

Трехполосная акустическая система с кроссовером и электронной задержкой: Часть 1

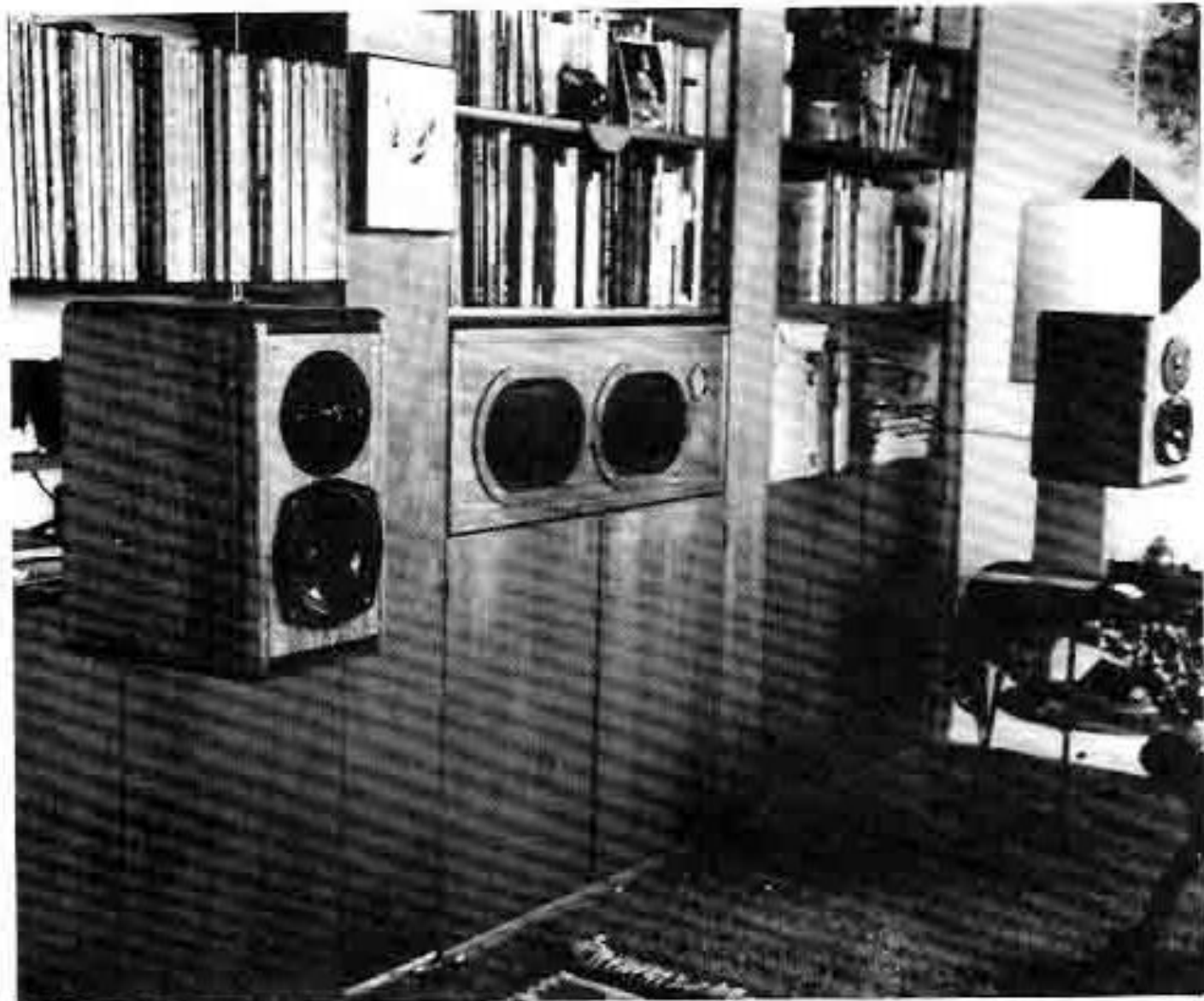
Зигфрид Линквиц

Эта публикация является подробным описанием акустической системы с несколькими динамиками. Публикация состоит из трех частей, и охватывает выбор динамиков, конструкцию корпуса, активный кроссовер, выравнивание и позиционирование. Предоставляется достаточно информации

для повторения системы, или улучшения существующих систем методом выравнивания низкочастотного отклика или добавления отдельного блока сабвуфера.

Описанная система развивалась в течение 1 года на основе экспериментов с множеством различных конфигураций, различными динамиками и корпусами. Многие люди предоставили свои

идеи. Это не «идеальная акустическая система», но она в достаточной степени раскрывает информацию о размещении микрофона при записи, примененных методах записи, и позволяет предположить, что студия звукозаписи является следующим слабым звеном в цепи между оригиналом и звуковоспроизведением. Несколько записей с хорошей пространственной ориентацией

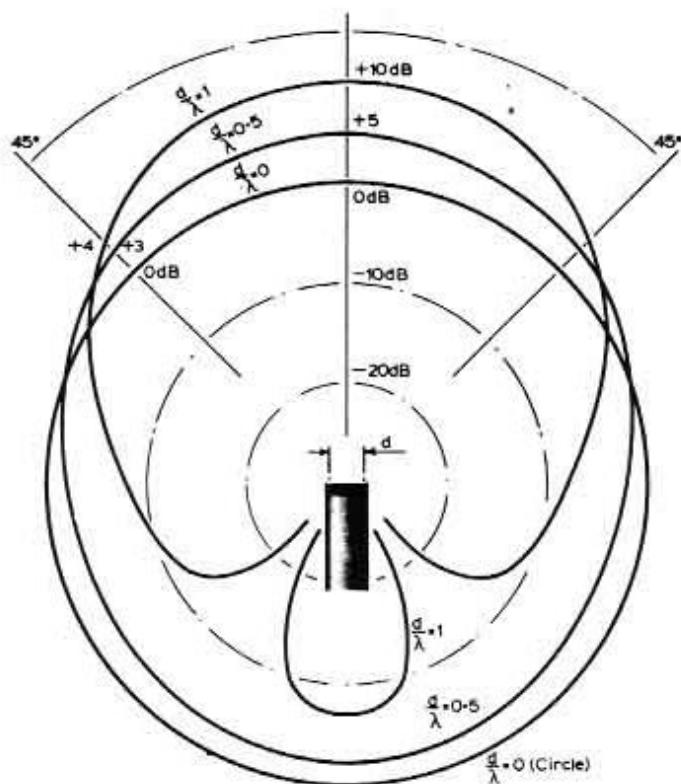


Фотография А Авторская акустическая система. Корпуса сателлитов среднечастотных и высокочастотных динамиков подвешены к потолку с помощью шнура для штор и остаются ориентированными вперед при помощи кабелей от задней панели.

являются доказательством того, что очень часто используется не весь потенциал стерео. Возможно, этот потенциал остался незамеченным, потому что вряд ли какая-либо коммерческая акустическая система адекватно воспроизводит перспективу глубины, создавая либо размытую, либо «тонкостенную» картину стереопанорамы.

С увеличением частоты каждый динамик становится более направленным. Диаграмма направленности жесткого поршня, установленного на конце длинной трубки, является всенаправленной на частотах, где отношение диаметра поршня d к длине волны λ излучаемого звука является небольшим, см. рис. 1. По мере того, как соотношение d/λ увеличивается, происходит увеличение осевого давления, но одновременно происходит уменьшение внеосевого давления при отклонении от оси на 45° . Опыт показывает, что для естественного воспроизведения звука желательно обеспечивать широкую дисперсию. Для обеспечения максимального падения в 6 дБ при отклонении от оси на 45° , необходимо использовать динамик только в том диапазоне частот, где его эквивалентный диаметр поршня меньше единичной длины волны. Это является идеализированным предположением, потому что реальные движущие силы ведут себя не точно так же, как жесткие поршни, но общий принцип по-прежнему гласит, что равномерную широкую дисперсию можно ожидать только для частот, где $d/\lambda < 1$.

При конструировании акустических систем необходимо сравнивать физические размеры динамика, корпуса акустической системы и помещения с длиной волны излучаемого звука, чтобы определить, является ли их размер акустически малым, например, когда $d/\lambda < 0,5$ или меньше, см. рис. 2. Например, для поддержания широкой дисперсии динамик диаметром 200 мм следует использовать для воспроизведения частот ниже 1,5 кГц. Это действительно популярная частота кроссовера, но одновременно она находится в преде-



лах критичного частотного диапазона основных и нижних гармоник многих музыкальных инструментов. Неизбежным явле-

направленности вносятся некоторые изменения. В описанной конструкции выбран среднечастотный динамик диаметром 100 мм,

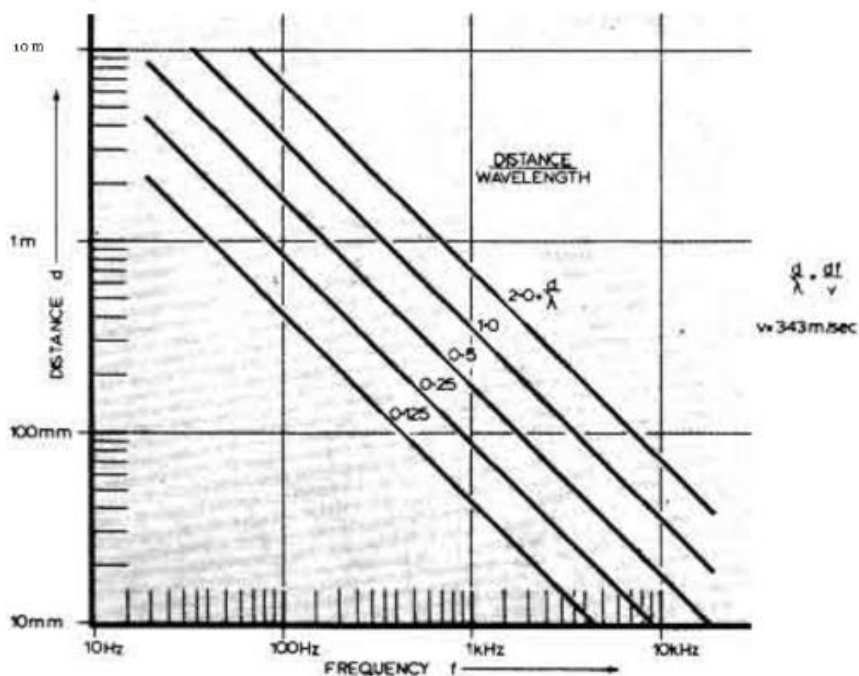


Рисунок 1 Диаграмма направленности для жесткого круглого поршня в конце длинной трубы, так как функция d/λ (d - диаметр поршня, λ длина излучаемой звуковой волны). Широкая дисперсия может быть получена только для частот, где $d/\lambda < 1$.

Рисунок 2 Размеры (d) динамика, корпуса или помещения должны сравниваться с длиной звуковой волны, чтобы определить, является ли размер акустически малым.

нием является и то, что около частоты перехода от большого динамика к меньшему, в диаграмму

с переходом к динамику диаметром 25 мм на частоте 3 кГц. Та-

ким образом, изменение диаграммы направленности происходит на октаву выше, в относительно менее критичном диапазоне частот, но при проектировании схемы кроссовера все же были предприняты меры для минимизации неравномерностей АЧХ в области перехода от одного динамика к другому.

Опасности применения нескольких динамиков

Некоторые дизайнеры пытаются получить широкую дисперсию или «всенаправленность», используя несколько динамиков, охватывающих один и тот же частотный диапазон. Ошибочность этого подхода можно увидеть, сравнив диаграмму направленности одного динамика с результирующей дисперсией излучения двух одинаковых динамиков, рис. 3. Если расстояние d между динамиками больше половины длины волны, может произойти подавление сигнала. Два источника будут сдвинуты по фазе на 180° всякий раз, когда расстояние от каждого из динамиков до слушателя отличаются нечетным кратным половине длины волны. По мере увеличения частоты оба блока перемещаются, относительно друг от друга, ещё дальше (рис. 3), плюс местоположения, для которых источники пропадают, становятся более частыми. Такая система может быть описана только как разнонаправленная. В дополнение к сказанному, несколько динамиков нарушают фазовую когерентность прямого звука, воспроизводимого акустической системой. Это создает иллюзию широкой дисперсии воспроизводимого программного материала, но этой иллюзии не хватает высокой точности звуковой перспективы, которую можно получить с помощью одного динамика.

После определения, исходя из диаметра диффузора, самой высокой частоты, до которой можно использовать динамик при сохранении хорошей дисперсии, необходимо определить нижний предел частоты, исходя из способности отклонения привода диффузора динамика и желаемого уровня звукового давления.

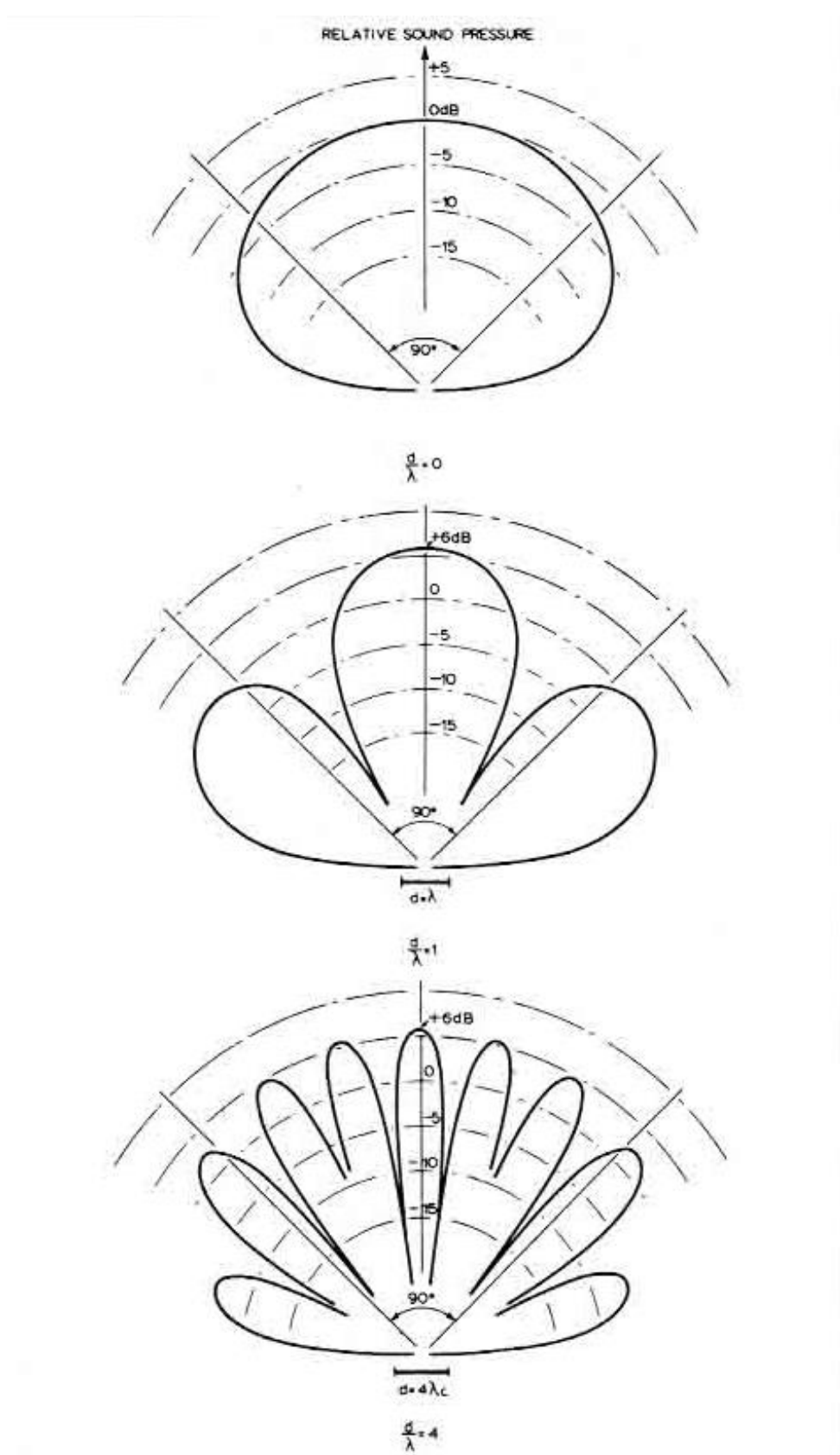


Рисунок 3. Использование нескольких динамиков для обеспечения широкой дисперсии создает эффекты помех. (а) один динамик (b) два динамика расстоянии на одной длины волны, (с) динамики на расстоянии в четыре длины волны, при подаче одного и того же сигнала на вход.

Было обнаружено, для обеспечения всенаправленного излучения низких частот поршнем в длинной трубе, необходимо соблюдение условия $d/\lambda < 1$, см. рис. 1. Если поршень движется с

размахом a_{pp} на частоте f и излучает в свободное пространство, то давление p на расстоянии r от источника составляет:

$$\rho = \frac{\pi^2 \rho_0 a_{pp} f^2 d^2}{8\sqrt{2} r}$$

Нормализация давления относительно опорного давления

$\rho = 2 * 10^{-4}$ μ Bar дает выражение для более привычного уровня звукового давления (d и a_{pp} в миллиметрах)

$$\begin{aligned} SPL &= 20 \log(\rho/\rho_0) \\ &= -86 \\ &+ 40 \log f \\ &- 20 \log r \\ &+ 40 \log d + 20 \log a_{pp} \end{aligned}$$

Предполагая, что a_{pp} составляет 6 мм, а f 70 Гц, может быть получен уровень прямого давления 83 dB от 100-мм динамика и 95 dB от динамика 200-мм на расстоянии 1 метра.

Максимальный SPL

Эти уровни звукового давления могут показаться очень невысокими, но переход на низкочастотный динамик на частоте 70 Гц удвоит максимально достижимое звуковое давление (+6 dB), а поскольку на такой низкой частоте сигналы от левого и правого каналов стереосистемы находятся преимущественно в фазе, можно ожидать дальнейшего увеличения звукового давления примерно на 6 dB. Поэтому от стереосистемы со 100-мм динамиками, можно ожидать S.P.L. около 95 dB в прямой свободной зоне. Кроме того, обычная среда для прослушивания - это полуревверберирующая комната, в которой звук усиливается отражениями от стен и предметов.

Практический опыт подтверждает, что 100-миллиметровый динамик может воспроизводить программный материал до 70 Гц с адекватным уровнем звукового давления и с низким уровнем искажений. Это перемещает частоту раздела кроссовера для сабвуферного динамика в менее критичный частотный диапазон, и дает возможность использовать один большой сабвуфер для покрытия оставшегося частотного диапазона ниже 70 Гц. Большой корпус НЧ-динамика может быть размещен отдельно от относительно небольших корпусов динамиков среднего диапазона и твитера, позволяя им быть акустически более близкими из-за

малого d/λ . Дальнейшее рассмотрение этого аспекта проектирования системы будет дано позже.

Предполагая 6-миллиметровый ход диффузоров, частотный диапазон ниже 70 Гц может быть покрыт двумя 200-миллиметровыми динамиками, которые будут генерировать 90 dB прямого S.P.L., например, на 35 Гц и 1 метре или двумя динамиками диаметром 250 мм с 94 dB S.P.L.

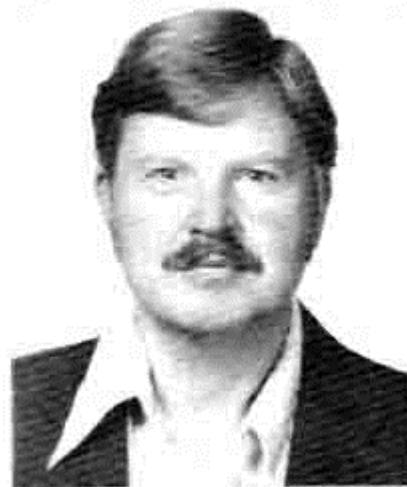
Выбранные динамики

Конкретными динамиками, выбранными для этой конструкции, являются низкочастотно-среднечастотный динамик KEF B110 100 мм, твитер KEF T27 25 мм и низкочастотный динамик KEF B139. B139 можно заменить другим, таким как KEF B200 или иным, с достаточными параметрами диапазона хода диффузора и линейности.

Конечно, кроме дисперсии и хода диффузора, существуют другие параметры, которые должны учитываться при выборе динамиков, например, такие как плавность частотной характеристики, отсутствие высоких резонансов Q , минимальное поведение фазы и низкие нелинейные искажения. К сожалению, производители публикуют скудные полезные данные. Знание веса магнита и плотности потока мало чем поможет.

Однако, при некоторой тренировке, уши помогут выбрать те динамики, которые, по-видимому, заслуживают дальнейшего изучения, а динамики выбранные для этой конструкции оказались весьма удовлетворительными.

При выборе динамиков я, в первую очередь, руководствовался стремлением к широкой и равномерной дисперсии, при как можно более высоких частотах раздела. Если бы я решил сделать акцент на высокой выходной мощности или меньших нелинейных и доплеровских искажениях, я бы выбрал динамики большего диаметра или сместил частоты кроссовера в более критичный частотный диапазон. Широкая дисперсия может быть получена только от небольшого диффузора, который, по сравне-



Зигфрид Линквиץ заинтересовался воспроизведением звука как хобби, признавая множество двойственностей между распространением микроволнового и акустического полей. «Электрическая волна 1 ГГц и акустическая волна 1 кГц имеют примерно одинаковую длину». После модификации и выравнивания АЧХ нескольких коммерческих акустических систем, он приступил к проектированию своей собственной системы из-за разочарования доступными устройствами.

Он являлся руководителем отдела разработки анализаторов сигналов в компании Hewlett Packard, был руководителем программы высокопроизводительного анализатора микроволнового спектра 8566A, занимался разработкой генераторов сигналов (608E), векторного вольтметра (8405A) и руководил проектом анализатора 8554LRF. Он присоединился к компании Hewlett-Packard в Калифорнии в качестве инженера-разработчика испытательного оборудования РЧ после окончания в 1961 году Дармштадтского университета.

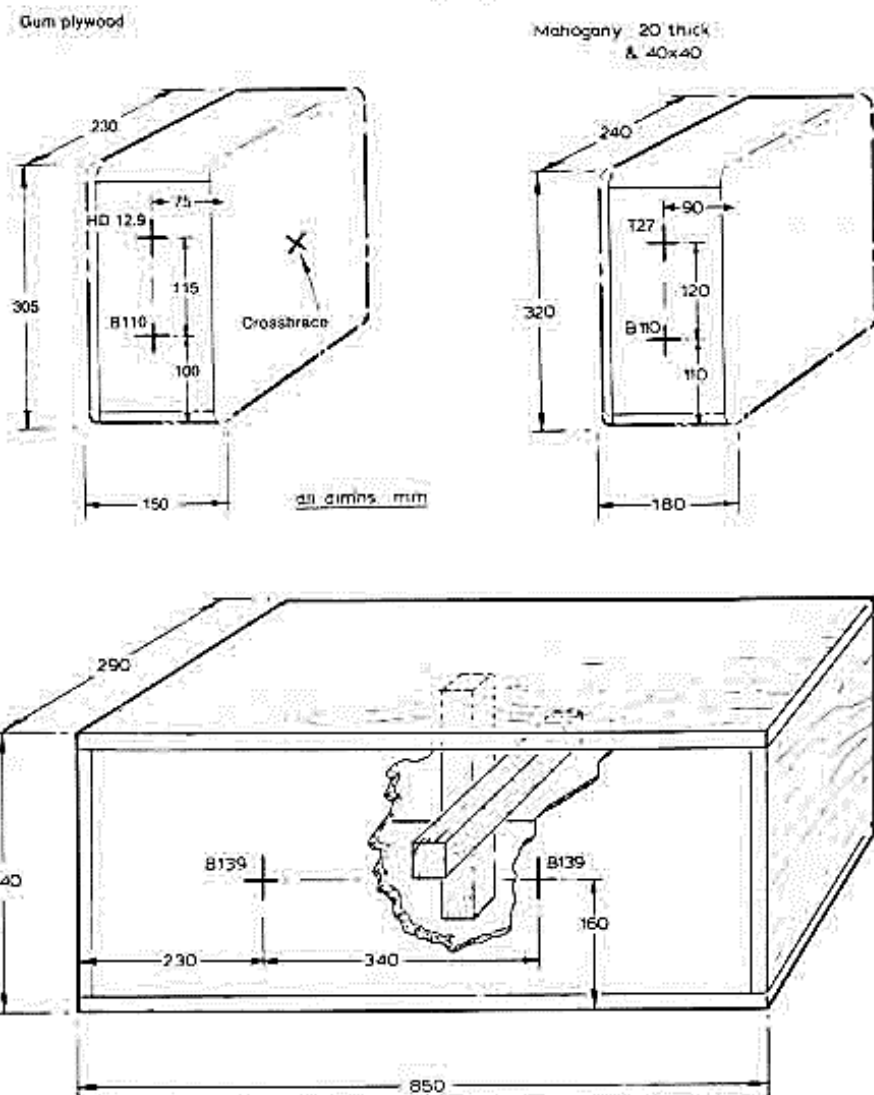
нию с более крупным диффузором будет иметь и более высокие искажения. Однако, похоже, что в психоакустическом плане увеличенные искажения перевешиваются улучшенной звуковой перспективой, которая дает большее чувство реалистичности.

Необходимы некоторые дальнейшие исследования этого компромисса.

Корпуса акустической системы

Обычно размер корпуса громкоговорителя определяется необходимыми характеристиками в низкочастотном диапазоне и эффективностью. Я выбрал другой подход, когда корпус оптимизирован для минимального вторичного излучения в максимально широком диапазоне частот. Возможность воспроизведения низких частот рассматривается как отдельная проблема.

Цель моих корпусов - контролировать излучение от задней части диффузора. Конструкция в виде закрытого ящика является самой простой формой корпуса. Если наибольший размер ящика составляет менее четверти длины волны на самой высокой частоте, воспроизводимой динамиком, то ящик является акустически небольшим, а объем воздуха внутри корпуса будет действовать как равномерная пружина. Стенки корпуса должны быть достаточно жесткими, чтобы изменения внутреннего давления воздуха не отклоняли стенки ящика и не вызывали вторичное излучение. В



Цели проектирования корпуса

- Узкая фронтальная зона для оптимальной горизонтальной дисперсии: твитер, установленный непосредственно над среднечастотным динамиком.
- Края корпуса закруглены для уменьшения рассеивания.
- Динамики установлены способом, который минимизирует прямую передачу вибрации к передней панели.
- Резонансы панелей ослабляются демпфирующими слоями с достаточной жесткостью и потерями.
- Чтобы исключить вторичное задержанное излучение через диффузор, резонансы в воздушной полости ослабляются наполнителями.

Рисунок 4 Размеры корпусов акустической системы. Поскольку ниже границы в 70 Гц находится мало стереоинформации от корпусов сателлитов (воспроизводящих всё, что выше 70 Гц), центральный НЧ корпус охватывает оставшийся (ниже) диапазон до 25 Гц. Пересмотренный корпус (вверху слева) имеет минимальную ширину и оптимизированное, для уменьшения дифракции от краев корпуса, расположение твитера. Конструкция из клееной фанеры допускает минимальное скашивание.

сравнении с максимальной частотой 70 Гц, корпус сабвуфера можно сделать небольшим. Поэтому он не будет иметь внутренних резонансов объема воздуха, а резонансы панелей корпуса могут быть подняты выше 70 Гц путем перекрестных связей.

Из-за более широкого частотного диапазона, в корпусе **B110** имеется больше проблем. Объем внутри корпуса будет демонстрировать полостные резонансы, которые должны быть устранены. Всякий раз, когда возбуждается один из этих резонансов, накапливается акустическая энергия, и после снятия возбуждения, постепенно, высвобождается. Большая часть этой акустической

энергии выходит через диффузор: динамик «извергает» свой собственный характерный звук корпуса. К счастью, полостные резонансы можно демпфировать, и это не трудно. Методика заполнения корпуса ватой с длинными волокнами хорошо известна и очень эффективна.

Другая форма нежелательного вторичного излучения исходит от самих стенок корпуса. Стенки могут возбуждаться и вибрировать при изменении внутреннего давления воздуха, но более серьезной проблемой является прямая передача в корпус механической вибрации диффузора динамика. В результате стенки корпуса излучают переданную им механи-



Фотография В Общий вид авторской системы. Удобный стул, очевидно, перемещается в менее активную по звуку позицию во время прослушивания.

ческую энергию в виде звука, особенно при совпадении с частотой резонанса панелей.

Экспериментально подтверждено, что вибрационное соединение между динамиком и стенками корпуса происходит, главным образом, через жесткое крепление динамика к корпусу. Вибрационно-подвижное крепление динамика к корпусу с помощью подвески соответствующей формы значительно уменьшает возбуждение стенок, но создает некоторые сложные механические проблемы при проектировании. Чтобы избежать неровностей частотной характеристики, собственная частота монтажа динамика должна быть значительно ниже воспроизводимой акустической частоты. Крепление должно герметично закрывать корпус и обеспечивать достаточное механическое крепление динамика. Другим подходом может быть решение поместить ящик с установленным динамиком в другой, внешний ящик, избегая всякой жесткой связи между ними.

Для описанной здесь конструкции, я выбрал вариант оформления в виде закрытого ящика, рис. 4. Динамик **B110** закреплен в

корпусе с помощью мягких резиновых прокладок в четырех монтажных отверстиях корзины, которые скользят на монтажных болтах. Уплотнительная прокладка выполнена из пенопласта и практически не сжимается. Сравнение этого варианта нажатием на корпус корзины динамика, с динамиком, смонтированным непосредственно в корпусе, указывает на значительное снижение связи с корпусом. Продолжается некоторое дальнейшее исследование этого предмета.

Вата и деготь

Относительно небольшой размер корпусов **B110/T27** дает преимущество в том, что резонансы внутреннего объема воздуха возникают на высоких частотах, где они могут эффективно демпфироваться с помощью ваты. Самый низкий резонанс возникает при частоте 600 Гц, следующие - при 800, 1000, 1200 Гц и т. д. Резонансы легко измеряются с помощью небольшого всенаправленного электретного микрофона, вставленного в корпус, и подавая **sweep** сигнал на **B110**. Достаточно плотное заполнение корпусов длиноволокнистой ватой ослабляет все резонансы до плавного частотного отклика и внутри

ящиков, и на внешних поверхностях диффузоров.

Мои оригинальные корпуса были изготовлены из 20 мм красного дерева с внутренними поверхностями, покрытыми демпфирующими слоями на основе смолы. С тех пор я построил новые версии, используя 6-миллиметровую фанеру с 15-миллиметровым демпфирующим слоем, состоящим из смеси 3:1 асфальтовой эмульсии на водной основе (Генри 107) и песка, что дало оптимальные результаты. В оригинальных корпусах были панели, которые были довольно жесткими. При использовании в качестве датчика вибрации магнитного звукоснимателя в импровизированном тонарме, самый низкий резонанс панелей наблюдался при 430 Гц. Было измерено, что тон 430 Гц затухает на 40 дБ за довольно длительное время, равное 120 мС, что указывает на значение Q , равное 36, которое типично для незатухающих деревянных панелей. При использовании демпфирующего материала время затухания может быть уменьшено до 40 мС, что соответствует Q 8,4 при 300 Гц. Это низкий Q для механической структуры.

Основная трудность состоит в том, чтобы найти демпфирующий материал, который имеет жесткость, достаточную для управления движением панели и в то же время имеет достаточные потери для рассеивания энергии механических колебаний в виде тепла. Лучшее соотношение между доступными материалами достигается за счет использования более тонких стенок, имеющих меньшую жесткость, чтобы более мягкий демпфирующий материал мог уменьшить изгибы стенок. Простой и довольно показательный тест - постучать по любой стенке корпуса, чтобы услышать, насколько она «мертвая» в акустическом плане.

Небольшой корпус является наименьшим препятствием для всенаправленного распространения звука. При правильном размещении в комнате, это является явно слышимым преимуществом. Поскольку корпус лишь незначительно шире динамика **B110**,

можно предположить, что диаграмма направленности поршня на конце длинной трубки, с дисперсией звука, является адекватным приближением первого порядка, рис. 1. Твитер **T27** установлен как можно ближе к **B110**. На частоте кроссовера 3 кГц расстояние соответствует расстоянию одной длины волны. Следовательно, в вертикальной плоскости диаграмма направленности на частоте кроссовера должна соответствовать ранее рассмотренному поведению двух драйверов, вносящих одинаковый вклад, рис. 3-b.

Результаты реакции на импульс

В идеале, звук от **T27** должен иметь возможность свободно распространяться во всех направлениях, но из-за большой ширины передней панели относительно диаметра диффузора, исходящая из диффузора волна будет первоначально блокирована панелью, а затем столкнется с резким переходом там, где панель заканчивается, рис. 5. На краю корпуса генерируется вторая волна, которая будет мешать исходной волне. При излучении первичного импульса **T27**, позднее, в момент времени $t = d/c = 260$ мкс, генерируется вторичный импульс с меньшей амплитудой, в результате чего исходный импульс размывается. Подобного рассеивания звука следует избегать, не допуская прохождения звуковой волны через резкие неровности корпуса, применяя плавные, скошенные края корпуса.

На рис. 6 показан осевой амплитудный отклик небольшого динамика, установленного в центре куба и сферы. Очевидно, что сфера, поверхность которой постепенно удаляется от источника, дает гораздо более плавный отклик, чем куб с острыми краями. Поэтому, чем больше размер корпуса превышает размер динамика, тем ближе он должен приближаться к форме сферы. Отсюда следует, что корпуса среднечастотных и высокочастотных динамиков могут быть еще

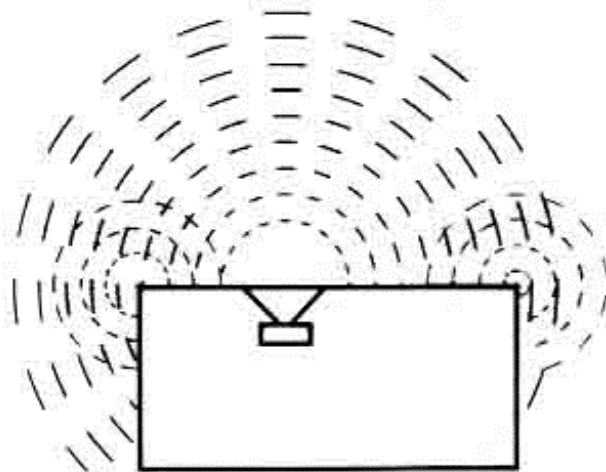


Рисунок 5 Рассеивание звука от острых углов корпуса динамика, приводящее к размытым переходным процессам системы.

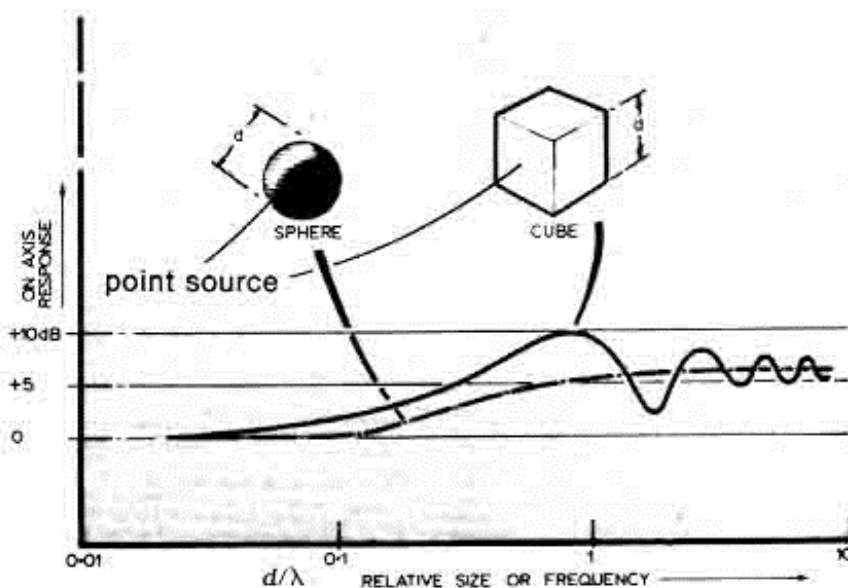


Рисунок 6. Частотная характеристика на оси точечного источника, установленного в разных корпусах, показывает более плавный отклик сферы.

более улучшены за счет уменьшения их размера, и изготовления более изогнутыми в области крепления динамиков. Картон из папье-маше или эпоксидное стекловолокно, а не дерево с нанесенными на поверхность демпфирующими материалами, могут быть более подходящими материалами для корпусов такой нетрадиционной формы. У данной конструкции нижняя граница частотного диапазона находится ниже 70 Гц, где **B110** имеет свой собственный резонанс. Поскольку ниже частоты 70 Гц находится мало полезной стереофони-

ческой информации, то оставшийся диапазон, до 25 Гц, может воспроизводиться центральным низкочастотным громкоговорителем с одним каналом, рис. 4. Для более жесткой конструкции и сдвига резонансов панелей до частот выше 70 Гц, низкочастотный громкоговоритель изготовлен с внутренним усилением. Кроме того, ко всем панелям, для уменьшения прямой связи приклеен тяжелый войлок толщиной 25 мм. Свободное пространство корпуса заполнено длинноволнистой шерстью.

Трехполосная акустическая система с кроссовером и электронной задержкой:

Часть 2

Зигфрид Линквиц

Дизайн-проект этой акустической системы был начат с идеи установки корпусов заподлицо в окружающую их стену. Расположение корпусов перед стеной, когда расстояние от передней части корпуса до стены равно четверти длины волны, приводит к значительному падению амплитудного отклика. При типичной глубине корпуса 300 мм, провал происходит на частоте около 250 Гц, рис. 2.

Если представить, что стены рядом с динамиками сделаны из зеркал, то можно легко визуализировать изображения корпусов в этих зеркалах. На частотах, где излучение из корпуса является всенаправленным, мы можем рассматривать каждое из этих изображений как отдельный источник звука, выход которого, в зависимости от того, как далеко источник изображения удален с точки зрения длин волн, будет складываться или вычитаться из исходного источника. Для расстояния до источника изображения в половину длины волны, соответствующего расстоянию в четверть длины волны от динамика до зеркала, выходы из реального и воображаемого источника будут взаимно компенсироваться.

Это описание виртуальных источников звука является действительным при условии, что громкоговоритель излучает звук в направлении стен и что стены, полы и потолок действуют как акустически отражающие поверхности, то есть зеркала. Установка корпусов на одном уровне с отражающей поверхностью исключает виртуальное изображение позади динамика и обеспечивает плавную частотную характеристику. Укомплектованная скрытыми корпусами акустическая система показала очень удовлетворительный результат. В

частности, это дало хорошее ощущение глубины перспективы для некоторого стереоматериала.

Перемещение сателлитов наружу

Позже я обнаружил, что, перемещая громкоговорители внутрь комнаты, на расстояние не менее 0,5-1 м от стен и пола, я мог добиться значительного улучшения перспективы звука, см. фото А в части 1. На соответствующем программном материале стали довольно легко и точно определяться местоположения отдельных инструментов как по горизонтали, так и по расстоянию до них за плоскостью корпусов динамиков. Вся звуковая сцена переместилась в фокус.

Кроме того, шипение ленты на записях и поверхностного шума стали пространственно-отделенными от музыкального материала. Шум определенно «находился» в корпусах динамиков, в то время как музыкальные инструменты занимали свое собственное пространство между и за сателлитами. В этом смысле шум записи и щелчки от поверхности сопоставимы с кашлем и тусовкой людей на живом концерте, где можно сконцентрироваться на выступлении и не отвлекаться на сторонние акустические события.

Непонятно, почему размещение корпусов на относительно небольшом расстоянии от стен дает такое заметное улучшение, особенно в свете только что упомянутых помех от «виртуальных изображений». Возможно, что комбинацией «ухо-мозг» выполняется анализ во временной области, и она способна игнорировать отражения от стен, приходящие на 4–6 мс позже прямого звука, опираясь на характеристики комнаты для прослушивания, а не на программный материал.

Я разместил корпуса средне-высокочастотных динамиков подалеже от стен, повесив их к потолку при помощи прочного шнура для штор. Электрические соединения находятся между задней частью корпуса и стеной за ними, одновременно направляя динамики вперед. Небольшие подвесные корпуса могут быть названы сателлитами для корпуса сабвуфера. Сам сабвуфер расположен посередине между сателлитами, находящимися на расстоянии 2,5 м друг от друга.

Комната для прослушивания имеет размер 5х8х4 м, акустическая система расположена перед узкой стеной, а типичные места для прослушивания находятся на расстоянии 5–6 м от сателлитов.

Дизайн кроссовера

Простейшей схемой кроссовера является фильтр с наклоном 6 дБ на октаву, показанный на рис. 7.

Предполагая, что компоненты являются идеальными, ток от генератора будет разделяться таким образом, что векторная сумма напряжений на клеммах

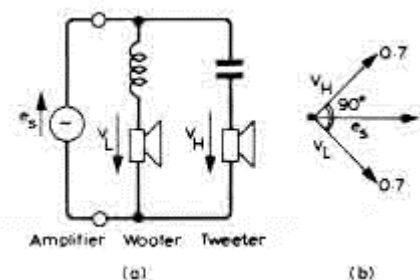


Рисунок 7 Схема кроссовера со спадом 6 дБ на октаву и его векторная диаграмма напряжений на частоте кроссовера.

низкочастотного и высокочастотного динамиков на всех частотах равна напряжению источника

$$V_L + V_H = e_s$$

Соответственно, векторная сумма звуковых давлений ρ_L и ρ_H , генерируемых динамиками, будет прямо пропорциональна напряжению генератора $\rho_L + \rho_H = k e_s$, и не зависит от частоты, при условии одинакового расстояния от слушателя до каждого из динамиков. Однако динамики **B110** и **T27** разнесены по длине волны, следовательно, эквидистантность справедлива только для плоскости в пространстве, рис. 8.

Для точек вне этой плоскости сумма звуковых давлений двух динамиков будет изменяться в зависимости от частоты.

Кроме того, поскольку напряжения двух динамиков уже имеют разность фаз 90° , сумма будет разной для симметричных точек выше и ниже плоскости эквидистантности. В той области частот

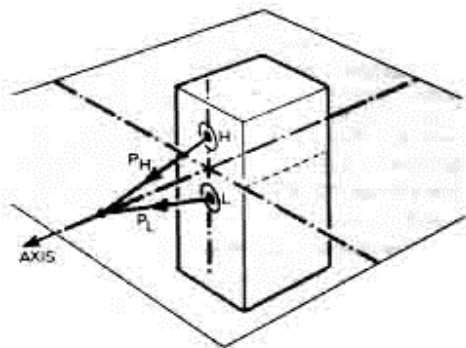
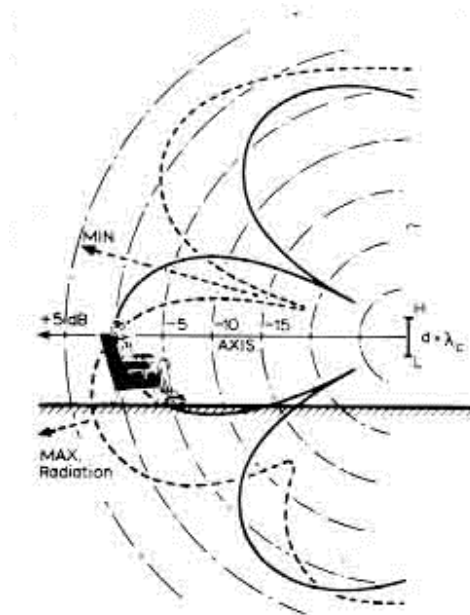


Рисунок 8 Плоскость точек, которые равноудалены от высокочастотного и низкочастотного динамиков. Сумма звуковых давлений пропорциональна сумме сигналов на катушки динамиков только в этой плоскости.

кроссовера, где оба динамика вносят одинаковый вклад, система будет излучать максимальное давление под углом 14° ниже плоскости, рис. 9.

Такая простая схема деления на полосы имеет широкий диапазон перекрытия между двумя динамиками, по крайней мере две октавы, а, следовательно, и наклонную диаграмму направленности. Кажущейся привлекательной особенностью этой схемы является полное отсутствие фазовых искажений для точек, которые находятся на равном расстоянии от **H** и **L**, рис. 8. В этих точках идеальное воспроизведение прямоуглольной волны достижимо в условиях свободного поля или в безэховой камере. В реальной



гостиной - повышенное излучение, направленное к полу и уменьшенное излучение вверх - будут вызывать окрашивание звука из-за частотно-избирательного изменения ревербери-

Крутой спад фильтра сужает область перекрытия, где взаимодействуют **B110** и **T27**. **T27** имеет основной резонанс на частоте 1,4 кГц, на этой частоте фильтр высоких частот полосы **B110** обеспечивает затухание на 27 дБ. На частоте 5 кГц, где **B110** демонстрирует резонанс диффузора, фильтр уменьшает напряжение возбуждения на 18 дБ, рис. 10.

Фильтр с наклоном спада 6, или даже 12 дБ на октаву, имел бы недостаточное затухание, не позволяющее минимизировать возбуждение этих резонансов. Фильтр 18 дБ на октаву не рассматривался, поскольку он наклоняет полярную диаграмму.

Рисунок 9 Излучение, на частоте кроссовера, схемы с кроссовером 6 дБ на октаву (пик 3дБ ниже плана эквидистантности для неодинаковых динамиков) и симметричные лепестки при схеме кроссовера 24 дБ на октаву.

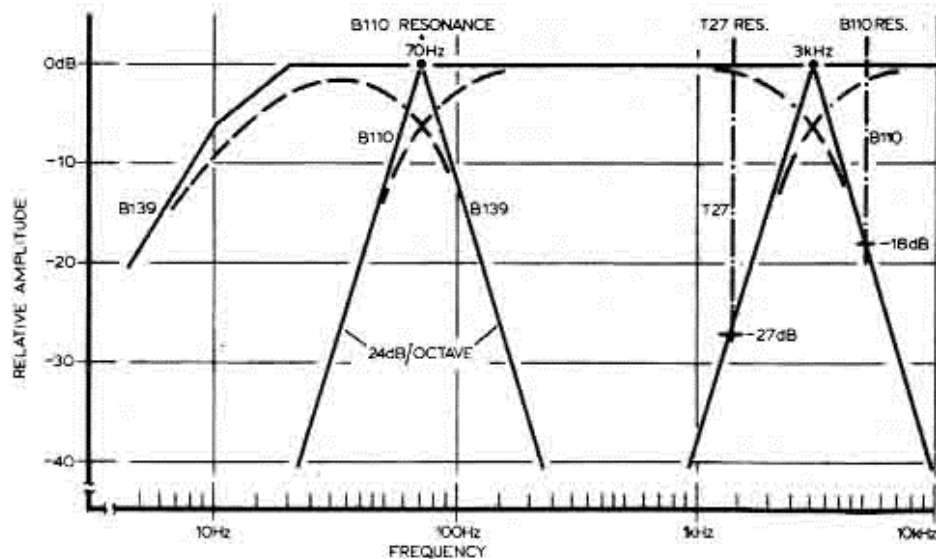


Рисунок 10 График расположения точек кроссовера и резонансов динамиков.

рующего поля. Слух человека более чувствителен к изменению амплитуды, чем к сдвигу фаз. Следовательно, подобные фильтры, имеющие разность фаз между сигналами возбуждения более 90° , и связанные с ними конструкции, имеющие большие пики внеосевой интенсивности, нежелательно использовать для системы сателлитов.

Наклон направленности

Был выбран фильтр с наклоном 24 дБ на октаву, который не имеет внеосевых пиков в диаграмме направленности, рис. 9.

сферы

Все схемы фильтров, за исключением фильтра 6 дБ на октаву, имеют частотно-зависимый фазовый сдвиг, а, следовательно, и некоторые фазовые искажения. Только схема, имеющая линейно-возрастающий фазовый сдвиг с увеличением частоты, не будет иметь фазовых искажений. В этом случае наклон фазовой кривой постоянен. Любое отклонение от постоянного наклона указывает на наличие некоторого искажения фазы. Возникает вопрос, насколько допустимо отклонение наклона, прежде чем оно станет слышимым, а не просто видимым на осциллографе.

На рис. 11 показан наклон фазовой кривой, обычно называемой **group delay** или групповым временем задержки, для часто используемых схем кроссовера Butterworth. Простое изменение

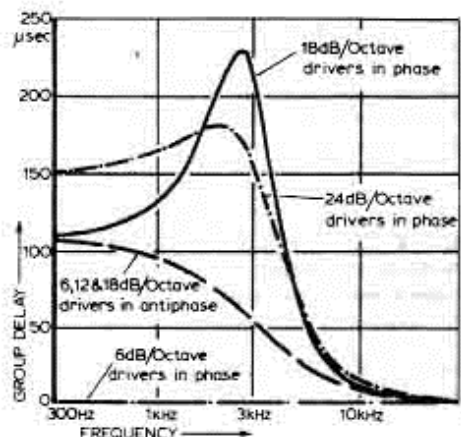


Рисунок 11 Групповое время задержки в зависимости от частоты акустической системы с кроссовером 3 кГц между среднечастотным динамиком и твитером с обычной схемой фильтров Butterworth первого и третьего порядков, а также с каскадными секциями фильтров Butterworth второго и четвертого порядка.

полярности подключения для одного из динамиков резко меняет групповую задержку для суммированных выходов динамиков, например, как в случае кроссоверов Butterworth первого и треть-

его порядка. Их осевой амплитудный отклик остается без изменений, если динамики не отделены друг от друга значительным расстоянием. В дальнейшем, при изменении полярности одного из динамиков, диаграмма сферы направленности будет отклоняться вверх или вниз.

Чтобы исследовать слышимость фазовых искажений, была собрана пропускающая все частоты схема, которая дублирует групповую задержку схем кроссоверов второго и четвертого порядка (кривые 12 и 24 дБ на октаву на рисунке 11).

При прослушивании через наушники стереофонического и монофонического материала, и при переключении с прямого прослушивания на пропускающую все частоты схему, различий в звуке обнаружено не было. Поэтому мне кажется безопасным использовать фильтр четвертого порядка с его резкой характеристикой спада, которая сводит к минимуму частотное перекрытие между динамиками.

Схема кроссовера с корректором

Схема кроссовера с корректором состоит из нескольких цепочек активных фильтрующих блоков.

Общая блок-схема, показанная на рис. 12, дает представление о сложности системы. Для каждого функционального блока представлены формулы дизайна, поэтому опытный конструктор должен иметь возможность повторить схему на рис. 13 или адаптировать дизайн к конкретным потребностям.

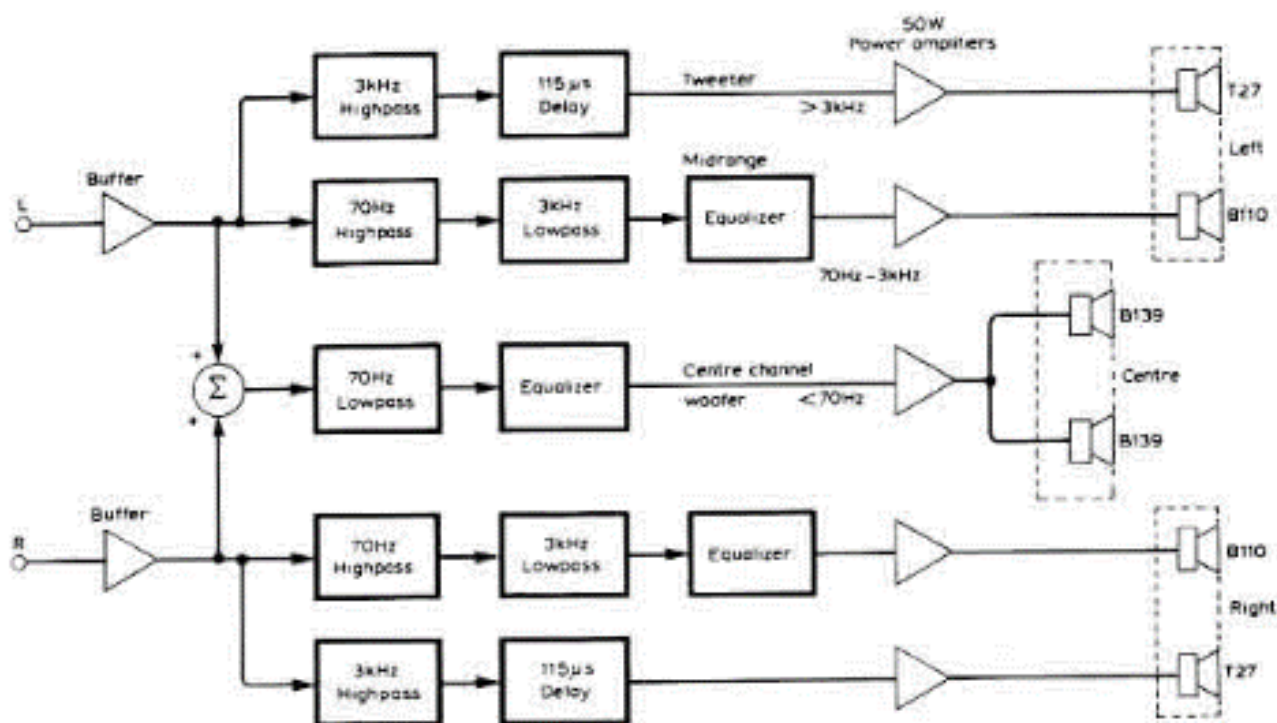


Рисунок 12 Общая блок-схема. Формулы для расчета каждого функционального блока приведены для возможности адаптировать схемы, показанные на рис. 14. B110 подключен в противофазе относительно T27 и B139 из-за разности фаз 180° между каналами на рис. 13.

Схема кроссовера 3 кГц

Фильтры верхних и нижних частот четвертого порядка состоят из каскадов секций фильтров Баттерворта второго порядка, рис. 14. Выходы V_H и V_L находятся в фазе друг с другом на всех частотах, а сумма их напряжений равна V_{in} , поэтому на частоте кроссовера f_C выходной сигнал каждого фильтра будет $V_{in}/2$, т.е. ниже на 6 дБ, что отличается от типичных 3 дБ для фильтров, где V_H и V_L находятся в фазовой квадратуре.

Компенсация задержки

При установке на переднюю панель сателлитов динамиков **B110** и **T27**, их излучение не находится в одной акустической плоскости. Электрические сигналы поступают на каждую звуковую катушку в одно и то же время, но поскольку звуковая катушка **T27** расположена ближе звуковой катушки **B110**, волна звукового давления, генерируемая **T27**, будет опережать волну звукового давления **B110**. 40-миллиметровое смещение динамика может

Рисунок 13 Принципиальная схема кроссоверов и эквалайзеров с компенсацией задержек. Пунктирные линии показывают необязательные компоненты для усиления высоких частот.

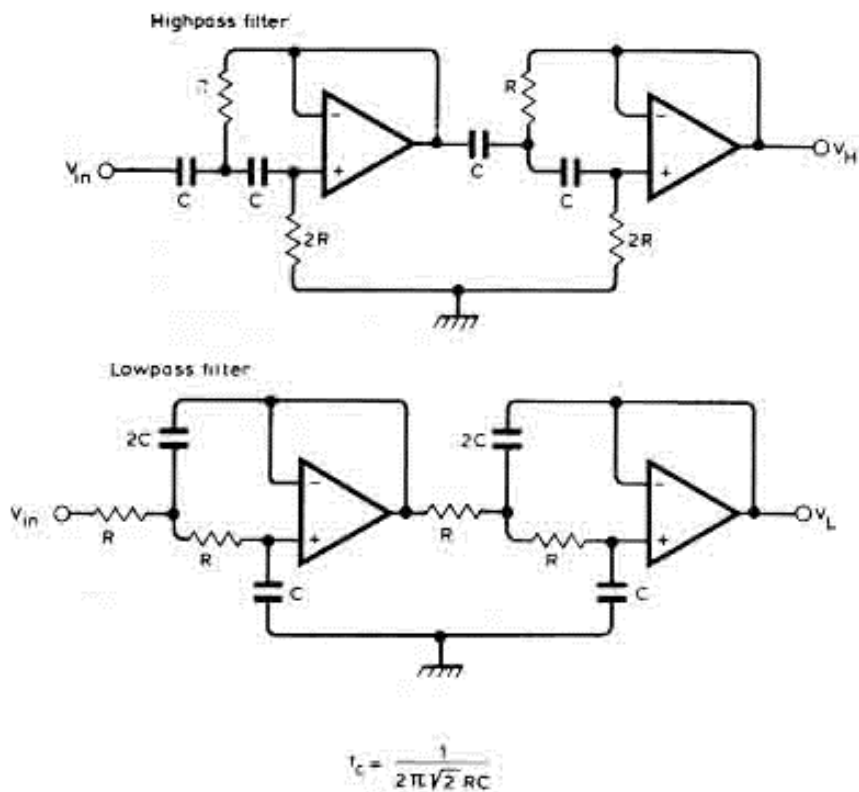
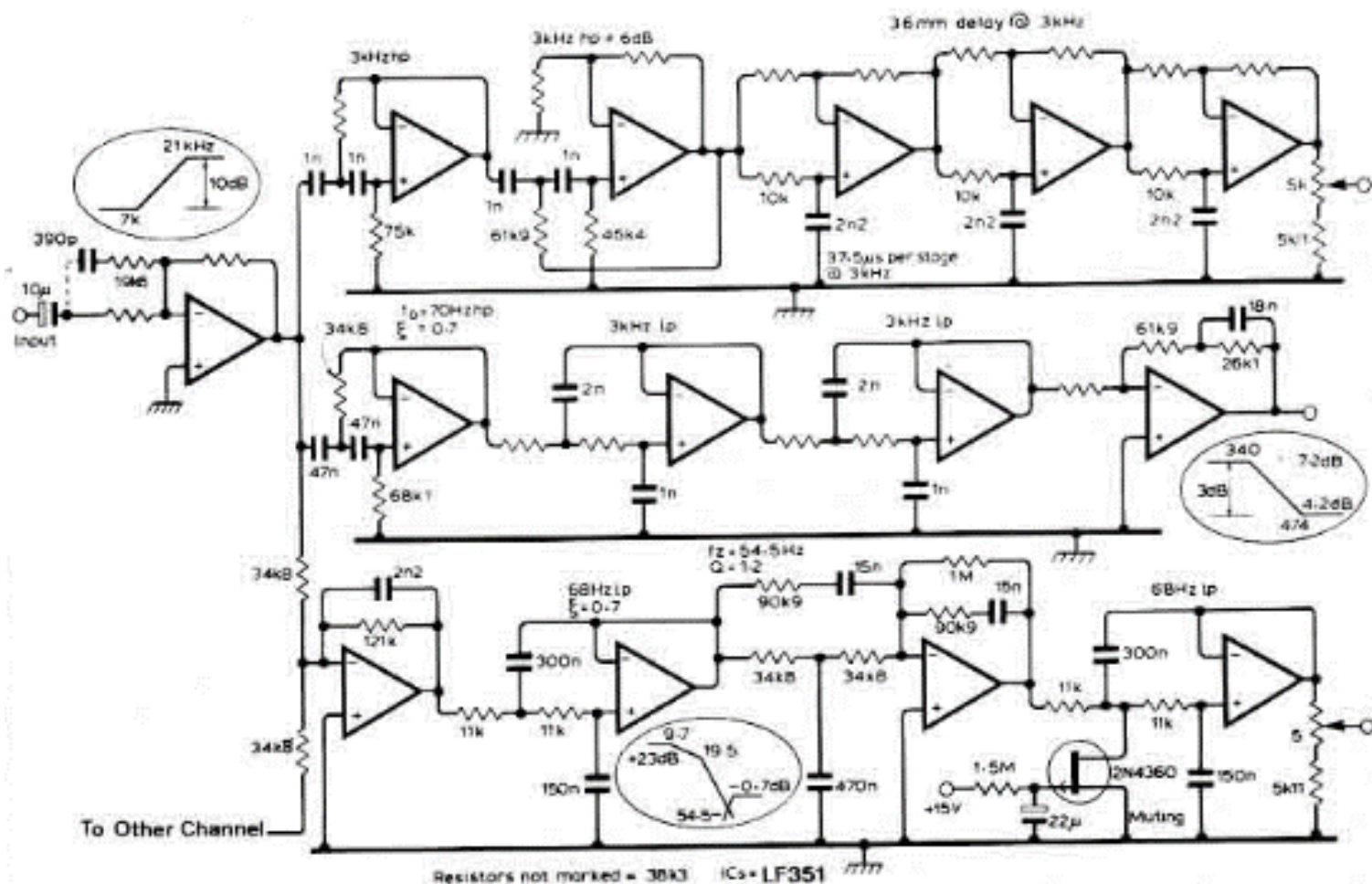


Рисунок 14 Фильтры кроссовера четвертого порядка 24 дБ на октаву состоят из каскадов секций второго порядка как для ФВЧ, так и для ФНЧ.

показаться незначительным, только если оно не связано с длиной волны, составляющей 144 мм



на частоте 3 кГц, что соответствует разности фаз между выходными сигналами двух динамиков в 100°, т.к.

$$\varphi = 360^\circ \frac{d}{\gamma}$$

Влияние смещения динамиков на амплитудно-частотную характеристику «на оси» может быть весьма значительным, особенно если оба динамика вносят почти одинаковый вклад в широкий диапазоне частот, рис. 15. У фильтров более высокого порядка область перекрытия частот значительно уже, что является следствием более крутого спада их характеристики.

Смещение динамиков может быть компенсировано добавлением электрической задержки к сигналу, приходящему на твитер, или установкой твитера в другой плоскости.

Механическое перемещение твитера назад возможно только при условии соблюдения мер предосторожности, позволяющих избежать острых краев корпуса и связанного с ними рассеивания звуковых волн. Для электрической задержки используется широко-

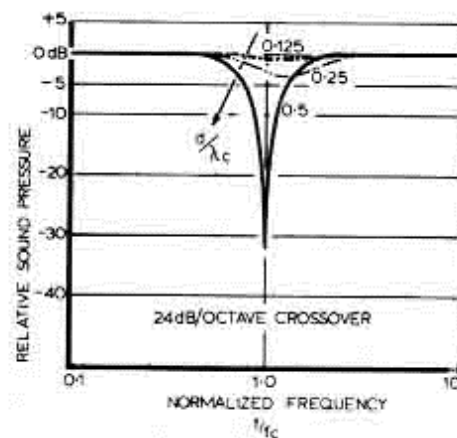
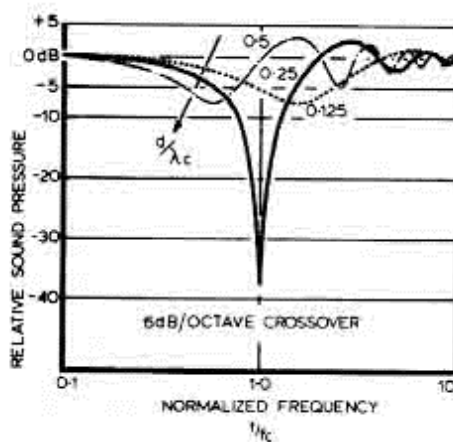


Рисунок 15 Осевой отклик, когда твитер расположен перед среднечастотным динамиком при разных d/γ , с кроссоверами 6 дБ и 24 дБ на октаву.

может потребоваться применение нескольких секций задержки, включенных последовательно. Величина задержки τ должна быть определена экспериментально, но разумную отправную точку может дать пространственное смещение динамика.

Схема кроссовера 70 Гц

Для разделения входного сигнала на полосы для НЧ-динамика и сателлитов используются фильтры с наклоном 24 дБ на октаву, аналогичные примененным в кроссовере 3 кГц. Частота раздела 70 Гц была выбрана потому, что из-за небольшого внутреннего объема корпусов сателлитов, на этой частоте выходной сигнал от **B110** имеет спад на 3 дБ. Ниже этой частоты выходной сигнал продолжает падать со скоростью 12 дБ на октаву, с формой отклика Баттерворта второго порядка. Следовательно, динамик в закрытом ящике может использоваться в виде половины секции фильтра верхних частот. Другая половина фильтра реализована в виде активной секции фильтра Баттерворта второго порядка - первая ступень центрального канала на рис. 13. Фильтр нижних частот для **B139** - это опять-таки фильтр четвертого порядка с двумя секциями усилителей - второй и четвертый блоки секций нижнего канала на рис. 13.

Коррекция сабвуфера

АЧХ сабвуфера имеет недостаточную величину отдачи на низких частотах. Следовательно, падение акустической мощности

необходимо компенсировать соответствующим увеличением сигнала, подводимого к динамику. При установке динамика в закрытый ящик, в диапазоне частот, где диффузор аналогичен жесткому поршню, его частотная характеристика соответствует:

$$F_w = \frac{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}{\sqrt{\left[\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1\right]^2 + \left(\frac{1}{Q_0} \frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

это функция верхних частот с угловой частотой вблизи резонанса f_0 в закрытом ящике и некоторым максимумом в зависимости от Q_0 , Рис. 17.

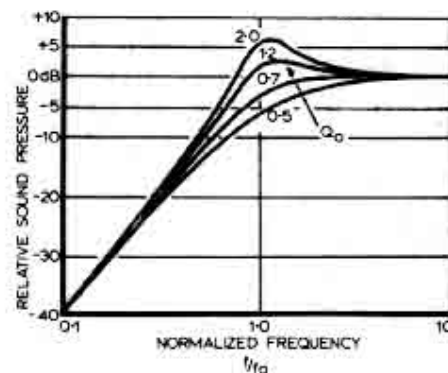
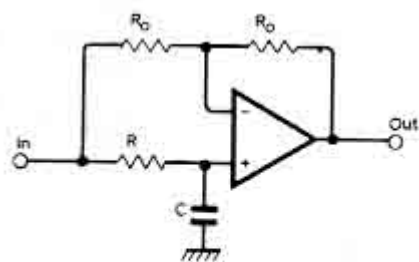


Рисунок 17 Частотная характеристика жесткого поршня в закрытом ящике. Параметры резонанса f_0 и Q_0 определяются согласно рис. 18 и 19.



$$\text{Delay } \tau = \frac{2RC}{1 + (2\pi fRC)^2}$$

Рисунок 16 Несколько широкополосных схем задержки со сдвигом фаз каскадируются для получения требуемой компенсации задержки.

полосная схема задержки, рис. 16.

Задержка этой схемы изменяется в зависимости от частоты, от $\tau = 2RC$ на низких частотах, до почти нулевой задержки на очень высоких частотах. Чтобы уменьшить зависимость в области частот около точки разделения частот кроссовера, значения компонентов следует выбирать таким образом, чтобы $RC < 1/20f$. Для получения требуемой задержки при соблюдении условия $RC < 1/20f$

Оба параметра, и f_0 и Q_0 удобно вычислять из частотной характеристики полного сопротивления в точке резонанса динамика, Рис. 18.

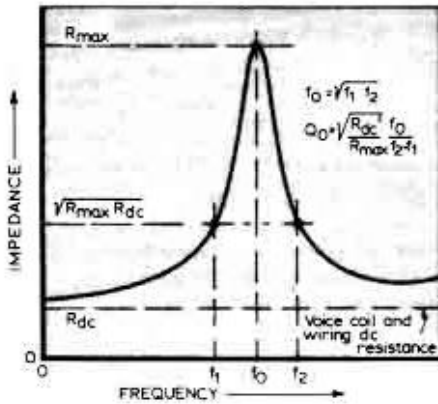


Рисунок 18 График полного сопротивления в точке резонанса низкочастотного динамика, измеренная, как показано на рис.19, из которого получены значения Q_0 и f_0 для рис.17.

Если катушка динамика подключается к генератору с полным внутренним сопротивлением, намного превышающим R_{max} , то напряжение на клеммах становится пропорциональным импедансу, а по графику напряжения, могут быть определены Q_0 и f_0 , рис. 19.

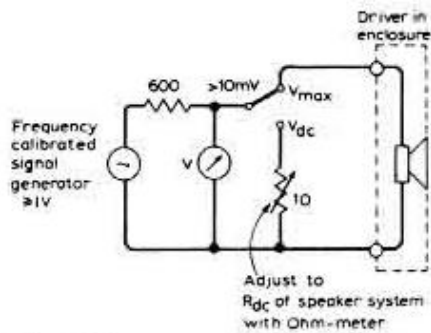


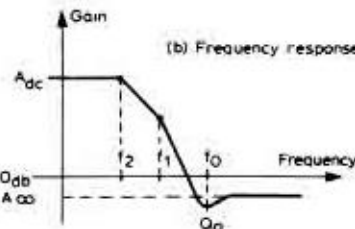
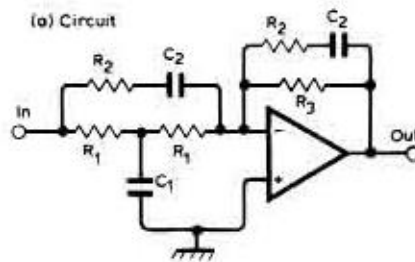
Рисунок 19 Установка измерения для рис. 18, чтобы определить R_{dc}/R_{max} исходя из V_{dc}/V_{max} и частот f_1 и f_2 из

$$V = \sqrt{V_{dc} * V_{max}}$$

Для двух низкочастотных динамиков В139 в их закрытом корпусе резонанс имеет место при частоте 54 Гц с добротностью 1,2. Теперь отклик можно компенсировать с помощью схемы, которая точно дополняет спад низкочастотного динамика и расширяет его до более низкой частоты среза, рис. 20. Этот подход к проектированию можно использовать для выравнивания других

акустических систем, если уделять пристальное внимание максимальному ходу диффузора и ограничениям на размах выходного напряжения усилителя мощности. Оба параметра увеличиваются в четыре раза, когда частота среза снижается на одну октаву.

При воспроизведении записей большая часть хода диффузора низкочастотного динамика используется для воспроизведения больших амплитуд от помех в виде гула (грохота) записи. Это тратит впустую ход диффузора динамика. К счастью, выходные сигналы гула (грохота) левого и правого каналов не совпадают по фазе и поэтому отменяются, когда происходит суммирование левого и правого каналов в центральном канале сабвуфера, как в этой конструкции. Отдельные левый и правый низкочастотные динамики можно легко соеди-



(c) Design formulas

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 \sqrt{C_1 C_2}}$$

$$Q_0 = \frac{1}{2\xi} = \frac{R_1}{2R_2 + R_3} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{Q_0} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} - 2$$

$$f_1 = \frac{1}{\pi R_1 C_1}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi (R_2 + R_3) C_2}$$

$$A_{dc} = \frac{R_3}{2R_1}$$

$$A_{\infty} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} < 1$$

$$\frac{A_{dc}}{A_{\infty}} = \frac{R_2 + R_3}{2R_1}$$

Рисунок 20 Схема расширяет отклик низкочастотного динамика в области низких частот до f_1 , обеспечивая точную компенсацию для Q_0 и f_0 с графиком амплитудной характеристики и расчетными формулами.

нить электрически, чтобы исключить ненужное движение воздуха

на дозвуковых частотах от одного динамика к другому.

Правильность АЧХ сабвуфера можно проверить, разместив микрофон на расстоянии около 1 см от диффузора, чтобы определить звуковое давление в ближнем поле, которое для равномерно движущегося поршня пропорционально звуковому давлению в дальнем поле.

Выравнивание АЧХ системы

Поскольку активные элементы уже используются для фильтров кроссовера, может казаться привлекательным использовать активные элементы для выравнивания всей акустической системы, с целью получения плоской амплитудно-частотной характеристики в предпочтительном месте прослушивания. Микрофон, расположенный в месте прослушивания будет улавливать как прямой звук, исходящий из динамиков, так и большое количество отражений от различных объектов и стен комнаты. Микрофон не может различить разные источники звука. Выходное напряжение микрофона, соответствующее прямому звуку из динамиков, будет замаскировано напряжением, возникшим из-за реверберирующего звукового поля. При этом, комбинация ухомозг, кажется, имеет свой ключ для определения деталей стереоизображения по прямому звуку, даже в том случае, когда энергия реверберации звука намного больше, чем у прямого звука. Это может объяснить, почему попытки выравнивания для получения плоской АЧХ в месте прослушивания дали неудовлетворительные результаты.

АЧХ на расстоянии одного метра от громкоговорителя, измеренная в комнате, представляется лучшей отправной точкой для выравнивания. Но даже для этого места совершенно плоский отклик, кажется, не дает наиболее естественного воспроизведения.

В этой конструкции, для получения плоской АЧХ динамика **B110** в диапазоне воспроизводимых им частот, применяется усиление низких частот на 3 дБ (последний модуль в схеме центрального канала на рис. 13). **T27** может следовать за собственным постепенным спадом, но если требуется плоская АЧХ на высоких частотах, то простая схема, показанная пунктирными линиями на входном буфере, создаст необходимый подъем на высоких частотах.

Оттенок точности

Аналогия может помочь описать субъективное впечатление от правильно спроектированной и выровненной системы, сравнив ее с цветной фотографией знакомой сцены. Средняя звуковая система может соответствовать изображению не в фокусе, возможно, с неправильным красным, синим или общим цветовым оттенком. Сравнить две такие системы друг с другом - все равно что смотреть на два варианта размытой реальности. В случае, когда кто-то может предпочесть одно другому из-за его цветового баланса, не может быть и речи о реалистичном воспроизведении.

Высокоточная звуковая система соответствует фотографии, которая сфокусирована и которая не делает неестественных акцентов на любом цвете. При приближении к высокому стандарту воспроизведения, становится возможным отчетливо слышать участки с небольшими дефектами, аналогично изображению, которое не точно сфокусировано или имеет лишь незначительный цветовой оттенок. Для высокочастотного выравнивания акустической системы это означает, что слишком большая выходная

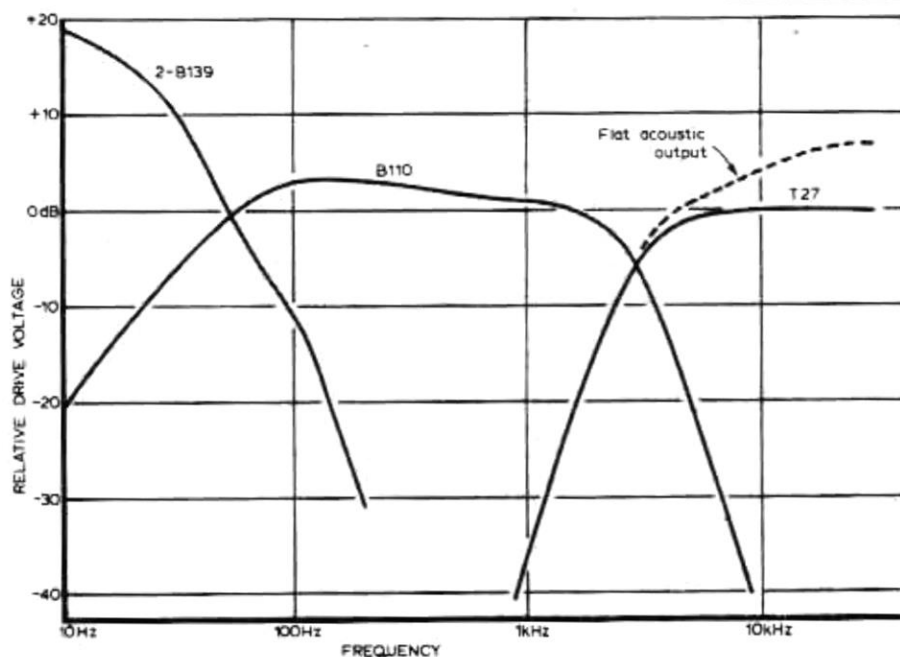


Рисунок 21 Напряжения, измеренные на клеммах динамиков всей системы. Плоская характеристика, кажется, не обеспечивает естественного воспроизведения звука.

мощность смещает звуковое изображение из фокуса. Глубина изображения становится размытой, потому что высокочастотные обертоны кажутся менее отдаленными, чем виртуальные источники, которые их генерируют.

Выбранная эвкализация динамиков соответствует наибольшему разнообразию программного материала. Однако для исправления различий в записях необходим правильно работающих регулятор высоких частот в предварительном усилителе. Окончательный отклик напряжений возбуждения для трех динамиков, показанный на рис. 21, можно было бы генерировать или аппроксимировать с помощью пассивных схем. Практическая реализация подобного пассивного кроссовера может оказаться сложной, поэтому не было предпринято никаких попыток разра-

ботать пассивный кроссовер/корректор. Когда строится только одна акустическая система, гибкость проектирования активных схемных решений намного превышает возможную экономию затрат при изготовлении пассивных схем.

Заключение

Я надеюсь, что некоторые из идей и методов проектирования, описанных здесь, будут стимулировать более рациональное проектирование акустических систем. Конечно, для уменьшения резонансов динамики будут постоянно улучшаться, но при их разработке гораздо большего изучения потребуют: дизайн их корпуса, материалы и технологии изготовления. Тем не менее, можно разработать очень удовлетворительную акустическую систему, используя стандартные современные компоненты.

Трехполосная акустическая система с кроссовером и электронной задержкой: Часть 3

Изменения и доработки акустической системы, описанной в частях 1 и 2

Зигфрид Линквиц

НАСТОЯЩИЕ ПРИМЕЧАНИЯ призваны способствовать дальнейшему развитию акустических систем и принести больше удовольствия тем, кто хочет взять на себя задачу построения своих собственных систем. Изменения и уточнения, внесенные в исходную акустическую систему, описанную в частях 1 и 2, представлены для демонстрации полноты подхода к аналитическому проектированию и не должны рассматриваться как указание на то, что предыдущая система устарела. Звуковые эффекты от этих изменений незначительны, а дополнительная сложность схемных решений будет полезна только тому, кто пытается достичь максимальной точности воспроизведения. Но описанные методы должны представлять общий интерес для любого разработчика акустических систем.

Я думаю, что при передаче сигнала для воссоздания иллюзии «источника жизни» с помощью громкоговорителей, самое слабое звено находится на стороне приемника микрофона. Наиболее вероятно, что для записи и воспроизведения соответствующего звукового поля требуется более двух громкоговорителей, но сначала это необходимо гораздо лучше понять, разработать и продемонстрировать. После этого можно будет перенестись в Симфонический зал, не выходя из кресла гостиной. Между тем и громкоговоритель, как необходимый электроакустический преобразователь, может приблизиться к высокому уровню развития.

Состязание между динамиком и фильтром

Любой динамик с подвижной катушкой, при питании от источника с постоянной амплитудой напряжения, имеет обобщенную частотную характеристику, показанную на рис. 22 (рис. 17). Это

фильтр второго порядка с асимптотическим наклоном 12 дБ на октаву ниже резонансной частоты f_0 и равномерным выходным звуковым давлением выше нее. Параметры f_0 и Q_0 легко определяются при измерении импеданса динамика, рис. 18. Эта обобщенная передаточная функция, между напряжением на клеммах и выходным звуковым давлением, применяется к низкочастотным, среднечастотным и высокочастотным динамикам в том случае, когда размеры их диффузоров невелики (рис. 2). Влияние этой передаточной функции необходимо учитывать при проектировании схемы кроссовера.

В качестве примера рассмотрим секцию фильтра верхних частот кроссовера для 25-миллиметрового купольного твитера с резонансом на 800 Гц с $Q_0 = 0,9$, рис. 23(а). Желаемая акустическая мощность должна соответствовать характеристике фильтра верхних частот кроссовера четвертого порядка 24 дБ на октаву, с частотой 1,5 кГц в точке спада -6 дБ (b). На первый взгляд, кажется достаточным сформировать напряжение на клеммах динамика таким образом, чтобы оно

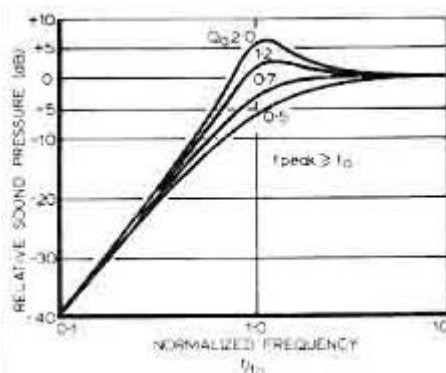


Рисунок 22 Частотная характеристика перемещения катушки динамика, размеры которого малы по сравнению с длиной волны, которая должна приниматься во внимание при проектировании схемы кроссовера.

соответствовало функции фильтра верхних частот 24 дБ на октаву (b), поскольку на частоте резонанса динамика фильтр имеет величину затухания 22 дБ. Действительно, для твитера T27 это и было сделано в первоначальной схеме кроссовера, рис. 10. Однако, для частот ниже резонанса f_0 , такое напряжение на клеммах вызывает спад акустического выходного сигнала динамика 36 дБ на октаву.

Для достижения точного акустического отклика (b), ниже частоты резонанса динамика в 800 Гц, напряжение на клеммах должно соответствовать наклону 12 дБ/октава (c). Затем необходимо точно скомпенсировать фазовый сдвиг и время групповой задержки, которые в противном

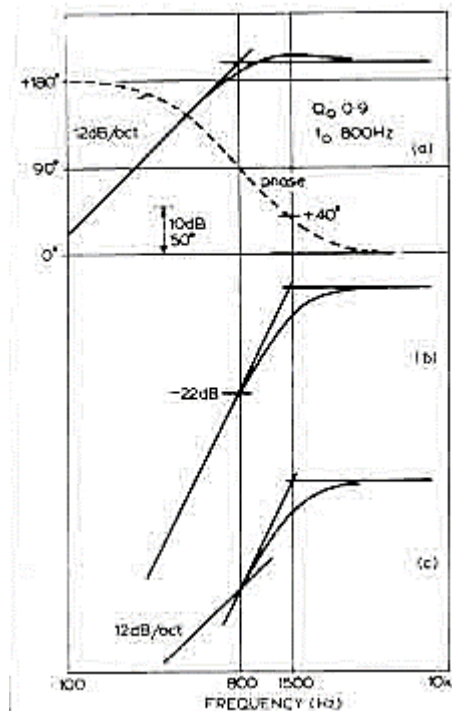


Рисунок 23 Для достижения акустического или общего отклика фильтра верхних частот с наклоном 24 дБ на октаву (b) требуется, чтобы напряжение на клеммах динамика соответствовало наклону 12 дБ на октаву ниже резонанса, скорректировав (c) неидеальную характеристику по звуковому давлению (a).

случае динамик добавил бы к акустической функции верхних частот. Дополнительный фазовый сдвиг вызовет наклон диаграммы направленности, поскольку давление звука, от высокочастотного и среднечастотного динамиков, увеличится до максимума в точке, находящейся вне оси (рис. 8). Для $Q_0 \geq 0,5$ величина фазового сдвига, вносимая фильтром верхних частот второго порядка, может быть рассчитана так:

$$\varphi = 180^\circ - \arctan \left[2Q_0 \frac{f}{f_0} + \sqrt{(2Q_0)^2 - 1} \right]$$

...

$$\varphi = 180^\circ - \arctan \left[2Q_0 \frac{f}{f_0} + \sqrt{(2Q_0)^2 - 1} \right]$$

В приведенном выше примере динамик вносит вклад в сдвиг фазы 40° при 1,5 кГц. Поэтому, если не будут предприняты описанные далее меры, звуковые давления от среднечастотного и высокочастотного динамиков, будут находиться не в фазе.

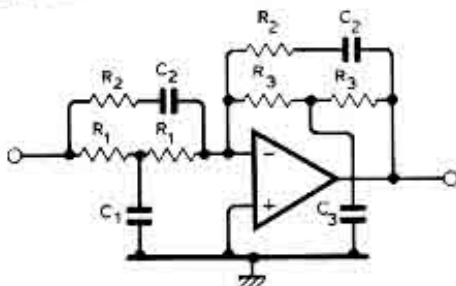
Напряжение на клеммах динамика

Акустическая функция фильтра верхних частот из предыдущего примера требует формирования на клеммах динамика точного напряжения, позволяющего компенсировать собственную частотную характеристику динамика. АЧХ фильтра высоких частот четвертого порядка эквивалентна каскаду из двух секций Баттерворта второго порядка. Поэтому первым шагом является выравнивание выходного сигнала динамика для соответствия ее функции Баттерворта второго порядка, делая это формированием приложенного к его клеммам

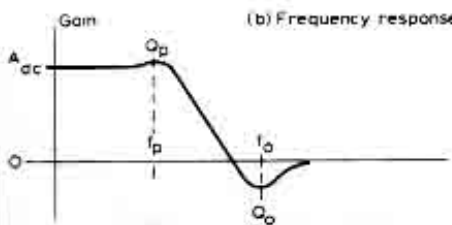
напряжения, рис. 24. Для реализации этой полезной идеи были разработаны схема и формулы, рис. 25. Это модификация схемы, показанной на рис. 20, которая будет использоваться несколько позже и для расширения отклика НЧ-динамика.

Примечание для тех, кто знаком с описанием передаточных функций по полюсам и нулям в комплексной частотной плоскости: эта схема будет генерировать пару комплексных нулей (f_0, Q_0), которые расположены так, что они отменяют комплексные полюсы динамика (f_p, Q_p). Кроме того, имеется пара сложных полюсов (f_p, Q_p), которые размещаются на частоте кроссовера в

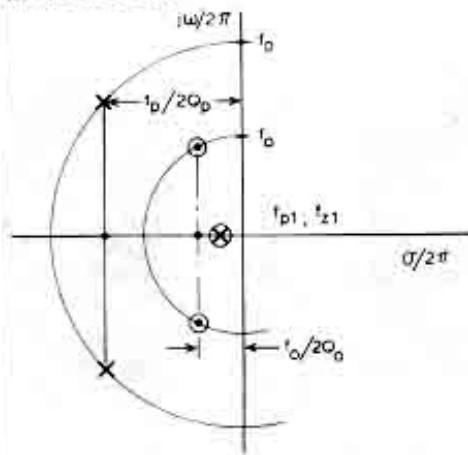
(a) Circuit



(b) Frequency response



(c) Pole-zero location



(d) Design formulas

(1) Specify f_0, Q_0, f_p, Q_p

$$k = \frac{\frac{f_0}{f_p} - \frac{Q_0}{Q_p}}{\frac{Q_0}{Q_p} - \frac{f_0}{f_p}} \quad k > 0 \text{ required}$$

$$(3) \text{ Choose } C_2 \quad (4) R_1 = \frac{1}{2\pi f_0 C_2 [2Q_0(1+k)]}$$

$$(5) R_2 = 2kR_1 \quad (6) C_1 = C_2 [2Q_0(1+k)]^2$$

$$(7) C_3 = C_1 \left(\frac{f_p}{f_0} \right)^2 \quad (8) R_3 = R_1 \left(\frac{f_0}{f_p} \right)^2$$

$$(9) A_{dc} = 40 \log \frac{f_0}{f_p} \quad [\text{dB}]$$

(e) Circuit analysis

$$\left. \begin{aligned} f_{p1} &= \frac{1}{\pi C_1 R_1} \\ f_{z1} &= \frac{1}{\pi C_3 R_3} \end{aligned} \right\} f_{p1} \approx f_{z1} \text{ required}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 \sqrt{C_1 C_2}} \quad Q_0 = \frac{R_1}{2R_1 + R_2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_3 \sqrt{C_2 C_3}} \quad Q_p = \frac{R_3}{2R_3 + R_2} \sqrt{\frac{C_3}{C_2}}$$

Рисунок 25 Схема для компенсации резонанса динамика на f_0 и расширения частотного отклика на f_p , применяемая, или для выравнивания отклика низкочастотного динамика, или для коррекции отклика на f_p СЧ или ВЧ динамиков. Рассчитанные значения должны быть проверены с помощью уравнений анализа цепи.

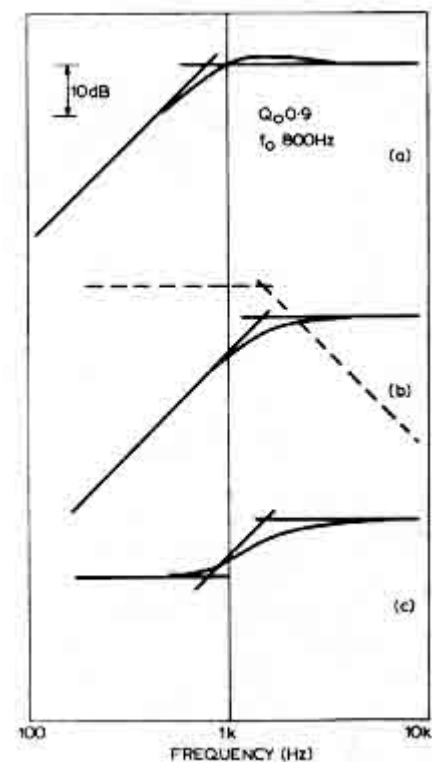


Рисунок 24 Требуемое напряжение возбуждения (c) должно быть постоянно ниже резонансной частоты возбуждения f_0 , чтобы создать желаемый акустический ФВЧ (b) (ход диффузора показан пунктиром) в результате реакции динамика (a).

случае фильтра верхних частот твитера, или, в случае выравнивания сабвуфера, в нижней точке отсечки сабвуфера. Коэффициент k в расчетных формулах необходим для отмены пары полюс-ноль (f_{P1}, f_{Z1}), которые в противном случае были бы введены схемой.

Второй шаг в разработке акустического фильтра верхних частот состоит в том, чтобы совместить эту схему со стандартной секцией фильтра Баттерворта второго порядка для достижения общего напряжения возбуждения, показанного на рис. 23 (с). Полная схема, рис. 26, лишь немного сложнее, чем представленная на рис. 14, но она обеспечивает получение точного акустического выходного сигнала четвертого порядка, показанного на рис. 23 (б).

Частоты динамиков и кроссовера

Описанная методика может быть использована для модификации исходного фильтра верхних частот **T27** (f_0 1,2 кГц, Q_0 1.1). Вместо этого я использовал высокочастотный твитер Son-Audax **HD12.9D25** и изменил частоту кроссовера для **B110** до 1,5 кГц. Я использовал **HD12.9D25** с несменной звуковой катушкой вместо **HD12.9D25A** из-за более плоской частотной характеристики. При частоте предыдущей точки кроссовера 3 кГц, диаметр диффузора **B110** составляет около одной длины волны, поэтому можно ожидать соответствующей направленности, рис. 1. На более высоких частотах, среднечастотный и высокочастотный динамики разделяются при единичной длине волны частоты 3 кГц, поэтому в диапазоне частот кроссовера объединенная диаграмма направленности начинает сужаться (рис. 3 (б)). Пониженная частота кроссовера уменьшает акустические размеры d/λ в два раза, таким образом получается более широкая и более равномерная дисперсия для всех частот, как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях излучения, рис. 2. Затем, по мере увеличения частоты, акустическая система приближается к точечному акустическому источнику.

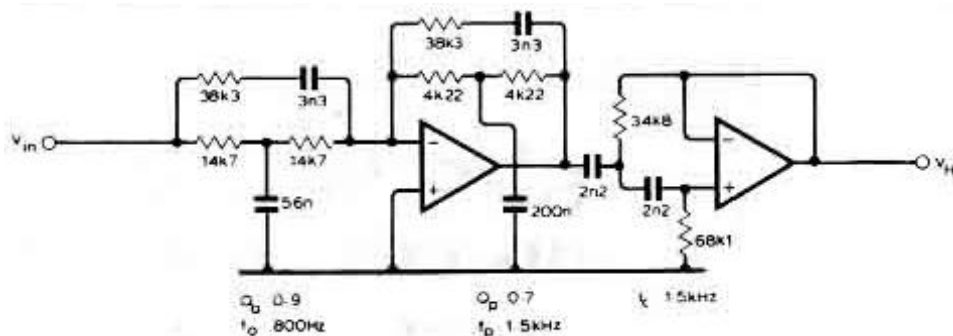


Рисунок 26 Схема с акустическим фильтром высоких частот 1,5 кГц 24 дБ / октава для купольного твитера Son-Audax HD12.9D25. Каскад на первом операционном усилителе точно компенсирует резонанс динамика при 800 Гц и создает акустический фильтр высоких частот 12 дБ/октава 1,5 кГц. Ступень на втором операционном усилителе - это обычная секция Butterworth. Расчетные формулы для этой схемы приведены на рис. 25 и рис. 14.

Когда среднечастотный динамик воспроизводит диапазон частот на одну октаву меньше, то для обеспечения прежней акустической мощности, твитер должен иметь ход диффузора в четыре раза больше. В моем случае динамик Son-Audax работает хорошо, и по сравнению с **T27**, неравномерность АЧХ в худшую сторону не изменилась. АЧХ нового динамика не имеет наклона вниз в районе верхних частот. Для большинства коммерческих записей, субъективно, кажется предпочтительным наличие небольшого, около 3 дБ, спада в диапазоне от 2 кГц до 15 кГц, такую АЧХ можно легко получить регулировкой, с помощью правильно разработанного регулятора высоких частот.

Точка кроссовера между динамиками низкочастотного и среднечастотного диапазонов была увеличена с 70 до 100 Гц, что позволило снизить максимальный ход диффузора **B110** в два раза при прежнем уровне звукового давления акустической системы. Опыт показывает, что иногда срабатывает ограничитель мощности, и только среднечастотном диапазоне. При тщательной защите для управления каждым **B110** может рассматриваться усилитель с мощностью 100 Вт. Трехполосная система показала себя очень хорошо при срабатывании ограничителя среднечастотного усилителя. При коротких переходных процессах срабатывание защиты не слышно, потому что канал НЧ-динамика и НЧ-динамик по-

прежнему воспроизводят неискаженную часть общего сигнала. Уменьшенное частотное покрытие **B110** как на низких, так и на высоких частотах улучшает распределение мощности усилителей между динамиками.

Частота точки кроссовера между низкочастотным и среднечастотными динамиками не была повышена до более высокой частоты, поскольку центральный низкочастотный громкоговоритель расположен на 0,84 метра дальше среднечастотных динамиков, и поэтому имеет фазовый сдвиг,

$$\varphi = 360^\circ \frac{d}{\lambda}$$

а при более высокой частоте количество каскадов, компенсирующих звуковую задержку, может стать чрезмерным. Кроме того, при смешивании информации левого и правого каналов, и слишком высокой частоте точки кроссовера, может пострадать стереоэффект.

В будущем, для воспроизведения надлежащим образом записанного звукового поля, может возникнуть необходимость иметь по настоящему полночастотный диапазон у отдельных динамиков. Ранее (1 и 2 части публикации), среднечастотный резонанс на частоте 70 Гц использовался в качестве акустической секции фильтра верхних частот 24 дБ/октава. Вторая секция фильтра была предоставлена активной схемой. Теперь обе секции фильтра реализованы в электронном виде, с использованием схемы на рис. 25, производя компенсацию

резонанса **B110** в корпусе, используя f_0 и Q_0 определённых согласно рис. 18 (f_0 73 Гц, Q_0 0,6). Таким образом, вся схема имеет конфигурацию, аналогичную конфигурации схемы для твитера на рис. 26.

Выравнивание сабвуфера

Низкочастотный громкоговоритель центрального канала охватывает относительно узкий частотный диапазон. Особый интерес представляют нижняя точка отсечения и наклон графика спада АЧХ. Есть некоторые признаки того, что поведение фазы на низких частотах может иметь слышимые эффекты. Например, прямоугольная волна с частотой 5 Гц, которая звучит как последовательность щелчков, изменит свой тональный характер при передаче через схему, пропускающую все частоты. Из теории мы знаем, что любой фильтр верхних частот с наклоном более 6 дБ/октава имеет на выходе некоторое количество звона. Нецелесообразно иметь спад АЧХ низкочастотного громкоговорителем 6 дБ/октава, поскольку это будет означать, что ход его диффузора будет продолжать увеличиваться ниже точки -3 дБ. Единственный практичный способ - использовать спад 12 дБ/октава. Если Q этого ФВЧ поддерживается на низком уровне - 0,5, то минимум перерегулирования сочетается с минимумом хода диффузора.

Исходная схема, рис. 13, является хорошим приближением к желаемому результату. В модернизированном кроссовере используется схема, представленная на рис. 25, с f_0 19,3 Гц и Q_0 0,5, что дает частоту 30 Гц при -3 дБ.

Из-за того, что точка раздела кроссовера 100 Гц находится относительно недалеко от точки коррекции НЧ динамика 19,3 Гц - соотношение частот менее декады, канал НЧ динамика вносит фазовые искажения в диапазон частот выше 100 Гц.

Схожесть сущности динамика с фильтром высоких частот позволяет оценить сдвиг фазы низкочастотного динамика на частоте 100 Гц относительно канала среднечастотного диапазона. В

соответствии с предыдущей формулой, для $Q_0=0.5$:

$$\varphi = 180^\circ - 2 \arctan \frac{f}{f_p} = 22^\circ$$

Эта величина фазового сдвига сама по себе незначительна, но в сочетании с фазовым сдвигом из-за расположения низкочастотного динамика дальше среднечастотного диапазона на 0,84 метра, становится необходимым добавить задержку в канал среднечастотного диапазона. Это реализовано с помощью схемы на рис. 16, которая имеет фазовый сдвиг:

$$\varphi = 180^\circ - 2 \arctan(2\pi fRC)$$

Абсолютные значения фазового сдвига и крутизны фазовой кривой, или группового времени задержки, между низкочастотным динамиком и среднечастотным каналом должны совпадать. Конкретные значения компонентов **R** и **C** схемы задержки зависят от настройки конкретной системы динамиков. Компенсация может не потребоваться, если среднечастотный диапазон и низкочастотный динамик излучают из одной плоскости. Два каскада коррекции фазы оказывают незначительное влияние на кроссовер 1,5 кГц.

Слышимость схем кроссовера

Снижение частоты точки кроссовера для твитера до 1,5 кГц вызвало некоторое беспокойство по поводу слышимости фазовых искажений. Комбинированное звуковое давление на средних и высоких частотах имеет ровную характеристику АЧХ. Звуковые давления от двух динамиков находятся, относительно друг друга, в фазе на всех частотах, но общее звуковое давление имеет частотно-зависимый фазовый сдвиг относительно электрического сигнала на входе схемы кроссовера, а групповое время задержки не постоянно с изменением частоты, рис. 11.

Была использована новая форма тестового сигнала, которая состоит из пятитактного тонального пакета переменной частоты. Вспышка тона не включается и не выключается обычным резким образом, вместо этого она накапливается и постепенно затухает, рис. 27. Огибающая всплеска сле-

дует функции приподнятого косинуса (Raised-cosine). Этот сигнал идеально подходит для измерения очень важного сочетания психоакустических частотных и временных характеристик акустических систем. Спектральное содержание формируемого тонального всплеска сосредоточено в узком частотном диапазоне. При подобных тестах ухо, кажется, очень чувствительно к фазовому искажению этого сигнала, в то время как всплеск прямоугольной волны или прямоугольной огибающей практически бесполезен на более высоких частотах.

Система с фильтрами кроссовера 24 дБ/октава пропускает все частоты и имеет фазовый сдвиг второго порядка со сложными полюсами и нулями при $Q = 0,7$. При подключении этой схемы к тракту тестового сигнала не было замечено никаких слышимых изменений. Q должен был быть увеличен до 2,4, прежде чем был замечен какой-либо эффект с испытательным сигналом 1,5 кГц. Наблюдение с помощью осциллографа показало, что звенит задний край сформированного всплеска, который становится все более и более слышимым, когда Q поднимается выше 2,4. На основании этих тестов и других программных материалов можно с уверенностью сделать заключение, что искажение фазы кроссовером 24 дБ/октава незначительно.

Часто заявляется о превосходстве схем кроссоверов низкого порядка с наклоном 6 дБ на октаву. Из рисунка 24 должно быть очевидно, что с помощью пассивных схем не может быть реализован

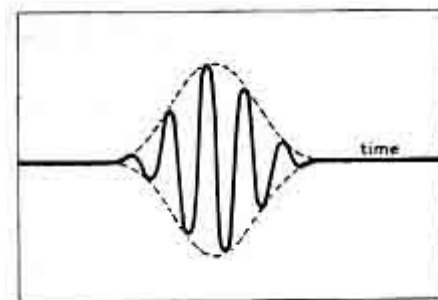


Рисунок 27 Для оценки слышимости фазовых искажений используется имеющий определенную форму сигнал **ToneBurst**.

акустический отклик 6 дБ на октаву, потому что сам динамик вводит наклон 12 дБ на октаву и упомянутый выше фазовый сдвиг. Простая подача на клеммы динамика напряжения, которое имеет крутизну спада 6 дБ на октаву, гарантировало бы наклон 18 дБ на октаву ниже резонанса динамика и 6 дБ на октаву выше него, но с чрезмерным фазовым сдвигом, который сводит на нет все аргументы о преимуществах фазовых характеристик схем этого типа.

С помощью пассивных схем будет чрезвычайно трудно достичь даже акустического фильтра 12 дБ на октаву, это видно из графика требуемого напряжения на клеммах рис. 24 (с).

Акустический фильтр верхних частот самого низкого порядка, который может быть реализован с помощью пассивных схем, имеет наклон 18 дБ/октава, иногда называемый «акустическим Баттервортом». Этот фильтр все еще страдает от фазовой квадратуры между выходными сигналами низкочастотного и высокочастотного динамиков, и результирующей неравномерности в диаграмме направленности, зависящей от частоты. **Неожиданно, но кроссовер 24 дБ/октава является функцией самого низкого порядка, для которой такой важный параметр, как диаграмма направленности, имеет устойчивую ось.** Динамики с так называемой линейной фазой основаны на желаемом мышлении, а не на физических реалиях.

Пассивные кроссоверы

Не все имеют возможность заниматься дома электроникой и довольно сложными схемами, содержащими операционные усилители, для повторения этой акустической системы. Пассивный кроссовер кажется привлекательным, поскольку состоит только из индуктивностей, конденсаторов и резисторов в относительно простом соединении. К сожалению, домашнему конструктору значительно труднее получить правильные значения элементов для пассивной сети, чем проектировать активные схемы, имеющие большую гибкость для изменения

передаточных функций и усиления.

Для проектирования пассивной схемы для акустического кроссовера 24 дБ/октава требуется компьютерная оптимизация, если только вы не удовлетворены процедурой проб и ошибок, на которой основывалось большинство конструкций громкоговорителей до сегодняшнего дня. Если динамик может быть представлен резистором, то точные значения схемы легко вычисляются, рис. 28 (а). Реальные динамики имеют сложное конечное сопротивление, рис. 18. Это влияет не только на теоретические значения компонентов схемы, но и на топологию, что можно увидеть, сравнивая две схемы на рис. 28. Здесь показана конструкция прототипа кроссовера для частоты 1,6 кГц между высокочастотным динамиком Son-Audax и 110-мм низкочастотно-среднечастотным динамиком, аналогичным **B110**, в фанерном корпусе из рис. 4. Даже оптимизированная на компьютере схема рис. 28 (б), имеет желаемые акустическо-амплитудную и фазовую характеристики примерно только для одной октавы в обе стороны от частоты кроссовера. Требуется дополнительное электрическое выравнивание для корректировки дифракционных эффектов ниже 1 кГц, и для расширения низкочастотного отклика до 50 Гц.

Активная схема, в отличие от пассивной, может быть точной, потому что источник напряжения на клеммах динамика, способен передать на динамик любую желаемую частотную характеристику, без взаимодействия между частотной характеристикой источника и импеданса динамика.

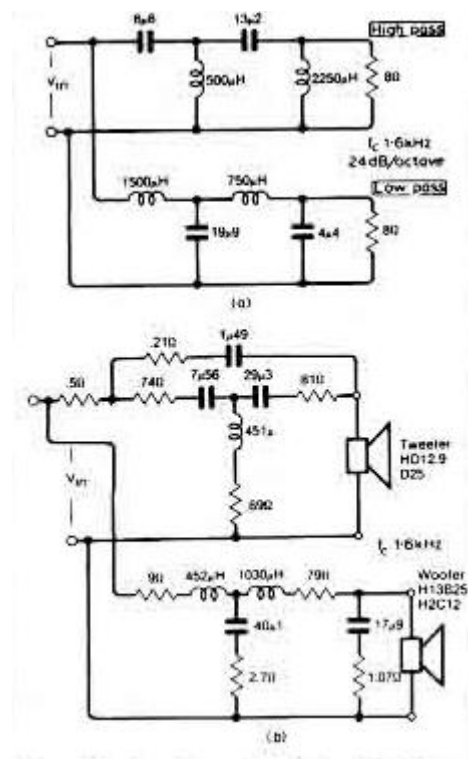


Рисунок 28 Схема пассивного кроссовера с акустическим наклоном 24 дБ/октава и частотой кроссовера 1,6 кГц. Если вместо динамиков предполагаются разъемы с постоянным сопротивлением, то схема и значения ее элементов могут быть определены аналитически (а). Оптимизированная на компьютере схема для реальных динамиков (б).

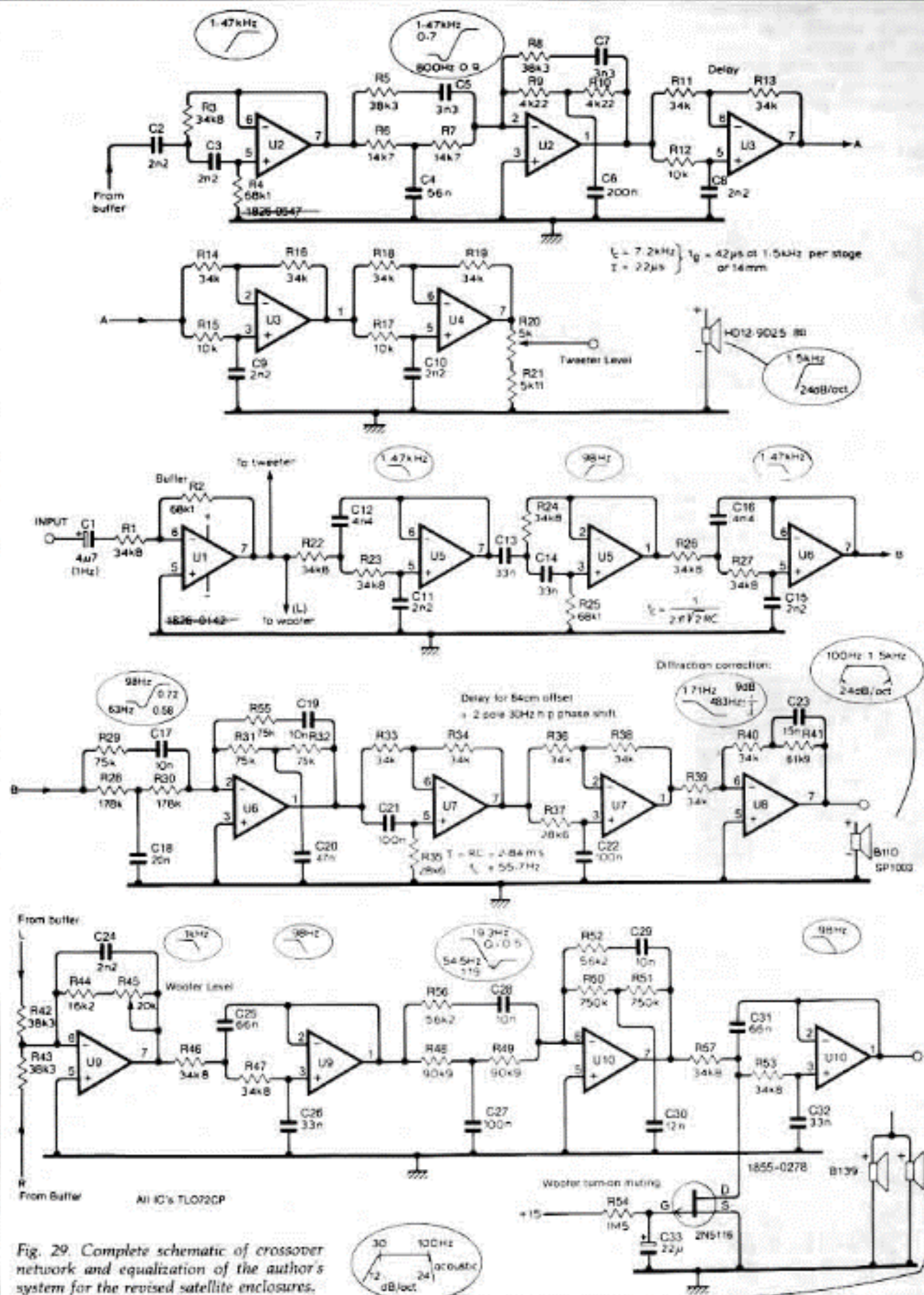
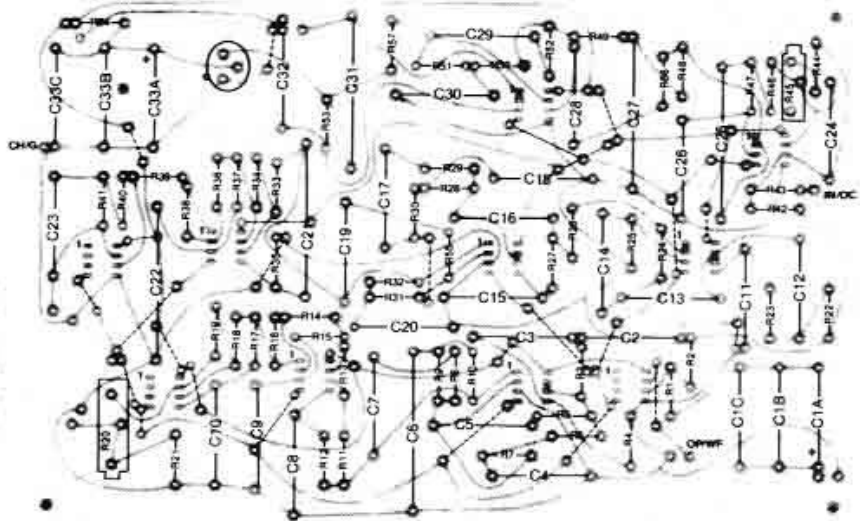


Fig. 29. Complete schematic of crossover network and equalization of the author's system for the revised satellite enclosures.

	Qty	Value
C ₁	1	4.7μF
C _{2,3,8,9,10,11,15,24}	8	2200pF
C ₄	1	5600pF
C _{5,7}	2	3300pF
C ₆	1	.2μF
C _{12,16,20}	3	4700pF
C _{17,19,28,29}	4	.01μF
C ₁₈	1	.02μF
C _{21,22,27}	3	.1μF
C ₂₃	1	.015μF
C _{25,31}	2	.068μF
C _{13,14,26,32}	4	.033μF
C ₃₀	1	.012μF
C ₃₃	1	22μF
R _{1,3,22,23,24,26,27,46,47,53,57}	11	34.8k
R _{4,4,25}	3	68.1k
R _{5,8,42,43}	4	38.3k
R _{6,7}	2	14.7k
R _{9,10}	2	4.22k

R _{11,13,14,16,18,19,33,34,36,38,39,40}	12	34k
R _{12,15,17}	3	10k
K ₂₀	1	5k POT
R ₂₁	1	5.11k
R _{28,30}	2	178k
R _{29,31,32,55}	4	75k
R _{35,37}	2	28.6k
R ₄₁	1	61.9k

R ₄₄	1	31.6k
R ₄₉	1	20k POT
R _{48,49}	2	90.9k
R _{52,36}	2	56.2k
R _{50,51}	2	750k
R ₅₄	1	1.5M
U ₁₋₁₀	10	TL072CP
Q ₁	1	2N5116



Parts listed above are for one channel. The builder need not double the components for the woofer if only one woofer is to be used. The circuit layout was designed to accept polypropylene, polystyrene, parylene and polycarbonate capacitors in both filter and bypass applications for sonic improvement. If you wish to bypass electrolytics, choose values that are 2% of the preceding value, i.e. 4.7μF = .094μF (.1μF); 1880μF (1800pF). All resistors are 1/4W, 1% metal film. For the ±15V power supply the Sulzer design (TAA, 2/80) is suitable.

