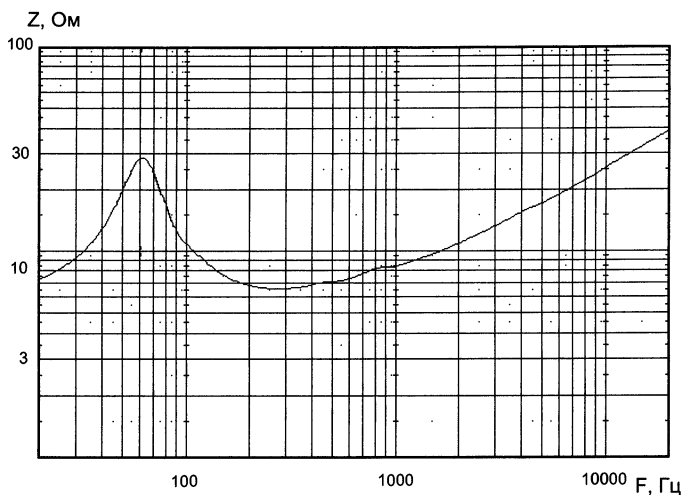


Рис. 3.59. Z характеристика СЧ головки Н1215

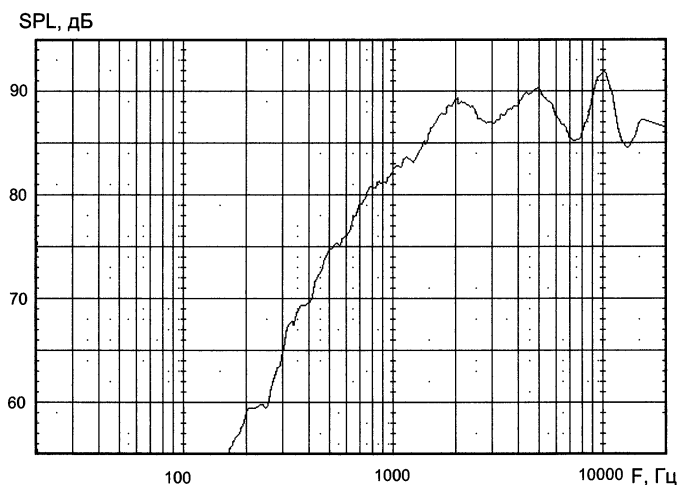


Рис. 3.60. АЧХ ВЧ головки MDT33, измеренная вдоль оси

Наиболее вероятно, что электрические фильтры первого порядка позволят сформировать спады АЧХ близкие к передаточным характеристикам фильтров второго порядка. Для спадов второго порядка требуется разнос частот среза относительно частоты раздела.

Выберем частоту раздела между СЧ и НЧ головкой 300 Гц. При частоте раздела 300 Гц в качестве заданного для СЧ головки подойдет спад Баттерворда второго порядка с частотой среза 400 Гц.

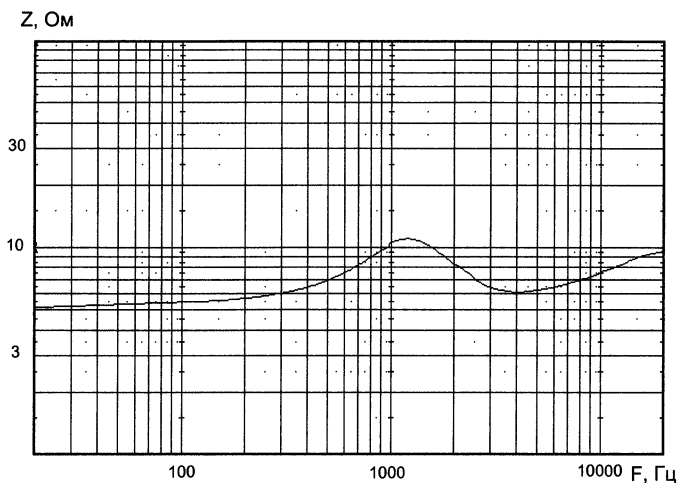


Рис. 3.61. Z характеристика ВЧ головки MDT33

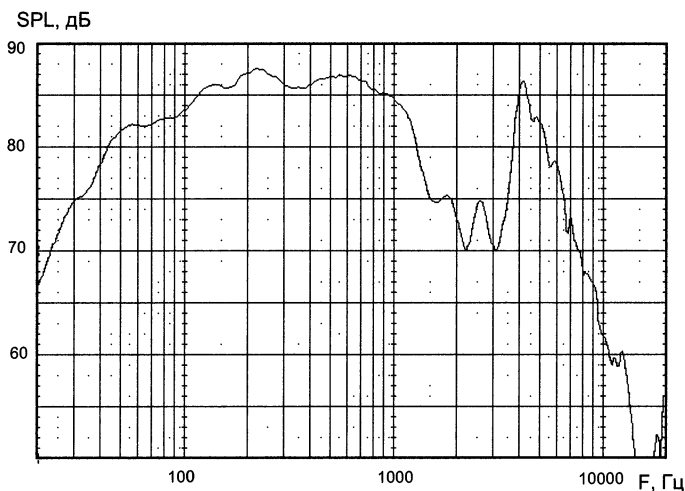


Рис. 3.62. АЧХ НЧ головки Н1209, измеренная вдоль оси ВЧ головки

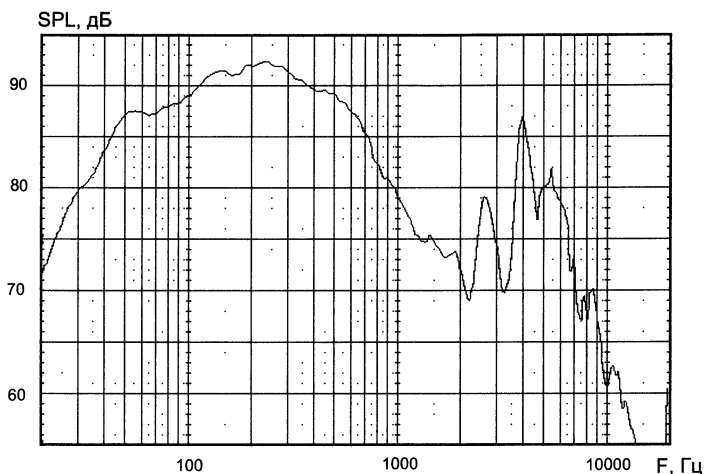


Рис. 3.63. АЧХ двух соединенных параллельно НЧ головок Н1209, измеренная вдоль оси ВЧ головки

При выборе частоты раздела с ВЧ головкой нам придется искать компромисс между двумя противоположными тенденциями. С одной стороны, частоту раздела желательно выбрать как можно ниже в целях ослабления влияния задержек на суммарную АЧХ и снижения искажений, связанных с нелинейностью индуктивности звуковой катушки.

Кроме того, необходимо эффективно подавить подъем АЧХ СЧ головки на частоте 4300 Гц (см. рис. 3.58). С другой стороны, желательно сдвинуть частоту раздела выше, чтобы расширить полосу частот, воспроизводимых СЧ головкой, и за счет этого снизить взаимное влияние фильтров и улучшить передачу импульсного сигнала. Приемлемым компромиссом оказалась частота раздела 2000 Гц. В качестве заданного на верхней частоте раздела выбран спад АЧХ, соответствующий передаточной характеристике фильтра Линквица-Рейли четвертого порядка. На рис. 3.64 показана АЧХ по звуковому давлению СЧ головки в сравнении с заданной, полученная в результате оптимизации фильтров. Рис. 3.64 свидетельствует о том, что достаточно хорошее совпадение АЧХ с заданной формой удалось получить только до уровня минус 15 дБ относительно плоской части. Этого вполне достаточно для получения суммарной АЧХ с хорошей равномерностью в областях совместного излучения, отклонения от задан-

ной АЧХ приведут к некоторому расширению областей совместного излучения. Схема фильтра СЧ головки Н1215 показана на рис. 3.65. Нижний спад АЧХ СЧ головки сформирован электрическим фильтром первого порядка, в котором работает емкость $C1$. Резистор $R1$ служит для снижения реактивной составляющей импеданса, на который нагружена емкость $C1$. Электрический фильтр второго порядка $L1, C2$ формирует верхний спад АЧХ.

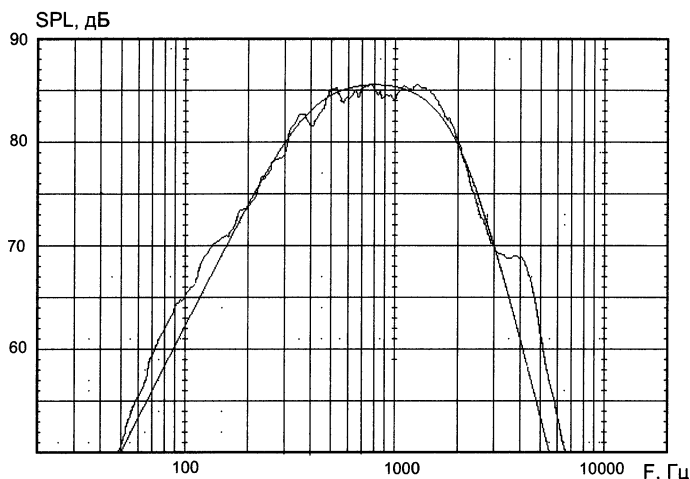


Рис. 3.64. АЧХ СЧ головки Н1215, работающей с фильтром, в сравнении с заданной

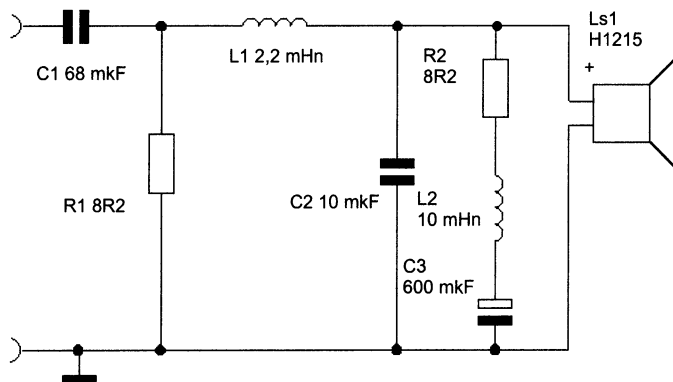


Рис. 3.65. Схема фильтра СЧ головки Н1215

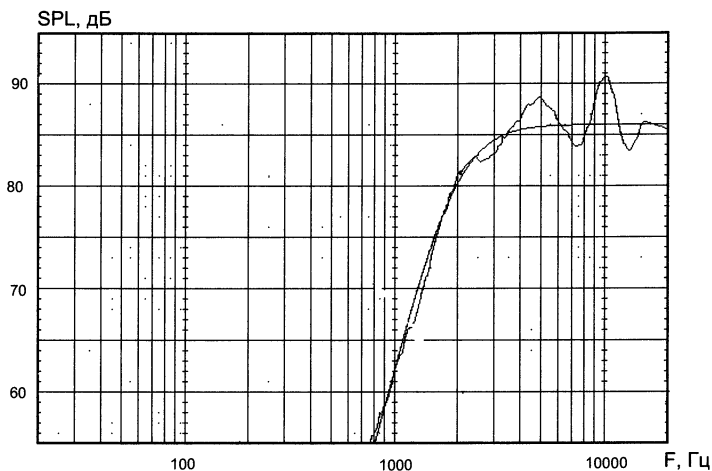


Рис. 3.66. АЧХ ВЧ головки, работающей с фильтром в сравнении с заданной

Последовательный контур R3, L2, C3 компенсирует резонансный пик на Z характеристике СЧ головки. Без компенсации резонансного пика отклонение АЧХ от заданной формы слишком велико, характер отклонения приводит к интерференции в области совместного излучения.

На рис. 3.66 показана АЧХ ВЧ головки с оптимизированным фильтром в сравнении с заданной. На спаде АЧХ заданная форма выдерживается весьма строго, в полосе прозрачности фильтра отклонения от заданной формы определяются неравномерностью АЧХ ВЧ головки. Результат оптимизации фильтра ВЧ головки можно считать вполне удовлетворительным. Малые отклонения от заданной формы на спаде позволяют предполагать, что в области совместного излучения получится небольшая неравномерность АЧХ. Характер неравномерности АЧХ ВЧ головки выше области совместного излучения на данном этапе разработки не вызывает беспокойства за качество воспроизведения высоких частот.

Схема фильтра ВЧ головки показана на рис. 3.67. Электрический фильтр второго порядка C1, L1 формирует спад АЧХ, соответствующий передаточной характеристике фильтра Линквица-Рейли четвертого порядка. Делитель напряжения R1, R2 приводит среднее звуковое давление ВЧ головки к уровню 86 дБ.

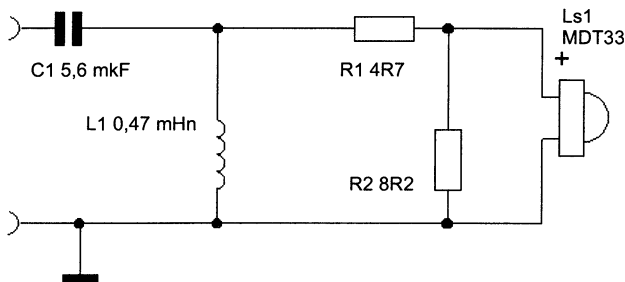


Рис. 3.67. Схема фильтра ВЧ головки

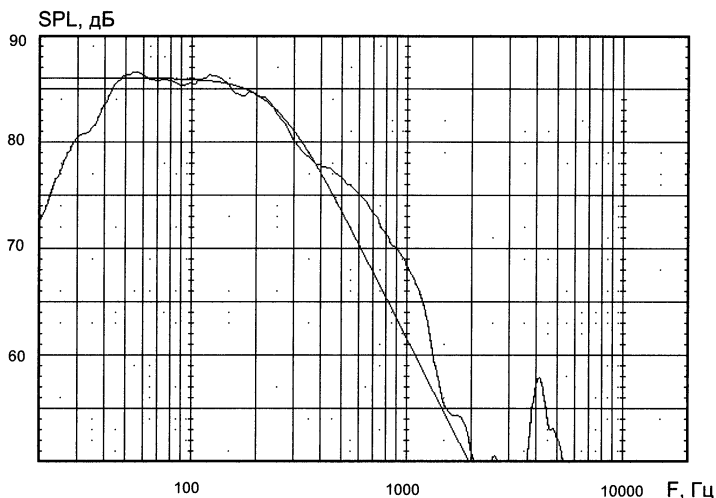


Рис. 3.68. АЧХ НЧ головки Н1209, работающей с фильтром, в сравнении с заданной

На рис. 3.68 показана АЧХ НЧ головки Н1209, работающей с электронным фильтром и усилителем мощности, в сравнении с заданной. Заданная форма спада АЧХ соответствует передаточной характеристике фильтра Баттерворда второго порядка с частотой среза 250 Гц. АЧХ НЧ головки имеет значительные отклонения от заданной, начиная с уровней минус 10 дБ относительно плоской части. Это связано с недостаточной крутизной спада электрического фильтра первого порядка, формирующего заданную АЧХ. При необходимости можно получить значительно мень-

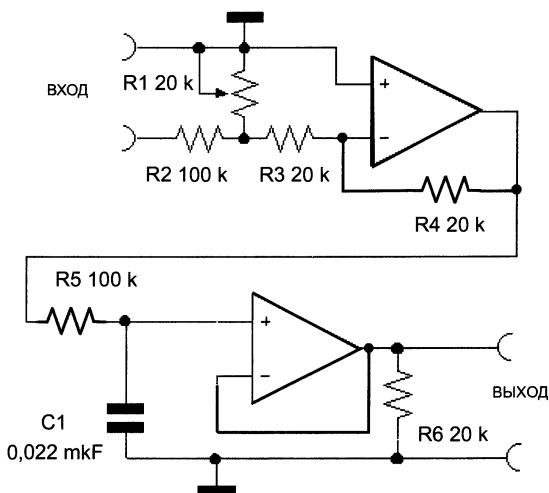


Рис. 3.69. Схема фильтра НЧ головки

шие отклонения АЧХ от заданной, если использовать электронный фильтр второго порядка с добротностью около 0,3 или два включенных последовательно фильтра первого порядка с разными частотами среза. Схема электронного фильтра и масштабирующего усилителя показана на рис. 3.69. Для одной низкочастотной головки Н1209 сквозной коэффициент усиления от входа масштабирующего усилителя до выхода усилителя мощности следует установить 6 дБ. Спады Баттерворда второго порядка требуют противофазное включение динамических головок, в связи с этим нужно принять во внимание фазовые соотношения в усилителях. Если усилитель мощности не инвертирует фазу, НЧ головки включаются в фазе с СЧ головкой, а противофазное включение обеспечивает масштабирующий усилитель, который инвертирует фазу. Номиналы резистора R4 и конденсатора C1, указанные на схеме, обеспечивают частоту среза фильтра 72 Гц. Столь сильное отличие частоты среза фильтра от частоты раздела связано с подъемом АЧХ НЧ головки.

Результат моделирования суммарной АЧХ громкоговорителя показан на рис. 3.70. АЧХ по звуковому давлению трехполосного громкоговорителя, измеренная вдоль оси ВЧ головки, показана на рис. 3.71. Измеренная АЧХ имеет несколько больший провал на частоте 2500 Гц (на 1,5 дБ) в сравнении с результатом моделирования.

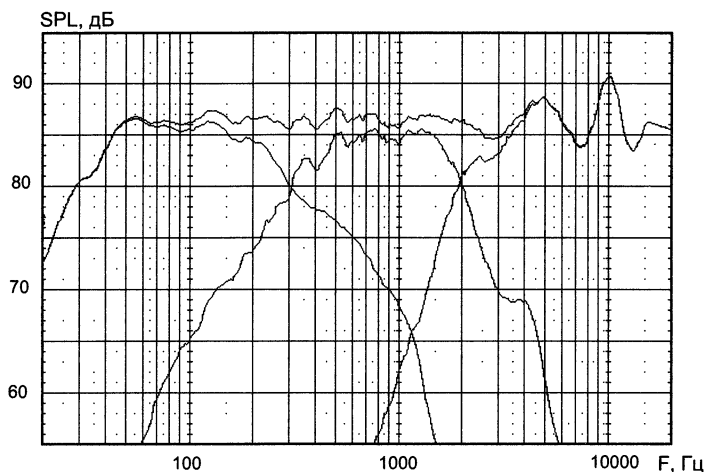


Рис. 3.70. Результат моделирования суммарной АЧХ громкоговорителя на динамических головках Н1209, Н1215, МДТ33

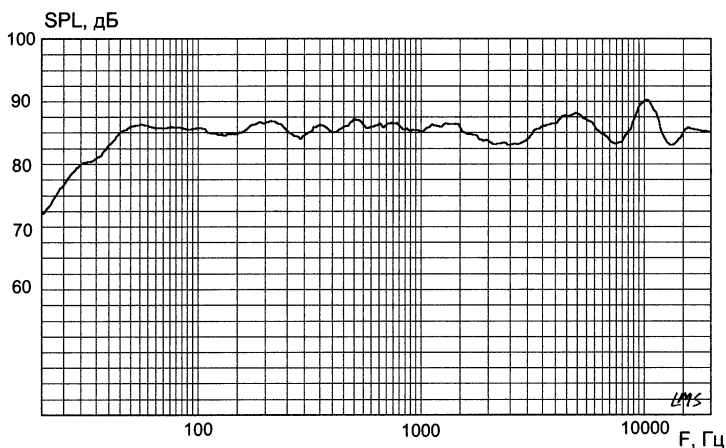


Рис. 3.71. АЧХ трехполосного громкоговорителя, измеренная вдоль оси ВЧ головки

Прежде, чем переходить к моделированию варианта громкоговорителя с двумя низкочастотными головками, рассмотрим АЧХ, показанные на рис. 3.72. Сравнение кривых (1) и (2) на рис. 3.73 показывает, что две НЧ головки, включенные параллельно, ниже частоты

300 Гц дают прибавку в звуковом давлении 6 дБ в сравнении с одной головкой. На частотах выше 300 Гц начинает проявляться взаимная интерференция излучений НЧ головок, на частоте 650 Гц за счет интерференции звуковое давление двух НЧ головок

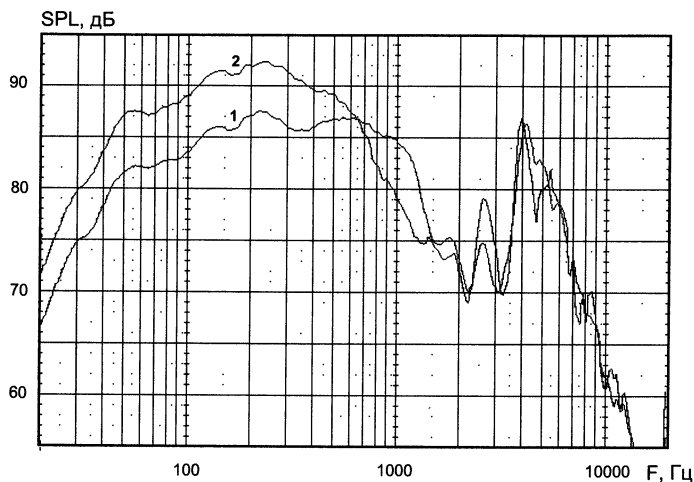


Рис. 3.72. АЧХ одной (1) и двух соединенных параллельно (2) НЧ головок Н1209, измеренные вдоль оси ВЧ головки

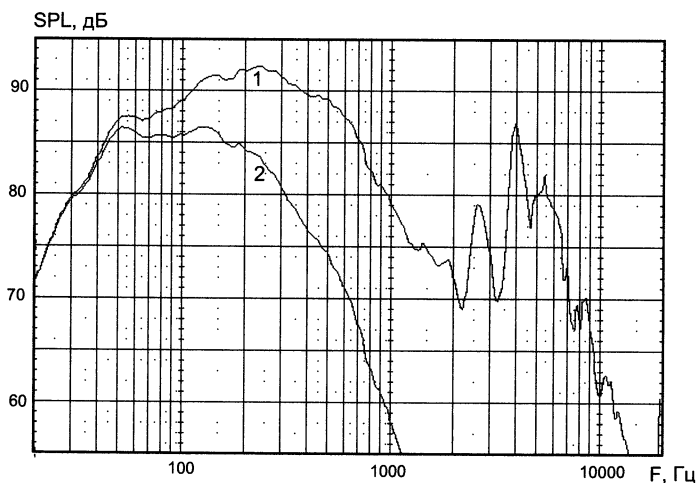


Рис. 3.73. АЧХ двух НЧ головок Н1209 без фильтра (1) и с фильтром (2)

уменьшается на 6 дБ и становится равным звуковому давлению одной головки. Подъем АЧХ, связанный с резонансом диффузора, у двух головок оказывается ниже на 6 дБ, чем у одной головки, также за счет интерференции. На рис. 3.73 показаны АЧХ по звуковому давлению двух НЧ головок без фильтра (1) и с оптимизированным фильтром (2). Сравнение кривых на рис. 3.73 наглядно показывает, как с помощью фильтра корректируется АЧХ НЧ головок, чтобы получить воспроизведение частоты 45 Гц с завалом порядка 2 дБ. Близкая к заданной АЧХ для двух НЧ головок получается с помощью электронного фильтра первого порядка с частотой среза 88 Гц. Для двух НЧ головок используется та же схема, что и для одной (рис. 3.69). Для двух НЧ головок коэффициент передачи от входа масштабирующего усилителя до выхода усилителя мощности устанавливается 0 дБ. Для изменения частоты среза фильтра номинал резистора R4 заменяется на 82 к. Результат моделирования суммарной АЧХ громкоговорителя с двумя НЧ головками показан на рис. 3.74. АЧХ по звуковому давлению, измеренная вдоль оси ВЧ головки, показана на рис. 3.75.

Рассмотренная система может рассматриваться как громкоговоритель со встроенным сабвуфером. Активное низкочастотное звено громкоговорителя немного, но все же отличается от промышленных сабвуферов, которые широко применяются в много-

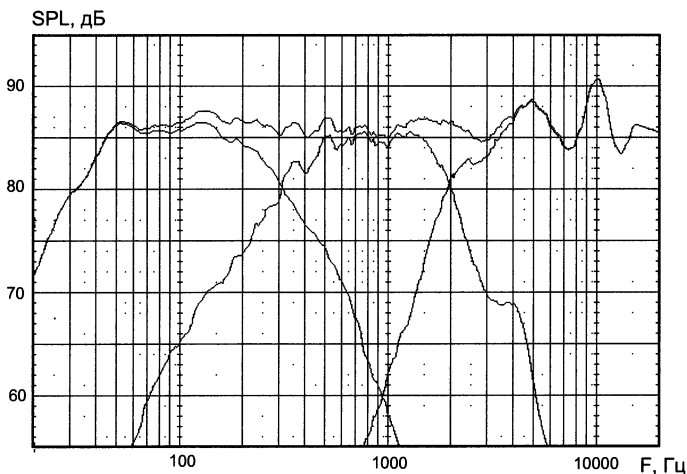


Рис. 3.74. Моделирование суммарной АЧХ громкоговорителя с двумя НЧ головками Н1209

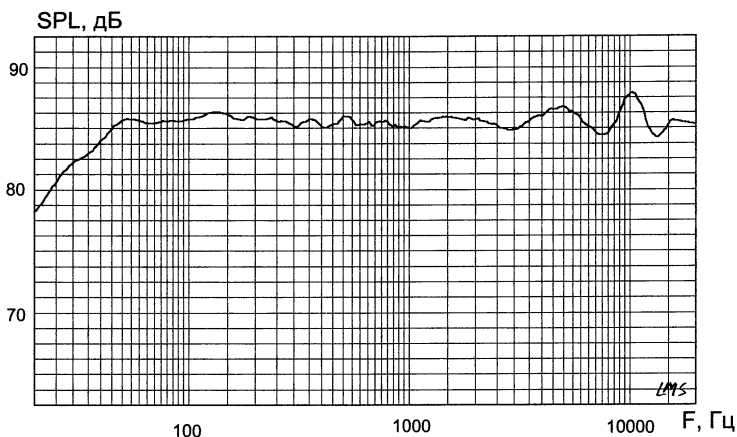


Рис. 3.75. АЧХ громкоговорителя с двумя НЧ головками Н1209, измеренная вдоль оси ВЧ головки

канальных системах звуковоспроизведения для домашних кино-театров и несколько реже — в двухканальных стереофонических системах. Промышленный сабвуфер проектируется в расчете на произвольное размещение относительно фронтальных громкоговорителей. Основная идея, заложенная в основу произвольного размещения сабвуфера, состоит в том, что источник звука, воспроизводящий частоты ниже 100 Гц, в помещении для прослушивания не локализуется на слух. Чтобы избежать слуховой локализации, в сабвуферах используются электронные фильтры, как правило, не ниже четвертого порядка, обеспечивающие сильное подавление частот выше 100 Гц. Кроме того, отсутствие локализации на слух требует, чтобы динамическая головка сабвуфера обеспечивала низкий уровень нелинейных искажений, поскольку высшие гармоники, генерируемые головкой, не задерживаются фильтрами. Учитывая, что НЧ головка в сабвуфере работает с большими амплитудами колебаний звуковой катушки, последнее требование является довольно жестким и, если действительно выполняется, то существенно влияет на цену изделия. Для сопряжения с фронтальными громкоговорителями фильтры приходится делать с регулируемой частотой среза и вводить в тракт плавную или ступенчатую регулировку фазы. В большинстве случаев сабвуферы хорошо интегрируются в театральные системы звуковоспроизведения. В стереофонических системах взыскатель-

ные слушатели используют сабвуферы значительно реже. Возможно, причина этого состоит в высокой стоимости сабвуферов, которые хорошо интегрируются в стереосистему, не нарушая расположение кажущихся источников звука. В таком случае оказывается предпочтительнее потратиться на более дорогие громкоговорители, чем приобретать сабвуфер с риском, что он может неудачно интегрироваться в систему. В рассмотренном выше громкоговорителе отсутствуют проблемы локализации, а вопрос слитного звучания СЧ и НЧ головок проработан на этапе проектирования. Работающие на басах четыре высококачественные головки SEAS N1209 по возможностям воспроизведения низких частот могут успешно конкурировать с многими сабвуферами.

Рассмотренные особенности громкоговорителя с комбинированным кроссовером в сравнении со стандартными промышленными изделиями, мне кажется, дают ему право на существование в любительской практике как универсального изделия, пригодного для реализации стереосистемы и системы звуковоспроизведения домашнего театра, не требующей сабвуфера.

Список литературы

1. И.А. Алдошина, А.Г. Войшвилло. Высококачественные акустические системы и излучатели. — Радио и связь, 1985.
2. Vance Dickason. The loudspeaker design cook book. — Audio amateur press, 1995.
3. Э.Л. Виноградова. Конструирование громкоговорителей со сглаженными частотными характеристиками. — Энергия, 1978.
4. С. Агеев. Должен ли УМЗЧ иметь малое выходное сопротивление? // Радио. — № 4. — 1997.
5. А. Аватенян. Virtual Acoustics EMA 3.3 // Audio Music. — № 2. 2004.
6. А. Аватенян. Virtual Acoustics HEOPS ENP 2.0 // Stereo&Video. 2006. — Ноябрь. — С. 177.
7. Ю. Пеньков. Когда слова не нужны // DVD Эксперт. — 2005. — Апрель
8. С. Устенко. Личный номер // DVD Эксперт. — 2005. — Март.
9. М. Wheeler. Navigation Speaker Design // Speaker Builder. — № 6, № 7. — 1999.
10. С. Бать. Любительские громкоговорители 2. — Ладомир, 2003.

Заявки на книги присылайте по адресу:
125319 Москва, а/я 91
Издательство «Техносфера»
e-mail: knigi@technosphaera.ru
sales@technosphaera.ru
факс: (495) 956 33 46

В заявке обязательно указывайте
свой почтовый адрес!

Подробная информация о книгах на сайте
<http://www.technosphaera.ru>

Бать Сергей Давидович

Любительские громкоговорители-3

Компьютерная верстка – В.В. Павлова
Дизайн – И.А. Куколева
Корректор – М.Г. Емельянова
Выпускающий редактор – О.Н. Кулешова
Ответственный за выпуск – О.А. Казанцева

Формат 84 × 108/32. Печать офсетная.

Гарнитура Ньютон.

Печ.л. 3,5. Тираж 3000 экз. Зак. № 1429.

Бумага офсет № 1, плотность 65 г/м².

Издательство «Техносфера»
125319, Москва, ул. Краснопролетарская, д.16, стр.2

Диaposитивы изготовлены ООО «Европолиграфик»

Отпечатано в ППП «Типография «Наука»
Академиздатцентра «Наука» РАН
121099 Москва, Шубинский пер., 6



Рис. 1. Монитор на базе головки VISATON AL 130 компании VA



Рис. 2. Трехполосный громкоговоритель на динамических головках VISATON компании VA

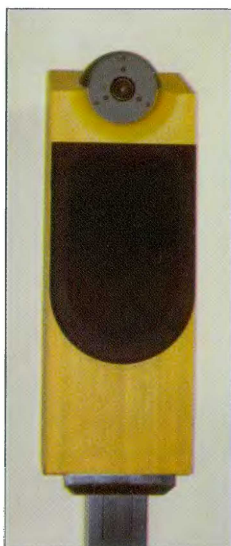


Рис. 3. Двухполосный громкоговоритель на базе динамической головки HM170Z18



Рис. 4. Двухполосный громкоговоритель на базе динамической головки НМ170Z18 в домашней системе звуковоспроизведения



Рис. 5. Трехполосный громкоговоритель компании VA с низкочастотной головкой SEAS W26FX 001



Рис. 6. Четырехполосный громкоговоритель, разработанный Д. Демьяненко

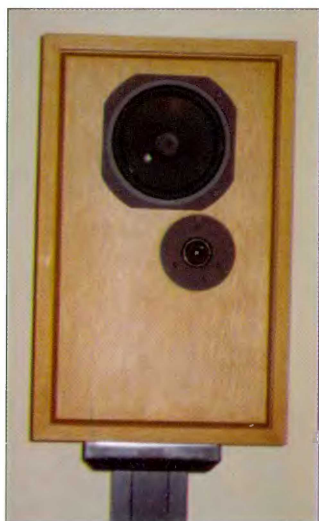


Рис. 7. Макет громкоговорителя на динамических головках HM170Z18 и MDT30



Рис. 8. Громкоговоритель компании VA в корпусе из мрамора на динамических головках HM170Z18 и MDT30



Рис. 9. Трехполосный громкоговоритель на динамических головках SEAS H1288, H1262 и H1149



Рис. 10. Набор модулей громкоговорителя с комбинированным кроссовером