

Звук: теория, устройства, практические рекомендации

Введение

С различными аудиосистемами человек сталкивается ежедневно. Стереосистема или хотя бы простой радиоприемник есть в каждом доме, владельцы автомобилей устанавливают в свои машины аудиоаппаратуру, которая по сложности превосходит домашние устройства, а на предприятиях широко применяются системы связи Интерком. В данном курсе рассматривается особый класс аудиосистем - профессиональные звукоусилительные системы, и термин "звуковая система" в нем используется, когда подразумевается комплект звукоусилительной аппаратуры.

Профессиональная звукоусилительная аппаратура, как правило, сложнее обычных домашних стереосистем, поэтому, чтобы научиться правильно ее использовать, нужно хорошо разбираться в принципах ее работы.

Данный курс даст те знания, которые помогут не только надлежащим образом работать с системами усиления звука, но и позволят научиться собирать такие системы самостоятельно.

Глава 1

1.1 Аудиосигнал

Звуковые волны

Звук - это разновидность кинетической энергии, которая называется "акустической" и представляет собой пульсацию давления, возникающее в физической среде при прохождении звуковой волны.

Полный период колебания волны звукового давления состоит из полупериода сжатия (повышения давления) и последующего полупериода разряжения молекул воздуха (понижения давления). Звуки с большей амплитудой (громкие) вызывают более сильное сжатие и разряжение молекул воздуха, чем звуки с меньшей амплитудой (тихие).



Рис.1.1. Графическое представление синусоидальной звуковой волны

Скорость пульсации звукового давления называется "частотой волны". К звуковым волнам относятся те, частота пульсации давления которых в воздухе составляет от 20 до 20000 колебаний (полных периодов) в секунду. Частота определяет другую характеристику звука - его высоту. И хотя высота звука является более сложной характеристикой, чем частота (она зависит также от амплитуды звуковых колебаний), в общем случае, звуки большей частоты воспринимаются, как более высокие. Для измерения частоты звуковых колебаний используется единица, которая называется "герц" и обозначается Гц:
 $20 \text{ Гц} = 20 \text{ колебаний в секунду}$.

Периодом волны называется время одного полного колебания звуковой волны, он измеряется в секундах и определяется по уравнению:

$$\text{Период} = 1/\text{Частота}.$$

Скорость распространения звуковой волны в воздухе при нормальных условиях (при 15 °C на уровне моря) составляет 344 м/с (1130 фут/с). Скорость звука не зависит от его частоты. Реальное расстояние, которое звуковая волна определенной частоты проходит за один полный период, называется "длиной волны". Длина волны выражается уравнением:
 $\text{Длина волны} = \text{Скорость звука} / \text{Частота}$

Звук как электрический сигнал

Звук (аудиосигнал) может быть передан в виде колебаний электрического напряжения или силы тока. В аудиоаппаратуре сила тока (или напряжение) сигнала пульсирует точно с такой же частотой, что и энергия звуковых колебаний, которую она представляет, а амплитуда электрического аудиосигнала изменяется пропорционально амплитуде звуковой волны.

Амплитуда (или сила аудиосигнала) называется "уровнем сигнала". Уровень акустического или электрического сигнала выражается в децибелах. (Эти единицы измерения подробно будут рассмотрены в гл. 4).

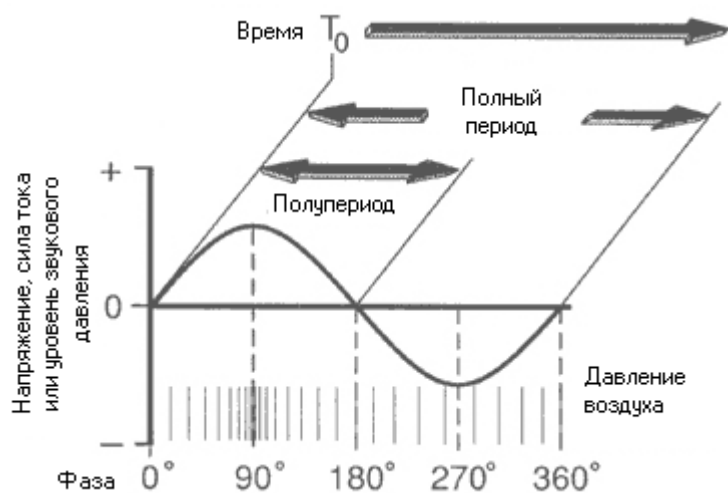


Рис. 1.2. Графическое представление аудиосигнала (один полный период синусоидальной волны).

Фаза

Разница во времени между звуковой волной (или аудиосигналом) и определенной точкой отсчета, начальным моментом времени, называется "фазой сигнала". Фаза измеряется в градусах, и один полный период синусоидальной волны равен 360° .

За начальный момент времени может быть выбрано любое произвольное значение на оси времени. На рис. 1.2 аудиосигнал представлен в виде синусоидальной волны. (Синусоидальная волна - это чистый тон с одной основной частотой). Фаза синусоидальной волны на этом рисунке определяется относительно начального момента времени T_0 ,

который совпадает с началом первого периода волны (но в качестве точки отсчета можно было бы принять любую точку внутри периода волны).

Точкой отсчета фазы может служить и другой сигнал. В этом случае опорный сигнал должен повторять форму сигнала, фазу которого измеряют. На рис. 1.3 показан процессор аудиосигналов с одним входом V_{in} и одним выходом V_{out} . Здесь фаза выходного сигнала определяется относительно входного.

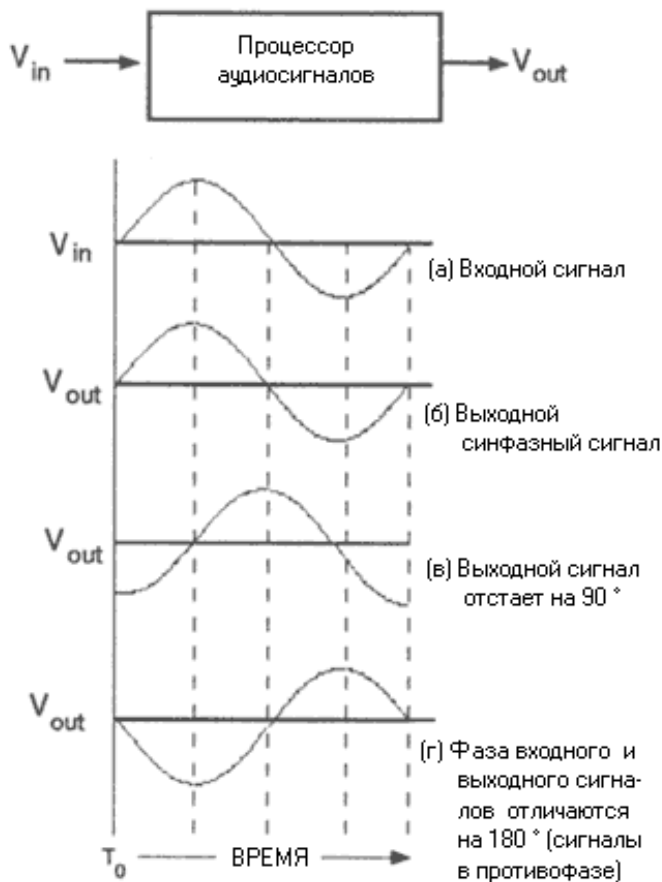


Рис. 1.3. Соотношение фаз сигналов на входе и выходе процессора

На рис. 1.3б представлен выходной сигнал, фаза которого совпадает с фазой входного сигнала: обе синусоидальные волны пересекают точку начала координат в одно и то же время, и они имеют одинаковое направление. На рис. 1.3в выходной сигнал отстает от входного на 90° : синусоидальная волна пересекает точку начала координат, соответствующей максимуму другой волны, направление обеих волн совпадает. На рис. 1.3г фазы выходного и входного сигналов отличаются на 180° (обе синусоидальные волны пересекают точку начала координат в один и тот же момент времени, но они имеют разное направление). На разных частотах относительная фаза сигнала может быть различной, именно такие сигналы чаще всего присутствуют в реальных аудиосхемах.

Сложение синусоидальных волн

Фаза сигнала имеет очень большое значение, так как от нее зависит то, как будет происходить наложение сигналов. При микшировании сигналов на микшерском пульте или смешивании звуковых волн в воздухе, их фазы складываются алгебраически. На рис. 1.4 показано сложение двух синусоидальных сигналов с одинаковыми уровнем и частотой, но разными фазами.

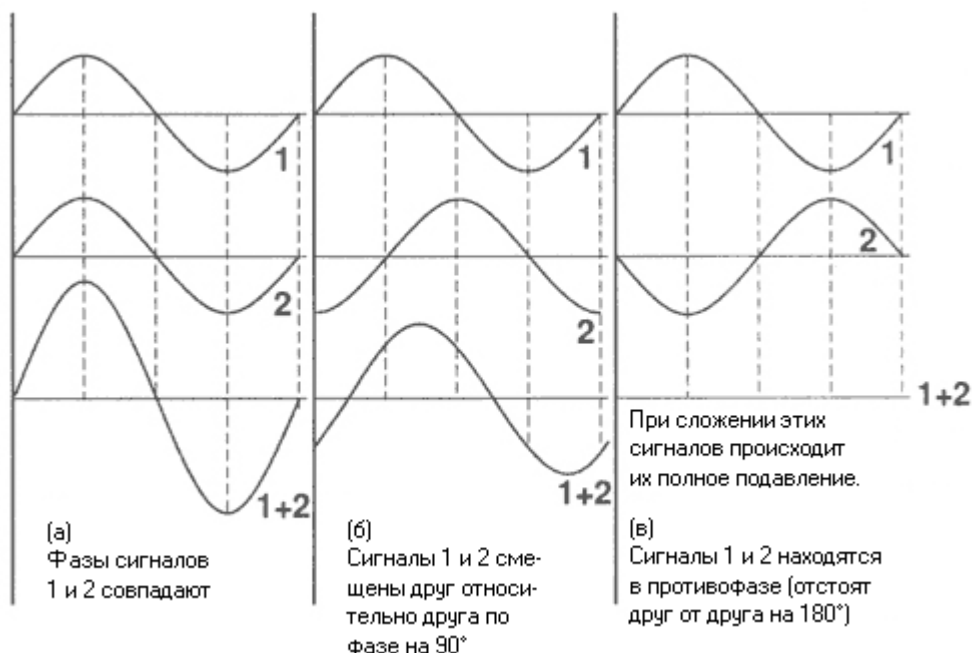


Рис. 1.4. Сложение двух синусоидальных сигналов с одинаковыми уровнем и частотой, но разными фазами

Синусоидальные волны, показанные на рис. 1.4а, синфазны, поэтому при их сложении получается волна с удвоенной амплитудой. Синусоидальные волны, изображенные на рис 1.4б отличаются по фазе на 90° , поэтому амплитуда образующейся в результате их сложения синусоидальной волны в 1,414 больше, чем амплитуда исходных волн. Фаза синусоидальных волн на рисунке 1.4в отличается на 180° , поэтому при их сложении происходит полное подавление сигнала.

1.2 Назначение звуковой системы

Звуковая система - это функциональный набор электронных компонентов, предназначенных для усиления звука. Как правило, усиливать звук необходимо в следующих случаях:

чтобы обеспечить лучшую слышимость. Например, человека говорящего на сцене в конце большого зала слышно не будет, а звуковая система позволит сделать звук более отчетливым. В этом случае стремятся к тому, чтобы не просто усилить звук, а стараются добиться, чтобы голос во всем зале воспринимался так же, как и вблизи;

в художественных целях. Выступление на сцене вокальной группы должно быть не только хорошо слышно в зале, в этом случае нужно обеспечить приятное звучание, которое доставит удовольствие слушателям;

чтобы слышать звуки из других помещений. На семинары и собрания иногда приходит столько людей, что они не всегда могут поместиться в одном конференц-зале. С помощью звуковой системы обсуждения и речи можно передавать в другое помещение, тогда люди, не попавшие в основной зал, тоже смогут их слушать.

Существуют также звуковые системы, предназначенные для эфирного вещания и воспроизведения записанных звуков. Такие системы во многом похожи на системы для усиления звука во время "живых" выступлений, только вместо микрофона или электрического музыкального инструмента в них предусмотрено либо устройство для воспроизведения с ленты, либо установлен компакт-диск проигрыватель, электропроигрыватель или радиотюнер.

1.3 Модель звуковой системы

Звуковая система усиливает звук за счет преобразования его в электрическую энергию, увеличения мощности этой электрической энергии с помощью электронных средств и последующего преобразования более мощной электрической энергии обратно в звук.

Устройства, установленные в звукозаписывающей и звуковоспроизводящей электронной аппаратуре и преобразующие энергию из одной формы в другую, называются "преобразователями", или "датчиками". Устройства, изменяющие один или несколько параметров аудиосигнала, называются "процессорами сигнала". Используя эти понятия, можно построить простейшую модель звуковой системы простейшего вида (рис. 1.5).

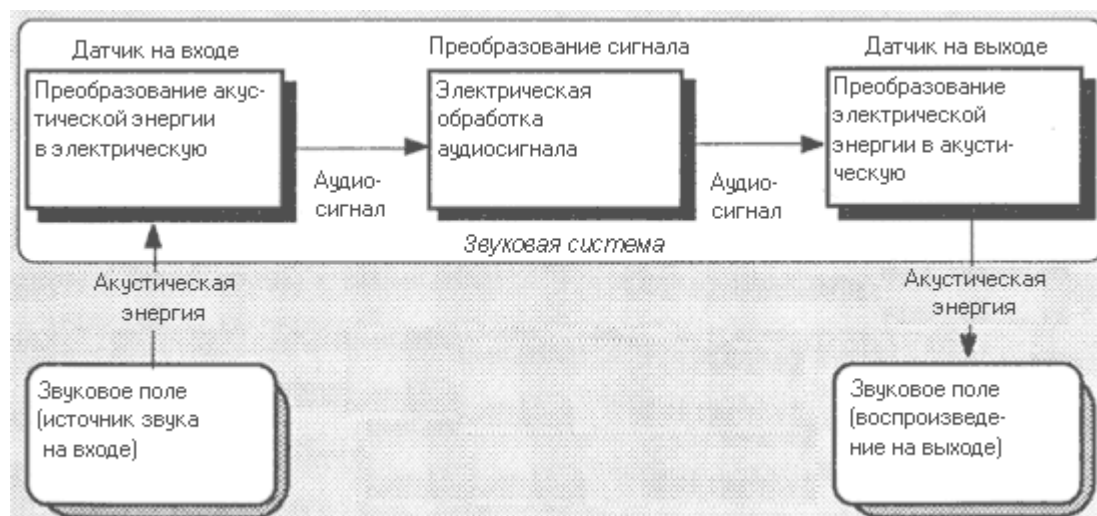


Рис. 1.5 Модель простейшей звуковой системы

Датчик на входе системы (микрофон или звукозаписывающее устройство) преобразует звук в колебания электрического тока или напряжения, которые являются точным представлением звука. Под аудиосигналом понимаются пульсации электрического тока или напряжения.

Процессор сигналов изменяет одну или несколько характеристик аудиосигнала. В простейшем случае он увеличивает мощность сигнала, такой процессор сигнала называется "усилителем". В реальных звуковых системах в этом блоке расположено много устройств: предусилители, микшерские пульта, процессоры эффектов, усилители мощности и др.

Выходные датчики (колонки или наушники) преобразуют усиленный или иным образом обработанный аудиосигнал обратно в звук.

1.4 Входные датчики

В звуковой системе датчики, стоящие на входе преобразуют звук в аудиосигналы. На вход системы звукоусилительной аппаратуры чаще всего устанавливают датчики следующих типов:

- обычные микрофоны - преобразуют звуковые волны, которые распространяются в воздушной среде, в аудиосигналы, передаваемые по микрофонным кабелям;
- контактные звукозаписывающие устройства (как правило, кварцевые, иногда емкостные) - преобразуют звуковые волны, распространяющиеся в плотной среде (дерево, металлы, кожа), в аудиосигнал. Иногда их ставят на акустические струнные инструменты: гитара, мандолина, скрипка и т.п.;
- магнитные звукозаписывающие устройства - устанавливаются на электрические струнные инструменты и преобразуют колебания тока магнитной индукции в аудиосигнал;
- головки для ленты - преобразуют колебания магнитного поля, записанные на магнитной ленте, в аудиосигнал;
- звукозаписывающее устройство электропроигрывателя (картриджи) - преобразует физическое движение иглы в аудиосигнал. В профессиональных системах наибольшее распространение получили картриджи с движущимся магнитом;
- лазерная головка - преобразует последовательность импульсов, записанных на компакт-диск, в поток цифровых данных, которые затем трансформируются в аналоговый аудиосигнал в цифро-аналоговом преобразователе (ЦАП);
- оптическая головка - преобразует изменение плотности киноплёнки в аудиосигнал, часто используется для воспроизведения звукового сопровождения фильмов.

Входной датчик каждого типа имеет свои характеристики, и их необходимо знать, чтобы правильно пользоваться датчиком.

1.5. Выходные датчики

Датчик на выходе звуковой системы преобразует аналоговый сигнал в звук. На выход системы звукоусилительной аппаратуры чаще всего устанавливают датчики следующих типов:

- НЧ-громкоговоритель - специальная акустическая система, предназначенная для воспроизведения нижних частот (обычно ниже 500 Гц). Иногда НЧ громкоговорители используют для воспроизведения НЧ и СЧ (обычно не выше 1,5 кГц). В качестве НЧ громкоговорителей, как правило, используются диффузорные НЧ-динамики с диаметром конуса 20-45 см.
- СЧ-громкоговоритель (раньше их называли "пищалками") - специальная акустическая система, предназначенная для воспроизведения средних частот (как правило, выше 500 Гц). Максимальная частота СЧ-динамика обычно не превышает 6 кГц. В качестве СЧ громкоговорителя может использоваться диффузорный (диаметром 12,5-30 см) или компрессионный динамик с диафрагмой диаметром 6,25-10 см (диаметр диафрагмы некоторых специальных динамиков достигает 22,5 см).
- ВЧ-громкоговорители (твитеры) - предназначены для воспроизведения самых высоких частот (как правило, выше 1,5 кГц и ниже 6 кГц). Диаметр диафрагмы диффузорного ВЧ-динамика может составлять 5-12,5 см, а компрессионного - 3,75-10 см.
- Широкополосные колонки представляют собой сложные системы; в корпусе такой колонки установлены НЧ- и ВЧ-динамики, а иногда еще и СЧ-динамик. Как следует из названия, такие колонки должны воспроизводить весь диапазон звуковых частот, но реальные колонки редко воспроизводят частоты ниже 60 Гц. (Широкополосный динамик - это один громкоговоритель, предназначенный для воспроизведения всего диапазона частот, и он не адекватен широкополосной системе, включающей несколько динамиков).
- Сабвуферы - предназначены для расширения диапазона воспроизводимых частот широкополосных систем в области низких частот (до 20--30 Гц). Частотный диапазон таких колонок практически не превышает 300 Гц. В них практически всегда устанавливают диффузорные динамики с диаметром конуса 37,5-60 см, но существуют и специальные сабвуферы, у которых диаметром конуса достигает 1,5 м.
- Громкоговорители-супертвитеры - используются для расширения диапазона воспроизводимых частот широкополосных систем в области верхних частот (как правило, выше 10 кГц). В профессиональных звуковых системах обычно устанавливают компрессионные или пьезоэлектрические динамики, а в системах класса hi-fi могут быть использованы супертвитеры самой причудливой конструкции.
- Колонки-мониторы - широкополосные колонки, которые при установке поворачивают не к публике, а в сторону музыкантов на сцене. Они звучат тише основных колонок, и через них исполнитель может слышать, как он играет, не выбиваясь ли он из тональности и ритма. Иногда их называют "подзвучка". Студийные мониторы или мониторы для аппаратуры в студиях звукозаписи - это широкополосные высокоточные акустические системы, предназначенные для оценки качества записываемого звука.
- Головные телефоны (наушники) - широкополосные датчики, которые в звуковых системах используются для контроля процесса микширования или записи во время выступления, а также прослушивания метрономной дорожки, некоторые модели наушников отсекают внешние звуки. Наушники являются частью систем связи Интернетом.

Выходные датчики каждого типа имеют свои особенности, чтобы правильно ими пользоваться, необходимо знать принцип их работы. (Подробно выходные датчики будут рассмотрены в гл. 13).

1.6 Простейшая звуковая система

На рисунке 1.6 приведена схема простейшей звуковой системы, которая может быть установлена для проведения "круглого стола" в лекционном зале и предназначена для усиления голоса трех участников. В этой системе можно выделить три секции: входных датчиков, обработки сигнала и выходных датчиков:

- 1). Входные датчики: три микрофона преобразовывают голос участников "круглого стола" в аудиосигналы, которые по кабелям поступают на аппаратуру для обработки сигнала.
- 2). Обработка сигнала: каждый из трех микрофонов подключен к своему входу на микшерном пульте, который выполняет следующие функции:
- предварительного усиления - секция микрофонного входа пульта усиливает уровень аудиосигнала, поступающего с каждого микрофона и приводит его к линейному уровню;
 - эквализации: пульт предоставляет средства для независимой регулировки тонального баланса каждого из микрофонов, поэтому оператор имеет возможность быстро изменять тембр голоса таким образом, чтобы он стал более приятным и разборчивым;
 - микширования: на пульте происходит сложение эквализированных сигналов, поэтому на выходе получается один выходной линейный сигнал.
- Выходной линейный сигнал мощностью от 0,1 до 100 мВт с пульта поступает на усилитель мощности, который усиливает его до уровня, необходимого для колонки (от 0,5 до 500 Вт).
- 3). Датчик на выходе: колонка преобразует выходной аудиосигнал с усилителя мощности в звук. Такая система обеспечивает на выходе высокий уровень звука.

Важную роль при использовании звуковых систем играет акустика помещения. Когда звук из колонок распространяется в зале, он изменяется в соответствии с акустическими параметрами помещения.

Помещение почти не будет влиять на звучание только в том случае, если оно не дает реверберации (отражение сигналов от стен). Но при сильной реверберации, устанавливая звуковую систему, акустику помещения следует учитывать обязательно, иначе ее влияние на звук может оказаться столь существенным, что звуковая система окажется неработоспособной.

Акустика помещения это составная часть звуковой системы, поэтому, установив последнюю, необходимо проверить, как она влияет на звук. (Влияние акустики помещения на звуковые системы описано в гл. 5 и 6).

Рассмотренная схема лежит в основе любой звуковой системы (в больших просто увеличивается количество используемого оборудования), поэтому принципы, применимые к этой простой звуковой системе, распространяются и на концертные системы усиления звука.

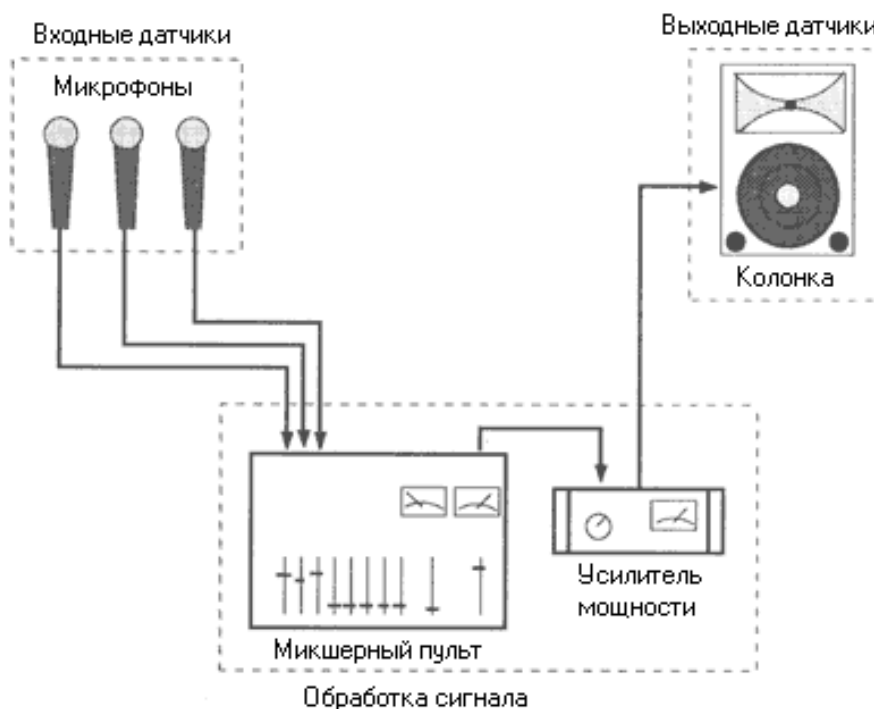


Рисунок 1.6. Простейшая схема звуковой системы.

Глава 2

2.1. Амплитудно-частотная характеристика

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) устройства описывает соотношение между частотой и амплитудой сигнала на его входе и выходе. АЧХ используют в качестве характеристики звукового устройства.

На рис. 2.1 показана система, включающая некий блок обработки сигнала ("черный ящик"), о параметрах которого ничего не известно. На вход этого блока подается сигнал с генератора синусоидальных волн (частоту можно изменять), а на выходе "черного ящика" стоит некое устройство, которое измеряет уровень сигнала в децибелах.



Рис. 2.1. Система для измерения частотной характеристики

Идеальный генератор продуцирует сигнал, который имеет одинаковый уровень на любой частоте, поэтому, уровень входного сигнала, поступающего в "черный ящик" остается постоянным (реальные устройства не всегда характеризуются такой линейностью). При изменении частоты входного сигнала, индикатор уровня будет регистрировать возможные изменения уровня сигнала на выходе "черного ящика". Если отметить значения уровня сигнала для каждой частоты, то получится кривая, изображенная на рис 2.2.

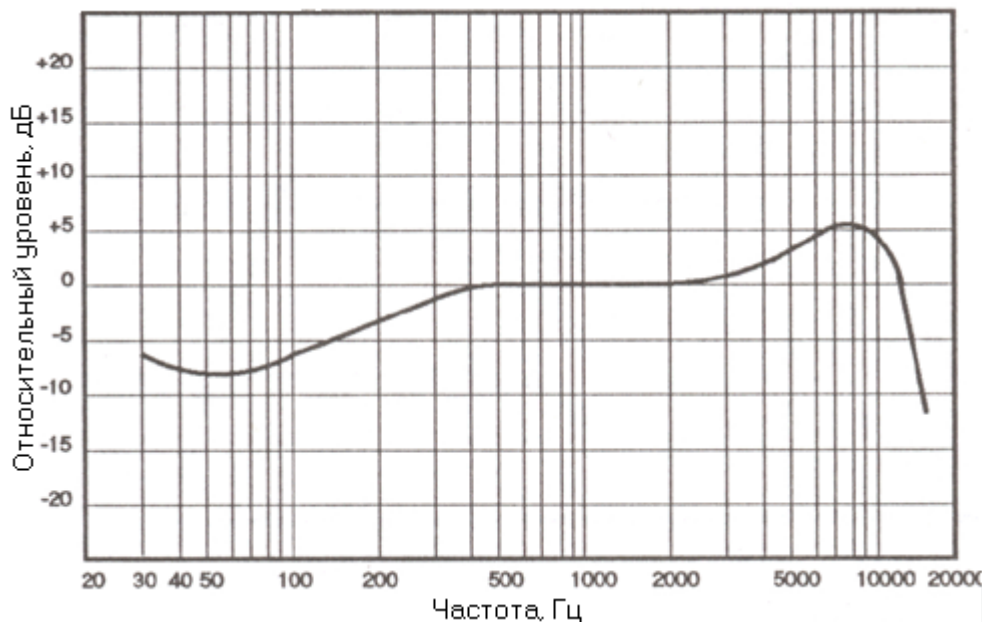


Рис. 2.2. График амплитудно-частотной характеристики (зависимость относительного уровня сигнала от частоты) для "черного ящика", показанного на рис. 2.1.

На этом графике виден диапазон частот, которые пропускает "черный ящик", а также возможные колебания уровня сигнала на выходе в этом диапазоне частот. При построении данного графика АЧХ было сделано допущение, что уровень входного сигнала, подаваемого на тестируемое устройство, во всем диапазоне частот был постоянным, и именно поэтому он характеризует ту точность, с которой устройство передает сигнал с входа на выход. Чем

меньше отклонение между уровнями сигналов на выходе и входе, тем в большей степени выходной сигнал будет соответствовать входному.

Примечание:

1. Если на вход тестируемого устройства подается сигнал, уровень которого, в диапазоне используемых частот изменяется, то в график, иллюстрирующий зависимость уровня сигнала от частоты, вносят поправки или специально регулируют уровень входного сигнала таким образом, чтобы он оставался постоянным. Полученная в этом случае кривая называется "нормализованной".

2. Термин "амплитудно-частотная характеристика" применяется только в отношении устройств для обработки сигнала и датчиков - т. е. для устройств, через которые проходит сигнал. Когда говорят об устройствах, предназначенных для генерации сигналов (генератор, музыкальные инструменты и т. п.), правильнее использовать термин "частотный диапазон".

Способы записи АЧХ в спецификации звуковых устройств

Наиболее простой способ записи АЧХ выглядит следующим образом:

Амплитудно-частотная характеристика: 30 Гц - 18 кГц, +/- 3дБ.

Обратите внимание, что обязательно указывается не только частотный диапазон (30 Гц - 18 кГц), но и допустимый разброс значений уровня сигнала (+3 или -3 дБ), который определяет максимальное отклонение уровня выходного сигнала в указанном диапазоне при постоянном уровне входного сигнала.

Приведение АЧХ без указания допустимого разброса значений бессмысленно, так как в этом случае придется только догадываться о том, как данное устройство влияет на сигнал: в его АЧХ может быть много всплесков и провалов, которые будут сильно изменять сигнал. Часто, если разброс значений уровня сигнала не указан, предполагают, что он равен +/- 3дБ, но это достаточно вольное допущение, и обычно отсутствие столь важной характеристики в спецификации должно настораживать. На рис. 2.3 показано, как определить разброс значений уровня сигнала по графику АЧХ.

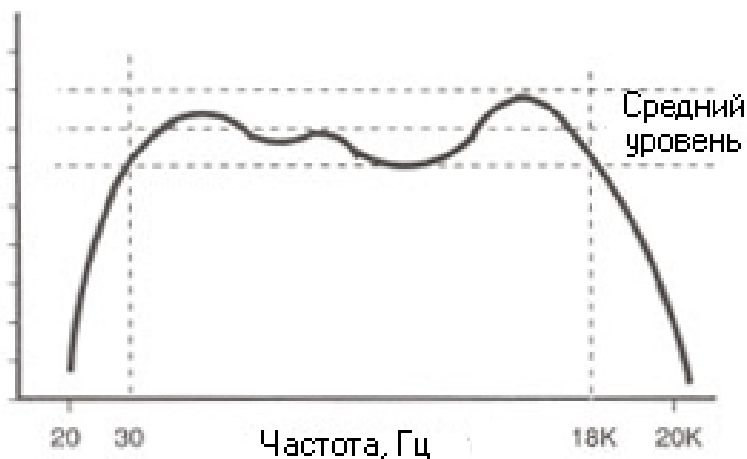


Рис. 2.3. Определение разброса значений уровня сигнала по графику АЧХ

Некоторые аудиоустройства, например усилители мощности или линейные усилители, имеют очень ровные (линейные) АЧХ (рис. 2.4). В таких случаях частотный диапазон определяют по точкам, в которых уровень выходного сигнала уменьшается относительно среднего (опорного) значения на 3 дБ.

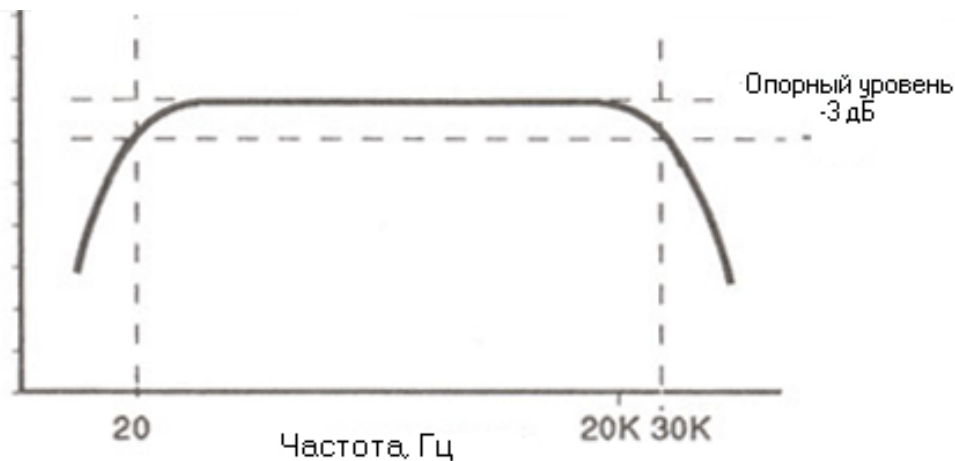


Рис. 2.4. График линейной амплитудно-частотной характеристики

АЧХ устройства, график которой приведен на рис. 2.4, может быть записана следующим образом:

Амплитудно-частотная характеристика: 20 Гц - 30 кГц, +0, -3 дБ.

Если частотный диапазон устройства намного шире диапазона частот, воспринимаемого человеком (20 Гц - 20 кГц), то в спецификации АЧХ указывается девиация частоты, т. е. общее отклонение от опорного уровня сигнала. АЧХ устройства, график которой приведен на рис. 2.5, может быть записана следующим образом:

Амплитудно-частотная характеристика: 20 Гц - 20 кГц, +0, -1 дБ.

А если ограничиться диапазоном, на краях которого АЧХ спадает на 3 дБ, тогда спецификация могла бы быть записана так:

Амплитудно-частотная характеристика: 10 Гц - 40 кГц, +0, -3 дБ

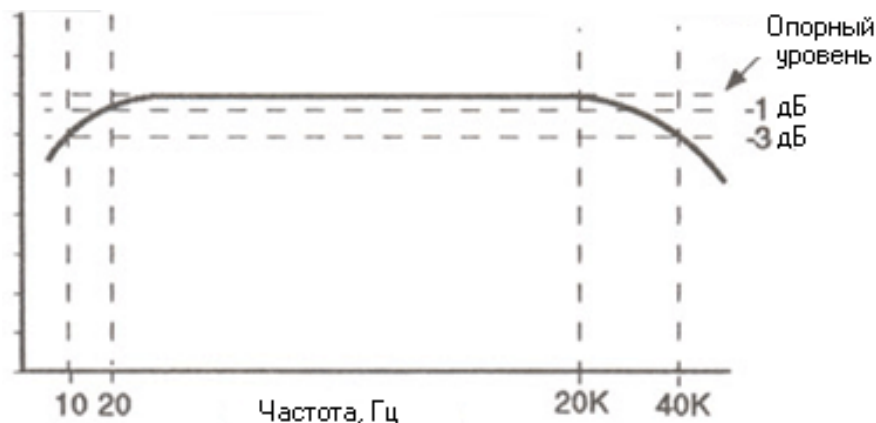


Рис. 2.5. График линейной АЧХ устройства с очень широким диапазоном частот

Октавные соотношения и измерения

Иногда для измерения АЧХ используют музыкальные интервалы -- октавные или треть октавные. Эти методы менее точны, чем описанный выше, но они обеспечивают хорошую корреляцию с особенностями слуха человека и часто применяются для характеристики колонок (уровень сигнала в этом случае можно регулировать октавными или треть октавными эквалайзерами или фильтрами).

Октава -- это определенный музыкальный интервал между двумя тонами, соотношение частот которых равно 2: 1. Человек такие звуки воспринимает равными по высоте (поэтому ноты каждой октавы имеют одинаковое название).

Октавный интервал на верхних частотах гораздо шире, чем на нижних. Так, например, звук, который на октаву выше звука с частотой 40 Гц, имеет частоту 80 Гц (т. е. интервал октава равен 40 колебаниям), а звук, который на октаву выше звука с частотой 1 кГц, -- частоту 2 кГц (т.е. интервал октава равен 1000 колебаниям). Но мы воспринимаем такие звуковые колебания одинаково! Дело в том, что чувствительность нашего слуха к звуковым частотам носит логарифмический характер. Поэтому на графиках АЧХ, в том числе и на тех, что были приведены выше, для частоты используется логарифмическая шкала, на которой значение каждого последующего деления на порядок превышает предыдущее (10, 100, 1000 и т. д.).

Октавные и треть октавные измерения позволяют разделить шкалу звуковых частот, которую мы не воспринимаем как линейную, на равные для нашего слуха интервалы. При снятии амплитудно-частотной характеристики для каждого интервала средний уровень сигнала записывается в виде гистограммы (рис. 2.6). Частоты центрального диапазона отстоят друг от друга на 1/3 октавы. Частоты, указанные на горизонтальной оси, являются стандартными для измерений с помощью треть октавных интервалов: такие же частоты используются для фильтров в треть октавных графических эквалайзерах. Данный стандарт называется ISO (International Standards Organization - Международная организация по стандартизации). Частоты, измеряемые с помощью анализатора спектра сигнала стандарта ISO, и частоты, регулируемые октавными и треть октавными эквалайзерами совпадают.

При проведении подобных измерений в качестве тест-сигнала используют не синусоидальную волну, а специальный сигнал, который называется "розовый шум".

Розовый шум -- это псевдослучайный широкополосный сигнал, в котором суммарная мощность на всех частотах в пределах любой октавы равна суммарной мощности на всех частотах в пределах любой другой октавы. По звучанию он очень напоминает водопад.

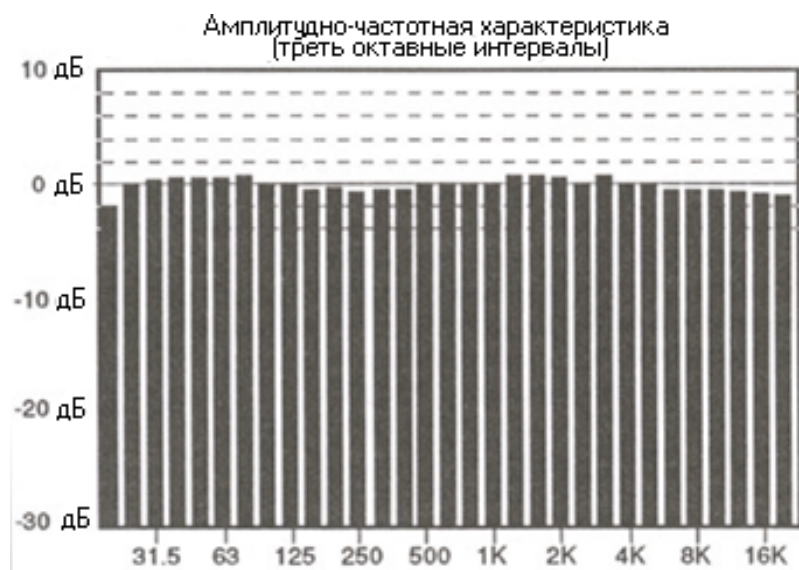


Рис. 2.6. Частотная характеристика, измеренная с помощью треть октавных интервалов

Верхние октавы занимают больший частотный диапазон, чем нижние, поэтому уровень розового шума на высоких частотах падает. То есть, уровень розового шума на любой верхней частоте ниже, чем на любой нижней, поэтому его суммарная мощность на всех частотах в пределах любой октавы равна суммарной мощности на всех частотах в пределах любой другой октавы. При использовании сигнала розовый шум в качестве тестового выходной сигнал измеряемого устройства фильтруется по октавным или треть октавным интервалам, и суммарная мощность в каждом интервале измеряется отдельно.

Следует отметить, что подобные измерения дают достоверную общую характеристику АЧХ устройства, но не позволяют регистрировать максимальные и минимальные уровни сигнала в узком диапазоне частот. В комнате с сильной реверберацией такие измерения в большей степени будут характеризовать само помещение, а не тестируемый громкоговоритель.

2.2 АЧХ реальных устройств воспроизведения звука

Реальная аудиосистема представляет собой целую сеть различных устройств, через которые должен пройти сигнал прежде, чем он достигнет слушателей. Каждая составляющая системы может иметь свою АЧХ, и в большей или меньшей степени изменять сигнал. Общая АЧХ системы зависит от АЧХ всех элементов в цепи прохождения сигнала.

Электрические цепи и кабели

Кабели являются самыми простыми элементами аудиосистемы и обычно имеют линейные АЧХ, однако на предельных частотах они могут ухудшаться. Стабильность АЧХ определяется конструкцией кабеля, его длиной и типом электрической схемы, к которой он подключен. Типичный аудиокабель состоит из одного или двух проводников сигнала и экранирующего проводника в изоляционной оплетке (рис. 2.7).

Аудиосигнал передается по центральному проводнику (проводникам). Экранирующий проводник подсоединяется к "земле" цепи и предназначен для подавления большинства наводок статического электричества и помех на радиочастотах. Экранирование, как правило, не уменьшает фоновые шумы, возникающие вследствие электромагнитных помех, а вот скручивание проводников (витая пара) в симметричной цепи является лучшим способом для подавления шумов такого рода.

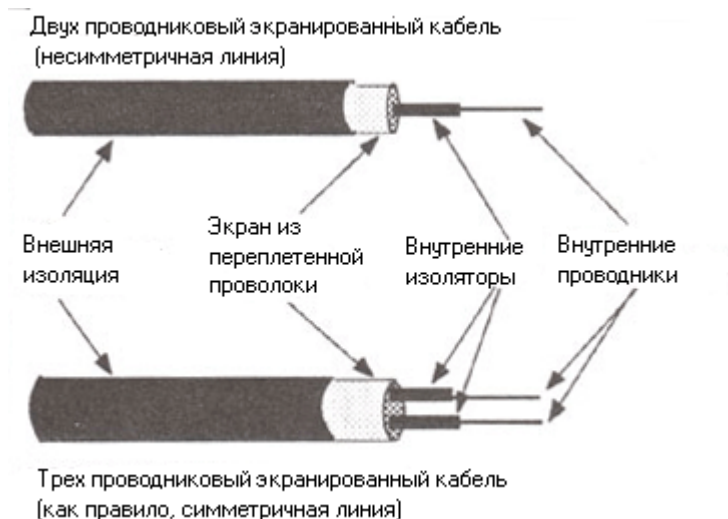


Рис. 2.7. Конструкция обычного аудиокабеля

Влияние кабеля на АЧХ, как правило, обусловлено тем, что между проводником сигнала и экранирующей оплеткой кабеля, а также между проводниками возникает электрическая емкость. А, поскольку сам кабель обладает определенным сопротивлением, это приводит к тому, что он начинает работать, как НЧ-фильтр (вырезает высокие частоты) и приглушает звук. Эффект приглушения пропорционален длине кабеля и зависит от выходного сопротивления цепи, к которой подключен кабель. Для передачи сигналов по очень длинным кабелям применяются специальные линейные усилители мощности. В кабелях некоторых видов между проводниками может возникать значительная индуктивность, и при определенном сопротивлении (и индуктивности) они могут работать как ВЧ-фильтр (вырезать нижние частоты). Поэтому для каждой конкретной задачи следует подбирать кабели нужного типа.

Современная схемотехника позволяет создавать электронные схемы с заданными характеристиками, и, если устройство не предназначено для изменения частотного спектра сигнала (например, регуляторы тембра), его АЧХ стремятся сделать линейной.

На рис 2.8. приведен график АЧХ для типичного качественного усилителя мощности аудиосигналов. В диапазоне звуковых частот АЧХ этого усилителя абсолютно линейная, она начинает падать только на границе этого диапазона.

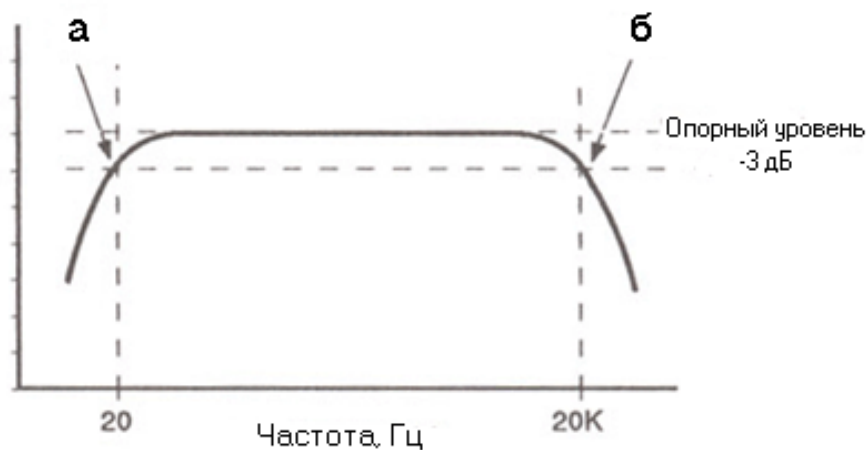


Рис. 2.8. АЧХ типичного усилителя мощности аудиосигналов

Для уменьшения АЧХ в области низких частот (точка а на рис. 2.8) иногда используют так называемые "обрезные фильтры": они отсекают сверхнизкие частоты, которые могут повредить колонки или вызывать нежелательные искажения.

Для снижения уровня АЧХ в области высоких частот (точка б на рис. 2.8) применяют фильтры временных интермодуляционных искажений, которые уменьшают эти искажения и отсекают сверхвысокие частоты, которые могут повредить ВЧ-динамики.

Практически все процессоры аудиосигналов характеризуются линейной АЧХ. Исключение составляют цифровые процессоры, на вход и выход которых, чтобы избавиться от искажений, связанных с цифровой обработкой сигнала, устанавливают НЧ-предфильтры. Все аналоговые процессоры аудиосигналов, если на этапе их разработки не была поставлена особая задача, должны иметь линейную АЧХ.

Микрофоны

Современные технологии позволяют создавать микрофоны с линейными АЧХ во всем диапазоне звуковых частот. Но часто эти устройства используют не только в качестве простых звукозаписывающих устройств, но и для придания звуку определенных характеристик, поэтому их АЧХ могут иметь отклонения. Так, например, на графике АЧХ микрофона может присутствовать широкий всплеск, соответствующий уровню сигнала 3--6 дБ, с максимумом в области 2--5 кГц. Микрофоны с такой АЧХ позволяют добиться "эффекта присутствия" и более отчетливого звучания речи.

В АЧХ микрофонов конденсаторного типа часто присутствует всплеск на частотах в 8-10 кГц, такие микрофоны обеспечивают более резкое и яркое воспроизведение широкого диапазона звуковых сигналов.

Для АЧХ микрофонов ленточного типа характерен всплеск, обеспечивающий "эффект присутствия", и небольшой подъем АЧХ в области низких частот, как правило, в районе 200 Гц. Такие микрофоны делают звучание более теплым, их часто используют для усиления звука инструментов и голоса певцов.

АЧХ динамических микрофонов, как правило, резко снижается на октаву при частоте 10 кГц и плавно - в области низких частот, начиная со 100 Гц. На АЧХ таких микрофонов может влиять угол падения звуковой волны, поэтому звуки, приходящие сбоку, могут воспроизводиться иначе, чем те, которые поступают под прямым углом, особенно сильно этот эффект проявляется у направленных микрофонов (рис. 2.9). Микрофоны для систем усиления звука могут иметь нелинейные АЧХ со множеством резонансов, их часто применяют для сольного вокала, так как они придают звучанию более яркий характер, или для отдельных инструментов, чтобы выделить их на фоне сложной комбинации партий других инструментов. Но из-за этих же характеристик такие микрофоны могут оказаться непригодными для воспроизведения звука от нескольких инструментов или голосов, и их лучше не использовать в качестве общих микрофонов для записи.

Универсальных микрофонов не существует. Точные их характеристики определяются сложным набором конструктивных факторов, поэтому при выборе нужного следует очень внимательно изучить спецификацию и опробовать микрофон в работе.

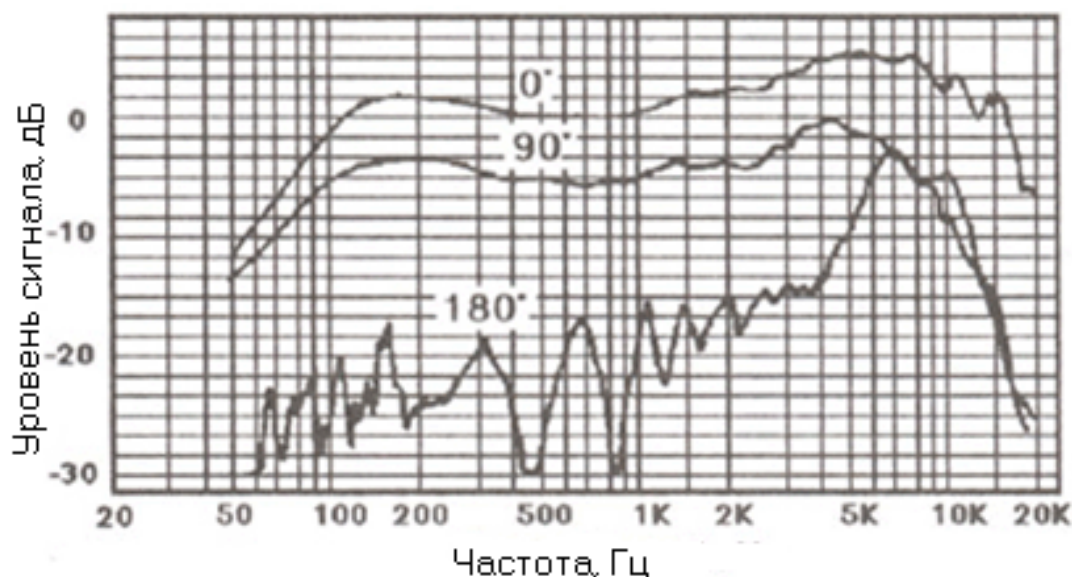


Рис. 2.9. АЧХ типичного микрофона с кардиоидной характеристикой направленности

2.3. Колонки

Колонки относятся к таким элементам реальных звуковых систем, которые могут иметь самые различные АЧХ. Для них характерны узкие максимумы и минимумы в АЧХ в пределах 10 дБ и более, поэтому считается, что отклонение АЧХ на ± 4 дБ при измерениях с помощью треть октавных диапазонов является очень хорошей характеристикой для этих устройств. Такой допуск может показаться слишком большим, но следует учитывать, что динамики колонок работают с относительно высокой мощностью и создают довольно большое звуковое давление, поэтому в их конструкции должны быть заложены компромиссные решения, обеспечивающие высокую надежность и эффективность. Для воспроизведения полного диапазона звуковых частот в колонках устанавливается несколько динамиков, согласование которых в одном функциональном блоке является сложной задачей и влияет на АЧХ колонок. Колонки для систем усиления звука можно разделить на два основных класса: широкополосные и специальные, предназначенные для работы в ограниченном диапазоне частот. Последние используются в дополнение к первым для расширения полосы воспроизводимых частот. Как правило, АЧХ широкополосных колонок для систем усиления звука ограничена частотами 100 Гц и 10--15 кГц, и для большинства задач такого диапазона частот вполне достаточно. Некоторые небольшие колонки, например те, что используются в системах внутренней связи, имеют более узкий диапазон частот, но для усиления голоса принято использовать колонки с минимальный диапазоном воспроизводимых частот от 300 Гц до 3,5 кГц.

Самыми распространенными среди специализированных колонок являются сабвуферы и твитеры. Сабвуферы -- это громкоговорители, предназначенные для работы на частотах от 300 Гц до 30 Гц. Их используют для расширения АЧХ системы в области низких частот. Твитеры работают на частотах выше 5-8 кГц и предназначены для расширения АЧХ системы в области высоких частот.

Реальные громкоговорители представляют собой направленные устройства, т. е. они фокусируют излучаемый звук в определенном направлении. По мере удаления от основной оси громкоговорителя, уровень звука может уменьшаться, а его АЧХ становится менее линейной. Дополнительная информация о частотных характеристиках колонок приведена в главе 13. Чтобы соотнести АЧХ устройства или системы с ее звуковыми характеристиками, надо иметь представление о частотном диапазоне типичных источников звука.

2.3. Диапазон частот голоса и инструментов

Речь

Диапазон частот, соответствующий речи человека (от 100 Гц до 6 кГц), гораздо уже того, который он может воспринимать, причем максимальная мощность звуков речи приходится на частоты ниже 1 кГц, а около 80% от общей мощности -- на частоты ниже 500 Гц. Звуков с высокими частотами в речи присутствует мало, но практически вся мощность согласных звуков приходится на частоты выше 1кГц, поэтому потеря высоких частот может привести к снижению разборчивости речи.

Минимальный частотный диапазон для системы воспроизведения речи (например, обычного телефона) должен находиться в пределах от 300 Гц до 3,5 кГц. Разборчивость речи можно повысить, если в частотах 2--5 кГц на АЧХ будет всплеск, соответствующий "эффекту присутствия", высотой 3--6 дБ.

К систем звукоусиления в отношении точности воспроизведения речи предъявляются более жесткие требования, чем к телефону, поэтому системы оповещения должны иметь достаточно линейную АЧХ хотя бы в диапазоне 100 Гц -- 8 кГц. Наличие в АЧХ таких систем пика, соответствующего "эффекту присутствия" тоже будет способствовать улучшению разборчивости речи, но он также может и увеличивать вероятность возникновения обратной связи (возбуждению системы звукозаписи).

Вокал и музыкальные инструменты

На диаграмме, приведенной на рис 2.10, отображены частотные диапазоны разных музыкальных инструментов и поставленного певческого голоса.

Звуки музыкальных инструментов имеют более сложные характеристики, чем речевые. Частотный диапазон и мощность определенного музыкального сигнала в большой степени зависят от количества звучащих инструментов и их расположения относительно друг друга, манеры исполнения и многих других факторов. Например, если в музыке какого то жанра основная мощность приходится на звуки с частотой 20 Гц --100 Гц, то в музыкальных произведениях, написанных в других стилях, такие звуки могут отсутствовать.

Поэтому профессионалам в области звукоусиления следует, в первую очередь, научиться анализировать музыкальный материал и использовать свой опыт, чтобы добиться качественного звучания. Для этого необходима длительная практика в прослушивании самых разных источников звука на разной аппаратуре. В работе звукорежиссера всегда важно очень внимательно слушать, исследовать то, что слышишь, запоминать впечатления и использовать их в дальнейшей работе.

Гармоники

Частотный диапазон музыкальных инструментов ограничен 4 кГц (рис. 2.10). Человек же может различать звуки гораздо более высоких частот, поэтому звучание систем с ограниченной АЧХ, в котором отсутствуют высокие звуки, он будет воспринимать тусклым и приглушенным. Такое явное несоответствие, вытекающее из частотных диапазонов, показанных на рис. 2.10, обусловлено тем, что в них не учтены гармоники музыкальных инструментов.

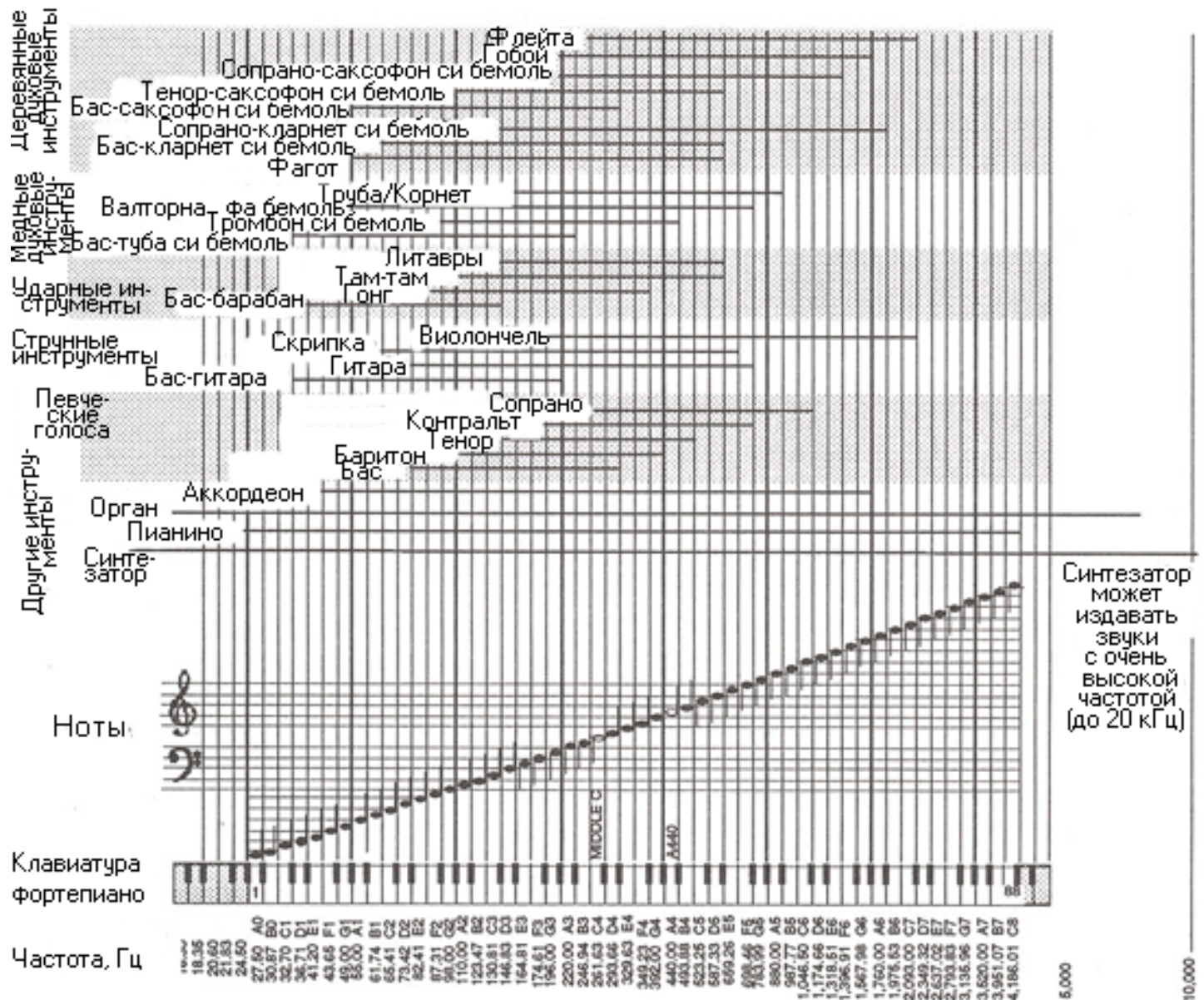


Рис. 2.10. Диапазон частот, воспроизводимых певческими голосами и различными музыкальными инструментами

Дело в том, что каждый музыкальный звук, который мы слышим, является сочетанием синусоидальных волн разных частот и амплитуд, соотношение которых и определяет характер, или тембр, звука. Результирующая звуковая волна может отображаться на осциллографе импульсами любой формы (треугольными, прямоугольными), причем иногда описать ее форму бывает очень трудно.

Звуковую волну, соответствующую музыкальной ноте определенной высоты, можно получить, объединив несколько синусоидальных волн с определенными параметрами. Набор таких синусоидальных волн называется "гармониками", они имеют кратные частоты (т.е. расположены на частотах, полученных умножением исходной на целое число). Частота синусоидальной волны на той высоте, которую мы слышим как ноту, является основной и обычно (но не всегда) самой сильной (т. е. имеет максимальную амплитуду) в комбинации синусоидальных волн, из которых состоит звуковой сигнал сложной формы.

Кроме основной волны в гармонике присутствуют дополнительные синусоидальные волны, которые расположены на кратных более высоких частотах. Например, если частота основной волны гармонике соответствует 500 Гц, то дополнительные волны будут располагаться на частотах 1 кГц, 1,5 кГц, 2 кГц, 2,5 кГц и т. д. Графическая иллюстрация спектра звуков гармонике музыкального инструмента представлена на рис. 2.11.

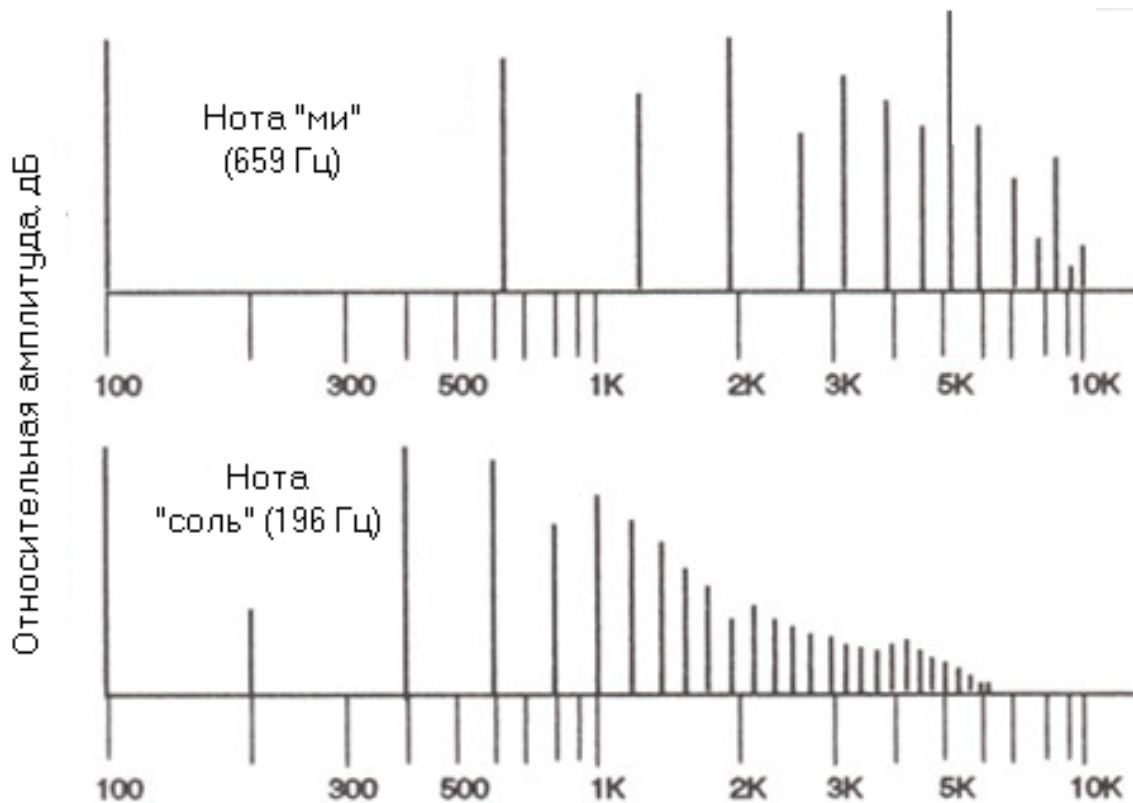


Рис. 2.11. Гармоники открытой струны скрипки. Низкие звуки имеют более плотные гармоники

Обычно, чем выше гармоника, тем ниже ее амплитуда (или сила), поэтому высокие гармоники характеризуются более слабыми звуками, чем основная. Но иногда отдельные гармоники могут быть и громче основной, в таких случаях звуки становятся более резким, напоминающим, те, что издают, например, гобой, кларнет.

Если компоненты синусоидальных волн, характеризуются некратными частотами, то они будут восприниматься в виде шума, а не отдельных тонов. Такое звучание дают ударные инструменты, они производят звуки со сложным набором компонентов с некратными частотами. Качество звука будут определяться соотношением амплитуд компонентов синусоидальных волн (независимо от того имеют ли они кратные или некратные частоты). Поэтому важно, чтобы звуковые системы имели линейную АЧХ, только в этом случае они не будут влиять на звучание инструментов.

2.4. Влияние акустических факторов

На АЧХ звуковой системы оказывает влияние среда, в которой она работает. Если они используются на открытом пространстве, то важными факторами являются ветер, температура и поглощение звуков воздухом. Ветер может отклонять распространяющуюся звуковую волну, а порывистый ветер -- модулировать звук. Под действием перепада температур звук также может отклоняться, причем в большей степени, чем при ветре. Воздух поглощает в основном волны с высокими частотами, так как мощность высокочастотных волн рассеивается быстрее, чем низкочастотных. Вот почему удаленные звуки мы воспринимаем приглушенными. Степень поглощения высокочастотной части спектра звуковой волны в воздухе зависит от относительной влажности воздуха.

Основными факторами, которые влияют на АЧХ системы, работающей внутри помещения, являются отражения от стен, потолка и пола, а также резонанс комнаты. Отражения не только вызывают реверберацию, но могут приводить к подавлению определенных частот (на АЧХ это проявляется в виде уменьшения уровня сигнала). Все эти эффекты придают звуку определенную окраску.

Влияние среды на звуковые системы подробно будет рассмотрено в главах 5 и 6.

Глава 3

3.1. Что такое децибел?

Одна из самых распространенных единиц измерения, применяемая в аудиотехнике называется "децибел" и обозначается "дБ". В децибелах выражают уровень и мощность звуковых сигналов.

Приставка "деци" применяется для обозначения дольных единиц, равных 1/10 от исходных. Соответственно, децибел -- это 1/10 Бела (единица измерения, названная в честь Александра Грэма Белла). Белл определяется, как логарифм отношения электрических, акустических или других мощностей:

$$\begin{aligned}\text{Бел} &= \log (P_1/P_0), \\ \text{дБ} &= 10\log (P_1/P_0).\end{aligned}$$

Чувствительность слуха человека к громкости звуковых сигналов носит логарифмической характер, поэтому их мощность, выраженная в децибелах, точнее отражает наше восприятие звуков.

Пример. Чему равно в децибелах отношение мощностей 2 Вт и 1 Вт?

$$\text{дБ} = 10 \log (P_1/P_0) = 10\log (2/1) = 10 \log 2 = 3,01 = 3.$$

Пример. Чему равно в децибелах отношение мощностей 100 Вт и 10 Вт?

$$\text{дБ} = 10 \log (P_1/P_0) = 10 \log (100/10) = 10 \log 10 = 10 \cdot 1 = 10.$$

Таким образом, двухкратное увеличение или уменьшение мощности всегда соответствует 3 дБ, а десятикратное увеличение или уменьшение мощности -- 10 дБ.

Децибеллы используются и для характеристики отношений напряжений. Мощность пропорциональна квадрату напряжения, поэтому:

$$\begin{aligned}\text{дБВ} &= 20 \log (E_1/E_0), \\ \text{где } E_0 \text{ и } E_1 &\text{ -- значения напряжения.}\end{aligned}$$

Если при двухкратном увеличении мощности всегда происходит ее возрастание на 3 дБ, то двухкратное увеличение напряжения всегда соответствует его возрастанию на 6 дБ.

Десятикратное увеличение мощности соответствует 10 дБ, а десятикратное возрастание напряжение -- 20 дБ.

Почему же десятикратное увеличение мощности соответствует 10 дБ, а десятикратное увеличение напряжения -- 20 дБ? Давайте рассчитаем реальную мощность, которая рассеивается на нагрузке 8 Ом при подаче на нее напряжения 100 В.

Уравнение для мощности имеет вид: $P = E^2/R$,

т. е. мощность пропорциональна квадрату напряжения, поэтому при удвоении напряжения, мощность будет увеличиваться в четыре раза. Подставим в это уравнение два значения напряжения -- 10 и 100 В.

$$P_1 = 10^2/8 = 100/8 = 12,5 \text{ Вт.}$$

$$P_2 = 100^2/8 = 10000/8 = 1250 \text{ Вт.}$$

При увеличении напряжения в 10 раз мощность возрастет в 100 раз. Теперь определим отношение P_1/P_2 в децибелах:

$$\text{дБ (Вт)} = 10 \log (P_1/P_2) = 10 \log (1250/12,5) = 10 \log (100) = 10 \cdot 2 = 20 \text{ дБ.}$$

Как видите, несмотря на то, что 100 В в 10 раз превышает 10 В, когда мы возвращаемся к значениям мощности, из которых получено отношение в дБ, оказывается, что оно равно 20 дБ. Поэтому и множитель, который стоит перед логарифмом в уравнении для определения

относительного напряжения в децибелах, в два раза больше. В уравнении для нахождения относительной силы тока в дБ также стоит множитель 20.

Если принять, что P0 равно 1 Вт, то из уравнения $дБ = 10 \log (P1/P0)$ можно получить значения, приведенные в табл. 3.1.

Мощность P1, Вт	дБ
1	0
10	10
100	20
200	23
400	26
800	29
1000	30
2000	33
4000	36
8000	39
10000	40
20000	43
40000	46
80000	49
100000	50

Таблица 3.1. Значение больших мощностей в Вт и в дБ

Данные этой таблицы наглядно иллюстрируют то, насколько удобно использовать дБ для выражения относительных уровней мощности: величина, равная всего 50 дБ, позволяет заменить отношение 100 000:1. Значения малых мощностей в Вт и в дБ приведены в табл. 3.2.

Мощность P1, Вт	дБ
1	0
1,25	1
1,6	2
2	3
2,5	4
3,15	5
4	6
5	7
6,3	8
8	9
10	10

Таблица 3.2. Значения малых мощностей в Вт и в дБ

В децибелах всегда выражается только относительная мощность. Использование этих единиц для описания абсолютных величин не имеет смысла. Но, если указано, что опорный уровень сигнала равен 0 дБ, то для характеристики устройства достаточно привести только значение мощности в дБ (оно может быть положительное или отрицательное). Чтобы проиллюстрировать сказанное, приведем несколько примеров записи спецификации.

Пример А. "Максимальный уровень сигнала на выходе микшерного пульта составляет +20 дБ".

Такая формулировка лишена смысла, так как в ней не указано нулевое опорное значение.

Пример Б. "Максимальный уровень сигнала на выходе микшерного пульта составляет 20 дБ выше 1 мВт".

Здесь сообщается о том, что микшерный пульт может выдавать на некоторую нагрузку сигнал мощностью 100 мВт (0,1 Вт). Это следует из приведенного значения максимального уровня сигнала 20 дБ: 10 дБ из них соответствуют десятикратному увеличению мощности от 1 мВт до 10 мВт, а еще 10 дБ -- десятикратному увеличению мощности от 10 мВт до 100 мВт.

3.2 Относительная мощность электрических сигналов дБм

Мощность электрических сигналов относительно стандартного сигнала мощностью 1 мВт выражают в единицах, которые называются "дБм":
 $0 \text{ дБм} == 1 \text{ мВт}$.

Следует отметить, что раньше величину дБм преимущественно использовали для определения сигналов в телефонных линиях с сопротивлением 600 Ом, а за опорный уровень принимали значение 0,001 Вт (или 1 мВт). Именно такое количество мощности рассеивается, если к 600-омной линии приложить среднеквадратичное напряжение V_{rms} , равное 0,775 В. Поэтому многие ошибочно полагают, что $0 \text{ дБм} = 0,775 \text{ В}$, но это справедливо только для цепи с сопротивлением 600 Ом, а вот то, что $0 \text{ дБм} = 1 \text{ мВт}$, правомерно всегда. (Примечание. В России за опорный уровень сигнала часто принимали значение $0 \text{ дБм} = 1,5 \text{ В}$..)

Пример В. "Максимальный уровень сигнала на выходе микшерного пульта равен +20 дБм".

Эта формулировка аналогична той, что приведена в примере Б, только короче.

Пример Г. "Максимальный уровень сигнала на выходе микшерного пульта равен +20 дБм на нагрузку 600 Ом".

Эта формулировка аналогична той, что приведены в примерах Б и В, но в ней содержится дополнительная информация о сопротивлении нагрузки (600 Ом). Это позволяет рассчитать максимальное среднеквадратичное выходное напряжение для этой нагрузки, которое будет равно 7,75 В.

дБи

Современные аудиоустройства (микшерные пульты, ленточные магнитофоны, процессоры сигналов и др.), как правило, чувствительны к напряжению. Только для характеристики усилителей мощности, к которым подсоединяются колонки, чаще указывают мощность в ваттах, а не в децибелах.

Выраженная в единицах дБм относительная мощность, не определяет напряжения, правда, если известно сопротивление, его можно вычислить. Но, поскольку сделать это достаточно сложно, а как мы уже говорили, единицы децибелы вводились для упрощения значений, используемых для характеристики устройств, для выражения входного и выходного напряжения была предложена другая величина, которая называется "дБи".

При оценке величин дБм и дБи используются различные нулевые уровни. Напряжение, выраженное в дБи, не зависит от нагрузки (0 дБи всегда равно $0,775 \text{ В}$). Его значение будет эквивалентно напряжению, выраженному в дБм, только в том случае, если оно было получено для нагрузки 600 Ом (рис. 3.1).

Пример Д: "Максимальный уровень выходного сигнала микшерного пульта равен +20 дБи для нагрузки 10 000 Ом и выше".

На основании приведенных данных можно утверждать, что максимальный уровень сигнала для этого микшерного пульта равен 7,75 V (т. е. он такой же, как в примере Г). Существенное отличие заключается в том, что сопротивление нагрузки в примере Г составляло 600 Ом, а здесь минимальное сопротивление нагрузки равно 10 000 Ом. Подключить данный пульт к 600-омной нагрузке нельзя: произойдет падение напряжения, появятся сильные искажения, он может даже перегореть.

На основании чего были сделаны эти выводы? В примере Г была указана максимальная мощность на выходе 20 дВт, при более высокой нагрузке для достижения заданного уровня потребуется большее напряжение. В примере Д указано минимальное сопротивление нагрузки, подключение нагрузки с еще меньшим сопротивлением приведет к падению мощности на выходе. В результате уменьшится выходное напряжение, появятся искажения, и пульт может выйти из строя.

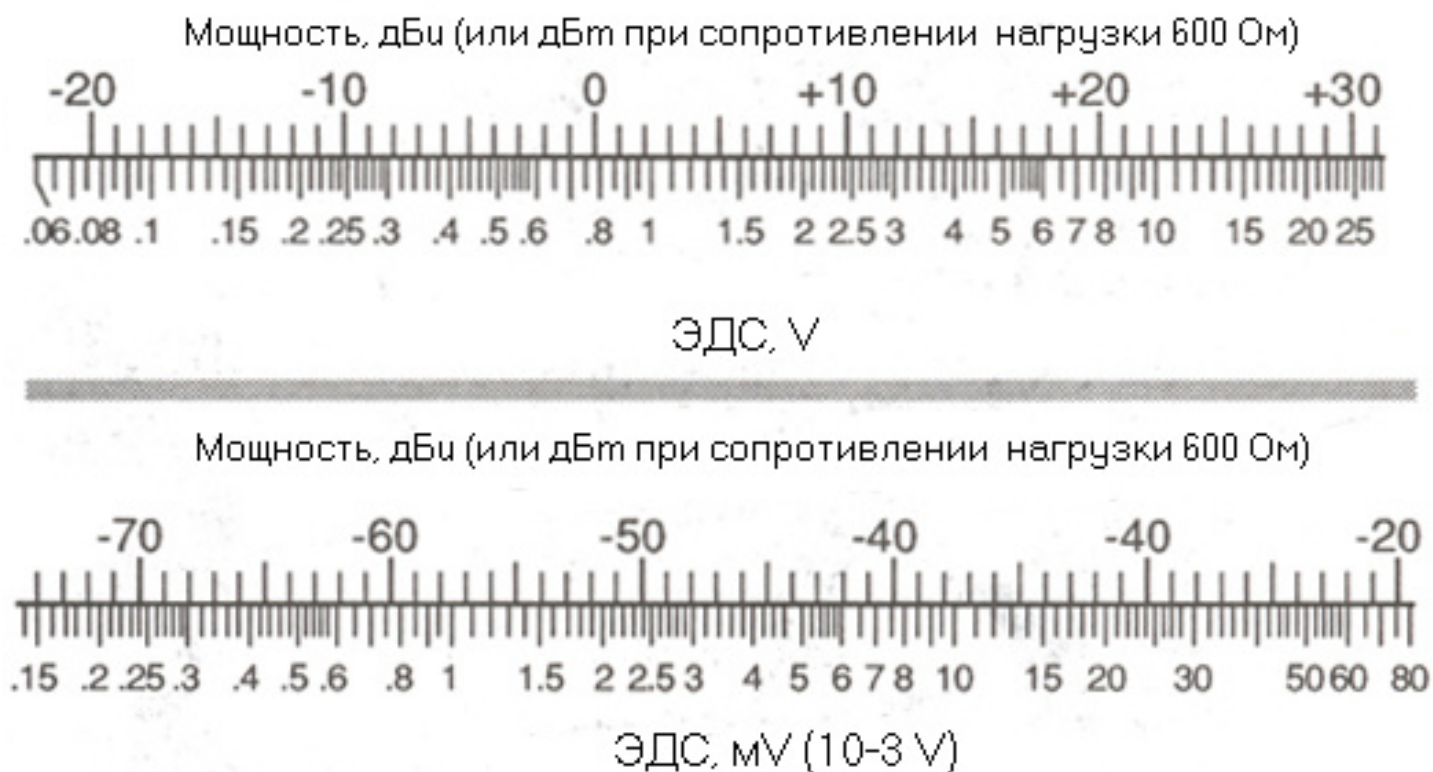


Рис. 3.1. Номограмма для определения относительной мощности, выраженной в дБи (или дВт при сопротивлении нагрузки 600 Ом), и напряжения

дБV и дБv

Величины дБи для выражения относительного напряжения стали использовать сравнительно недавно, прежде для этой цели служила величина дБV ($0 \text{ дБV} = 1 \text{ V}_{\text{rms}}$, где V_{rms} - среднеквадратичное напряжение). Для обозначения уровня напряжения, соответствующего мощности, указанной в дВт, раньше часто применяли строчную букву v: $0 \text{ дБv} = 0,775 \text{ V}$.

Такое написание было удобным, так как значения величин дБv и дВт совпадали, если последнее оценивалось для сопротивления нагрузки 600 Ом, что упрощало сравнение данных, приведенных в различных спецификациях. Но порой путаница в написании приводила к серьезным ошибкам.

Пример Е.

1. "Номинальное выходное напряжение равно +4 дБv".
2. "Номинальное выходное напряжение равно +4 дБV".

Формулировки 1 и 2 только кажутся равнозначными. Строчная буква v в первой из них означает, что номинальное выходное напряжение $V_{rms} = 1,23$, а прописная буква V во второй, что $V_{rms} = 1,60$.

К сожалению, ошибки, связанные с тем, что данные, приведенные в единицах дБv (когда за ноль принято 0,775 V при сопротивлении нагрузки 600 Ом) и в единицах дБV (0 дБV = 1 V при любом сопротивлении нагрузки), воспринимались одинаковыми, происходили достаточно часто. Чтобы исключить их, Международная электротехническая комиссия (IEC) в качестве стандартного обозначения напряжения относительно уровня 1 V утвердила заглавную букву V. А Государственная ассоциация вещательных компаний (NAB) рекомендовала использовать маленькую букву u для обозначения напряжения, которое получено в случае измерения дБm при сопротивлении нагрузки 600 Ом. Буква u в величине дБи означает "недогруженный" выход -- этот термин используют для описания выхода, который работает без нагрузки или с маленькой нагрузкой (например, обычные входы с высоким сопротивлением в современной аудиоаппаратуре).

Пример Ж.

1. "Номинальное выходное напряжение равно +4 дБv".
2. "Номинальное выходное напряжение равно +4 дБи".

Формулировки 1 и 2 равнозначны, но вторая предпочтительнее. В них сообщается, что номинальный уровень выходного напряжения равен 1,23 V_{rms} .

Еще раз повторим, что отличие дБи (или дБv) от дБV заключается в уровне напряжения, которое принимается за ноль: 0 дБи (или дБv) = 0,775, а 0 дБV = 1,0 V.

Преобразование дБV в дБи (или в дБm при нагрузке 600 Ом)

Если речь идет о напряжении, а не о мощности, то для преобразования дБV в дБи (или в дБm при нагрузке 600 Ом) к имеющемуся значению дБV надо добавить 2,2 дБ. Для обратного преобразования дБи (дБm) в дБV следует отнять 2,2 дБ от указанного значения в дБи.

В табл. 3.3 приведены часто встречающиеся значения дБV и дБи, а также напряжения которому они соответствуют.

дБV (0 дБV = 1V при любом сопротивлении нагрузки, но обычно оно высокое)	Напряжение (среднеквадратичное), V	дБи или дБm (0 дБи = 0,775 V при любом сопротивлении нагрузки); 0 дБm = 0,775 V при сопротивлении нагрузки 600 Ом)
6	2	8,2
4	1,6	6,2
1,78	1,23	4
0	1	2,2
-2,2	0,78	0
-6	0,5	-3,8
-8,2	0,29	-6
-10	0,32	-7,8
-12	0,25	-9,8
-12,2	0,25	-10
-20	0,1	-17,8

Таблица 3.3. Значения дБV, дБи и соответствующие напряжения

дБV, дБи и дБm в спецификациях

Во многих продуктах предусмотрены входные и выходные миниразъемы RCA, предназначенные для подключения аппаратуры с высоким сопротивлением, которая более чувствительна к колебаниям напряжения, а не мощности, поэтому в их спецификации часто указывают номинальный уровень напряжения в дБV (например, -10 дБV).

Симметричные линейные входные и выходные XLR-разъемы предназначены для подключения аппаратуры, как с низким, так и с высоким сопротивлением. Устройства с низким сопротивлением более чувствительны к изменению мощности, поэтому в спецификации часто приводят номинальные уровни, характеризующие уровни сигнала при записи (например, +4 дБm) или при вещании (например, +8дБm) звука. Иногда указывается и значение дБи. Для входных и выходных разъемов RCA в спецификации обычно оговариваются более высокие, чем для разъемов XLR, уровни напряжения и меньшие сопротивления, но бывают и исключения. Линейный выход с низким сопротивлением в принципе можно подключить к входам с более высоким сопротивлением без значительного изменения уровня сигнала. А вот подключение выхода с высоким сопротивлением к входу с низким сопротивлением может привести к перегрузке, в результате которой возрастут искажения и снизится уровень сигнала. Это окажет неблагоприятное воздействие на АЧХ, а некоторых случаях может привести к выходу аппаратуры из строя, поэтому предлагаемые спецификации следует изучать очень внимательно.

дБW

Мы уже говорили, что величина дБm определяет электрическую мощность по отношению к 1 мВт. Ее удобно использовать для приведения низких значений выходных мощностей, свойственных, например, для микрофонов (она составляет порядка нескольких миллионных долей ватта) и процессоров сигналов (она достигает нескольких милливатт). А вот для характеристики высоких мощностей усилителей, которые составляют несколько сотен ватт, была предложена величина дБW, позволяющая обходиться без большого числа нулей.

0 дБW = 1 Вт.

Мощность 100-ваттного усилителя составит 20 дБW:

$$10\log(100/1) = 10\log(100) = 10 \cdot 2 = 20 \text{ дБ},$$

а мощность 1000-ваттного усилителя будет равна 30 дБW. Если речь идет о мощности усилителя, то значения дБ, приведенные в табл. 3.1 и 3.2 равны значениям дБW и соответствуют количеству децибел на 1 Вт электрической мощности.

3.3. Децибелы и уровень звука

Уровень звука, как правило, характеризует звуковое давление, но иногда под этим термином подразумевают и мощность звука. В чем же различаются эти два понятия. Мощность звука -- это совокупная звуковая энергия, которую излучает громкоговоритель (или иное устройство) во всех направлениях. Звуковое давление - это звуковая энергия, которая попадает на единицу площади в заданном направлении от источника звука, удаленную от него на определенное расстояние (как правило, на 1 м).

дБ SPL

Для характеристики уровней звукового давления используется уравнение

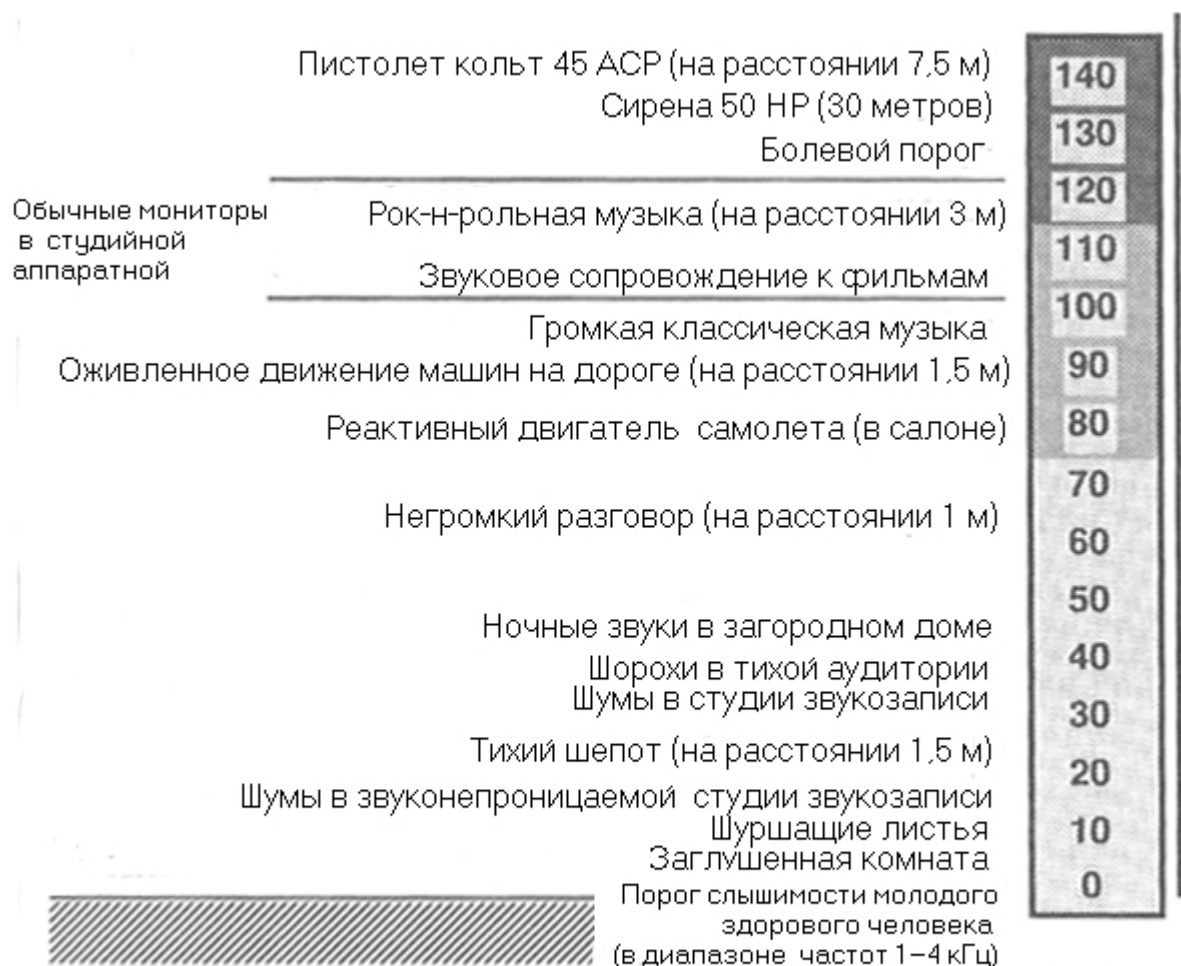
$$\text{дБ SPL} = 20 \log(p_1/p_0),$$

где p_0 и p_1 звуковое давление, выраженное в динах на квадратный сантиметр или Ньютонах на квадратный метр.

Из этого уравнения следует, что двукратное увеличение звукового давления соответствует 6 дБ, а десятикратное -- 20 дБ.

Звуки, которые различаются на 3 дБ, человеком воспринимаются одинаковыми по громкости, а вот звук, давление которого на 10 дБ выше, для него будет звучать в два раза громче. Правда, громкость -- субъективная характеристика, которая к тому же зависит от частоты и абсолютного уровня звукового давления.

За 0 дБ принят уровень звукового давления, соответствующий порогу слышимости здорового молодого человека в диапазоне частот 1--4 кГц (наш слух наиболее чувствителен к таким звукам), что составляет 0,0002 дин/см² или 0,000002 Н/м². Приблизительные уровни звукового давления, характерные для различных источников приведены рис. 3.2.



Примечание. 1. Установлено, что некоторые люди могут слышать звуки, имеющие звуковое давление ниже 0 дБ.
2. Беззвонные камеры могут быть очень шумными. Тот факт, что камера не отражает звук, не означает, что она хорошо защищена от проникновения звуков извне.

Рис. 3.2. Уровни звукового давления, характерные для различных источников

дБ PWL

Акустическая мощность выражается в акустических ваттах и для ее характеристики используется величина дБ PWL:

$$\text{дБ PWL} = 10 \log (P_1/P_2).$$

Акустическую мощность и ее значение в дБ применяют достаточно редко, в основном, для расчета времени реверберации в замкнутом пространстве или КПД системы громкоговорителей. Чаще используются значения дБ SPL, так как звуковое давление проще измерить, и оно имеет непосредственное отношение к воспринимаемой громкости.

Определенного соотношения между величинами дБ PWL и дБW не установлено, так как первые выражают акустическую мощность, вторые - электрическую мощность. Если на громкоговоритель подать сигнал мощностью 20 дБW, он будет генерировать звуковое давление 10 дБ PWL. Другими словами, если на громкоговоритель подать электрическую мощность 100 Вт, то на его выходе акустическая мощность составит всего 10 Вт. При этом КПД преобразования будет равно 10%, что считается достаточно высоким значением для конусного громкоговорителя.

3.4 RMS -- среднеквадратичное значение

В аудиотехнике среднеквадратичные значения используют для характеристики уровней сигналов, они наиболее точно описывают энергию сложных или синусоидальных волн. Для получения среднеквадратичного уровня все мгновенные значения напряжений для волны сложной формы возводят в квадрат, усредняют полученные значения и извлекают из результата квадратный корень. Для периодического сигнала (например, для синусоидальной волны), чтобы получить среднеквадратичное значения достаточно умножить пиковое напряжение на определенную константу. Среднеквадратичное значение для непериодического сигнала (например, для речевых или музыкальных звуков), можно измерить с помощью специального измерительного устройства или детектора.

Как показано на рис. 3.3, среднеквадратичное значение напряжения для синусоидальной волны равно пиковому уровню, умноженному на коэффициент 0,707.

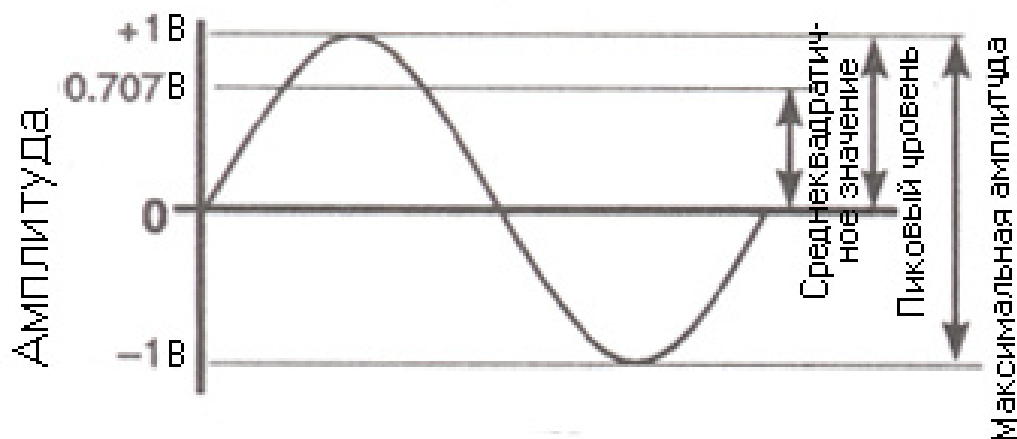


Рис. 3.3. Среднеквадратичное значение напряжения для синусоидальной волны

Производители усилителей мощности иногда указывают в спецификациях, что среднеквадратичная мощность устройства равна (х) Вт. При этом предполагалось, что значение среднеквадратичной мощности аудиосигнала идентично эквивалентной мощности, которая могла бы быть рассеяна сигналом постоянного тока. Например, усилитель, про который сказано, что его среднеквадратичная мощность на нагрузку 8 Ом составляет 200 Вт, должен обеспечивать среднеквадратичное напряжение 40 В:

$$E = \sqrt{(200 \text{ Вт} \cdot 8 \text{ Ом})} = \sqrt{1600} = 40 \text{ В.}$$

Если сигнал постоянного тока с напряжением 40 В рассеивался бы на нагрузке 8 Ом, то при этом выделялось бы такое же количество тепла, как при подаче на эту нагрузку синусоидальной волны или другого сигнала со среднеквадратичным напряжением 40 В.

Мощность определяется как произведение напряжения на силу тока. Обычно в усилителе мощности измеряют среднеквадратичное выходное напряжение и умножают его на среднеквадратичное значение силы тока на выходе. Но, так как напряжение и сила тока не совпадают по фазе, то величина, которая получается при умножении среднеквадратичных значений (т.е. мощность), не имеет математического смысла. Производители до сих пор подают на усилители тестовые синусоидальные сигналы и подключают к их выходам "холостые" нагрузки. Так они измеряют среднеквадратичное значение синусоидального выходного напряжения и вычисляют выходную мощность при различных напряжении и сопротивлении нагрузки. Если производитель стремится к тому, чтобы указывать в

спецификации технически корректные данные, то он называет полученную величину "средняя мощность синусоидальной волны", а не "среднеквадратичная мощность".

Среднеквадратичные значения используются не только для характеристики усилителей мощности. В большинстве случаев напряжение, определяющее входную чувствительность предусилителя или линейного усилителя, также является среднеквадратичным значением.

Например, в ранее приведенных уравнениях $0 \text{ дБм} == 1 \text{ мВт}$, или $0,775 \text{ В}$ при сопротивлении нагрузки 600 Ом , а $0 \text{ дБВ} = 1 \text{ В}$, подразумевались среднеквадратичные значения напряжения. Среднее значение сигнала не будет заметно меняться даже при наличии кратковременных пиков очень высокого уровня. И наоборот, большой разброс пиковых уровней может не оказывать значительного влияния на среднее значение. Поэтому, когда необходимо оценить уровень громкости сигналов воспринимаемых человеком используются среднеквадратичные значения, они точнее совпадают с чувствительностью нашего слуха к звуковой энергии. Измерители среднеквадратичных значений применяются во многих компрессорах, системах шумоподавления и других процессорах сигналов. Единственным исключением, о котором стоит упомянуть, являются эфирные процессоры, в которых даже кратковременные пики могут вызывать перемодуляцию, поэтому в этих устройствах часто используют измерители пикового уровня.

3.5. Громкость, уровень сигнала и коэффициент усиления

К сожалению, именно эти термины очень часто используют неправильно, поэтому сначала давайте разберемся, что они означают.

Громкость -- это уровень мощности, поэтому увеличение громкости на аудиоаппаратуре соответствует повышению мощности. Иногда громкость используют для описания интенсивности звука или амплитуды электрического сигнала, но для этих характеристик лучше применять другие, более точные термины.

Уровень сигнала -- это величина, определенная относительно какого-то стандартного значения. Так, например, уровень звукового давления в децибелах определяют относительно значения $0,0002 \text{ дин/см}^2$, а уровень звука в процессоре обработки сигналов в дБм -- относительно значения 1 мВт .

Коэффициент усиления характеризует увеличение мощности сигнала и обычно выражается в дБ. Иногда для описания повышения напряжения используют термин коэффициент усиления по напряжению, но лучше этого не делать, так как при определенном относительном напряжении коэффициент усиления по напряжению может соответствовать и уменьшению мощности.

Пример.

Измеренное напряжение на выходе процессора обработки сигналов равно $0,775 \text{ В}$ (среднеквадратичное значение). Этот сигнал подается на усилитель мощности, а затем -- на громкоговоритель. Среднеквадратичное значение напряжения, подаваемого на громкоговоритель, равно $0,775 \text{ В}$. Чему равен коэффициент усиления усилителя мощности?

Для ответа на этот вопрос приведенных данных недостаточно. Конечно, можно просто предположить, что на входе и выходе усилителя напряжение одинаковое, и коэффициент усиления по напряжению равен 0 дБ . Но для четкого ответа на заданный вопрос, необходимо определить мощность, которая рассеивается на входе усилителя и на входе громкоговорителя, а для этого нужно знать их сопротивление.

Пример. На усилитель мощности с входным сопротивлением 600 Ом подается сигнал со среднеквадратичным напряжением $0,775 \text{ В}$. Сигнал с этого усилителя мощности поступает на громкоговоритель с сопротивлением 8 Ом . Чему равен коэффициент усиления усилителя?

Рассчитываем входную мощность:

$$P = E^2/Z = 0,7752/600 = 0,600625/600 = 0,001 = 1 \text{ мВт.}$$

Это нам было уже известно, так как 0,775 В при 600 Ом составляет 0 дБм или 1 мВт. Определяем мощность, которая подается на нагрузку громкоговорителя:

$$P = E^2/Z = 0,7752/8 = 0,600625/8 = 0,075 \text{ Вт} = 75 \text{ мВт.}$$

Рассчитываем отношение выходной и входной мощности в дБ:

$$\text{дБ} = 10 \log (P_1/P_0) = 10 \log (75/1) = 10 \log 75 = 10 \cdot 1,875061263 \sim 19 \text{ дБ,}$$

т. е. при равных значениях входного и выходного напряжений, коэффициент усиления усилителя составляет 19 дБ. Учитывая, что опорное значение на входе равно 0 дБм, мощность, которая подается на нагрузку громкоговорителя (75 мВт), на выходе составит +19 дБм.

3.6. Громкость

Часто термины "громкость" и "уровень звукового давления" используют как взаимозаменяемые, но это неправильно, так как термин "громкость" имеет свое определенное значение. Уровень звукового давления в дБ определяют с помощью измерителей уровня звука.

Кривые равной громкости и Фоны

Будут ли слушатели воспринимать тестовые шумоподобные или синусоидальные сигналы с линейной АЧХ во всем диапазоне звуковых частот, направленные на усилитель мощности с линейной АЧХ, а затем на громкоговоритель с линейной АЧХ, одинаково громкими на всех частотах? Дело в том, что чувствительность слуха человека имеет нелинейный характер, и поэтому звуки равной громкости на разных частотах слушатели будут воспринимать как звуки с разным звуковым давлением.

Это явление описывается, так называемыми "кривыми равной громкости" (рис. 3.4), которые показывают, какое звуковое давление требуется создать на разных частотах для того, чтобы для слушателей громкость этих звуков была равна громкости звука с частотой 1 кГц. Чтобы мы воспринимали звуки более высоких и более низких частот, такими же громкими, что и звук с частотой 1 кГц, они должны иметь большее звуковое давление. И чем меньше уровень звука (нижние кривые на рис. 3.4), тем менее чувствительно наше ухо к низким частотам.

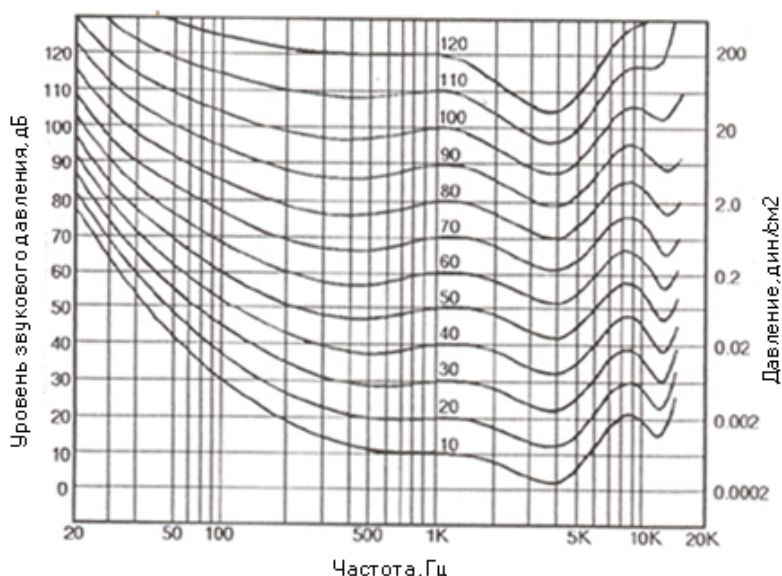


Рис. 3.4. Кривые равной громкости

Для определения громкости был введен еще один термин, который называли "Фон". Значение Фона всегда равно уровню звукового давления в дБ на частоте 1 кГц, на других частотах эти значения отличаются. Рассмотрим, например, верхнюю кривую, приведенную на рис 3.4: на частоте 1 кГц ей соответствует уровень звукового давления 120 дБ (шкала с левой стороны графика). Эта кривая называется "120 Фон". На частоте порядка 3,5 кГц кривая, соответствующая 120 Фон, снижается до 105 дБ, в двух крайних точках этой кривой, на частотах 45 кГц и 9500 кГц, достигает 130 дБ.

На основании этих данных можно сделать следующие выводы. Ухо человека имеет максимальную чувствительность к звукам с частотой 1 кГц и менее чувствительно к звукам с крайними частотами. Чтобы мы воспринимали звуки разных частот равными по громкости звуку 120 дБ на 1 кГц, громкоговоритель должен генерировать 130 дБ на 45 Гц или 9,5 КГц, и всего 105 дБ на 3,5 кГц.

Если внимательно посмотреть на кривые равной громкости, то можно увидеть, что пиковая чувствительность уха человека приходится на частоты, лежащие между 3 и 4 кГц. Учитывая это, производители измерителей уровня звука, предложили использовать для измерения уровня звукового давления в дБ корректирующие фильтры (рис. 3.5), которые описываются, так называемыми "взвешенными" характеристиками -- дБ (А), или дБ (Авзв.). Кривая А, приведенная на этом рисунке, которой соответствует опорный уровень сигнала при 1 кГц, опускается до 30 дБ на частоте 50 Гц и ниже 45 дБ на частоте 20 Гц, а затем поднимается на несколько дБ в диапазоне от 1,5 кГц до 3 кГц. На частотах выше 6 кГц кривая А опускается ниже значения, соответствующего частоте 1 кГц. Это примерно соответствует инверсии кривой равной громкости (40 Фон), приведенной на рис. 3.4.

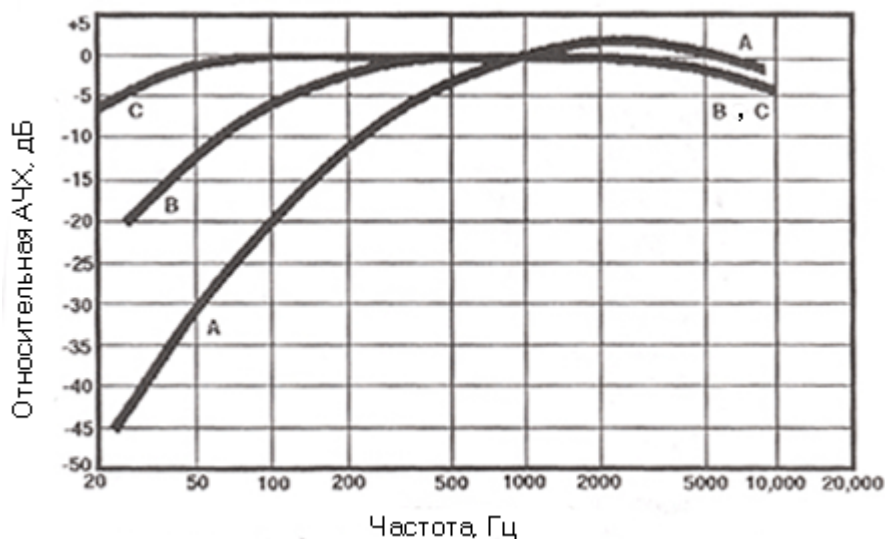


Рис. 3.5. Кривые взвешенных характеристик корректирующих фильтров

Кривая взвешенных характеристик А, учитывает особенности восприятия негромких звуков (см. рис. 3.5), например, шорохов в тихой аудитории на частоте 1 кГц, которым соответствует звуковое давление 40 дБ (см. рис. 3.2). В отношении громких звуков (например, рок-н-рольная музыка), ухо человека имеет линейную чувствительность. Это наглядно можно увидеть, сравнивая кривые равной громкости 100 Фон и 110 Фон (именно такая громкость характерна для рок-н-рольной музыки) с кривой 40 Фон. Чем линейнее АЧХ измерителя уровня звукового давления, тем в большей степени определенный с его помощью уровень звука будет соответствовать тому, который воспринимает слушатели. Именно этот фактор учитывают кривые взвешенных характеристик В и С. Однако многие государственные организации, отвечающие за технику безопасности и гигиену труда, продолжают пользоваться для оценки громкости звуков только кривыми А, поэтому в их отчетах очень часто фигурируют заниженные данные. Болевой порог уровня звука при частоте 1 кГц составляет 120 -- 130 дБ, и, как правило, женщины и дети более чувствительны к громкости звуков, чем взрослые мужчины.

Тonoкомпенсация

Многие предусилители класса Hi-Fi и автомобильные стереосистемы имеют переключатели или регуляторы тонокомпенсации. Простой переключатель тонокомпенсации, как правило, просто усиливает низкочастотные звуки. Более сложные регуляторы тонокомпенсации дополнительно обеспечивают усиление и звуков высоких частот, а самые сложные -- непрерывное понижение общего уровня с одновременным увеличением НЧ- и ВЧ-составляющих. За счет внесения таких изменений достигается более естественное звучание, но при очень высокой громкости тонокомпенсация неэффективна. Этот подход можно использовать для тех случаев, когда необходима корректирующая эквалаизация за счет усиления НЧ и ВЧ при низком уровне общей громкости. При установке системы звукоусиления для инструментальной группы в маленьком клубе можно переключить измеритель звукового давления на шкалу А (это автоматически обеспечит нужный контур для выравнивания АЧХ системы на измерителе взвешенных характеристик), или немного усилить звуки на самых низких НЧ и верхних ВЧ. Только внимательно следите за ходом выступлений и отмените установленную компенсацию, когда будет выступать рок-н-рольная группа с очень энергичным звучанием.

Глава 4

4.1. Динамический диапазон

Динамический диапазон определяет максимальное изменение уровня звука в аудиоматериале, он выражается в децибелах и равен разности между самой громкой и самой тихой частью аудиоматериала. Иногда на фоне шумов самая тихая часть музыкального фрагмента может оказаться неслышимой, в этом случае динамический диапазон будет определяться разностью между самой громкой частью музыкального произведения и уровнем шумов.

Динамический диапазон используется и для характеристики звуковых систем. Любая звуковая система имеет собственный шум, являющийся остаточным электронным шумом системы. Динамический диапазон звуковой системы равен разности между пиковым уровнем звука на выходе и уровнем внутренних шумов.

Динамический диапазон рок-н-рольной музыки

Для рок-н-рольной музыки характерен самый широкий динамический диапазон. Уровень звукового давления у микрофонов (не в аудитории) на таких концертах может изменяться от 40 дБ (что соответствует шуму в аудитории при кратковременных паузах в исполнении, улавливаемому микрофоном) до 130 дБ (это выше болевого порога, но звуки такой громкости исполнители издают в микрофон, а до слушателей они доходят менее громкими). Чтобы определить динамический диапазон такого концерта, следует из пикового уровня звукового давления вычесть уровень шумов:

Динамический диапазон = Пиковый уровень - Уровень шумов = 130 дБ - 40 дБ = 90 дБ.

Примечание. дБ - это отношение двух сигналов, и в этом случае мы описываем, как соотносятся сигналы 130 дБ SPL и 40 дБ SPL. Разница между ними составляет 90 дБ, но данное значение никак не связано с уровнем звука 90 дБ SPL, отнесенного к 0,0002 дин/см². Динамический диапазон всегда указывается в дБ, его никогда не следует выражать в единицах дБ SPL, дБm, дБу, отнесенных к какому-то абсолютному значению.

Электрический динамический диапазон звуковой системы

Электрический уровень сигнала звуковой системы (в дБу) пропорционален уровню звукового давления (в дБ SPL) у микрофона. Реальные уровни электрического сигнала, определяются чувствительностью микрофонов, уровнем усиления предусилителей мощности и другой аппаратурой, но эти величины являются постоянными и соответствуют тем, что приведены в спецификациях.

При уровне звукового давления у микрофона 130 дБ SPL максимальные линейные уровни на выходе микшерного пульта могут достигать +24 дБу (12,3В), а максимальные уровни на выходе каждого усилителя мощности - пиковых значений 250 Вт (подобных усилителей может быть и несколько). При уменьшении уровня звука до 40 дБ SPL минимальный линейный уровень уменьшается до 66 дБу (388 мВ), а уровень сигнала на выходе усилителя мощности снижается до 250 нВт.

При этом динамический диапазон аудиоматериала на выходе микшерного пульта остается таким же, как у сигнала, снимаемого с микрофона:

Динамический диапазон = Пиковый уровень - Уровень шумов = +24 дБу - (-66 дБу) = 90 дБ.

А что можно сказать относительно динамического диапазона на выходе усилителя мощности? Как соотносятся в децибелах 250 Вт и 250 нВт можно легко рассчитать, используя формулы, приведенные в главе 3:

$$\text{дБ} = 10 \log (P1/P0) = 10 \log (250/0,000000250) = 10 \log (1000000000) = 10 \cdot 9 = 90 \text{ дБ}.$$

Соответствие величин дБ SPL и дБу, дВт или дБW сохраняется на всех участках звуковой системы от источника звука у микрофона до выхода на систему громкоговорителей. При изменении уровня звука на 90 дБ, электрическая мощность изменится на столько же. В электрической цепи, которая возбуждается данным звуком (предполагается, что усиление носит линейный характер, т.е. в системе не применяется компрессия, эквалаизация, ограничение и отсечку сигналов) разность между двумя уровнями звукового давления, выраженная в децибелах, всегда соответствует разности мощностей в дВт или разности напряжений в дБу. Такое соотношение характерно для систем любого типа: звукоусиления, звукозаписи, вещательных.

Акустический динамический диапазон системы

Мы описали динамический диапазон аудиоматериала, который поступает на микрофон, и динамический диапазон электрического сигнала, который проходит через микшерный пульт и усилители мощности, а что можно сказать относительно звука на выходе системы громкоговорителей? Как вы, наверное, могли бы уже предположить, он должен иметь такой же динамический диапазон. Если громкоговорители не в состоянии передать полный динамический диапазон, то они не смогут воспроизводить самые низкие уровни мощности, либо будут искажать звук на пиковых уровнях сигнала (эти недостатки могут присутствовать одновременно). Реальные уровни звука, которые должны воспроизводить громкоговорители определяются расстоянием между ними и публикой, а также требуемой громкостью звучания. Предположим, что мы не хотим, чтобы у наших слушателей лопнули барабанные перепонки, и за достаточный для точной передачи исполнения пиковый уровень принимаем 120 дБ SPL. В этом случае на данной сценической площадке громкоговорители должны сообща генерировать 130 дБ SPL (если вы проведете необходимые расчеты, то получите именно это значение). Мы также знаем, что, если громкоговорители генерируют 130 дБ SPL на пиках, то они смогут поддерживать 40 дБ SPL на самых тихих фрагментах, т. е. обеспечивать заданное значение динамического диапазона 90 дБ.

Нам известно, что звуковая волна, соответствующая пиковому уровню, ослабляется в процессе распространения на 10 дБ (т.е. со 130 дБ SPL до 120 дБ SPL). Но точно также будет снижаться и уровень звукового давления, соответствующий тихим фрагментам (с 40 дБ до 30 дБ), и публика может их не услышать, так как в этом случае уровень звука становится ниже уровня шума в зрительном зале. Именно поэтому часто применяют электронную регулировку динамического диапазона, включающую компрессию самых громких пиков, в результате которой повышается общий уровень звуков, и тихие фрагменты звучат громче.

4.2. Запас динамического диапазона

Средний электронный линейный уровень звука в концертной системе, описанной в разделе 4.1, равен +4дБи (1,23 В) и совпадает со средним уровнем звука (110 дБ SPL) у микрофона. Этот средний уровень обычно называют "номинальным уровнем" аудиоматериала. Запас динамического диапазона определяется разностью между номинальным и пиковым (максимальным) уровнем звука в аудиоматериале. Зная уровни звука у микрофона, рассчитаем запас, который должна иметь данная концертная звуковая система.

Запас = Пиковый уровень - Номинальный уровень = 130 дБ SPL - 110 дБ SPL = 20 дБ. Запас динамического диапазона всегда выражается в простых дБ потому, что он описывает соотношение уровней, а не абсолютные их значения.

Электрический запас, расчет которого приведен ниже, также равен 20 дБ.

Запас = Пиковый уровень - Номинальный уровень = +24дБи - (+4дБи) = 20 дБ. Здесь запас также равен 20 дБ, а не 20дБи. Запас усилителя с максимальной мощностью 250 Вт и минимальной 2,5 Вт также составит 20 дБ, что можно рассчитать, используя следующие уравнения (см. главу 3):

$$\text{дБ} = 10\log(P_1/P_2) = 10\log(250/2,5 \text{ Вт}) = 10\log(100) = 10 \cdot 2 = 20 \text{ дБ}.$$

На рис 4.1. приведена схема, на которой показаны значения динамического диапазона и его запаса для типичной звуковой системы. Указанное отношение сигнал : шум соответствует разности между номинальным уровнем сигнала и уровнем шумов.

Правда, следует учитывать, что сумма отношения сигнала к шуму и запаса не всегда равна динамическому диапазону. Дело в том, что динамический диапазон соответствует разности между самым громким и самым тихим фрагментами аудиоматериала, который состоит из сигналов определенной структуры и является относительно узкополосным, а шум является псевдослучайным широкополосным сигналом.

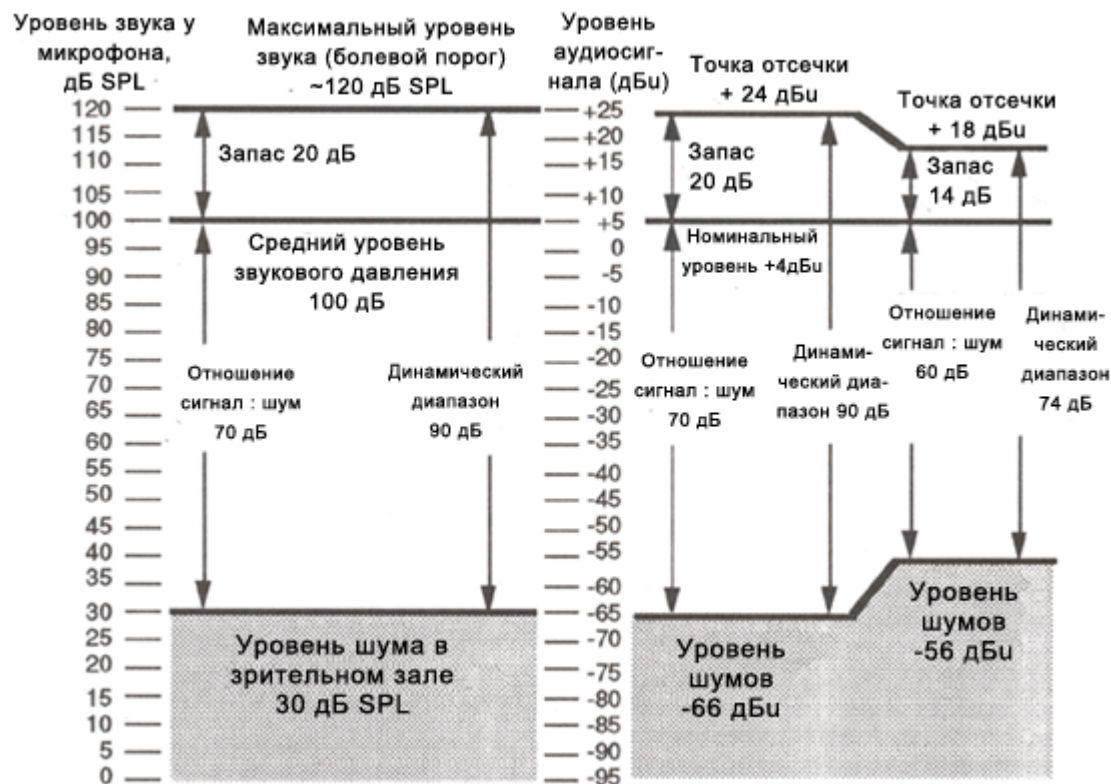


Рис. 4.1. Динамический диапазон и запас

С другой стороны, отношение сигнала к шуму определяется номинальным уровнем сигнала и уровнем собственных шумов. Если это значение добавляется к запасу, который представляет собой разность между этим номинальным уровнем и максимальным уровнем,

то полученная величина в дБ может оказаться меньше динамического диапазона (т. е. допускается наличие различимого на слух сигнала, который лежит ниже уровня собственных шумов системы).

Но как определить, на сколько уровень звуков в аудиоматериале может быть ниже уровня собственных шумов, чтобы первые оставались различимы на слух. В значительной степени это зависит от характера аудиоматериала, природы шума, а также от способности слушателей к восприятию звуков. Поэтому все-таки предпочтительнее определять динамический диапазон исходя из уровня собственных шумов, хотя это не всегда справедливо, но зато позволяет получать надежные результаты.

От запаса динамического диапазона зависит, будет ли звуковая система справляться с пиковыми уровнями звука в аудиоматериале. Так, две системы с разными динамическими диапазонами могут одинаково хорошо работать номинальными уровнями звука, но только та из них, которая обладает большим динамическим диапазоном, сможет без искажений передавать пиковые уровни звуков.

Требования к динамическому диапазону зависят от назначения системы. Для звуковой системы громкой связи, которая должна работать в условиях шумного производства с высокими номинальными уровнями звука, чтобы перекрыть шум от работающих станков, достаточно иметь запас в несколько децибел (до 6 дБ). Данная система предназначена только для воспроизведения речи или предупреждающих сигналов, уровень звука которых можно контролировать и удерживать в очень узком диапазоне. Если номинальный уровень для системы внутренней связи будет равен 110 дБ SPL, то при запасе 6 дБ пиковые значения составят 116 дБ SPL, что всего на несколько децибел меньше болевого порога. Если запас такой системы был бы таким же, как у концертной звуковой системы, описанной выше (20 дБ), то пиковые уровни звука достигали бы 130 дБ SPL, и после первых нескольких объявлений по громкой связи рабочие подали бы жалобу по поводу невыносимых условий труда.

А вот звуковая система, предназначенная для усиления симфонической музыки, должна иметь запас динамического диапазона более 20 дБ. Дело в том, что при среднем уровне звуков, издаваемых оркестром 90 дБ, пиковые значения, соответствующие звукам некоторых инструментов (литаврами, скрипками и др.) могут достигать 120 дБ SPL. Поэтому для таких систем необходим запас динамического диапазона 30 дБ, и если он будет меньше, при максимальном уровне звуков будут слышны искажения. Присутствие последних возможно и допустимо на громких концертах рок-н-рольной музыки с плотным звуком, но почитателей классической музыки с натренированным слухом даже кратковременное искажение звучания будет раздражать, и такая звуковая система не устроит ни исполнителей, ни публику.

Однако это не означает, что для симфонической музыки потребуется больше усилителей мощности и громкоговорителей, чем для рок-н-рольной. Такого же или даже меньшего количества аппаратуры будет вполне достаточно, но ее нужно настроить так, чтобы запас динамического диапазона составлял 10 дБ.

Вспомним о том, что 10 дБ эквивалентно 10-кратному увеличению мощности. Как же увеличить запас динамического диапазона системы на 10 децибел? Выше мы указывали, что пиковые значения уровня звука могут достигать 120 дБ SPL. Увеличить максимальный уровень мы не можем, но, снизив номинальное значение со 100 дБ SPL до 90 дБ SPL, обеспечим повышение запаса динамического диапазона на 10 дБ. Полученная звуковая система для оркестра, выдержит пиковый уровень 117 дБ SPL (с запасом 27 дБ), при этом половину усилителей и громкоговорителей можно будет отключить, так как 3 дБ соответствует 50% мощности.

4.3. Выбор динамического диапазона для реальной звуковой системы

Какими же критериями следует руководствоваться при выборе динамического диапазона и его запаса? При создании звуковой системы нужно учитывать, с какими аудиоматериалами

ей предстоит работать. Правда, порой вследствие различных практических и финансовых ограничений приходится идти на компромиссы.

Нужно ли стремиться к максимальному динамическому диапазону?

Динамический диапазон системы можно расширить либо за счет увеличения максимального уровня звука, либо за счет уменьшения уровня фонового шума. Иногда для этой цели применяют акустическую обработку, которая наряду с увеличением динамического диапазона уменьшает избыточное эхо, поэтому ее часто используют в системах, используемых в концертных залах. В портативных звуковых системах уменьшить уровень фонового шума практически невозможно, поэтому для них приемлем только один вариант - увеличение уровня звука.

Повышение максимального уровня звука, который способна обеспечить звуковая система, увеличивает ее стоимость в экспоненциальной зависимости, так как для увеличения уровня звука на каждые 3 дБ потребуется двукратное повышение мощности усилителей и громкоговорителей. Конечно, можно к тем же усилителям мощности подключить более чувствительные громкоговорители, но скорее всего именно такие устройства уже используются в системе, к тому же чувствительные громкоговорители стоят дороже и гораздо больше по размеру. Можно также использовать направленные громкоговорители (например, рупорные колонки с меньшим углом рассеивания), которые фокусируют всю мощность в меньшем объеме пространства, и соответственно обеспечивают больший уровень звукового давления. Ну а если это невозможно, придется увеличивать количество усилителей или подбирать более мощные устройства.

Если звуковая система не соответствует требованиям

Если динамический диапазон аудиоматериала превышает максимальный динамический диапазон системы, появляются искажения на пиковых уровнях звука и громкоговорители могут выйти из строя, а тихие фрагменты будут не слышны из-за того, что они окажутся ниже уровня электрических и акустических шумов.

Давайте рассмотрим, подобную ситуацию на примере концертной системы, которую мы рассматривали в разделе 4.1. Диапазон акустических уровней у микрофона составлял от 40 дБ SPL до 130 дБ SPL, а динамический диапазон - 90 дБ. Соответствующие уровни сигнала на микшерном пульте изменялись в пределах от -66 дБу (388 мВ) до +24 дБу (12,3 В), т. е. его динамический диапазон также был равен 90 дБ. Наконец, минимальный выход усилителя мощности составлял 0,25 мВт, а максимальный -- 250 Вт, поэтому и здесь значение динамического диапазона сохранялось, равным 90 дБ.

Пример. Предположим, что описанную звуковую систему перевозят на двух грузовиках. Но тот грузовик, на котором везли электронику, застрял в пробке на шоссе, и, чтобы не сорвать концерт, в последнюю минуту пришлось взять в аренду местную звуковую систему с меньшим количеством громкоговорителей. В этой звуковой системе цепь предусилителя для микрофонов шумит сильнее, а мощность выходного линейного усилителя микшера меньше, чем у той аппаратуры, что застряла на шоссе. Зато арендованные усилители мощности обеспечивают нужную нам мощность. Итак, при измерении арендованной аппаратуры мы обнаруживаем, что электронный уровень собственных шумов у нее составляет -56 дБу (1,23 мВ), а пиковый выходной уровень - +18 дБ (6,16 В). Каков будет динамический диапазон собранной системы?

1. Нам известно, что самым слабым звеном данной системы является не динамический диапазон, а электронная цепь.

Динамический диапазон = Пиковый уровень - Уровень собственных шумов = +18 дБу - (-56 дБу) = 74 дБ.

Динамический диапазон этой системы составит всего 74 дБ.

2. Акустический динамический диапазон музыкального выступления остался равным 90 дБ, (см. рис. 4.1), поэтому 16 дБ (0 дБ - 74 дБ = 16 дБ) в данной звуковой системе "потеряется".

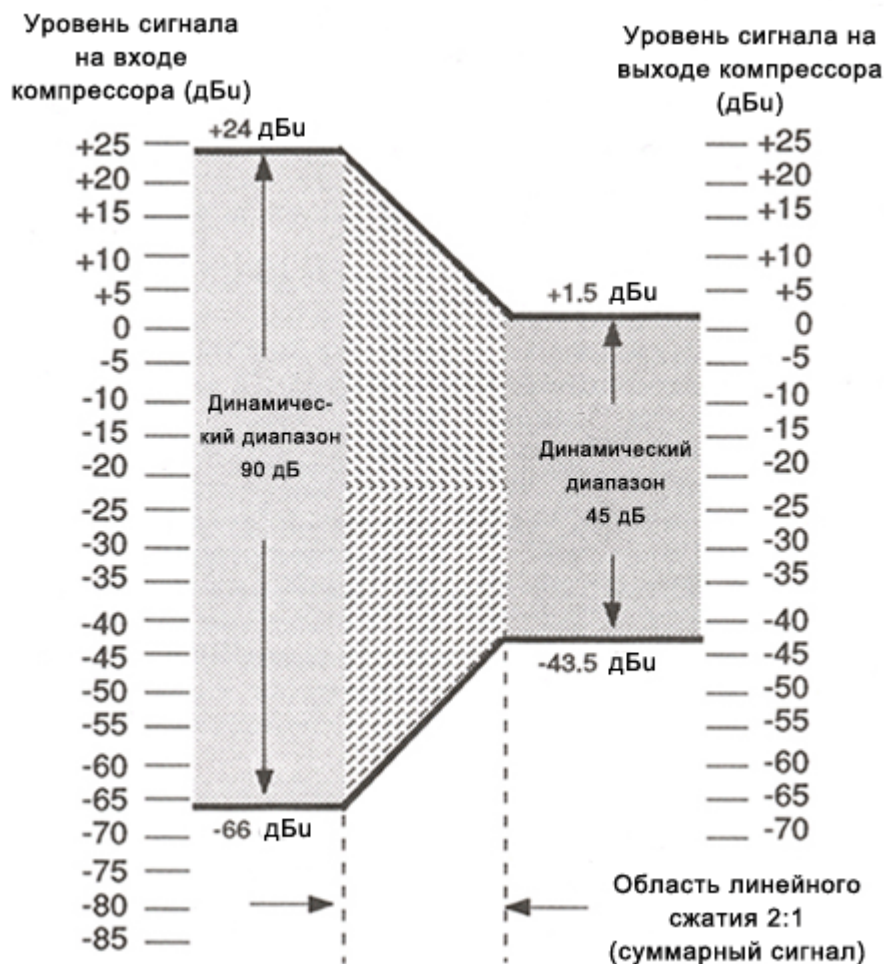


Рис. 4.2. Компрессия с коэффициентом 2:1 аудиоматериала с динамическим диапазоном 90 дБ.

На выходе микшерного пульта пиковые значения, соответствующие самым громким фрагментам, будут воспроизводиться неадекватно, а самые тихие фрагменты с низким уровнем сигналов станут неразличимы на фоне шумов. Поэтому для усиления или воспроизведения звука с высоким качеством, звуковая система должна эффективно работать на низких уровнях громкости и иметь высокую мощность.

Как согласовать выступление с широким динамическим диапазоном с системой с ограниченным динамическим диапазоном

До сих пор мы рассматривали линейные зависимости, когда при изменении уровня сигнала на входе на 2 дБ его изменение на выходе составляли те же 2 дБ. Однако так происходит не всегда. Как же будет меняться динамический диапазон музыкального выступления, если при изменении входного уровня сигнала на 2 дБ, его уровень на выходе изменится только на 1 дБ. Как видно из представленной на рис. 4.2 схемы, он уменьшится в два раза (с 90 дБ до 45 дБ).

Именно такую операцию выполняет устройство, предназначенное для обработки сигнала, называемое "компрессор". Если для компрессора задано относительно небольшое сжатие 2:1, то на выходе уровни сигналов будут в два раза меньше, чем на входе. Такое сжатие вполне допустимо при воспроизведении музыки, но часто используют компрессию и с более высокими коэффициентами.

В примере, приведенном выше, нам надо было изменить динамический диапазон выступления с 90 дБ до 74 дБ, т.е. уменьшить его всего на 16 дБ. Для этого, как показано на рис. 4.3, можно установить коэффициент сжатия компрессора 1,21:1 и получить нужный динамический диапазон 74 дБ. Возможно, при этом придется отрегулировать реальные уровни сигналов, что также показано на рисунке 4.3. Данный вариант обработки сигнала предпочтительнее, чем его сжатие с коэффициентом 2:1, так как обеспечивает не только

согласование динамического диапазона с ограничениями звуковой системы, но и сохраняет естественное звучание аудиоматериала.

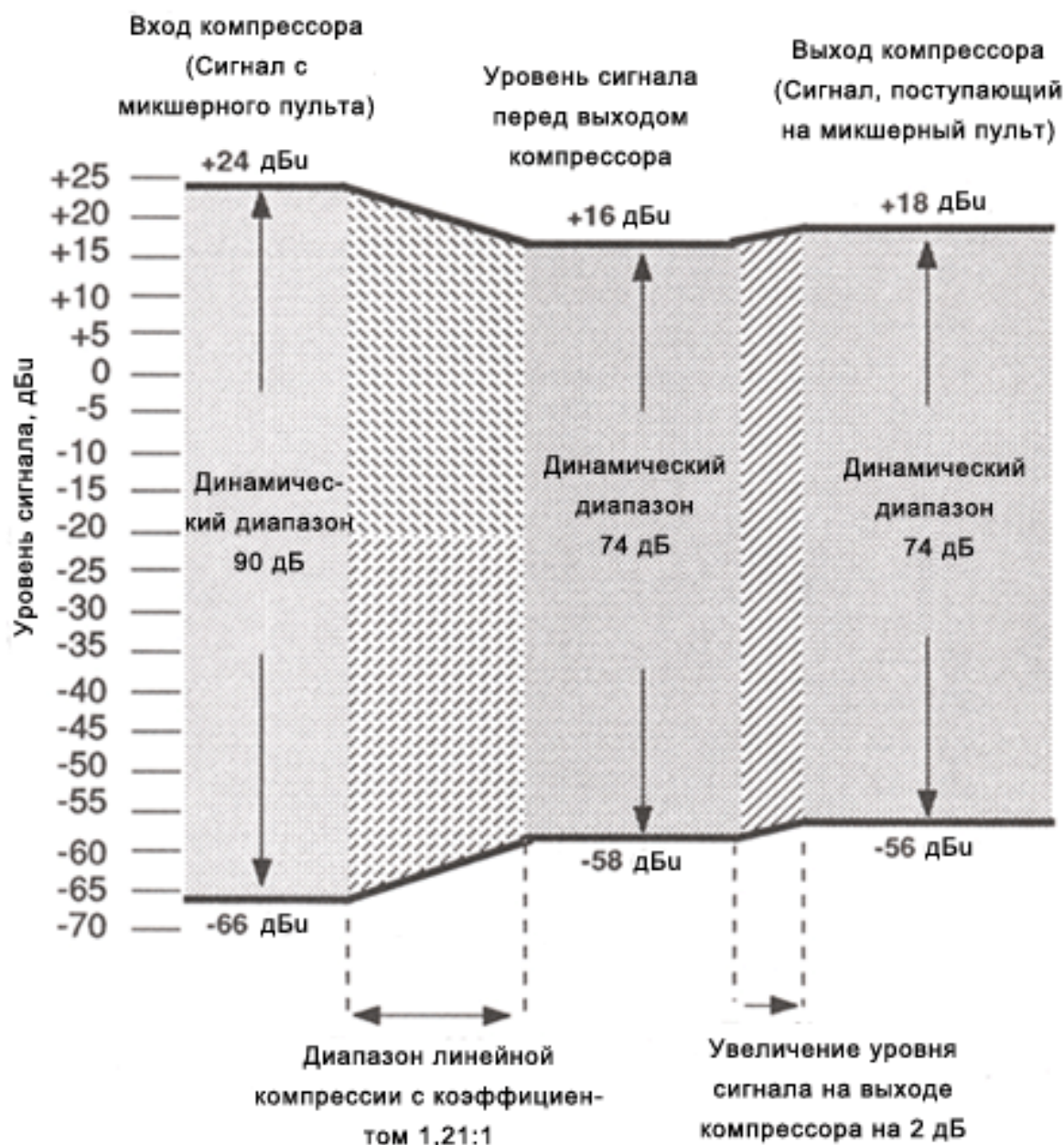


Рис. 4.3. Сжатие с коэффициентом 1,21:1 аудиоматериала с динамическим диапазоном 90 дБ

Ну а как быть, если компрессию применять нежелательно, чтобы исключить связанные с ней побочные эффекты, которые проявляются в увеличении громкости тихих фрагментов и появлению линейных искажений на низких частотах. В этом случае можно выбрать другой подход: использовать компрессию только для сигналов, уровень которых превышает заданное пороговое значение. При этом сигналы ниже этого уровня сжиматься не будут и, если пороговый уровень близок к номинальному уровню сигналов в аудиоматериале, основная часть выступления будет звучать естественно. Зато для сигналов с уровнем выше порогового значения можно использовать такое сжатие, которое необходимо для предотвращения их "срезания". Рис. 4.4 иллюстрирует применение компрессии с коэффициентом 1,43:1 в отношении сигналов, уровень которых превышает пороговое значение +4дБи. Этот способ позволил снизить требования к запасу динамического диапазона, но поскольку динамический диапазон снизился до 84 дБ, тихие фрагменты выступления будут передаваться не лучшим образом (в шумах потеряется 10 дБ аудиоматериала). Если пороговый уровень сигналов был бы ниже, а коэффициент компрессии - выше, то удалось бы сохранить больший динамический диапазон, и общий уровень сигнала на компрессоре оставался бы выше уровня собственных шумов микшерного пульта.

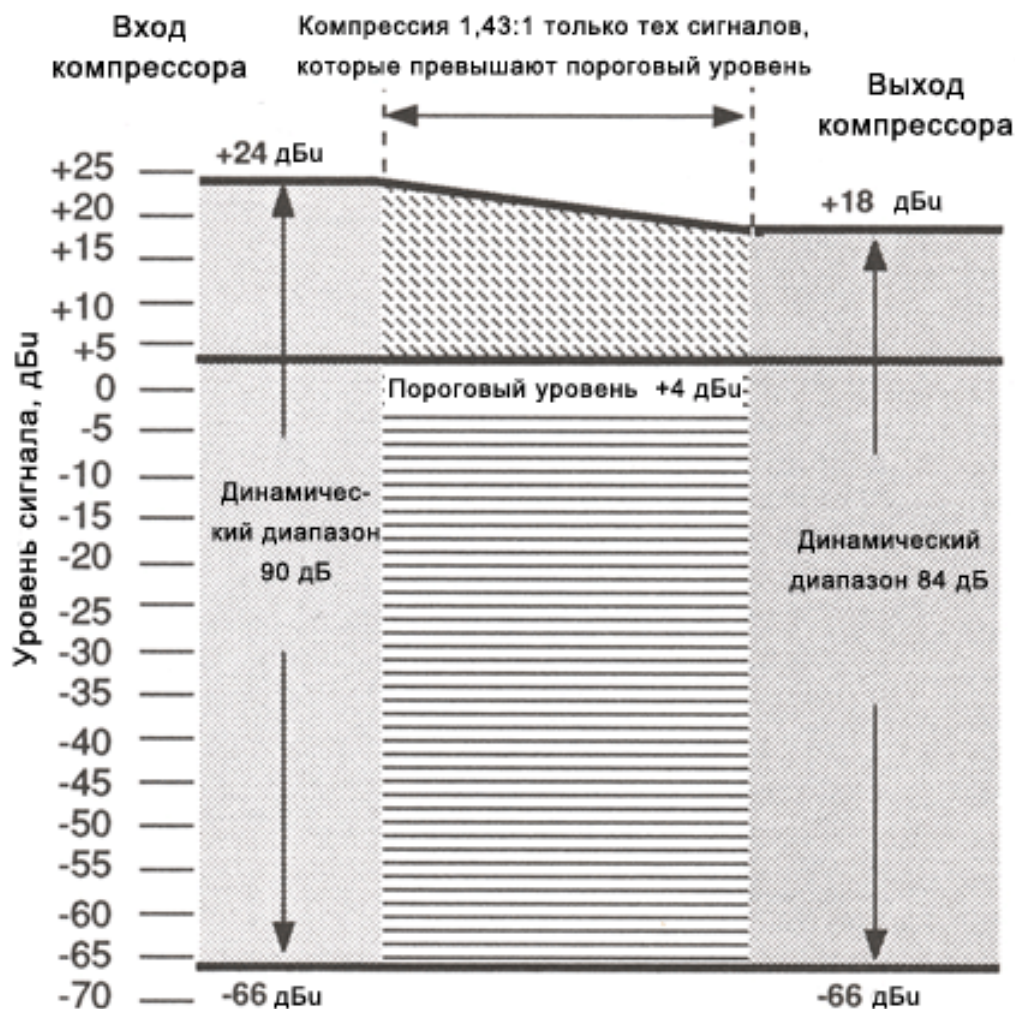


Рис. 4.4. Сжатие сигналов аудиоматериала, превышающих пороговый уровень, с коэффициентом 1,43:1

Существуют устройства, которые позволяют применять компрессию с очень высоким коэффициентом сжатия (8:1 - 20:1 или даже ∞:1) в отношении сигналов, имеющих уровень выше порогового значения. Эти устройства называют "ограничители", а операцию, которую они выполняют, - "ограничение". Например, установлены пороговое значение уровня сигнала +15 дБн и коэффициент сжатия 10:1. В этом случае до тех пор, пока уровень сигнала на входе компрессора будет меньше +15 дБн, на выходе компрессора он останется таким же, как на входе, а когда уровень входного сигнала станет больше +15 дБн, на выходе он изменится, но очень незначительно. Если коэффициент сжатия равен 10:1, то при изменении уровня сигнала на входе на 10 дБ, его изменение на выходе составит 1 дБ, т.е. входной сигнал с уровнем +25 дБн на выходе станет равным +16 дБн.

В качестве компрессора или ограничителя можно использовать различные устройства, которые называют "ограничители-компрессоры".

В своих рассуждениях мы сделали одно серьезное допущение: предположили, что компрессор установлен после микрофонного предусилителя микшерного пульта до выходного каскада и что весь шум, а также проблемы, связанные с запасом динамического диапазона в микшерном пульте, проявляются после компрессора. Но часто источником шума являются микрофонные предусилители, а усилители в микшерном пульте могут оказаться уязвимым звеном в отношении запаса динамического диапазона. Справиться с этими проблемами поможет установка компрессора во входном каскаде. Порой возникает ситуация, когда микшерный пульт имеет большие запас и динамический диапазон, а его ограничение связано с системой усилители мощности/громкоговорители. В этом случае ограничитель нужно установить в любой точке цепи до усилителей мощностей.

Иногда компрессор и экспандер (расширитель) применяют для преодоления ограничений динамического диапазона только на отдельном участке звуковой системы. Это приходится делать при использовании аналогового ленточного рекордера, динамический диапазон

которого в большей степени ограничен уровнем собственных шумов и искажениями, вызванными намагничиванием пленки, чем электроникой. В этом случае для уменьшения потерь при воспроизведении аудиоматериала используют шумоподавление. Компандерная система шумоподавления, (рис. 4.5) позволяет сохранить динамический диапазон оригинального материала в процессе записи и воспроизведения за счет сжатия динамического диапазона перед записью на ленту и соответствующего его расширения при считывании аудиоматериала с ленты. Такими системами оснащены многие и профессиональные и бытовые магнитофоны.

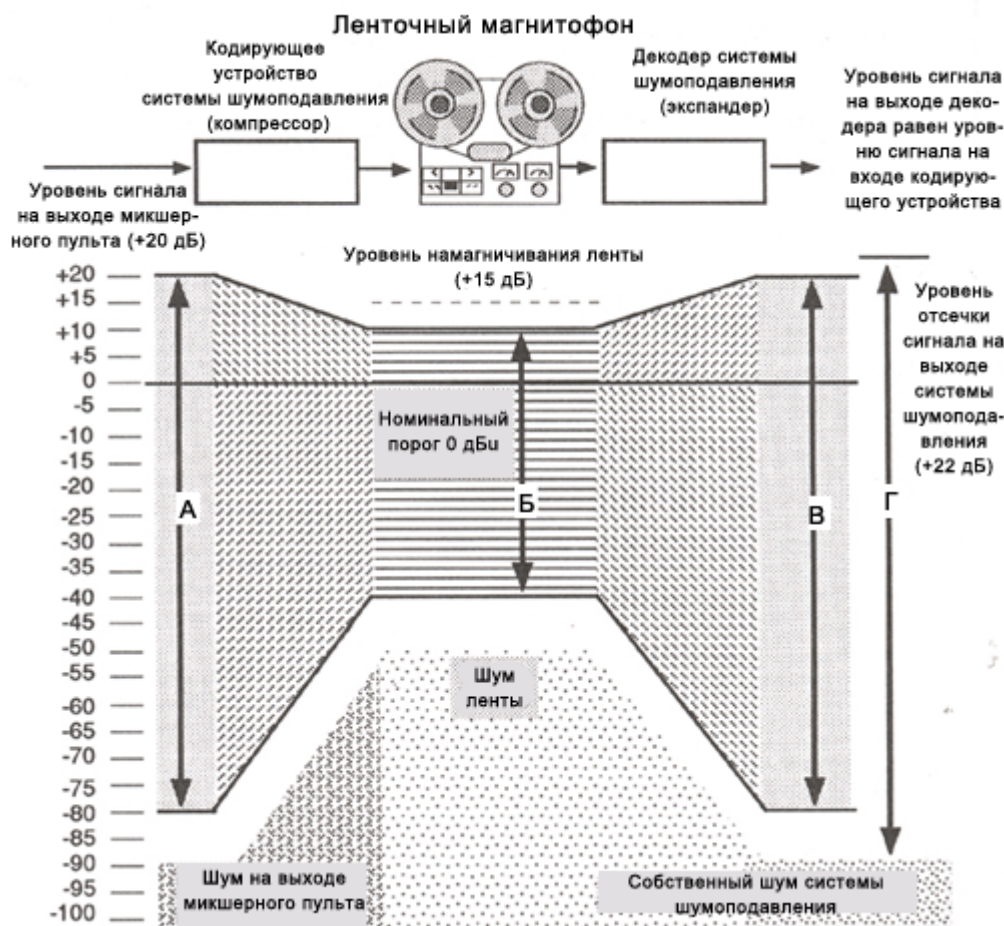


Рис. 4.5. Компандерная система шумоподавления позволяет преодолеть ограничения динамического диапазона

А. Аудиоматериал с широким динамическим диапазоном (порядка 100 дБ).

Б. После сжатия с коэффициентом 2:1 динамический диапазон аудиоматериала уменьшается в два раза (50 дБ).

В. После расширения (декодирования) с коэффициентом 1:2 динамический диапазон аудиоматериала восстанавливается и становится равным исходному (100 дБ).

Каким должен быть запас динамического диапазона?

Необходимый запас динамического диапазона определяется разностью между номинальными (средними) и максимальными (пиковыми) уровнями сигналов, присутствующих в аудиоматериале. Он зависит от типа аудиоматериала и устанавливается с учетом стоящих задач и той суммы, которую можно израсходовать на усилители. Чтобы обеспечить естественное звучание музыки, желательно иметь запас от 10 дБ до 20 дБ. Для систем звукоусиления, особенно при большом количестве усилителей, запас динамического диапазона в 10 дБ запаса обычно бывает достаточен. Для заводских систем громкой связи, которые должны обеспечивать хорошую слышимость на фоне постоянного шума, а также ограничивать максимальные уровни сигналов, как правило, выбирают запас 5- 6 дБ. Для

достижения таких низких значений запаса динамического диапазона используют сжатие с очень большим коэффициентом или существенно ограничивают уровни сигналов, поэтому сообщения могут звучать несколько неестественно, но зато будут очень хорошо слышны.

Глава 5

Распространение звука в открытых пространствах

5.1. Закон обратных квадратов

Зависимость уровня звукового давления в открытых пространствах от расстояния описывается законом обратных квадратов: интенсивность звука изменяется пропорционально квадрату расстояния точечного источника звука, т. е. при увеличении расстояния от источника в два раза, звуковое давление будет уменьшаться на 6 дБ.

Например, если на расстоянии 10 футов (" 3 м) мощность громкоговорителя равна 100 дБ SPL, то уровень звукового давления на расстоянии 20 футов (" 6 м) составит 94 дБ ($100 - 6 = 94$).

Разность уровней звукового давления в 6 дБ соответствует их отношению 2:1, а вот в случае громкости такое же отношение будет наблюдаться при разности уровней в 10 дБ (см. главу 3).

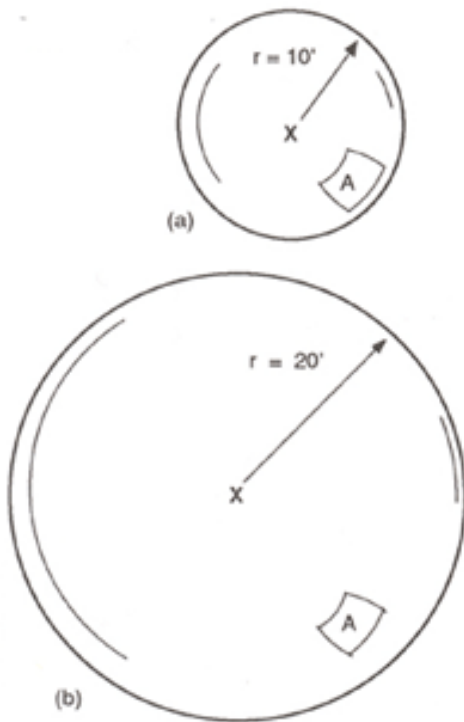


Рис. 5.1. Акустическая мощность или звуковое давление уменьшается пропорционально квадрату расстояния от источника звука

На рис. 5.1 показано, почему при увеличении расстояния в два раза, уровень звукового давления уменьшается на 6 дБ. Положение точечного источника звука отмечено X. Сфера, окружающая точечный источник на рисунке 5.1а, имеет диаметр 10 футов, а такая же сфера на рис. 5.1б - 20 футов (в два раза больше). При этом площадь сферы, показанной на рис. 5.1а, будет в четыре раза больше площади сферы, изображенной на рисунке 5.1а.

Представим, что на каждой сфере есть "окна" одинаковой площади. Акустическая энергия точечного источника X на рис. 5.1б распределена по площади, которая в 4 раза больше, чем на рисунке 5.1 (а), поэтому через "окно", показанное на рис. 5.1б, будет проходить в четыре раза меньше акустической энергии, чем через окно, изображенное на рис. 5.1а. Выраженное в децибелах отношение акустических мощностей 4:1 равно 6 дБ и соответствует отношению уровней звукового давления 2:1.

Примеры расчетов с использованием закона обратных квадратов

Закон обратных квадратов в процессе установки систем звукоусиления приходится использовать очень часто.

Пример 1. Номинальная чувствительность колонки мощности 1 Вт на расстоянии 1 м (в открытом пространстве без отражающих помех) составляет 102 дБ SPL. Какую громкость будет давать громкоговоритель на расстоянии 30 футов при подаче на него сигнала мощностью 1 Вт.

1. Во-первых, следует преобразовать футы в метры, поскольку именно эти единицы используются при определении чувствительности:

30 футов/3,28 (фут/метр) ~ 9 м.

2. Рассчитаем потери по закону обратных квадратов, используя уравнение для выражения уровня звукового давления в децибелах:

$20 \log (9 \text{ м}/1 \text{ м}) = 20 \log (9) = 20 \log (9) = 20 \cdot 0,9542425094 = 19 \text{ дБ}.$

3. Вычтем потери (19 дБ) из значения уровня звукового давления на расстоянии 1 м (102 дБ):

$102 - 19 = 83 \text{ дБ SPL}$

Уровень звукового давления на расстоянии 30 футов от громкоговорителя будет равен 83 дБ SPL.

Пример 2. Нужно собрать систему звукоусиления для открытой площадки. Последний ряд мест для зрителей удален от сцены на расстояние 100 футов. Предполагается установить перед зрительскими местами полнодиапазонные колонки с номинальной чувствительностью 98 дБ SPL (на расстоянии 1 метр при мощности 1 Вт). В спецификации колонок указано, что они могут давать мощность 100 Вт. Какой максимальный уровень звукового давления будет в последнем ряду?

1. Рассчитываем отношение мощностей 1 и 100 Вт в дБ:

$10 \log (100 \text{ Вт}/1 \text{ Вт}) = 10 \log (100) = 10 \cdot 2 = 20 \text{ дБ}.$

2. Прибавим это значение к чувствительности 98 дБ (уровню звукового давления при мощности 1 Вт) для получения значения уровня звукового давления при мощности 100 Вт (на расстоянии 1 м):

$98 + 20 = 118 \text{ дБ SPL}.$

3. Определим потери, используя уравнение для расчета уровня звукового давления в децибелах:

$100 \text{ футов}/3,28 = 30 \text{ метров},$

$20 \log (30 \text{ метров}) = 20 \log 30 = 20 \cdot 1,477121255 = 29,542 \text{ дБ} \approx 30 \text{ дБ}.$

4. Вычтем полученное значение потерь из уровня звукового давления при мощности 100 Вт: $118 - 30 = 88 \text{ дБ SPL}.$

Таким образом, уровень звукового давления при максимальной мощности колонок 100 Вт для последнего ряда составит 88 дБ SPL.

5.2. Влияние окружающей среды

На распространение звука на открытых пространствах оказывают влияние ветер, температурные градиенты и влажность.

Ветер

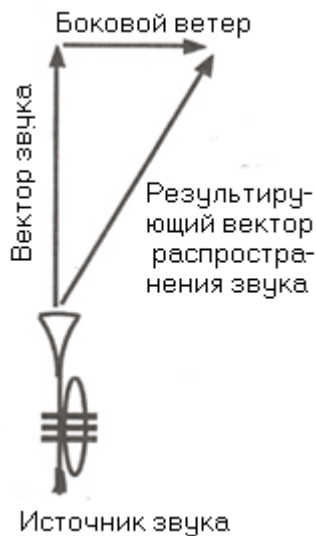


Рис. 5.2. Векторы звука и ветра

При рассмотрении влияния ветра на распространение звука следует учитывать два фактора: скорость и градиент. Влияние скорости ветра показано на рис. 5.2. Боковой ветер добавляет вектор скорости к распространяющейся звуковой волне и может приводить к смещению направления распространения звука, в результате будет складываться впечатление, что он исходит из другой точки.

Влияние градиента скорости ветра проявляется тогда, когда слои воздуха движутся с разной скоростью. Очень часто такие градиенты возникают там, где место для публики отгорожено от ветра каким-либо барьером: лесопосадкой или стеной. Влияние градиентов скорости показано на рис. 5.3. Вследствие того, что скорость ветра добавляет определенный вектор к распространяющейся звуковой волне, при прохождении звука через градиент скорости происходит отклонение звуковой волны. Если предположить, что слои ветра располагаются горизонтально, то при распространении звука против ветра его волна будет отклоняться вверх, а при распространении звука по ветру - вниз. При вертикальном распространении звуковая волна будет отклоняться влево и вправо.

На самом деле, ветер очень незначительно влияет на распространение звука потому, что скорость ветра по сравнению со скоростью звука ничтожно мала (конечно, если это не ураган). Но сильный порывистый ветер может вызывать дестабилизацию стереозвука. Влияние ветра в большей степени связано с тем, что он часто вызывает перепады температуры в слоях воздуха, в результате чего образуются температурные градиенты.

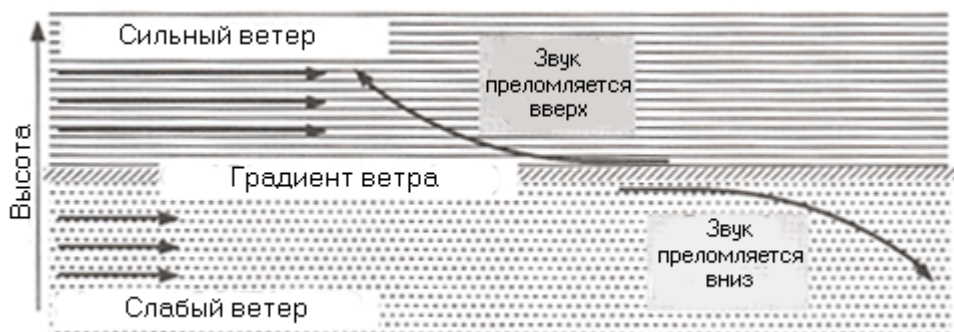


Рис. 5.3. Влияние градиента скорости ветра на распространение звука

Температура

На скорость распространения звука также влияет и температура окружающей среды. Через горячий воздух (он имеет меньшую плотность) звук проходит быстрее, чем через холодный. Поэтому температурные градиенты также вызывают эффекты отклонения звуковых волн (рис. 5.4). На рис. 5.4а приведены условия, которые часто наблюдаются утром, когда земля еще прохладная после прошедшей ночи, а воздух уже прогрет лучами солнца. В этих условиях обычно возникают области более высокой и более низкой интенсивности звука.

На рис. 5.4б показаны такие условия, которые могут возникать вечером, когда земля еще теплая. В этих условиях звуковые волны будут отклоняться вверх.

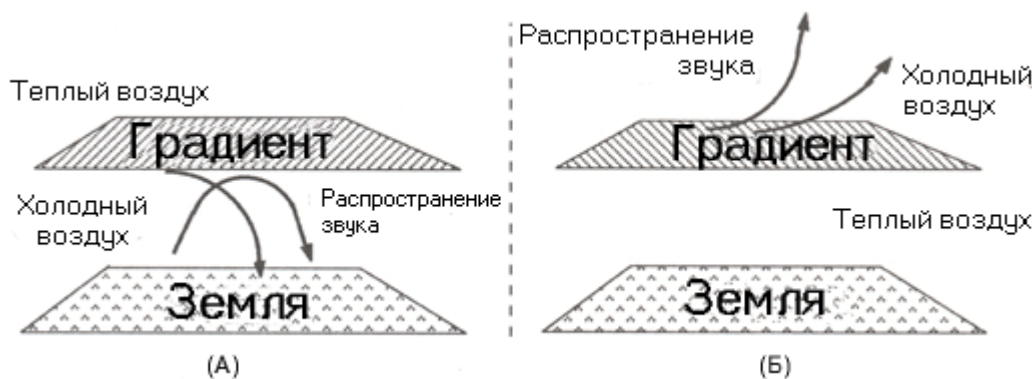


Рис. 5.4. Влияние температурных градиентов на распространение звука

Влажность

Воздух частично поглощает энергию звука и ослабляет его. Этот эффект заметен только на частотах выше 2 кГц и усиливается с увеличением частоты. Отдаленные раскаты грома мы слышим как низкое грохотание, потому что высокочастотный "треск" с увеличением расстояния ослабляется быстрее, чем низкочастотная часть шума.

На способность воздуха поглощать звуковую энергию влияет его относительная влажность. Сухой воздух (менее плотный) поглощает гораздо больше акустической энергии, чем влажный (более плотный).

Графики зависимостей поглощения звуковой энергии воздухом от его относительной влажности показаны на рис. 5.5.

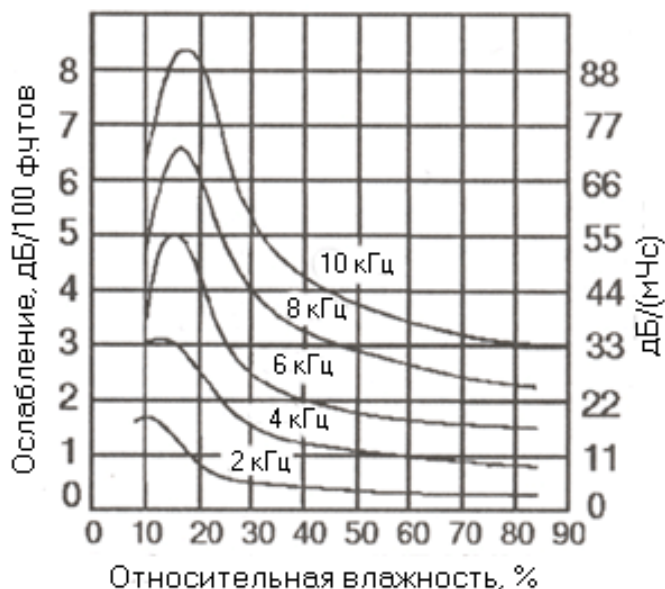


Рис. 5.5. Зависимость поглощения звука в воздухе от его относительной влажности

5.3. Обратная связь

Рассмотрим простейшую звуковую систему, состоящую из одного громкоговорителя, одного микрофона и усилителя (рис. 5.6). Исполнитель стоит перед микрофоном, а слушатели сидят на местах для зрителей. Если в работающей системе увеличивать коэффициент усиления усилителя мощности, то при достижении определенного его значения система начнет "звенеть". Такой "звон" называется обратной связью. Толстой стрелкой на рисунке показан путь обратной связи: микрофон улавливает часть звука из громкоговорителя, он снова попадает в систему, в результате чего образуется непрерывный контур.

Обратная связь возникает тогда, когда коэффициент усиления в этом контуре будет такой же, как в системе (усиление 0 дБ). АЧХ системы не будет стабильной и в том случае, если установить усиление чуть ниже того значения, при котором проявляется обратная связь. В этом случае система все равно будет резонировать на частотах, которым соответствуют волны, совпадающие по фазе с теми, что присутствуют в образованном контуре.

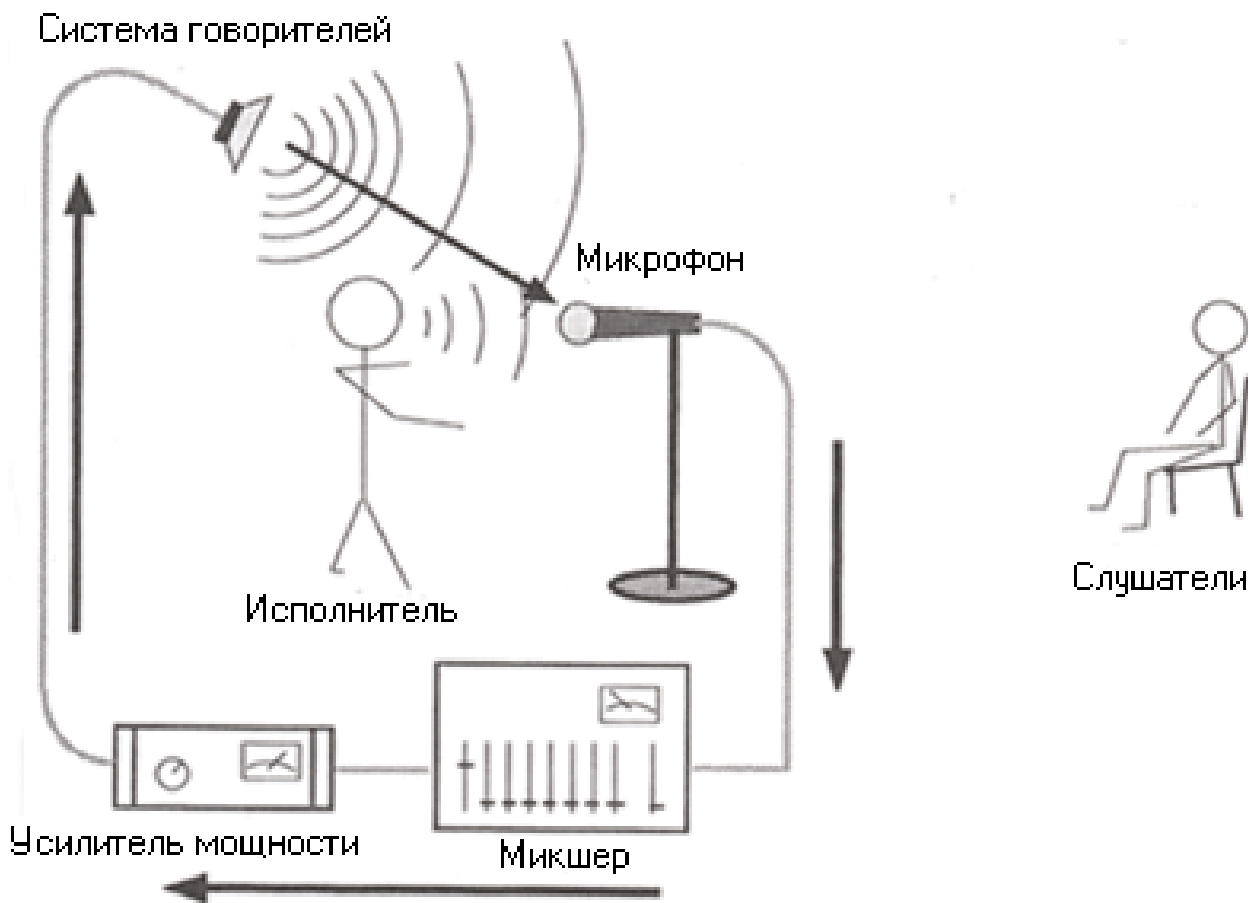


Рис. 5.6. Акустическая и электрическая обратная связь

Чтобы звуковая система работала нормально, усиление должно быть приблизительно на 6 дБ меньше того значения, при котором возникает обратная связь. Такой запас обеспечит естественный характер звучания.

Максимальный коэффициент усиления до появления обратной связи

Давайте рассмотрим еще одну важную характеристику, которая называется "максимальный акустический коэффициент усиления".

Предположим, что громкоговорители и микрофон, показанные на рис. 5.7, ненаправленные, и микрофон удален от выступающего на расстояние 1 фут. Уровень звука, соответствующий голосу и измеренный у микрофона, равен 70 дБ SPL. Чтобы упростить вычисления, будем считать, что система установлена в открытом пространстве, поэтому реверберацию звука можно не учитывать.

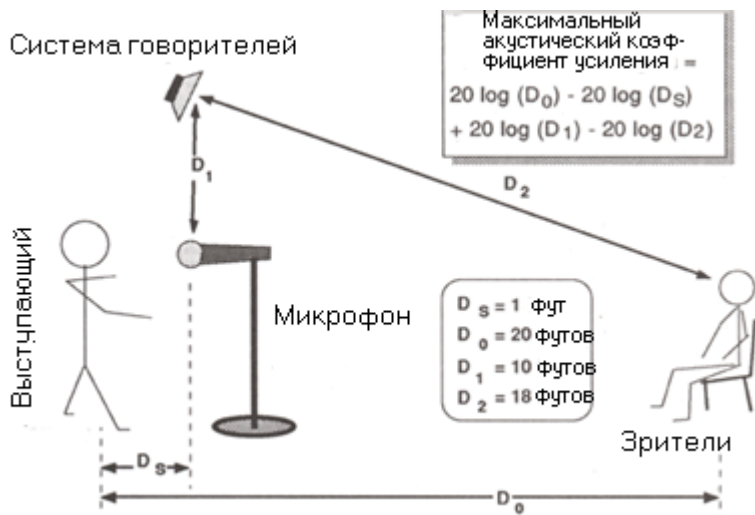


Рис. 5.7. Акустический коэффициент усиления

Если система усиления выключена, то уровень звука, который услышат зрители, можно определить из уравнения:

$$70 \text{ дБ} - [20 \log(D_o/D_1)] = 70 - [20 \log(20/1)] = 70 - [20 \log(20)] = 70 - (20 \cdot 1,301) = 70 - 26 = 44 \text{ дБ}.$$

Таким образом, при выключенной системе до зрителей дойдет звук с уровнем 44 дБ SPL. Теперь, включим звуковую систему и увеличим коэффициент усиления усилителя. Обратная связь появится, когда уровень звука громкоговорителя будет равен уровню звука голоса выступающего возле микрофона (70 дБ SPL).

Чтобы определить тот уровень звука, который услышат зрители, запишем следующее уравнение (D_1 - расстояние между громкоговорителем и микрофоном, D_2 - расстояние между громкоговорителем и слушателем):

$$70 \text{ дБ} - [20 \log(D_2/D_1)] = 70 - [20 \log(18/10)] = 70 - (20 \cdot 0,2552725) = 70 - 5 = 65 \text{ дБ}.$$

Акустический коэффициент усиления системы - это разность между уровнями звука, которые зрители слышат при выключенной и включенной системе. В данном случае он равен:

$$65 \text{ дБ} - 44 \text{ дБ} = 21 \text{ дБ}$$

и его значение зависит от коэффициента усиления, при котором возникает обратная связь. Если установить усиление на 6 дБ меньше (запас предотвращающий возникновение обратной связи), то реальное значение максимального акустического коэффициента усиления уменьшится до 15 дБ.

Теперь, учитывая сказанное выше, можно записать общее уравнение для максимального акустического коэффициента усиления:

Максимальный коэффициент усиления = пдБ - $20 \log(D_2/D_1)$ - пдБ - $20 \log(D_o/D_s)$,
 где пдБ - уровень звукового давления голоса выступающего.

Упростив последнее уравнение и введя запас в 6 дБ, получаем стандартное уравнение:

$$\begin{aligned} \text{Максимальный коэффициент усиления} &= 20 \log(D_o) - 20 \log(D_s) + 20 \log(D_1) - 20 \log(D_2) - 6 \\ \text{или} \\ \text{Максимальный коэффициент усиления} &= 20 \log(20) - 20 \log(1) + 20 \log(10) - 20 \log(18) - 6 = \\ &= 26 - 0 + 20 - 25 - 6 = 15. \end{aligned}$$

Обратите внимание, что слагаемые пдБ взаимноуничтожаются, поэтому максимальный коэффициент усиления не зависит от уровня звука источника. Из этого уравнения также следует, что мы можем увеличить коэффициент усиления системы, уменьшая расстояние

между источником звука и микрофоном (DS), а также увеличивая расстояние между громкоговорителем и микрофоном (D1).

Использование направленных микрофонов и громкоговорителей

При расчете акустического коэффициента усиления, было сделано предположение, что микрофон и громкоговоритель являются ненаправленными, но в реальных системах усиления звука ненаправленные элементы используются очень редко. На рисунке 5.8 показаны диаграммы направленности обычного кардиоидного микрофона (а) и обычного громкоговорителя для усиления звука (б). Характеристики этих элементов имеют ярко выраженную направленность и их можно использовать для увеличения акустического коэффициента усиления звуковой системы.

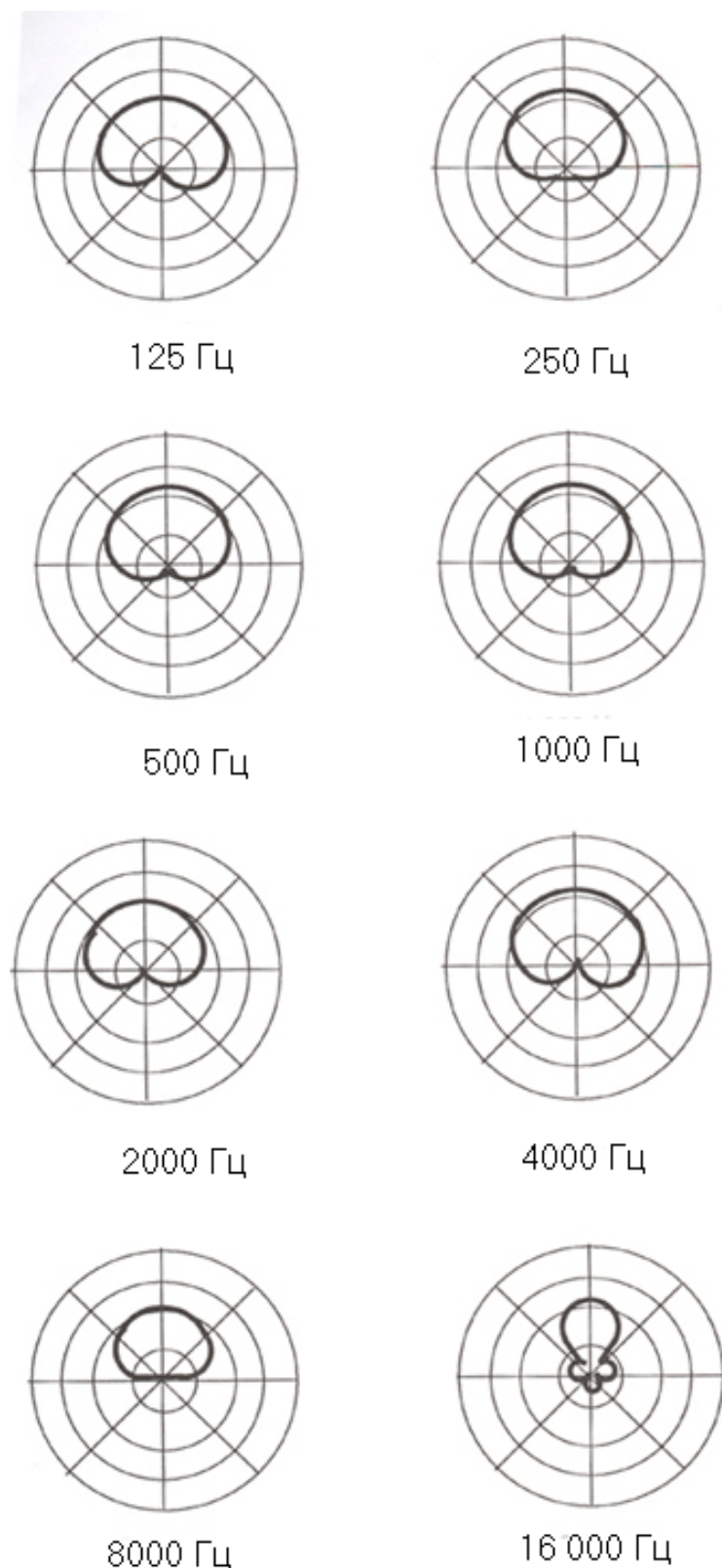


Рис. 5.8 а. Диаграмма направленности кардиоидного микрофона

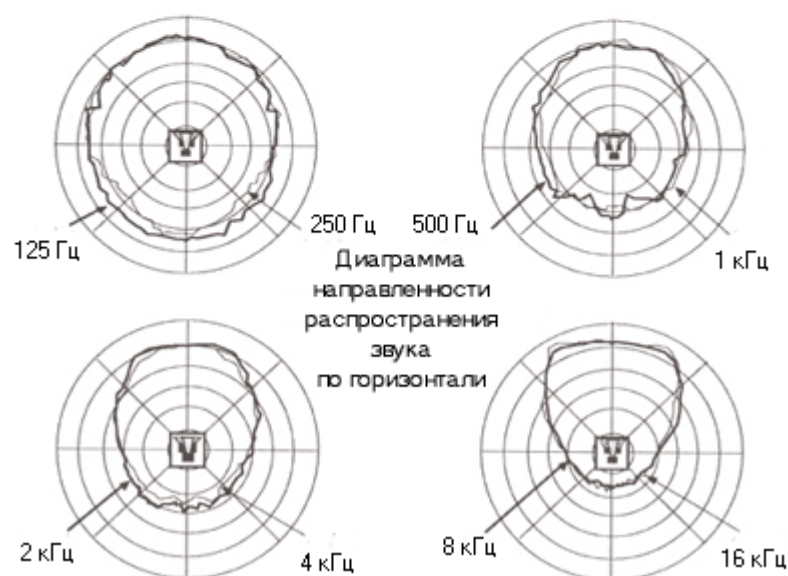
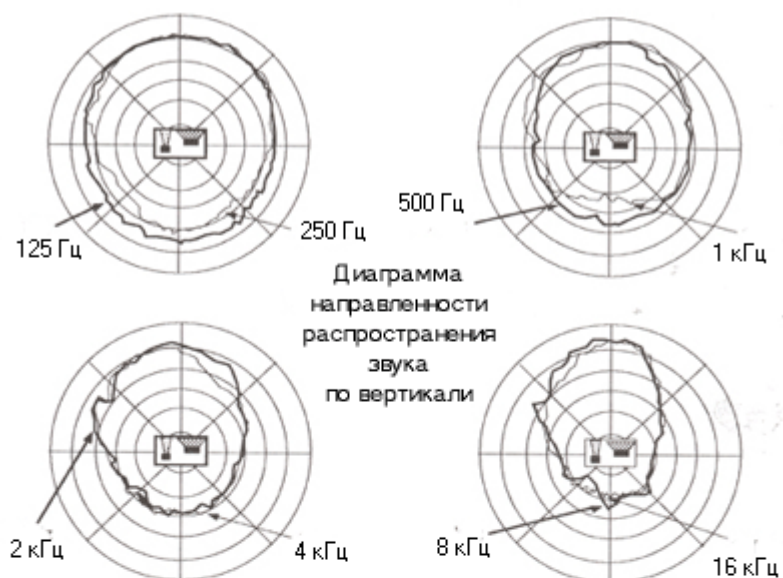


Рис. 5.8б. Диаграмма направленности громкоговорителя для систем усиления звука

На рис. 5.9 изображена ситуация, аналогичная той, что была показана на рис. 5.7, но вместо ненаправленного громкоговорителя в этом случае установлен направленный (его характеристики представлены рис. 5.8). Если мы развернем громкоговоритель относительно микрофона, так, что на диаграмме направленности такое положение будет соответствовать -6 дБ, то в микрофон попадет звук с уровнем на 6 дБ меньше, чем в случае ненаправленного громкоговорителя. Этот выигрыш в 6 дБ добавляется к максимальному коэффициенту усиления звуковой системы.

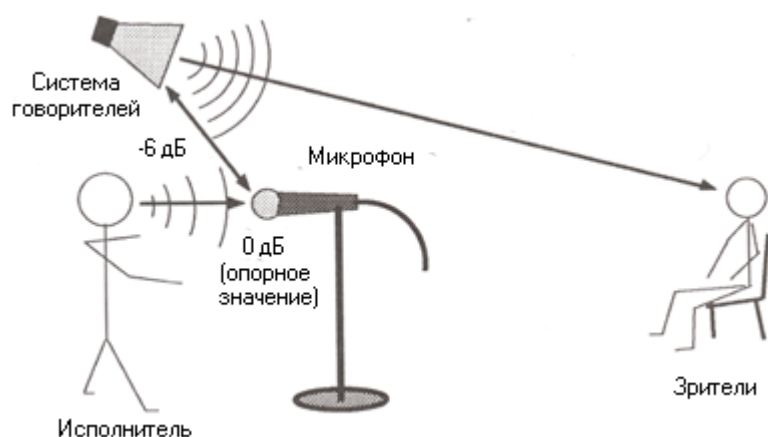


Рис. 5.9. Максимальный коэффициент усиления звуковой системы до наступления обратной связи можно увеличить за счет использования направленных элементов

Теперь, если вместо ненаправленного микрофона мы установим кардиоидный с диаграммой направленности, показанной на рис. 5.8, и развернем его так, чтобы положение громкоговорителя соответствовало той же области диаграммы направленности (- 6 дБ), мы выиграем еще 6 дБ.

Поэтому теоретически, используя направленные громкоговоритель и микрофон, максимальный коэффициент усиления звуковой системы можно увеличить на 12 дБ!

Но на практике все несколько сложнее. На НЧ полнодиапазонные системы громкоговорителей становятся ненаправленными не зависимо от того, насколько направленными они являются на СЧ и ВЧ. Кардиоидные микрофоны также имеют разные характеристики направленности на разных частотах. В действительности, ненаправленные микрофоны с плавной АЧХ могут обеспечивать такой же реальный максимальный коэффициент усиления, как кардиоидные микрофоны с не достаточно ровной АЧХ.

Попробуйте собрать простую систему усиления с кардиоидным микрофоном и полнодиапазонным громкоговорителем. Если поставить микрофон перед громкоговорителем и постепенно увеличивать коэффициент усиления, то на ВЧ в системе возникнет обратная связь. Установите микрофон позади колонки и увеличивайте коэффициент усиления, в этом случае обратная связь появится на НЧ.

В реальных условиях направленные элементы, как правило, дают выигрыш порядка 6 дБ (позволяют использовать в два раза больший коэффициент усиления). Из приведенного выше уравнения следует, что увеличить максимальный коэффициент усиления системы можно значительно увеличить за счет уменьшения расстояния между источником и микрофоном (DS). Допустимый коэффициент усиления можно повысить и за счет увеличения расстояния между микрофоном и громкоговорителем ($D1$). Поэтому, чтобы исключить возможность возникновения обратной связи в системе усиления звука следует: использовать направленные элементы и правильно их размещать; устанавливать громкоговорители, как можно дальше от микрофона; устанавливать микрофон максимально близко к источнику.

Глава 6

Распространение звука в закрытых помещениях

Закономерности, описывающие распространение звука в закрытых помещениях, имеют более сложный характер, чем те, что мы рассматривали в главе 5 для открытых пространств. В результате многолетних исследовательских работ в области акустики закрытых помещений было предложено много уравнений, описывающих поведение звука в условиях определенного помещения. Но мы не будем рассматривать эти сложные закономерности, а остановимся только на основных принципах акустики звука внутри помещения и постараемся обойтись при этом простыми математическими уравнениями.

6.1. Пограничные поверхности

На рис. 6.1 показано, что происходит при падении звуковой волны на пограничную поверхность. Часть энергии волны отражается, при чем доля отраженной энергии будет зависеть от плотности поверхности (A). Неотраженная энергия волны частично поглощается, преобразуясь в тепло (B), а остальная энергия проходит через эту поверхность (C). Соотношение отраженной и неотраженной энергий волны зависит от способности пограничной поверхности к деформации и ее проницаемости для звука.

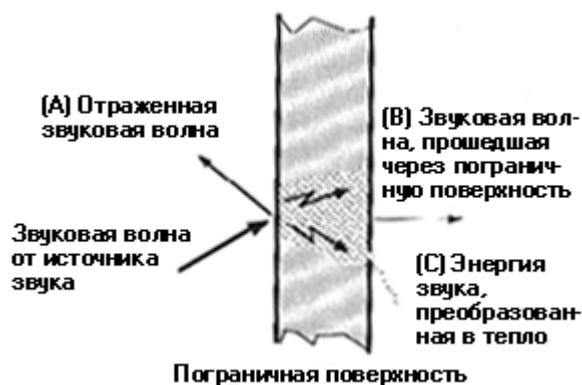


Рис. 6.1. Прохождение звуковой волны через пограничную поверхность

Если звуковая волна падает на маленькую по размеру преграду (например, не на стену или потолок, а на подиум или церковную кафедру), она будет ее огибать. Это явление показано на рисунке 6.2 и называется "преломлением звуковой волны" или "рефракцией".

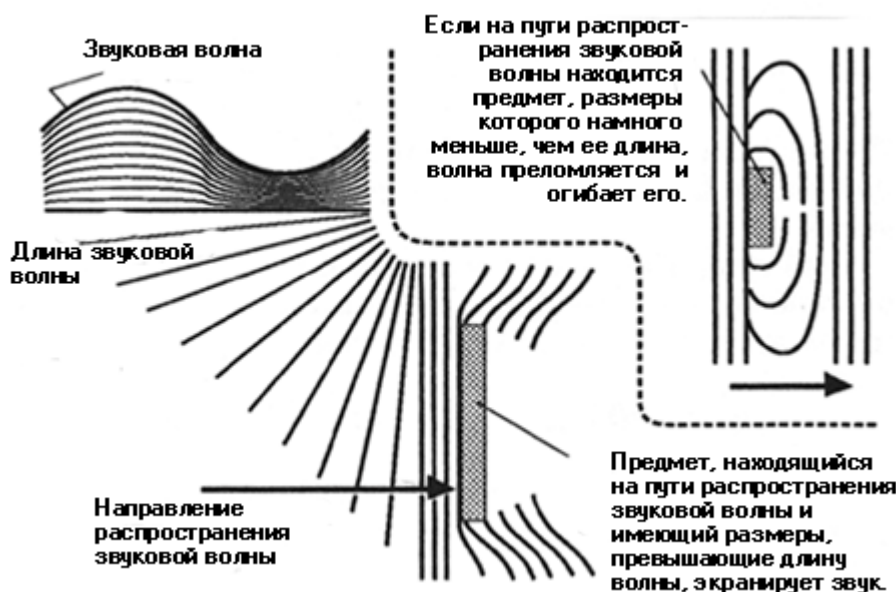


Рис. 6.2. Преломление звука на пограничной поверхности

Соотношение энергий звуковой волны, которые будут отражаться, поглощаться, преломляться и проходить через пограничную поверхность, зависят от частоты звуковой волны и угла падения и не зависят от ее мощности.

Коэффициент поглощения

Коэффициент поглощения определяет, какая часть энергии будет теряться при падении звуковой волны на преграду из этого материала. Известный ученый-акустик доктор Уоллес Сабин ввел понятие "открытое окно", соответствующее идеальному поглотителю, т. е. такому материалу, который абсолютно не отражает звук, и присвоил ему коэффициент поглощения, равный 1 или 100%. Соответственно, материалу, идеально отражающему звук, он присвоил коэффициент поглощения, равный 0 или 0%. Поэтому коэффициенты поглощения реальных материалов имеют значение от 0 до 1.

Между коэффициентом поглощения материала пограничной поверхности и интенсивностью отраженной звуковой волны существует простое соотношение. Например, пусть коэффициент поглощения определенного материала равен 0,15. Чтобы определить, как будет влиять пограничная поверхность на звуковую волну, необходимо выполнить следующие действия:

1) выразить значение коэффициент поглощения в процентах

$$0,15 = 15\%,$$

т.е. этот материал будет поглощать 15% энергии звуковой волны;

2) для получения количества отраженной энергии эту величину нужно вычесть из 100%

$$100-15=85\%,$$

т.е. отражаться будет 85% звуковой энергии;

3) наконец, выразить это значение в дБ

$$10 \log 0,85 = -0,7 \text{ дБ},$$

таким образом, звуковое давление отраженной волны будет на 0,7 дБ меньше, чем падающей.

Все эти операции можно объединить в одно уравнение:

$$\text{пдБ} = 10 \log [1/(1-a)],$$

где пдБ - уменьшение уровня звука, а - коэффициент поглощения.

Значения коэффициентов поглощения для наиболее распространенных поверхностей приведены в табл. 6.1 (так как коэффициенты поглощения материала зависят от частоты звуковой волны, их значения даны для разных частот).

Таблица 6.1. Коэффициенты поглощения для различных поверхностей

Поверхности	Частота		
	125 Гц	1 кГц	4 кГц
Кирпичная стена (толщины 18 дюймов, некрашеная)	0,02	0,04	0,07
Кирпичная стена (толщины 18 дюймов, крашеная)	0,01	0,02	0,02
Штукатурка для внутренних работ на металлической сетке	0,02	0,06	0,03
Бетон уложенный	0,01	0,02	0,03
Пол из сосновых досок	0,09	0,08	0,10
Кпаровое покрытие	0,10	0,30	0,70
Двойной хлопчатобумажный занавес	0,70	0,80	0,50
Двойной велюровый занавес	0,15	0,75	0,65
Акустическая плитка (5/8 дюйма, крепление #1)*	0,15	0,70	0,65
Акустическая плитка (5/8 дюйма, крепление #2)*	0,25	0,70	0,65
Акустическая плитка (5/8 дюйма, крепление #7)*	0,50	0,75	0,65
Панели (1 дюйм, крепление #2)*	0,08	0,55	0,65
Панели (1 дюйм, крепление # 7)*	0,35	0,35	0,65
Панели из фанеры (1/8 дюймов, 2 дюйма, воздушная прослойка)	0,30	0,10	0,07
Цилиндры из 2-слойной фанеры (1/8 дюйма)	0,35	0,20	0,18
Воздухопроницаемый асбестоцемент (крепление #7)*	0,90	0,95	0,45
Места в зале, заполненные зрителями	0,50	0,95	0,85
Театральные кресла с обивкой на твердом полу	0,45	0,90	0,70

* Крепление #1 бетонируется непосредственно в штукатурку или бетон; крепление #2 закрепляется к стандартным обрешеткам 1 дюйм; крепление #7 подвешивается под потолок (зазор между потолком составляет 16 дюймов).

Обратите внимание, что на средних и высоких частотах коэффициент поглощения заполненных мест для зрителей близок к единице (полное поглощение), поэтому степень заполнения концертного зала оказывает большое на его акустику. При проектировании звуковых систем для закрытых концертных залов этот фактор обязательно учитывают.

6.2. Стоячие волны

Формирование стоячих волн - один из наиболее заметных эффектов влияния жестких пограничных поверхностей на распространение звука. На рис. 6.3. показано, что происходит, когда звуковая волна определенной частоты падает на отражающую поверхность под углом 90°. Те волны, которые отражаются от нее, накладываются на

падающие волны, и в местах совпадения максимумом звукового давления, происходит усиления звука, а в местах совпадения минимумов звукового давления - его ослабление.

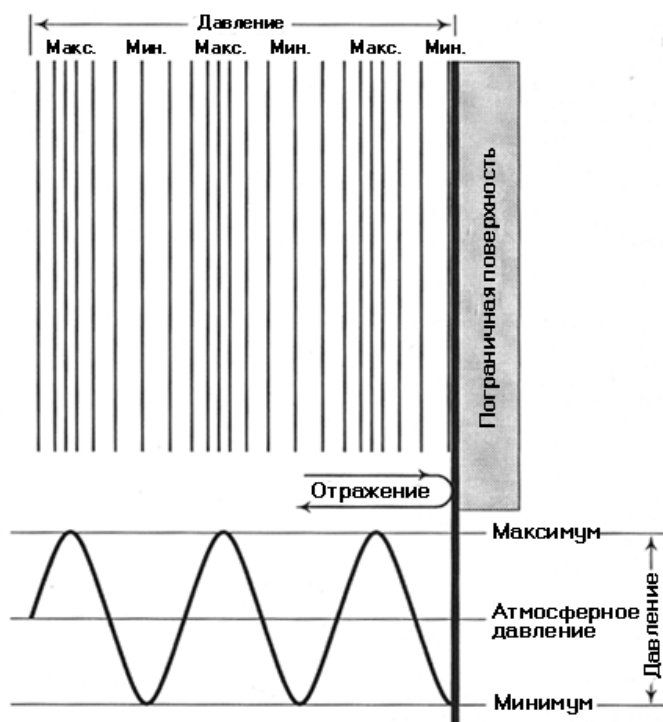


Рис. 6.3. Образование стоячей волны при отражении звука от пограничной поверхности

В результате в воздухе формируется стационарная структура, которая и называется "стоячая волна", в ней чередуются зоны низкого давления (узлы) и зоны высокого давления (антиузлы).

Если двигаться через зоны стоячей волны, можно легко обнаружить места, в которых звук очень громкий, и места, в которых он очень тихий. Чередующиеся зоны максимального и минимального звукового давления отстоят друг от друга на расстояния, равные половине длины волны, и их положение зависит от частоты звука.

Стоячая волна в помещении

На рис. 6.4 показаны две параллельные стены с высокой отражающей способностью, а в центре помещен точечный источник звука.

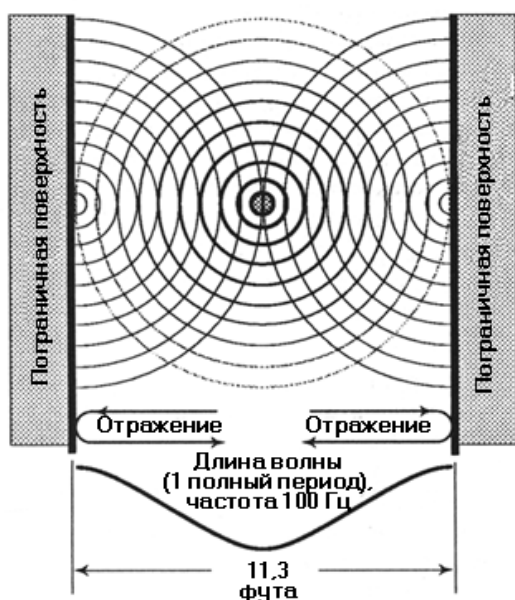


Рис. 6.4. Образование стоячей волны в помещении

Предположим, что точечный источник издает короткий однотонный звук. Звуковые волны распространяются во всех направлениях, некоторые из них достигают стен, которые поглощают незначительную часть энергии звуковых волн, а большую ее часть отражают. Волны, отраженные от каждой из стен, доходят до противоположной стены и претерпевают повторное отражение. Процесс продолжается до тех пор, пока энергия звука не рассеется полностью за счет поглощения в воздухе и стенами.

В описанном примере стоячие волны будут формироваться только в том случае, если длина волны звука кратна расстоянию между стенами. Такие стоячие волны называют "резонансом помещения", и он имеет собственную частоту. Например, длина волны однотонного сигнала с частотой 100 Гц равна:

$1130 \text{ футов/с} : 100 \text{ колебаний/с} = 11,3 \text{ футов/период.}$

Если стены на рис. 6.4 отстоят друг от друга на 11,3 фута, то отраженные волны будут усиливать друг друга, и в помещении образуется стационарная структура из узлов и антиузлов. Тот же эффект (см. рис. 6.5) будет возникать на частотах, кратных 100 Гц (200 Гц, 300 Гц и т.д.)

Предположим, что в пространстве между стенами находится публика, и что однотонным звуком с частотой 100 Гц была басовая нота из музыкального проигрыша. Слушатели, сидящие на местах, совпадающими с узлами, могут и не услышать эту ноту, а для слушателей, сидящих на местах, совпадающих с антиузлами, она будет звучать чрезмерно громко. Поэтому стоячие волны оказывают огромное влияние на качество звука в закрытом помещении.

Мы рассмотрели простейший случай резонанса помещения, но резонанс реальных залов складывается из трех таких простых резонансных систем (по одной между каждой парой стен, и одна между полом и потолком) и двух более сложных (в одну входят все четыре стены, а во вторую все шесть поверхностей). Таким образом, в конкретном помещении будет проявляться несколько резонансов на разных частотах.

Хороший акустик обязательно учитывает все возможные резонансные системы в помещении и пытается максимально их уменьшить за счет использования непараллельных стен и различных способов для поглощения звука. Один из наиболее простых и эффективных из них - использование занавеса.

Обратите внимание, что на рис. 6.3. зоны, отстоящие от отражающей поверхности на расстояние $1/4$ длины волны, являются узлами. В этой зоне давление минимально, а скорость движения частиц воздуха максимальна. Поэтому, если в ней повесить занавес из поглощающего материала, он будет оказывать на стоячую волну более значительное влияние, чем следовало бы ожидать, учитывая коэффициент поглощения этого материала.

6.3. Реверберация

Еще одним эффектом отражения звуковых волн от пограничных поверхностей, имеющим большое влияние на характер распространения звука в закрытых помещениях, является реверберация. Представим, что в центре закрытого помещения находится точечный источник звука. Звуковые волны от этого источника распространяются во всех направлениях и, в конце концов, попадают на пограничные поверхности помещения. Часть энергии при этом поглощается, часть проходит через эти поверхности, а большая часть отражается обратно в помещение.

В какой то момент времени, когда уже произошло достаточное число отражений и все пространство заполнено звуковыми волнами, система входит в такое состояние равновесия, когда энергия, отданная источником, оказывается равна энергии, которая поглощается и рассеивается при прохождении через пограничные поверхности. Если не учитывать резонансы стоячих волн и сфокусированных отражений, можно утверждать, что звуковое давление во всех точках, расположенных не слишком близко к источнику, будет одинаковым.

Давайте, теперь выключим источник звука. Оставшиеся в комнате звуковые волны продолжают отражаться пограничными поверхностями, и с каждым отражением энергия звуковых волн уменьшается. В определенный момент времени вся остающаяся в системе энергия рассеивается, и звук полностью стихает.

Такое затухание звука мы воспринимаем, как реверберацию. Количество времени, за которое акустическая энергия уменьшается на 60 дБ, называется "временем затухания" или "временем реверберации" и обозначается RT60.

Длина и спектральные характеристики затухания (вместе со всеми резонансами) формируют акустическое звучание, характерное для данного помещения.

Для расчета времени реверберации в зависимости от поглощающей способности определенной среды используют три уравнения, которые названы в честь авторов: уравнение Сабина, Норриса-Эйринга, Хопкинса-Страйкера (табл. 6.2).

Таблица 6.2. Уравнения для определения времени реверберации

Уравнение	Система СИ (м ² - площадь поверхности, S; м ³ - объем, V)	Британская система единиц фут ² - площадь поверхности, S; фут ³ объем, V)
Сабина: дает лучшее совпадение с опубликованными коэффициентами поглощения в случае, когда $a \leq 0,2$	$T = 0,16 V / (Sa)$	$T = 0,49 V / (Sa)$
Норриса-Эйринга: предпочтительная формула для помещений с хорошей акустикой, когда $a > 0,2$	$T = 0,16 V / [-\ln (1 - a)]$	$T = 0,49 V / [-\ln (1 - a)]$
Хопкинса-Страйкера: для прямоугольных помещений с неравномерным поглощением. a_x, a_y, a_z - средние коэффициенты, поглощения для пар поверхностей, расположенных напротив друг друга, с общей площадью x, y и z	$T = (0,16 V / S^2) [(x^2 / X a_x) + (y^2 / Y a_y) + (z^2 / Z a_z)]$	$T = (0,49 V / S^2) [(x^2 / X a_x) + (y^2 / Y a_y) + (z^2 / Z a_z)]$
T - время затухания на 60 дБ в секундах		

Короткая реверберация с плавной спектральной характеристикой воспринимается на слух, как приятная, естественная и музыкальная. Избыточная реверберация затрудняет восприятие речи и может разрушать фактуру и эмоциональное воздействие музыки. Иногда, даже внимательно вслушиваясь в слова диктора, в залах с жесткими поверхностями (спортивных, железнодорожном и др.) понять его объявления невозможно из-за слишком реверберирующего звучания. Поэтому, чтобы успешно установить звуковую систему внутри помещения, надо обязательно учитывать реверберацию.

6.4. Критическое расстояние

Мы уже отмечали, что поле звука, ревербирующее в помещении, равномерно распределено в пространстве. А вот будет ли в этом случае соблюдаться закон обратных квадратов? Чтобы ответить на этот вопрос, надо разобраться, чем отличается прямой звук (первоначальная звуковая волна, излучаемая источником звука до ее отражения) от реверберирующего звука.

На рис. 6.5 показан ненаправленный громкоговоритель, излучающий звук в реверберующее поле. Прямой звук, идущий от громкоговорителя, распространяется в пространстве, и его интенсивность уменьшается в соответствии с законом обратных квадратов. Вначале прямых звуковых волн в пространстве намного больше (А), но по прошествии какого-то времени на определенном расстоянии от громкоговорителя в результате отражений интенсивности прямого и реверберирующего звука становятся равными (В). Наконец, на достаточно большом расстоянии от громкоговорителя реверберирующий звук доминирует и заглушает прямой (С).

Расстояние от источника звука до той точки, в которой интенсивности реверберирующего и прямого звука становятся равными, называется "критическим расстоянием". По мере удаления от громкоговорителя, на расстояние, превышающее критическое (где доминирует реверберирующее поле), интенсивность звука выравнивается до статистически постоянной величины.

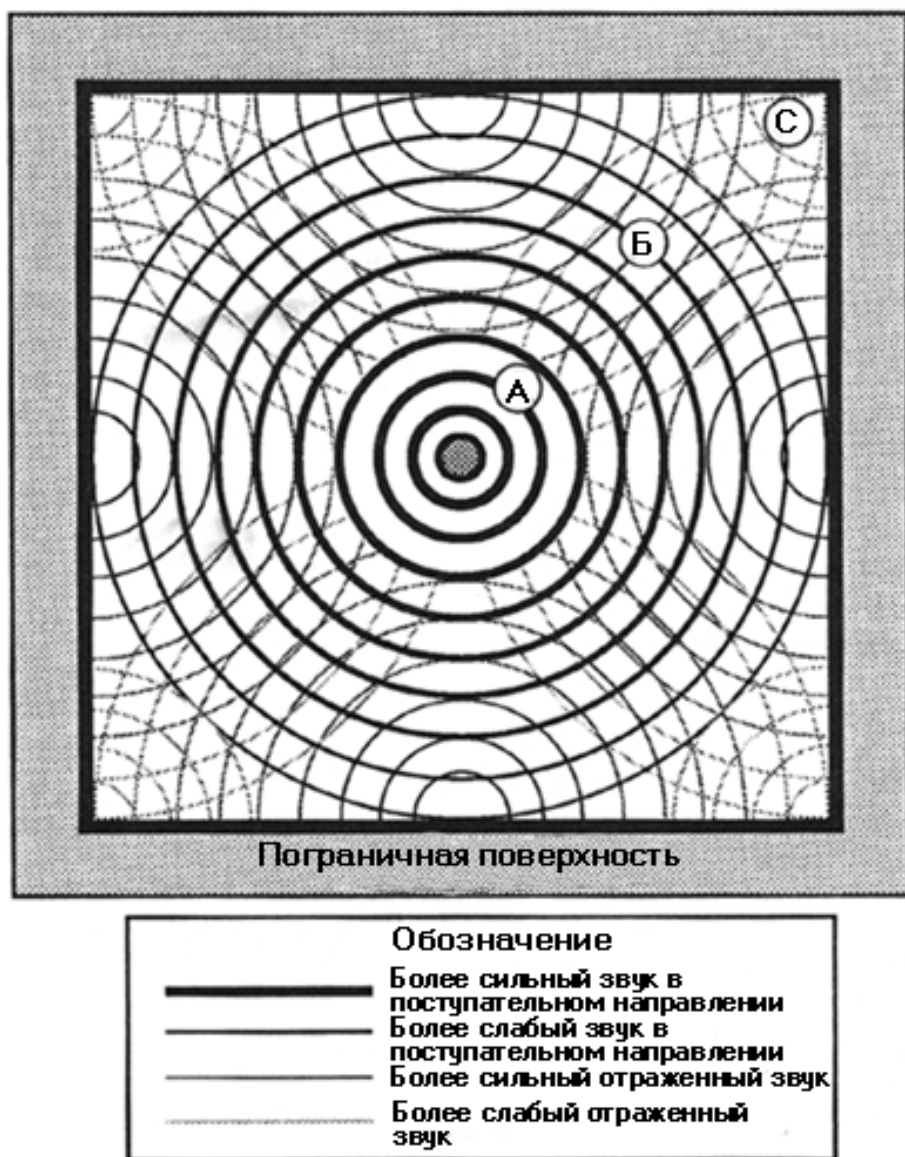


Рис. 6.5. Распространение реверберирующих звуковых волн

Критическое расстояние можно увеличить за счет использования направленного громкоговорителя. За счет концентрации всей мощности системы в определенном направлении количество энергии волн, уходящих в сторону, будет меньше, в результате на долю энергии волн, отраженных от стен, потолка, пола и других поверхностей, а, соответственно, и реверберирующего поля, будет приходиться меньшая часть энергии громкоговорителя. Но, следует учитывать, что энергия направленного громкоговорителя резко падает при отклонении от оси (рис. 6.6). Основным достоинством направленных громкоговорителей является то, что они увеличивают уровень прямого звука в определенной области.

Распространение прямого звука подчиняется закону обратных квадратов, а интенсивность поля реверберирующего звука постоянна в любой его точке, поэтому соотношение прямого звука к реверберирующему также подчиняется закону обратных квадратов. Иными словами, если соотношение звукового давления прямого и обратного звука на критическом расстоянии равно 1:1, то на расстоянии вдвое больше критического прямой звук будет на 6 дБ тише реверберирующего (т.е. его уровень будет в два раза меньше)

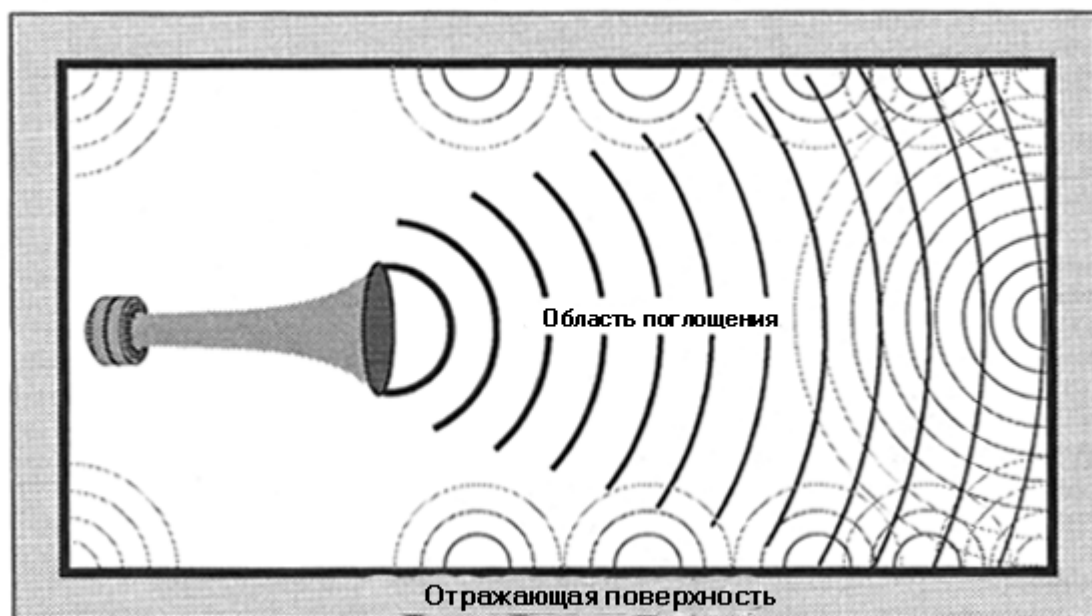


Рис. 6.6. Направленный громкоговоритель в поле реверберующего звука

Чтобы реверберирующий звук не глушил прямой, в системах звукоусиления стараются использовать направленные элементы. Если удастся увеличить критическое расстояние, то вероятность того, что на большем расстоянии будет обеспечиваться чистота и отчетливость звучания возрастает. Специалисты по акустике создали систему моделирования, которая связывает критические расстояния и соотношения прямого и реверберирующего звука с разборчивостью голоса при усилении речи. Но это достаточно сложная область, и грамотное моделирование требует серьезных познаний в математике и использования компьютера с хорошей программой. Поэтому в этом простом учебнике мы не будем подробно рассматривать этот вопрос.

На основе таких данных были разработаны методы для расчета поведения систем усиления речи в зависимости от акустики зала, которыми постоянно пользуются инженеры и строители при установке таких систем. А вот в области усиления музыки применять строгие закономерности чрезвычайно сложно, главными критериями здесь часто оказываются субъективные впечатления и вкус.

Как правило, всегда стремятся, чтобы система звучала настолько чисто, насколько это возможно, а для этого нужно увеличивать критическое расстояние системы, т. е. уменьшать степень возбуждения поля реверберирующего звука, чтобы публика слышала в основном прямой звук. О специальных приемах, позволяющих добиться этого, рассказывается в главах 17 и 18.

Глава 7

Принципиальные блок-схемы

В этой главе мы рассмотрим стандартные условные символы, используемые в принципиальных блок-схемах для обозначения различных элементов. Значение этих символов поможет научиться правильно читать те схемы, которые даются в описании устройств.

7.1. Общие представления

На принципиальной схеме устройство изображается в виде системы, составленной из отдельных функциональных элементов, которые соединены между собой особым образом. Различные функции устройства на схемах рисуют в виде отдельных блоков с помощью упрощенных обозначений, поэтому на них наглядно показан путь прохождения сигнала.

Принципиальные блок-схемы в простой и понятной форме отображают внутреннее устройство аппаратуры.

Принципиальные блок-схемы обычно даются в инструкции, прилагаемой к устройству, они отличаются от схем другого типа, которые называются "схемами электрических соединений". На такой схеме показаны все радиотехнические элементы устройства. Схемы электрических соединений не обязательно присутствуют в руководствах пользователя, но в руководствах по техническому обслуживанию они приводятся всегда. Дело в том, что информация, которую содержит схема электрических соединений, необходима для технического обслуживания устройства, а для работы с ним, как правило, не нужна.

Иногда схемы электрических соединений составляют не для всего устройства, а для каждой монтажной платы отдельно, что облегчает поиск электрических компонентов при выполнении текущего ремонта. Путь прохождения сигнала на таких схемах проследить довольно трудно. А вот основное назначение принципиальных блок-схем - наглядно показать путь прохождения сигнала. На схемах электрических соединений обязательно изображаются все соединения, включая силовой разъем и заземление, а на принципиальных схемах эти разъемы часто опускают. Схема электрических соединений должна содержать все элементы цепи, а на принципиальной схеме обычно показывают лишь самые важные функциональные элементы, например, усилитель мощности, вместо транзисторов, диодов, емкостей и резисторов, из которых он состоит.

Пользователи, имеющие определенную техническую квалификацию, могут использовать принципиальные схемы и схемы электрических соединений в качестве дополнительных инструментов. Принципиальная схема имеет очень большое значение и дополняет схему электрических соединений, если нужно определить, какие функции выполняют различные участки схемы. В то же время, информация, которую дает схема электрических соединений, может оказаться полезной при согласовании нестандартных устройств. На рис. 7.1 приведены символы, которые используются на принципиальных блок-схемах для обозначения усилителей.

Примечание 1. На принципиальных схемах, выполненных с соблюдением всех правил, символ треугольник используют только для простых (пассивных) функций. Для активных функций на схеме рисуют четырехугольники с соответствующей надписью. Но часто символ треугольника используют для обозначения и активных функций (например, каскадов эквализации), сопровождая его надписью, определяющей функцию.

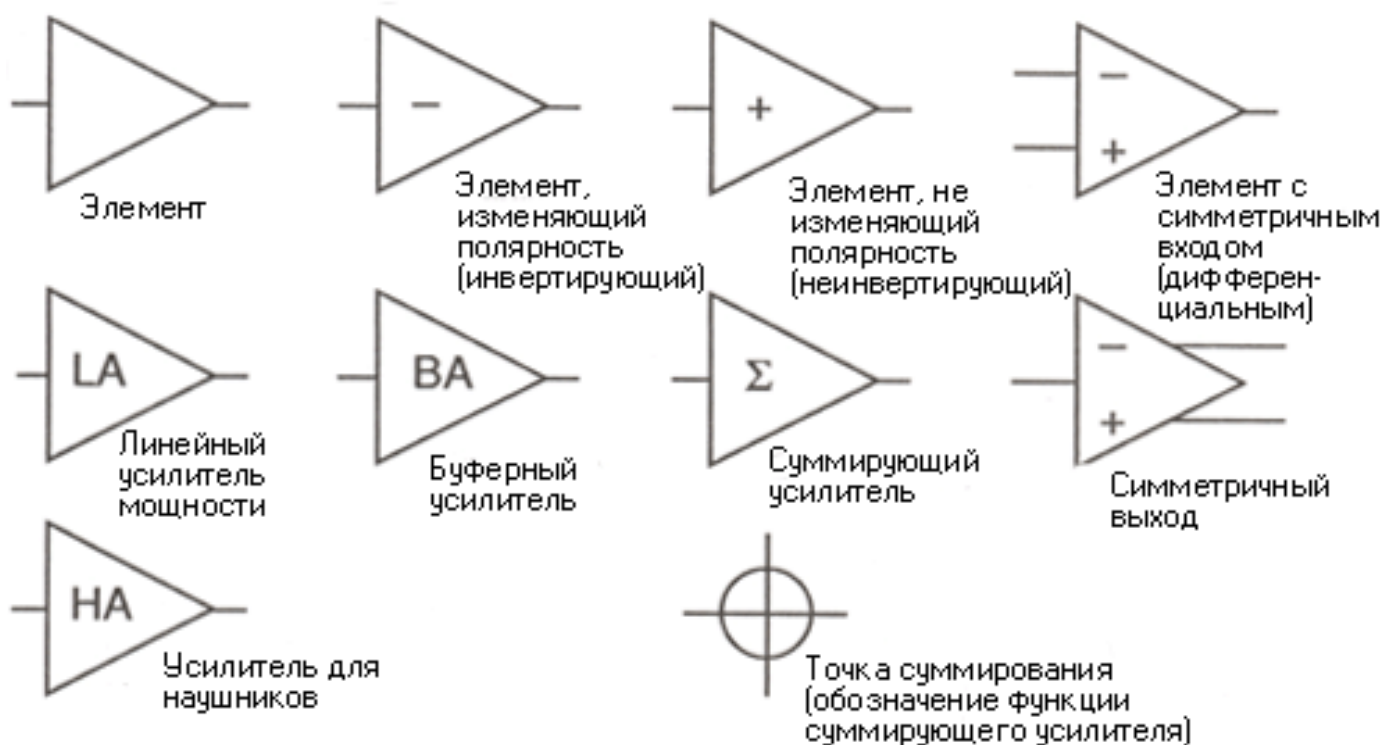


Рис. 7.1. Обозначение усилителей

7.2. Обозначение различных элементов

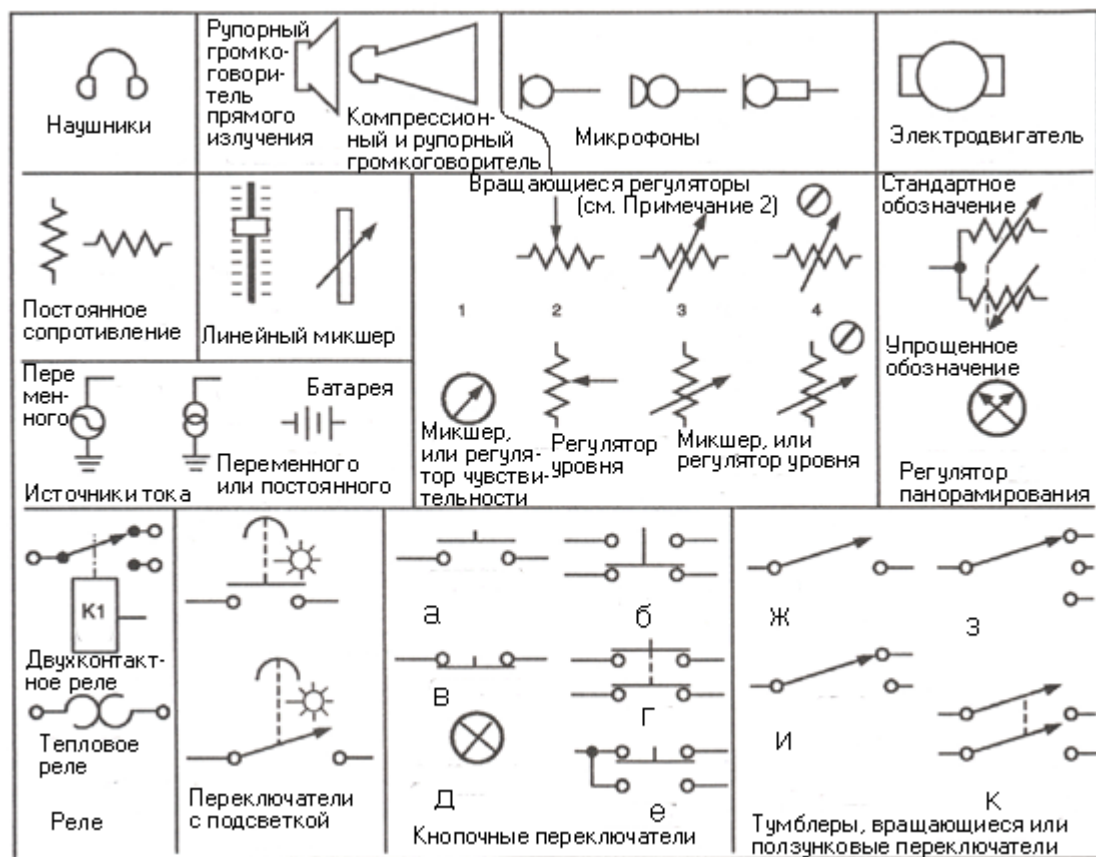


Рис. 7.2. Обозначения различных элементов

- а) Однополюсный на одно направление (нормально разомкнут)
- б) Однополюсный на одно направление (нормально замкнут)
- в) Шина (точка пересечения сигналов), элемент коммутации с переменным количеством полюсов
- г) Двухполюсный с изменением направления
- д) Двухполюсный на одно направление
- е) Однополюсный на два направления
- ж) Однополюсный на одно направление
- з) Однополюсный на три направления
- и) Однополюсный на два направления
- к) Двухполюсный на одно направление

Примечание 2. Иногда обозначения 2 и 3 резервируются для внутренних регулировочных сопротивлений, которые обычно недоступны для пользователя. В этом случае для регулировочных сопротивлений под шлиц, доступных для пользователя, может использоваться обозначение 4. Обозначения 2 и 3 могут применяться и для обозначения линейного микшера.

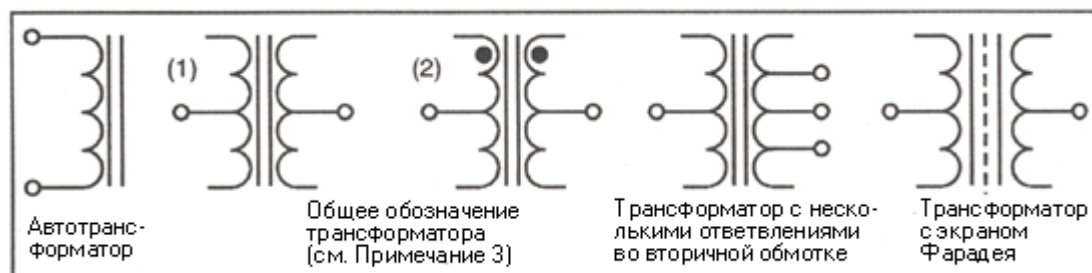


Рис. 7.3. Обозначения трансформаторов

Примечание 3. Обозначение (1) используется для трансформатора без указания полярности подключения (предполагается, что он подключен синфазно). Противофазное подключение указывается обязательно. Обозначение (2) обычно применяется, чтобы показать полярность подключения трансформатора. Точка соответствует "плюсовому" или синфазному подключению обмоток. Если одна точка расположена над символом трансформатора, а другая под ним, то трансформатор изменяет полярность сигнала на выходе.



Рис. 7.4. Заземление

Примечание 4. Некоторые производители не делают различия между обозначениями заземления контура и заземлением корпуса, используя для них одинаковые символы. Но это вносит определенную путаницу в схемы.

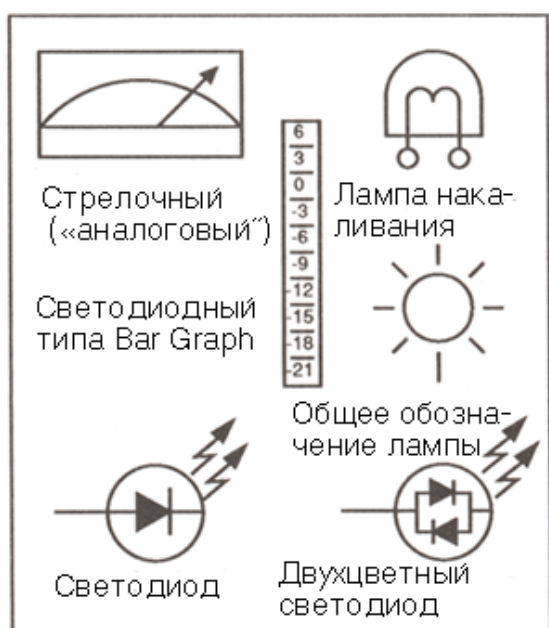


Рис. 7.5. Индикаторы

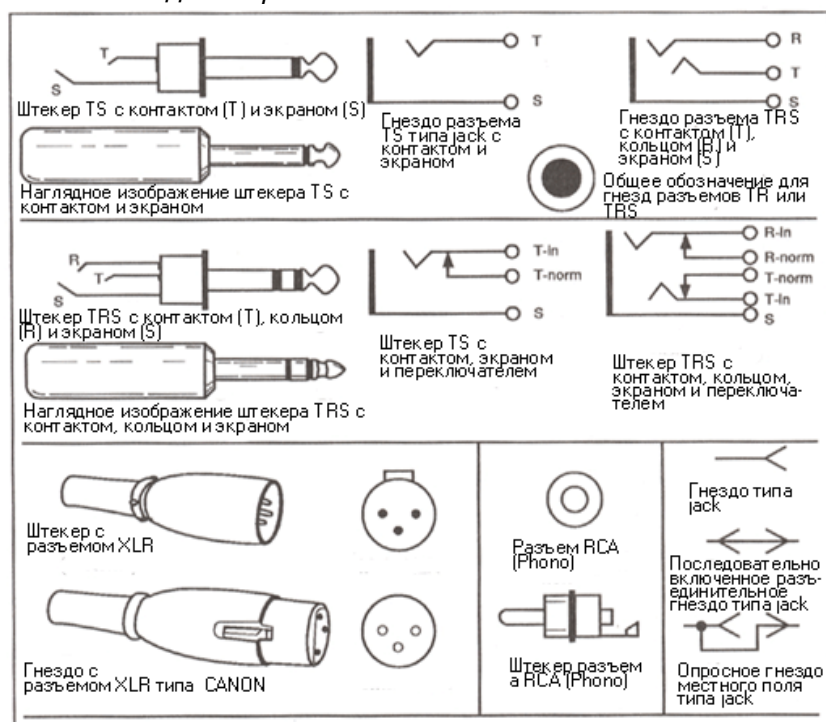


Рис. 7.6. Разъемы

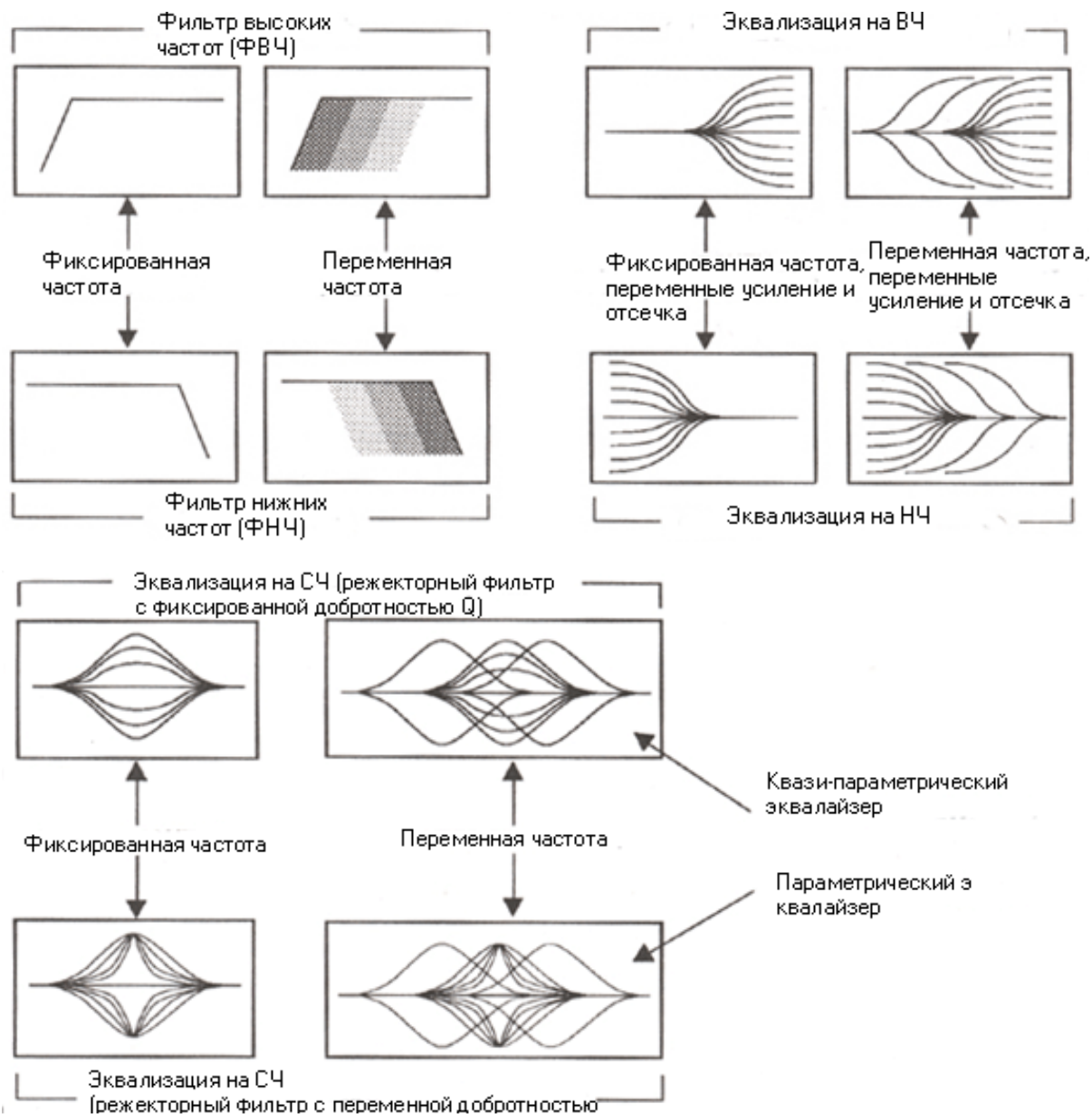


Рис. 7.7. Фильтры и эквалайзеры

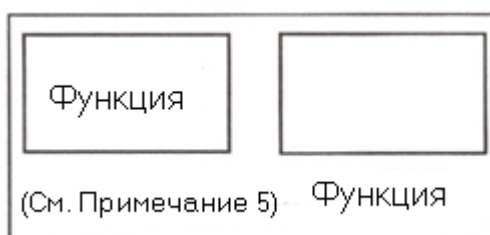


Рис. 7.8. Обозначение других функций

Примечание 5. Существует одно простое правило, которое применяется при выборе обозначения на принципиальной схеме: "не знаешь, что рисовать, нарисуй четырехугольник и подпиши его". Оно приобретает все большую популярность, особенно часто им пользуются при составлении схем для цифровых процессоров сигнала. На многих таких схемах нет ничего, кроме подписанных четырехугольников, соединенных между собой линиями. Этот упрощенный подход, позволяет избежать разночтений, возникающих из-за существования разных стандартов на используемые обозначения.

Иногда на схемах можно встретить символы, отличающиеся от тех, что были приведены выше. Это объясняется отсутствием единых стандартов, которые бы определяли обозначения элементов. Но, как правило, ответственный чертежник, занимающийся подготовкой технической документации, использует только принятые обозначения и поясняет все нестандартные.

7.3. Обозначения пути прохождения сигнала и разъемов

Принципиальные блок-схемы составляют так, чтобы сигнал шел слева направо или сверху вниз, если схема не уместится в одну линию. Правда, иногда это правило иногда, чтобы сэкономить место или изобразить более простую схему.

Функциональные блоки, как бы они ни были нарисованы, соединяются линиями, которые показывают путь прохождения сигнала. Чтобы показать направление сигнала, на принципиальных схемах могут быть нарисованы стрелки. Но, если схема нарисована в соответствии с правилом "слева - направо", они не нужны.

Некоторые стандартные обозначения, принятые на принципиальных схемах, показаны на рисунке 7.9.

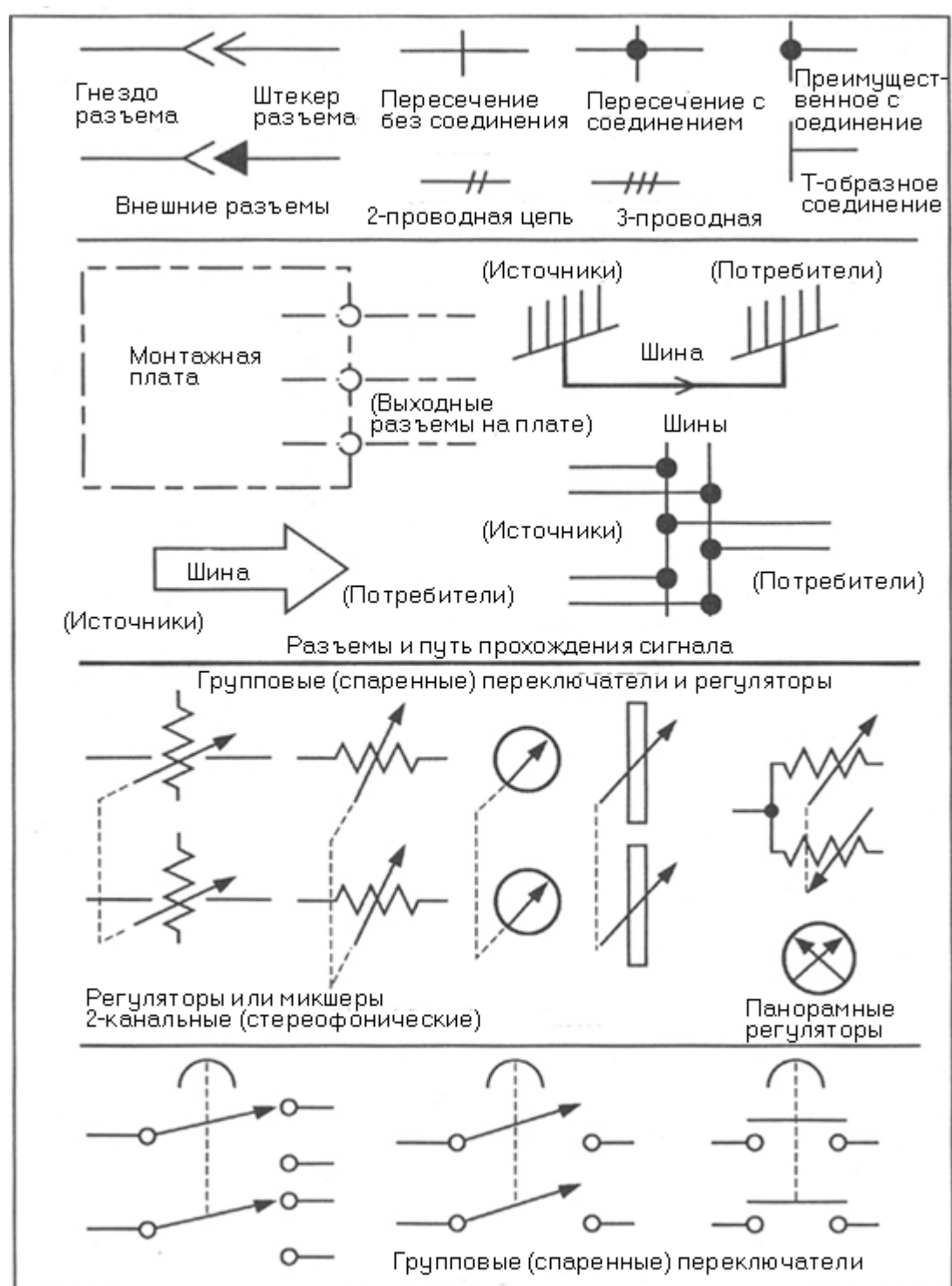


Рис. 7.9. Разъемы и путь прохождения сигнала

7.4. Анализ простых принципиальных схем

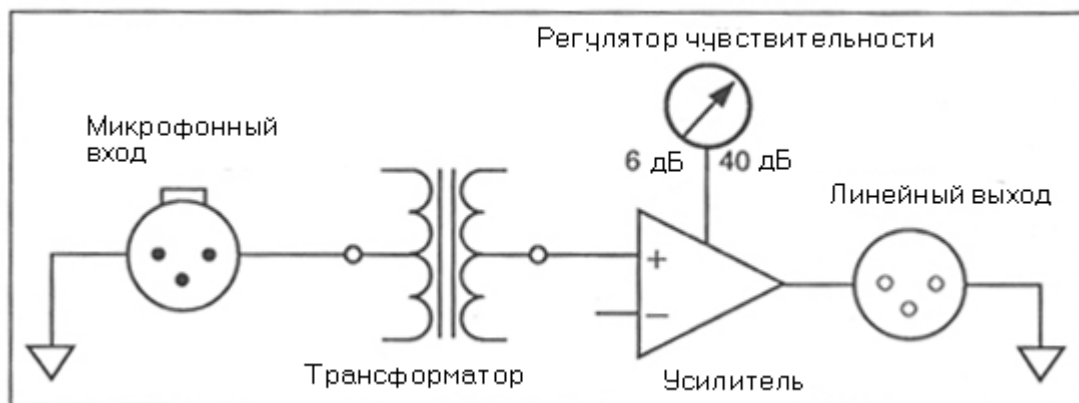


Рис. 7.10. Принципиальная схема микрофонного предусилителя

Пример 1. На основе принципиальной схемы микрофонного предусилителя, представленной на рис. 7.10, можно сделать определенные выводы относительно этого устройства.

Рассматривая схему в соответствии с принятым правилом для пути прохождения сигнала (слева направо), мы видим, что этот блок оснащен входным XLR-разъемом, причем, хотя на схеме это не указано, можно предположить, что 1-й контакт разъема - это заземление по постоянному току.

Исходя из того, что 2-й и 3-й контакты входного разъема подключены к первичной обмотке трансформатора, можно предположить, что они сигнальные. На схеме показано, что вход развязан с помощью трансформатора. С вторичной обмотки трансформатора сигнал подается на входной дифференциальный усилитель, на это указывают знаки "плюс" и "минус" на его разъемах (для усилителей с несимметричным выходом на принципиальных схемах обычно рисуется одна линия на входе и одна на выходе). Исходя из того, как на схеме нарисован вращающийся регулятор, можно предположить, что он регулирует коэффициент усиления усилителя мощности и не является линейным регулятором уровня с фиксированным коэффициентом усиления, который устанавливается до или после усилителя мощности. Надписи рядом с регулятором указывают на то, что коэффициент усиления изменяется в диапазоне от 6 дБ до 40 дБ.

Каскад усиления имеет симметричный выход, он не развязан трансформатором, и сигнал подается на выходной разъем напрямую.

Схема 7.10 содержит достаточно информации для определения полярности на входе и выходе предусилителя. Учитывая то, что 2-й контакт входа соединен с "+" первичной обмотки трансформатора, а "плюс" вторичной обмотки идет на "плюс" усилителя, можно предположить, что "плюсовой" выход усилителя подключен ко 2-му контакту выходного разъема (что соответствует принятому стандарту). Поэтому контакт 3 имеет отрицательную полярность от входа до выхода. Таким образом, второй контакт XLR-разъема в этом предварительном усилителе является "плюсом" или контактом, не изменяющим полярность.

Примечание. В межблочных усилителях мощности с несимметричным выходом источник сигнала на самом деле чаще всего подключен к "отрицательному" (инвертирующему) входу усилителя. В этом случае полярность сигнала изменяется, зато цепь обратной связи для управления усилением и коэффициентом нелинейных искажений получается более простой. Выход не инвертируется в двух случаях: А - когда в системе четное число каскадов усиления, и изменения полярности все равно нивелируются; Б - когда полярность входных или выходных разъемов в схеме изменяется.

Пример 2. Рассмотрим принципиальную схему графического эквалайзера, показанную на рис. 7.11. Он оснащен разъемами XLR, контакты которых на схеме не подписаны. Однако,

зная распайку таких разъемов, а также то, что контакт 1 всегда является заземлением по постоянному току, можно сделать выводы относительно других контактов.

Из того, что сигнал с контактов 2 и 3 подается на входы дифференциального усилителя напрямую без трансформатора, следует, что эквалайзер имеет электронно-согласованный вход. Определить, что контакт 2 является положительным, а контакт 3 - отрицательным, по схеме нельзя, но исходя из стандартной распайки разъемов XLR, скорее всего, так оно и есть. Входной усилитель, за которым установлен регулятор уровня, по-видимому, имеет фиксированный коэффициент усиления (правда, на схеме не показано, какой).

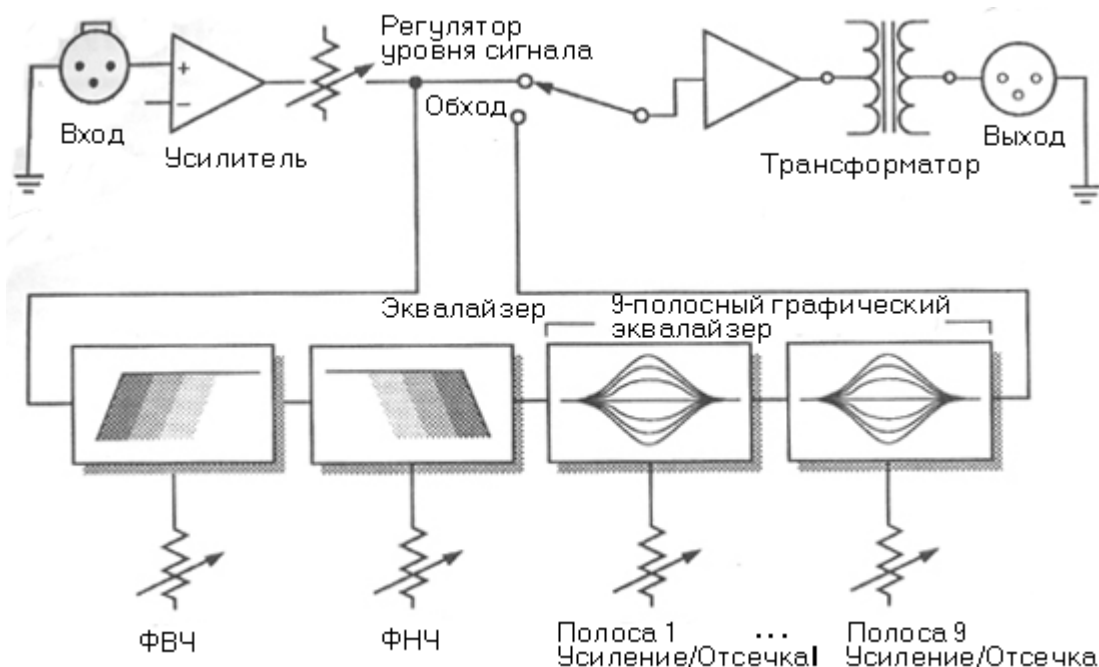


Рис. 7.11. Принципиальная блок-схема графического эквалайзера

В этой точке сигнал разветвляется, и он может либо идти на выход усилителя, либо в боковую цепь фильтрации. Понятно, что боковая цепь - это фильтры эквалайзера, причем, судя по схеме, они подключены последовательно.

Первым стоит ФВЧ с переменной частотой отсечки. Хотя рабочий диапазон частот фильтра не показан, можно предположить, что это фильтр с переменной частотой отсечки, который используется для вырезания нижних частот. (Эту информацию можно найти в технических данных устройства). За ФВЧ следует ФНЧ с переменной частотой отсечки, он предназначен для вырезания самых верхних частот. (Его характеристики также должны быть приведены в технических данных устройства).

Каскады, расположенные далее по цепи, - обычные полосовые фильтры графического эквалайзера. На схеме нарисованы два фильтра, соединенные пунктирной линией, из чего следует, что всего таких фильтров девять, причем, скорее всего, все характеристики, кроме рабочего диапазона частот, у них одинаковые. На схеме показано, что каждый фильтр имеет по одному регулятору воздействия. Тип регуляторов на схеме не определен, но можно предположить, что управление фильтрами осуществляется с помощью ползунковых переключателей. (Эта информация также должна быть приведена в технических данных устройства).

Выход последнего фильтра соединен со вторым контактом переключателя, подающим сигнал на выходной усилитель мощности. На схеме он обозначен надписью "Обход/Эквалайзер". Принцип работы этого переключателя понятен: стрелка замкнута в положении "проходит на выходной усилитель". В положении "Обход" (контакт в верхнем положении) на выходной усилитель мощности поступает только сигнал с входа. Предполагается, что сигналы проходят только в прямом направлении, и в точку, расположенную сразу за регулятором уровня, никаких сигналов с фильтров не поступает. В

положении "Эквалайзер" (контакт замкнут в нижнем положении), на выходной усилитель поступает входной сигнал, прошедший через фильтр и каскады эквалайзера.

Выходной усилитель мощности показан с помощью простого и распространенного обозначения, применяемого для каскадов усиления мощности, поэтому можно предположить, что он не изменяет полярность. (Уточнить это, а также посмотреть, какую полярность имеет сигнал, можно в технических данных устройства).

Выходной сигнал с выходного усилителя мощности идет на трансформатор и далее на контакты 2 и 3 выходного разъема (здесь опять используется разъем XLR). Следовательно, выход графического эквалайзера симметричный и развязан с помощью трансформатора.

Чтобы проследить полярность сигнала, придется сделать несколько допущений:

- 1) выходной усилитель не является инверсным;
- 2) обмотки трансформатора подключены синфазно (полярность на схеме не показана);
- 3) цепь эквалайзера неинвертирующая.

Приняв эти допущения, можно сказать, что это эквалайзер не изменяет полярность сигнала на выходе, и 2-й контакт XLR-разъема является положительным.

Но любое из этих предположений может оказаться неверным, так принципиальная схема содержит

слишком мало информации для определения полярности. Например, многие усилители мощности являются инверсными (при прохождении сигнала через такие усилители полярность изменяется), а "плюс" в разъеме XLR иногда может соответствовать 3-му контакту. Поэтому допущения, которые мы сделали, могут оказаться ошибочными, а для определения реальной полярности на входе и выходе этого эквалайзера следует обратиться к техническим данным устройства.

Пример 3. Рассмотрим принципиальную схему цифровой задержки, приведенную на рис. 7.12. На нем изображена упрощенная схема, на которой не изображены ни входной, ни выходной разъемы, а вместо некоторых сложных функциональных блоков нарисованы прямоугольники. Эта схема показывает только то, как устроена цифровая задержка, а подробные сведения о разъемах, полярности входа/выхода и коэффициенте усиления можно найти в технических характеристиках устройства. И все же она достаточно информативна.

Вход буферизируется усилителем мощности, коэффициент усиления которого задается с помощью регулятора входного уровня. За усилителем расположен фильтр нижних частот, функции которого заключаются в том, чтобы вырезать ультразвуковые частоты.

За фильтром нижних частот путь сигнала разветвляется. Одна ветвь идет в обход основной цепи на регулятор выходного уровня. Другой контакт этого регулятора подключен к выходу основной цепи процессора сигналов и замыкается на выходной блок. Поэтому регулятор выходного уровня используется для изменения соотношения между сигналом без задержки, напрямую проходящим на выход цифровой задержки с ФНЧ на входе устройства, и сигналом с задержкой. Другая ветвь с выхода ФНЧ идет на обратную связь (выход/вход), а регулятор обратной связи позволяет регулировать ее уровень. Выход аналого-цифрового преобразователя подается на блок линии задержки, в котором происходит задержка данных. (Подробное описание цифровых задержек приведено в гл. 14).

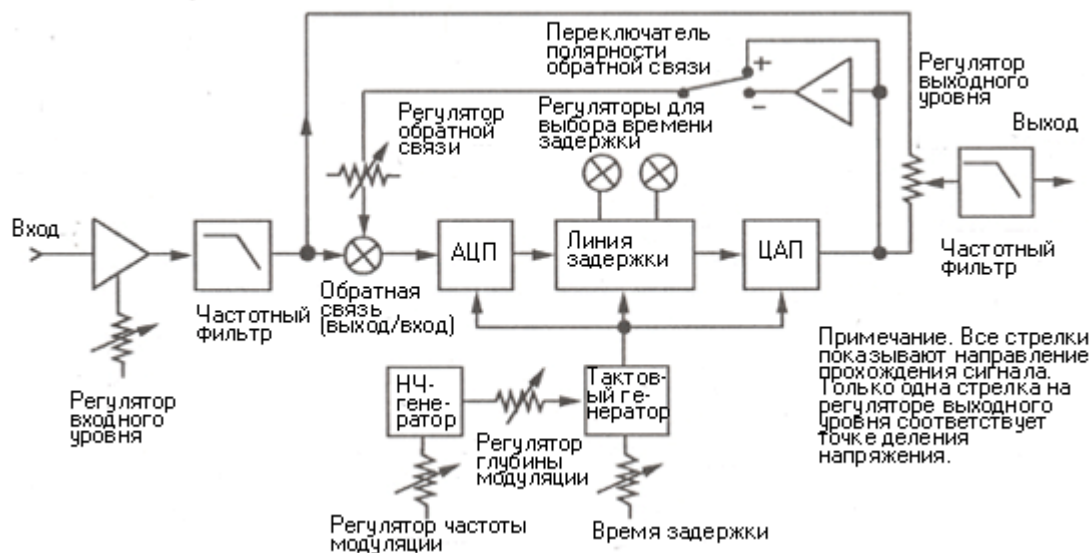


Рисунок 7.12. Принципиальная схема цифровой задержки

АЦП - Аналого-цифровой преобразователь

ЦАП - Цифро-аналоговый преобразователь

Сверху к блоку подключено два регулятора для выбора времени задержки. Поэтому можно сделать вывод, что диапазон времени задержки задается с помощью двух переключателей, расположенных на передней панели устройства. С выхода блока задержки сигнал подается на блок цифро-аналогового преобразователя. Далее сигнал опять возвращается в аналоговую область.

На выходе цифро-аналогового преобразователя путь сигнала опять разветвляется. Одна ветвь подключена к регулятору выходного уровня, роль которого мы уже обсудили. Этот регулятор подключен к другому фильтру нижних частот, функция которого, очевидно, заключается в удалении из выходного сигнала частоты тактового генератора, внесенной в процессе работы блока задержки. Путь сигнала после цифро-аналогового преобразователя снова разветвляется, причем одна ветвь идет на инвертирующий усилитель мощности, подключенный к переключателю полярности обратной связи, а вторая - в обход усилителя на другой контакт этого переключателя. Переключатель полярности обратной связи имеет два положения, обозначенные на схеме "плюс" и "минус". Этот переключатель позволяет выбрать синфазную или противофазную обратную связь. Варьируя время задержки, с помощью обратной связи можно генерировать многократное эхо, эффекты реверберации или эффекты типа фленжер.

Переключатель полярности обратной связи через регулятор уровня обратной связи соединен с переключателем обратной связи (выход/вход). Следовательно, мы можем регулировать уровень сигнала в обратной связи и при необходимости выключать ее. Обратите внимание, что здесь сигнал идет справа налево.

Нам осталось только проанализировать боковую цепь в нижней части принципиальной схемы. Она генерирует тактовый сигнал для блока цифровой обработки. Линии между блоками этой схемы показывают путь сигнала управления (не аудиосигнала).

На все три цифровых блока тактовый сигнал подается с тактового генератора, следовательно, тактовая частота блока, контролирующего время задержки, регулируется напряжением.

С тактовым генератором колебаний связана панель управления линии задержки, мы можем плавно изменять время задержки в диапазоне, который выбирается с помощью переключателя диапазона. На тактовый генератор колебаний поступает еще один сигнал от НЧ-генератора. Так обычно называют генераторы колебаний, предназначенных для работы на инфразвуковых частотах, лежащих в диапазоне от 0,001 Гц до 20 Гц или 100 Гц. Итак, НЧ-генератор генерирует модулирующий сигнал, далее он подается на тактовый генератор

колебаний, который изменяет частоту тактовых импульсов на его выходе с определенным периодом (поскольку иное не оговорено, можно предположить, что форма модулирующей волны будет треугольная). НЧ-генератор подключается к тактовому генератору, через регулятор амплитуды модулирующего сигнала (глубины модуляции тактовой частоты). Частоту НЧ-генератора можно изменять с помощью регулятора частоты модуляции, который расположен на панели управления устройства.

7.5. Заключение

На основе методики, которую мы использовали в примерах, рассмотренных выше, можно проводить анализ гораздо более сложных принципиальных блок-схем. Основные принципы всегда остаются неизменными: если не оговорено иное, следует считать, что сигнал идет слева направо, и, рассуждая логически, нужно проследить каждый из путей прохождения сигнала.

Если схема составлена неудачно, информацию о том, что означает тот или иной символ или способ обозначения, использованные на схеме, придется искать в прилагаемой документации. Принципы составления принципиальных блок-схем, описанные в данной главе, применяются и в сложных схемах звуковых систем. Правильно составленная схема всегда будет служить удобным справочным материалом. Примеры принципиальных схем звуковых систем будут приведены в гл. 17 и 18, в которых описано, как собрать такие системы вместе с электроникой и громкоговорителями.