

Акустика для звукорежиссера

©Швец С. И.

23 января 2008 г.

Глава 1

Введение

Эта книга предназначена для использования в качестве учебного пособия по акустике, психоакустике и электроакустике студентами специализации "Звукорежиссура".

Так уж устроен человек, что один склонен к техническим, точным наукам, а другой — к гуманитарным. У одного — хорошее логическое мышление, а у другого — богатая фантазия и воображение. У одного — хорошая память на логические конструкции, а у другого — хорошая музыкальная память.

При наборе студентов на новый учебный курс часто возникает вопрос, по каким критериям лучше отбирать абитуриентов? С одной стороны, хороший профессионал — звукорежиссёр, безусловно, должен иметь музыкальные способности, музыкальный слух и должен знать нотную грамоту. С другой стороны, при современных темпах развития и усложнения звуковой аппаратуры, звукорежиссёр должен быть и хорошим инженером.

Можно сказать, что современный звукорежиссёр должен быть на одну треть инженером в электронике, на одну треть инженером в акустике и на одну треть музыкантом. Практика показывает, что такое сочетание человеческих качеств встречается не часто. Компромиссным вариантом при подготовке звукорежиссёров может быть повышение степени специализации обучения. Для этого необходимо более тщательно находить те грани теоретических дисциплин, за которые выходить не имеет смысла. Избыточное усложнение теоретического материала может привести к понижению эффективности обучения. Наряду с этим, знание базисных основ акустики, электроники и ряда других специальных дисциплин просто необходимо.

В настоящее время наблюдаются такие тенденции, что огромные возможности современной техники и технологий начинают поглощать и подавлять "живое" творчество. Техника становится всё более сложной и разнообразной. По мере совершенствования звукотехнических приборов и комплексов, значительно повышаются требования к качеству звука. Для пол-

ноценной и эффективной работы со звуком требуются высококвалифицированные инженеры по звуку, звукооператоры и звукорежиссёры. Перекладывая "на плечи" компьютера ряд технологических задач, погружаясь в мир реальных и виртуальных кнопок, регуляторов, коммутаторов и других точек взаимодействия с комплексом звукотехнического оборудования, музыканты, совместно со звукооператорами или звукорежиссёрами, часто теряют "живую" связь с производением, теряют его "душу".

Однако я бы совершил большую ошибку, если бы отверг преимущества научно-технического прогресса и, сопутствующие ему, новые технологические возможности. Всё хорошо, если "... грамотно, со вкусом и в меру". Как это ни парадоксально, чтобы не злоупотреблять избыточными возможностями техники, а использовать её гармонично и эффективно, необходимо иметь весь комплекс знаний по вышеназванным дисциплинам. Всё это определяет более высокие требования к подготовке специалистов данной профессии.

Главной причиной, побудившей меня взяться за написание этой книги, является отсутствие специализированного учебного пособия, которое соответствовало бы перечисленным выше требованиям. Надеюсь, что оно будет полезно звукооператорам, звукорежиссёрам и инженерам по звуку.

Если возникнет желание и добрая воля, то можно скинуть пару копеечек за книжку (WMID: 755732534258; Z252885520822; R105126449871; E538136237825; U297041345878) - не обижусь.

Оглавление

1	Введение	3
2	Основы общей акустики	9
2.1	Природа звука	9
2.1.1	Звук и условия его возникновения	9
2.1.2	Линейные характеристики звуковых колебаний	10
2.1.3	Скорость звука	12
2.1.4	Звуковые волны	13
2.1.5	Фронт волны	14
2.1.6	Энергетические характеристики звукового поля	15
2.2	Законы распространения звука в пространстве	16
2.2.1	Распределение звуковой энергии в пространстве	16
2.2.2	Отражение звуковых волн	18
2.2.3	Поглощение звука	19
2.2.4	Закон преломления звука	20
2.2.5	Дифракция звуковых волн	21
2.2.6	Акустический резонанс	22
2.2.7	Интерференция звуковых волн	24
2.2.8	Эффект Доплера	26
3	Основы психоакустики	29
3.1	Основные свойства слуха человека	29
3.1.1	Физиология слуха человека	29
3.1.2	Восприятие звука по частоте	32
3.1.3	Восприятие звука по амплитуде	34
3.1.4	Кривые равной громкости	36
3.1.5	Динамический диапазон слуха человека	37
3.1.6	Нелинейные свойства слуха	38
3.1.7	Последствия воздействия звука на слух	39
3.1.8	Восприятие фазовых характеристик звука	41
3.1.9	Восприятие звука по тембру	42

3.1.10	Направленные свойства слуха	45
3.2	Эффект маскировки	48
3.2.1	Маскировка звука по уровню	49
3.2.2	Маскировка звука в частотной области	49
3.2.3	Эффект Хааса	50
3.2.4	Маскировка звука во временной области	51
3.2.5	Пространственное демаскирование	52
3.2.6	Восприятие импульсных звуков	53
4	Основы электроакустики	57
4.1	Основы теории преобразователей	57
4.1.1	Электромеханические преобразователи	57
4.1.2	Электромагнитные преобразователи	58
4.1.3	Электростатические преобразователи	59
4.1.4	Пьезоэлектрические преобразователи	60
4.1.5	Анализ свойств преобразователей методом электро- механических аналогий	60
4.1.6	Электрические аналоги акустических элементов	62
4.1.7	Приемники давления и градиента давления	63
4.1.8	Явление обратимости	63
4.2	Микрофоны	65
4.2.1	Электродинамические микрофоны	65
4.2.2	Ленточные микрофоны	67
4.2.3	Конденсаторные микрофоны	67
4.2.4	Конденсаторные электретные микрофоны	69
4.2.5	Оптические микрофоны	69
4.2.6	Основные технические характеристики микрофонов	70
4.2.7	Остронаправленные микрофоны	77
4.2.8	PZM микрофоны	79
4.2.9	Радиомикрофоны	81
4.2.10	Сравнительные характеристики разных типов микро- фонов	83
4.2.11	Общие рекомендации по выбору микрофонов	84
4.3	Громкоговорители и акустические системы	85
4.3.1	Основные характеристики громкоговорителей	86
4.3.2	Электродинамические громкоговорители	88
4.3.3	Электростатические громкоговорители	88
4.4	Акустические системы	88

5	Тракт звукоусиления	89
5.1	Структура тракта звукоусиления	89
5.2	Влияние обратной связи на частотную характеристику звукового поля	91
5.3	Индексы тракта звукоусиления	92
5.4	Временные характеристики тракта звукоусиления	93
5.5	Оптимизация тракта звукоусиления	94
6	Анализ и коррекция акустических свойств среды	97
6.1	Акустические условия в закрытых помещениях	97
6.1.1	Анализ архитектурных особенностей зоны озвучивания	97
6.1.2	Диффузное звуковое поле в помещении	98
6.1.3	Поглощение звука в помещениях	99
6.1.4	Звукоизоляция	105
6.1.5	Реверберация	107
6.1.6	Расчет времени реверберации	109
6.1.7	Концепция LEDE	111
6.2	Расчёт мощности системы звукоусиления	112
6.2.1	Выбор требуемого звукового давления	113
6.2.2	Определение влияния местных акустических условий на интенсивность звукового поля	114
6.2.3	Расчёт мощности акустических систем	116
6.2.4	Анализ временных задержек в зоне озвучивания	118
A	Звукопоглощающие материалы	123
A.1	Резонансные звукопоглотители	123
A.2	Синтетические звукопоглотители	123
B	Звукоизоляционные материалы	125

Глава 2

Основы общей акустики

2.1 Природа звука

2.1.1 Звук и условия его возникновения

Для того чтобы мог возникнуть звук, необходима среда, обладающая некоторой плотностью. Звук не может распространяться в условиях вакуума. Пример несуразностей, связанных с этим, можно наблюдать в некоторых фантастических фильмах. В сценах с пролетом космических кораблей или с космическими взрывами зритель слышит соответствующие звуки, хотя в реальности это невозможно. Но оставим на совести режиссеров эти художественные приемы. Распространение звука в той или иной мере зависит от свойств данной среды. В частности большое значение имеют плотность, вязкость или упругость, молекулярная структура, температура и др. Если среда обладает высокой вязкостью, то звук быстро затухает, превращаясь в тепло. Кроме этого, распространение звука существенно зависит от неоднородности среды. В условиях с неоднородной плотностью и температурой, будет изменяться направление и скорость распространения. Такое влияние можно наблюдать в тумане, в горной местности и в некоторых других случаях. Известно, что в тумане звук распространяется на большие расстояния гораздо эффективнее, чем в сухую, солнечную погоду. В горах бывает достаточно сложно определить направление на источник звука из-за изменения плотности воздуха по высоте и наличия отражений.

Итак, что же собой представляет звук? Какова его природа? В первую очередь звук это **колебательный процесс**. Колебания упругой среды с частотой от 20 Hz до 20 kHz называют звуковыми. Для звукорежиссера основной интерес представляют законы распространения звука в воздухе. Поэтому в дальнейшем мы сосредоточим своё внимание именно на этом. Окружающее нас воздушное пространство состоит из молекул различных

газов и микрочастиц, которые под воздействием сил гравитации распределены у поверхности Земли. По мере удаления от Земли плотность атмосферы уменьшается. За счёт сил межмолекулярного взаимодействия газы стремятся к расширению в пространстве, но силы гравитации противодействуют этому, приводя данную систему в энергетическое равновесие. В результате этого воздух находится под давлением, которое называют атмосферным и измеряют в миллиметрах ртутного столба (мм.рт.ст.) или в Паскалях (Па). Воздух обладает достаточно высокой упругостью, что и определяет хорошие условия для распространения звуковых колебаний.

Для того чтобы вызвать звуковые колебания, необходимо создать механическое возмущение среды с помощью вибрации физического тела, ударного воздействия, взрывного или другого характера.

2.1.2 Линейные характеристики звуковых колебаний

Для определения основных характеристик звуковых колебаний рассмотрим простейший случай синусоидальной волны. Иначе говоря, когда давление в точке наблюдения изменяется по синусоидальному закону.

$$\vec{p}_{зв} = P_{зв.мах} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \quad (2.1)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.2)$$

- $\vec{p}_{зв}$ — мгновенное значение звукового давления,
- $P_{зв.мах}$ — максимальное, амплитудное значение звукового давления,
- ω — круговая частота,
- t — момент времени,
- f — частота колебаний,
- φ_0 — начальная фаза колебаний.
- T — период звуковых колебаний,
- $P_{атм}$ — атмосферное давление.

Амплитудным значением звукового давления называют разницу между максимальным значением абсолютного (полного) давления (или минимальным значением абсолютного давления) и средним атмосферным давлением.

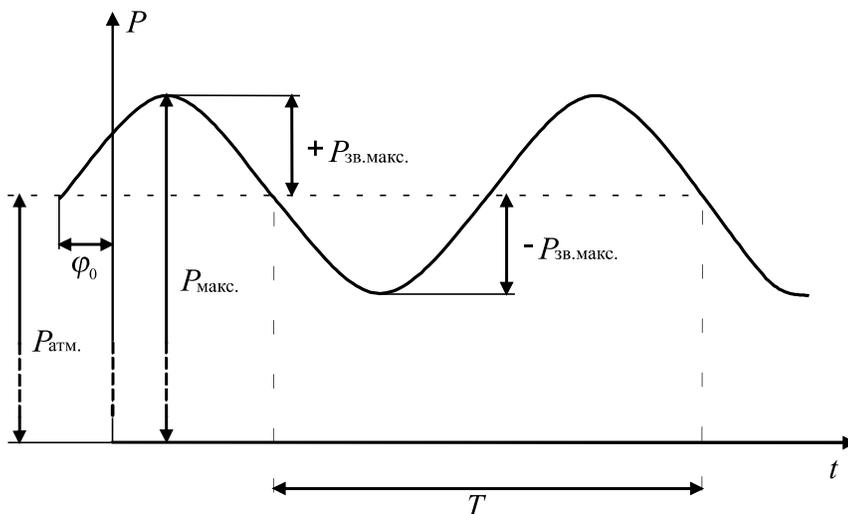


Рис. 2.1: Временная зависимость давления при наличии звуковых колебаний.

Действующим значением звукового давления называют величину, равную 0.707 от амплитудного значения давления.

$$P_{\text{зв}} = 0,707 \cdot P_{\text{зв.макс}} \quad (2.3)$$

Звуковое давление — величина знакопеременная. Если абсолютное давление больше среднего атмосферного, то звуковое давление считают положительным. Если абсолютное давление меньше среднего атмосферного, то звуковое давление считают отрицательным.

Периодом звуковых колебаний называют интервал времени, в течение которого совершается одно полное колебание. На протяжении одного периода не должно быть повторяющихся участков звукового колебания. Единицей измерения длительности периода является единица времени — секунда.

Частотой звуковых колебаний называют количество периодов за одну секунду. Единицей измерения частоты является Герц (Hz).

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.4)$$

Из вышесказанного ясно, что для различных частот звуковых колебаний, длительность периода, измеряемая в секундах, будет иметь различные значения. Однако в ряде случаев возникает необходимость оценивать звуковые колебания не относительно шкалы времени, а относительно самого

периода. Поэтому периоду также сопоставлены угловые единицы измерения — градусы ($^{\circ}$) или радианы (рад.). Одному полному периоду соответствует угол 360° или 2π радиан. Это позволяет отказаться в некоторых расчетах от переменной времени t .

На основании определённых выше величин можно определить такую характеристику, как **начальная фаза** колебания (φ_0). Начальная фаза колебания означает момент начала полного периода колебания при $P_{зв}=0$, в момент роста давления, относительно момента начала наблюдения (т. е. относительно нулевого значения координаты оси времени). Если начальная фаза колебания смещена влево относительно нулевой точки оси времени, то фаза считается положительной, а если вправо — то отрицательной.

Фазу принято измерять в угловых единицах: в $^{\circ}$ или радианах. Если в один и тот же момент времени наблюдают два синусоидальных колебания с разными начальными фазами, но одинаковыми частотами, то говорят, что одно колебание сдвинуто по фазе относительно другого. Разница начальных фаз данных колебаний называется **сдвигом по фазе** ($\Delta\varphi$). Если сдвиг по фазе равен 180° , то говорят, что одно колебание находится в **противофазе** относительно другого. При геометрическом сложении таких колебаний, мгновенные значения звуковых давлений одного колебания будут вычитаться из мгновенных значений другого, в результате чего суммарное давление будет равно арифметической разнице давлений этих колебаний. Если сдвиг по фазе равен 0° , то суммарное давление будет равно арифметической сумме давлений. При других значениях сдвига фаз, сумма давлений будет равна геометрической сумме (сумме векторов давлений).

2.1.3 Скорость звука

Одной из наиболее важных характеристик звука является скорость распространения. Как уже было сказано ранее, молекулы газов, составляющие воздух, взаимодействуют между собой через упругие силовые связи. Если в какой либо локальной точке пространства возникает колебательный процесс, то он последовательно передается к соседним точкам данного пространства посредством этих связей. Так звуковые колебания распространяются во всех направлениях при условии, если не встречаются на своем пути жестких препятствий. При этом частицы воздуха могут совершать только колебания относительно точки покоя, не смещаясь линейно куда либо в пространстве. Разумеется, если на них не действуют другие силы (например, ветер).

На основании этого можно определить, что скорость распространения в пространстве звуковых колебаний называют **скоростью звука** \vec{c} . А скорость движения частиц воздуха относительно точки покоя, во время коле-

бательного процесса, называют **колебательной скоростью** \vec{v} . Причём, необходимо отметить, что скорость звука в воздухе величина достаточно стабильная и равняется примерно 330...340 м/с. И зависит она от температуры, плотности и состава воздуха. А колебательная скорость изменяется как по направлению, так и по величине непрерывно, в течение всего колебательного процесса. Необходимо отметить, что вектор скорости звука совпадает с направлением распространения звука, а вектор колебательной скорости может быть направлен как угодно относительно вектора распространения. Если вектор колебательной скорости совпадает с вектором скорости звука по направлению, то такие колебания называют **продольными**, а если находится под углом 90° , то — **поперечными**.

2.1.4 Звуковые волны

Из предыдущего параграфа можно сделать вывод, что звуковые колебания распространяются в однородном пространстве с конечной и стабильной скоростью. С течением времени колебательный процесс распределяется в этом пространстве по мере удаления от источника звука. Таким образом, можно говорить и о пространственной зависимости характеристик колебаний. Другими словами, в различных точках пространства существует объемное распределение звуковой волны. Взаимосвязь между временной и пространственной зависимостью звукового давления определяется через скорость звука. Распространяясь в воздухе, звуковая волна имеет свои максимумы и минимумы давлений в разных точках пространства. Форма зависимости давления от расстояния до источника звука повторяет форму зависимости давления от времени. На основании этого можно говорить о такой характеристике как **длина волны** (λ).

$$\lambda = \frac{\vec{c}}{f} \quad (2.5)$$

Из приведенной формулы видно, что длина звуковой волны прямо пропорциональна скорости звука и обратно пропорциональна частоте колебаний. Так, например, на частоте 20 Hz длина волны будет равна 17 метров, на частоте 1 kHz — 34 сантиметра, а на частоте 20 kHz — 1,7 сантиметра. Необходимо обратить внимание на диапазон длин волн для звукового диапазона частот. В последующем мы увидим, что эти значения существенно влияют на поведение звука в различных условиях.

2.1.5 Фронт волны

Звуковые волны распространяются в пространстве, создавая некую объемную конфигурацию распределения давлений и смещения частиц воздуха. Если бы мы могли видеть звуковые волны, то обнаружили бы удивительную и сложную объемную картину вокруг нас. Некоторое подобие такой картины мы можем наблюдать на поверхности воды с волнами. Но это всё же только волны, ограниченные поверхностным слоем воды, а не в полном объеме. Если в пространстве выбрать произвольно какую либо точку на некотором расстоянии от источника звука и соединить с ней все смежные точки, в которых звуковая волна будет находиться в такой же фазе колебания, то получим поверхность. Эта поверхность и называется **фронтом волны**.

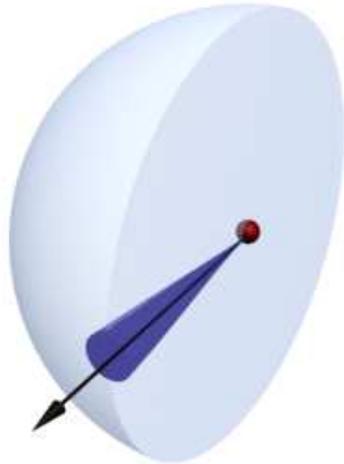


Рис. 2.2: Звуковое поле в разрезе со сферическим фронтом волны.

В однородном неограниченном пространстве для точечного источника звука фронт волны имеет форму сферы с центром в точке источника. На большом расстоянии от источника, на малом участке поверхности фронта, такой фронт приближается к плоской форме. В неоднородной среде или среде, ограниченной жесткими препятствиями, фронт волны может приобретать более сложные формы. Пространство, в каждой точке которого происходит звуковой колебательный процесс, называется **звуковым полем**. Линия, проходящая через точку источника звука и перпендикулярная к сферическому фронту волны, называется **звуковым лучом**. Звуковой луч совпадает с направлением распространения волны. Если звуковая волна распространяется в однородном, неограниченном пространстве, то такое пространство называют **свободным звуковым полем**. Звуковое поле, образованное источником звука в условиях ограниченного пространства, без учёта отраженных от препятствий волн, называют **первичным звуковым полем**. Звуковое поле образованное отраженными от препятствий волнами называют **вторичным звуковым полем**.

В однородном неограниченном пространстве для точечного источника звука фронт волны имеет форму сферы с центром в точке источника. На большом расстоянии от источника, на малом участке поверхности фронта, такой фронт приближается к плоской форме. В неоднородной среде или среде, ограниченной жесткими препятствиями, фронт волны может приобретать более сложные формы. Пространство, в каждой точке которого происходит звуковой колебательный процесс, называется **звуковым полем**. Линия, про-

2.1.6 Энергетические характеристики звукового поля

Для ряда акустических расчётов звукового поля иногда удобнее использовать не линейные, а энергетические характеристики. Это позволяет нам анализировать и делать выводы о характеристиках звукового поля на основе закона сохранения энергии. К таким характеристикам относятся в первую очередь акустическая мощность и интенсивность звуковых колебаний. Во избежание путаницы со звуковым давлением (\vec{p}, P) , будем использовать для обозначения акустической мощности (\mathbb{P}) . Единица измерения акустической мощности — Ватт (W).

Акустическая мощность это работа, выполненная для распространения звуковой волны за единицу времени. Другими словами это скорость выполнения работы. Акустическая мощность зависит от сопротивления среды и скорости звука. Чем больше сопротивление среды, тем больше необходимо выполнить работу для распространения звуковой волны. Чем меньше скорость звука, тем больше необходимо выполнить работу.

Интенсивность звука это акустическая мощность, передаваемая через единицу площади некоторой плоскости. Иначе говоря, это плотность мощности, передаваемой через некоторую плоскость. В качестве примера можно рассмотреть изображение на рисунке (2.2). На данном рисунке изображена сфера фронта волны, в которой выделен сектор телесного угла. На поверхности сферы выделена часть площади, которую пересекает телесный угол. Через неё передается часть мощности, величина которой будет соотноситься с общей мощностью так же, как часть выделенной площади поверхности с площадью всей сферы. В пределах показанного телесного угла, величина мощности не изменяется с удалением от источника, а её пространственная плотность уменьшается. Интенсивность звуковых колебаний обозначается (I) . Единица измерения интенсивности — (W/m^2) .

$$I = \cos \psi \cdot \frac{\mathbb{P}}{S} \quad (2.6)$$

Определив мощность излучаемой звуковой волны, можно определить интенсивность звука на поверхности сферы.

Где S — площадь поверхности, которую пересекает звуковая волна, мощностью \mathbb{P} ,

ψ — угол между звуковым лучом и перпендикуляром к поверхности, проведенным в точке пересечения луча с поверхностью.

Для оценки звуковой энергии, воздействующей на человека или на микрофон, необходимо использовать интенсивность. Мощность звука, распространяющегося в окружающее пространство в свободном звуковом поле и не падающего на поверхность человека или мембраны микрофона, для

этих субъектов не имеет значения. Эту энергию можно считать потерянной. Человек или микрофон воспринимает силу звука в зависимости от интенсивности, а не общей, рассеянной в окружающее пространство, акустической мощности. Поэтому для повышения уровня звука, в зоне расположения слушателя, более выгодно применять направленные системы излучения (особенно на открытых площадках). Распространенной ошибкой некоторых специалистов по звуку является расчёт мощности озвучивания без учёта направленности излучения акустическими системами.

2.2 Законы распространения звука в пространстве

2.2.1 Распределение звуковой энергии в пространстве

Рассмотрим простейший случай распространения звуковых волн в свободном звуковом поле. Если размеры источника звука малы по сравнению с длиной излучаемых волн, то излучение будет происходить равномерно во всех направлениях, с одинаковой интенсивностью и скоростью. Фронт волны будет сферическим. По мере удаления от источника звука, площадь фронта волны будет увеличиваться. Если излучение происходит с мощностью \mathbb{P} , то интенсивность звука будет изменяться в зависимости от расстояния до источника. На основе формулы (2.6) получим.

$$I = \cos \psi \cdot \frac{\mathbb{P}}{4\pi \cdot R^2} \quad (2.7)$$

Где, R — радиус сферы фронта волны, расстояние от источника звука до точки приёма.

S — площадь поверхности сферы фронта волны,

ψ — угол между звуковым лучом и перпендикуляром к поверхности фронта волны, проведенным в точке их пересечения с фронтом.

Учтём, что $\psi = 0$ и $\cos \psi = 1$, т.к. звуковой луч направлен параллельно перпендикуляру к поверхности сферы. Тогда:

$$I = \frac{\mathbb{P}}{4\pi \cdot R^2} \quad (2.8)$$

Из формулы (2.8) видно, что интенсивность звука будет уменьшаться в квадратичной зависимости при увеличении расстояния до источника звука. Данное утверждение нельзя считать справедливым для направленного излучения звука или излучения в неоднородной среде. Приведенная выше

закономерность более всего справедлива для излучения в воздухе, на некоторой высоте от поверхности Земли, которая значительно (хотя бы на порядок) превышает радиус сферы фронта волны, если поблизости нет других препятствий, которые имеют размеры равные или больше длины волны. Например, источник звука, спускаемый на парашюте, на высоте несколько сотен метров, без учёта изменения плотности воздуха по высоте.

Пользуясь данной закономерностью, можно рассчитывать и прогнозировать распространение звука на низких частотах (для больших длин волн) в первичном звуковом поле.

Необходимо также отметить, что при распространении звука в воздухе, происходит *диссипация* звуковой энергии (рассеяние). Суть этого явления заключается в преобразовании звуковой энергии в тепловую, при преодолении сил сопротивления среды. Известны два основных фактора, определяющих диссипацию звука в воздухе. Это вязкость и межмолекулярное взаимодействие воздуха. При увеличении вязкости среды, например при повышении влажности воздуха, затухание звука усиливается. Однако необходимо обратить внимание на то, что изменение влажности воздуха может происходить локально, распределяясь в виде тумана у поверхности Земли слоем, высотой от нескольких метров до нескольких десятков метров. В таком случае этот слой будет представлять собой в некотором роде волновод, внутри которого будут распространяться звуковые волны, преломляясь и отражаясь от пограничной поверхности слоя с высокой влажностью и слоя воздуха с меньшей влажностью. Тогда звуковая энергия будет в меньшей мере передаваться в пространство, за пределами такого природного волновода, и в большей степени будет концентрироваться внутри него, распространяясь эффективно на достаточно большие расстояния. Разумеется, источник звука в этом случае, должен находиться внутри такого волновода.

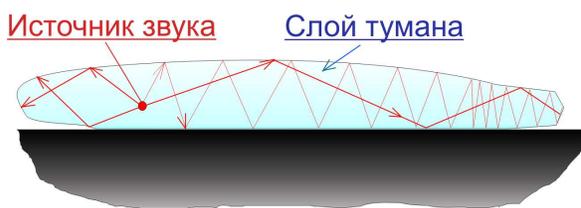


Рис. 2.3: Распространение звука в тумане.

Суммарное звуковое поле представляет собой суперпозицию (наложение) первичного и вторичного полей. Для анализа и расчётов вторичного звукового поля, нам необходимо выяснить, как звук отражается от препятствий и поглощается ими.

Итак, мы рассмотрели основные причины уменьшения интенсивности звука с удалением от источника, которые приводят к затуханию звуковых волн. Для расчётов реального суммарного звукового поля, необходимо учитывать как первичное, так и вторичное зву-

2.2.2 Отражение звуковых волн

В этом параграфе мы рассмотрим поведение звуковых волн при падении на поверхность различных препятствий.

Энергия звука при падении на поверхность физического тела, распределяется на две составляющие: на отраженную от поверхности энергию и на поглощенную энергией данным телом. В составе поглощенной энергии есть также две составляющих: энергия, превращенная в тепло (непосредственно поглощенная, потерянная) и энергия, перешедшая в препятствие, и распространяющаяся в данном физическом теле. Но на данном этапе, для расчёта вторичного звукового поля, две последних составляющих будем учитывать как одну, суммарную энергию потерь.

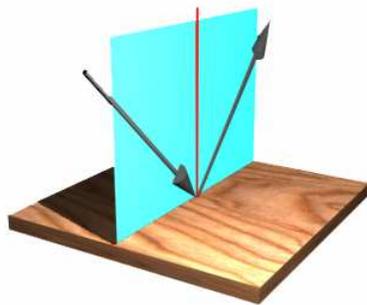


Рис. 2.4: Схема отражения звукового луча.

Закон отражения звуковых волн аналогичен оптическому закону отражения световых лучей. Согласно этому закону, падающий звуковой луч и отраженный звуковой луч находятся в одной плоскости с перпендикуляром к поверхности тела, проведенным в точке падения - отражения. При этом угол между падающим звуковым лучом и перпендикуляром к поверхности равен углу между отраженным лучом и перпендикуляром.

Другими словами, угол падения равен углу отражения.

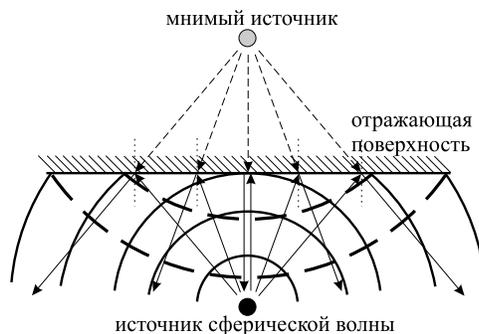


Рис. 2.5: Отражение сферической волны от плоской поверхности.

Для того чтобы учесть потери звуковой энергии, которые возникают при отражении волн, применяют коэффициент отражения $\alpha_{отр}$.

$$\alpha_{отр} = \frac{I_{отр}}{I_{пад}} \quad (2.9)$$

Из формулы (2.9) видно, что коэффициент отражения показывает, какая доля интенсивности падающей волны сохраняется при отражении. Коэффициент $\alpha_{отр}$ зависит от плотности сред, на границе раздела которых происходит отражение, от скорости звука в этих средах и их вязкости. Кроме

этого $\alpha_{\text{отр}}$ зависит от угла падения волны. Чем меньше угол между звуковым лучом и плоскостью отражающей поверхности в точке падения, тем больше $\alpha_{\text{отр}}$.

2.2.3 Поглощение звука

Поглощение звука — это преобразование энергии звуковых колебаний в тепловую энергию. Человечеству известно с давних времен, что при деформации физических тел или при трении выделяется тепло. По закону сохранения энергии эти процессы представляют собой преобразование механической энергии в тепловую. Звуковые волны обладают кинетической энергией (энергией движения). Когда звук распространяется в какой-либо среде, происходит деформация этой среды, а также трение внутренних структур данной среды. Особенно эффективно такие процессы происходят в мягких телах с волокнистой и вязкой структурой. Например, различные ткани, ковровые покрытия, вязкие смолы, поролон и другие. В тканях поглощение звука осуществляется за счёт трения волокон. В смолах и поролоне — за счёт высокой вязкости. Необходимо обратить внимание на то, что материалы, предназначенные для поглощения звука должны быть мягкими и податливыми. В противном случае, при высокой жесткости и твердости таких материалов, значительная часть звуковой энергии будет эффективно отражаться от поверхности этих тел.

Для учёта доли звуковой энергии, которая будет превращена в тепло, из общей энергии звуковой волны, падающей на поглотитель, применяют коэффициент поглощения: $\alpha_{\text{погл}}$

$$\alpha_{\text{погл}} = \frac{I_{\text{погл}}}{I_{\text{пад}}} \quad (2.10)$$

Различные поглощающие материалы имеют немонотонные, разные коэффициенты поглощения звука на разных частотах. Одни материалы более эффективно поглощают звук на высоких частотах, другие на средних, а третьи на — низких. Помимо этого, некоторые материалы могут эффективно поглощать звук в нескольких полосах спектра частот. Комбинируя разные поглощающие материалы, можно обеспечить равномерное поглощение звука во всём спектре звуковых частот.

Поглощающие материалы можно разделить на два вида: сплошные и пористые. Сплошные материалы почти всегда имеют акустическое сопротивление больше, чем у воздуха, а пористые в большинстве случаев — меньше. Это определяет разницу в их коэффициентах поглощения. На практике такие материалы комбинируют между собой для обеспечения требуемой

зависимости эффективности поглощения от частоты $\alpha_{\text{погл}}(f)$. Применение поглощающих материалов для поглощения звука в реальных условиях рассмотрим позже.

2.2.4 Закон преломления звука

Закон преломления звука описывает поведение волны в двух средах и на границе этих сред, если скорость звука в этих средах разная. Закон преломления звука аналогичен оптическому закону преломления света.

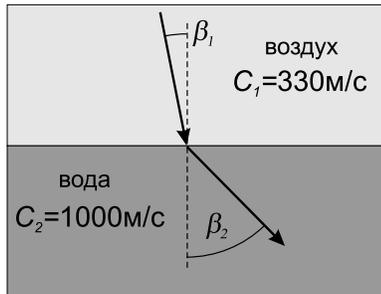


Рис. 2.6: Преломление звукового луча на границе двух сред воздух-вода.

β_1 — угол между падающим звуковым лучом в первой среде и перпендикуляром к поверхности границы раздела двух сред, β_2 — угол между преломленным звуковым лучом во второй среде и перпендикуляром к поверхности границы раздела двух сред.

$$\frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.11)$$

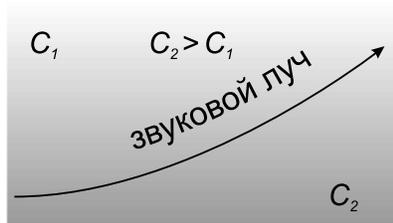


Рис. 2.7: Искривление звукового луча в пространстве с изменяющейся по высоте плотностью и скоростью звука.

по высоте, то луч будет плавно искривляться (смотри рисунок 2.3).

Закон преломления звука утверждает, что отношение синуса угла падения β_1 к синусу угла преломления β_2 равно отношению скорости звука в первой среде c_1 к скорости звука во второй среде c_2 . Причём, падающий звуковой луч, преломленный звуковой луч и перпендикуляр к плоскости границы раздела сред, в точке падения, находятся в одной плоскости.

Примером таких условий, когда необходимо учитывать закон преломления, может быть переход звуковой волны из воздуха в воду или наоборот.

Другим примером может быть распространение звука в воздухе с изменяющейся в пространстве влажностью или плотностью (случай распространения в тумане или в горах). Если звук распространяется в воздухе с градиентом скорости звука

Должен отметить, что заметное искривление звукового луча в воздухе происходит при достаточно небольших высотах. Это видно из графика (2.8).

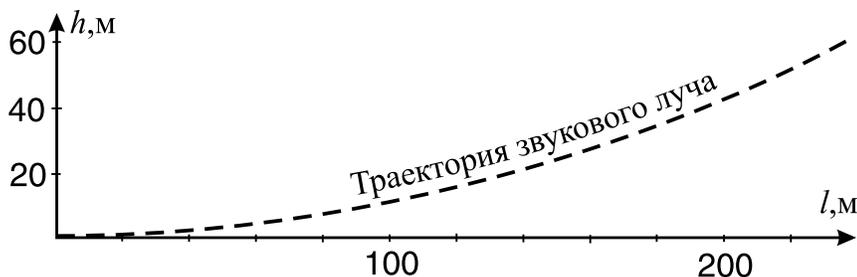


Рис. 2.8: Траектория луча вдоль земной поверхности при увеличении высоты.

2.2.5 Дифракция звуковых волн

Дифракцией называют огибание звуковыми волнами механических, жестких препятствий, находящихся на пути волны. Дифракция существенно зависит от соотношения линейных размеров препятствия и длины волны. Если длина волны значительно меньше размеров препятствия, то звук будет эффективно отражаться или поглощаться препятствием. Если длина волны сравнима с размерами препятствия, то она будет частично огибать препятствие и частично отражаться. Если длина волны значительно превышает размеры препятствия, то она будет его огибать и распространяться далее в пространстве, незначительно при этом рассеиваясь и отражаясь.

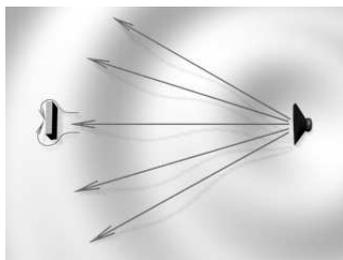


Рис. 2.9: Дифракция (длина волны больше размеров препятствия).

Давайте рассмотрим более детально физику данного явления. Как уже было сказано ранее, длина волны связана с периодом T (или с частотой колебания f). Чем больше длина волны, тем меньше частота и меньше колебательная скорость при той же амплитуде колебания (т.е. медленнее происходит колебательный процесс). Учитывая, что при этом скорость звука в однородной среде постоянна, при медленном изменении звукового давления, оно будет успевать выравниваться в пространстве вокруг препятствия, не создавая больших градиентов давления между точ-

Рис. 2.9: Дифракция (длина волны больше размеров препятствия).

ками перед препятствием и за ним. Упрощенная модель такого процесса изображена на рисунке (2.9).

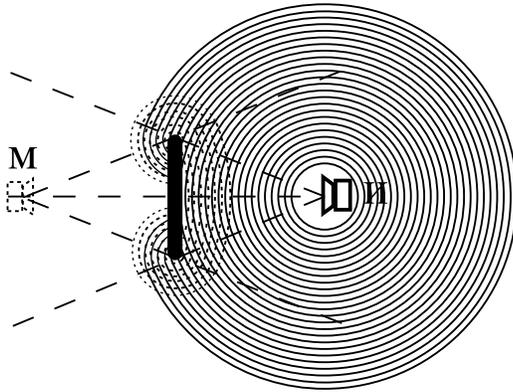


Рис. 2.10: Семейство фронтов прямой и отраженной сферической волны (длина волны меньше размеров препятствия).

звука (И), а также отражение и частичное огибание препятствия. Пунктирными линиями изображен мнимый источник звука (М), в соответствии с которым формируются волны при отражении.

Если длина волны существенно меньше размеров препятствия, то на протяжении пути его обхода, возникнут градиенты перепадов давлений и выравнивание давлений не произойдет. В этом случае препятствие будет оказывать существенное влияние на распространение волны, отражая значительную часть звуковой энергии и формируя за ним акустическую тень.

На рисунке (2.10) показано, как распространяются сферические волны от источника

2.2.6 Акустический резонанс

Акустический резонанс — это явление, которое оказывает значительное влияние на результирующее звуковое поле в помещениях. Суть этого явления заключается в накоплении звуковой энергии при многократной суперпозиции звуковых волн.

Рассмотрим простейший случай для плоской звуковой волны. Для возможности возникновения акустического резонанса должны быть созданы несколько условий. Первым условием является наличие двух, параллельно расположенных, отражающих поверхностей или двух, противоположных внутренних угловых поверхностей. Источник первичной излучаемой волны должен находиться симметрично относительно них. Например, у самой поверхности или в центре относительно отражателей. Кроме этого, сами углы в помещении тоже формируют собственные резонансы. Вторым условием является совпадение по фазе прямых и отраженных волн, которые накладываются друг на друга. При многократных отражениях и суммировании таких волн, происходит накопление звуковой энергии результирующего поля.

Если коэффициенты отражения поверхностей стремятся к единице, а коэффициенты поглощения, соответственно, к нулю, то количество отраженных волн, обладающих существенной энергией, будет достаточно велико. И тогда сила резонанса тоже может достичь больших значений.

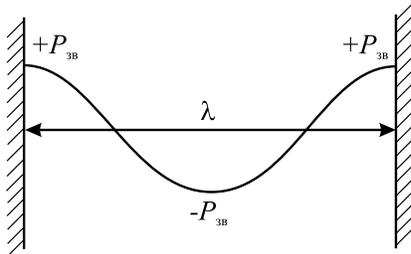


Рис. 2.11: Волновой резонанс.

В таких случаях можно говорить о высокой добротности резонанса. Между характеристиками акустического резонанса и электрического резонанса можно провести аналогию. Понятие добротности акустического резонанса аналогично добротности электрического резонанса. Если добротность резонанса высока, то звуковое давление может достигать больших значений и, в некоторых случаях, при достаточно больших мощностях первичной излучаемой волны, может приобретать разрушительный характер. В реальных условиях помещений, добротность акустического резонанса может достигать значений от нескольких единиц до нескольких десятков. В некоторых случаях, например в жесткой длинной трубе, добротность может достигать значений, равных нескольким сотням. Чем больше добротность резонансов в помещении, тем больше неравномерность звукового поля в нём. А это является весьма существенным недостатком при озвучивании помещения. Слушатели в разных точках данного помещения будут слышать звук с сильно отличающейся тембровой окраской.

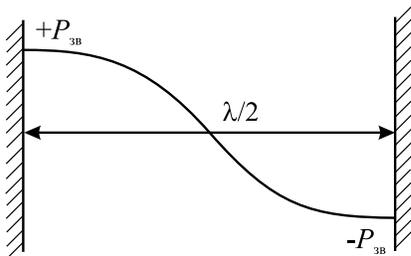


Рис. 2.12: Полуволновой резонанс.

На рисунках (2.11) и (2.12) приведены примеры диаграмм распределения звукового давления в пространстве между двумя отражающими поверхностями. В первом случае расстояние между отражателями равно длине волны, а во втором случае — половине длины волны. Если длина волны, или половина её точно равна расстоянию между отражателями, то области повышенного и пониженного давления установятся неподвижно в пространстве. В таком случае можно говорить о возникновении эффекта **стоячей волны**. Если указанные размеры будут отличаться незначительно, то возникнет эффект **бегущей волны**. При этом области с повышенным и пониженным звуковым давлением будут с некоторой скоростью перемещаться в пространстве. Эти эффекты можно явно наблюдать, перемещаясь в пространстве, в котором соблюдаются указанные условия. Разумеется, в реальных условиях, при наличии более чем двух отражающих поверхностей, неравномерность распре-

деления звукового давления будет достигать больших значений и, в некоторых случаях, при достаточно больших мощностях первичной излучаемой волны, может приобретать разрушительный характер. В реальных условиях помещений, добротность акустического резонанса может достигать значений от нескольких единиц до нескольких десятков. В некоторых случаях, например в жесткой длинной трубе, добротность может достигать значений, равных нескольким сотням. Чем больше добротность резонансов в помещении, тем больше неравномерность звукового поля в нём. А это является весьма существенным недостатком при озвучивании помещения. Слушатели в разных точках данного помещения будут слышать звук с сильно отличающейся тембровой окраской.

На рисунках (2.11) и (2.12) приведены примеры диаграмм распределения звукового давления в пространстве между двумя отражающими поверхностями. В первом случае расстояние между отражателями равно длине волны, а во втором случае — половине длины волны. Если длина волны, или половина её точно равна расстоянию между отражателями, то области повышенного и пониженного давления установятся неподвижно в пространстве. В таком случае мож-

деления звукового давления в пространстве имеет более сложный характер и существенно зависит от формы помещения и его линейных размеров. Наиболее сильно резонансы проявляются в помещениях с линейными размерами, равными нескольким метрам или десяткам метров.

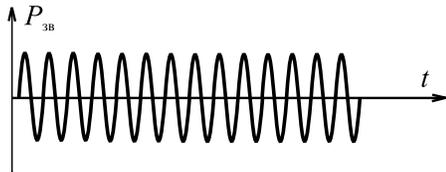


Рис. 2.13: Исходный звуковой импульс.

В больших помещениях, с линейными размерами более десятка метров, на уменьшение добротности резонансов начинает оказывать существенное влияние диссипация звука в воздухе. Кроме этого, учитывая, что звуковые волны на низких частотах в большинстве случаев имеют фронт, близкий к сферическому, в больших помещениях происходит заметное уменьшение звукового давления по мере удаления от источника или отражателя (смотри параграф (2.1.5)). Поэтому в таких случаях резонансы не могут иметь высокую добротность. Однако в больших помещениях могут возникать локальные резонансы благодаря внутренним архитектурным конструкциям, имеющим параллельные плоскости и углы.

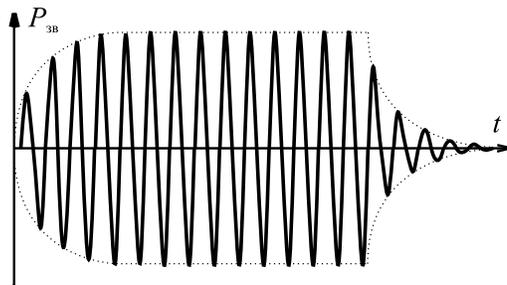


Рис. 2.14: Резонансный импульс.

Необходимо отметить ещё одну характерную особенность резонанса. Как видно из рисунка (2.14), резонанс — явление инерционное, в результате чего возникают динамические искажения фронта нарастания и фронта спада звукового импульса. Эта особенность оказывает заметное влияние на субъективное восприятие звука человеком. Такой звуковой импульс кажется „размазанным, гулким“, не четким. Чем выше добротность резонанса, тем более „размазанным“ кажется звуковой импульс. Чаще всего это можно услышать в акустических системах с фазоинверторами и в акустических системах с длинными и узкими корпусами. Такие корпуса как раз и используются для повышения отдачи на низких частотах за счёт резонанса.

2.2.7 Интерференция звуковых волн

Интерференция звуковых волн имеет много общего с акустическим резонансом. Но есть и существенные различия в физике этих двух явлений. Для того чтобы могла возникнуть интерференция, необходима суперпозиция двух или более когерентных звуковых волн. Условие когерент-

ности в первую очередь определяет одинаковый тип звуковых волн (например, плоская продольная волна) и одинаковую их частоту. На практике такие условия возникают достаточно часто. Если первичная звуковая волна эффективно отражается от жёсткого препятствия, то отражённая волна, накладываясь на первичную, уже создаёт достаточные условия для интерференции.

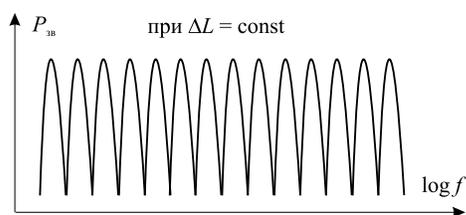


Рис. 2.15: Эффект гребенчатого фильтра при фиксированном положении приёмника в пространстве.

Другой случай возникновения интерференции возможен при близком расположении двух или более однотипных акустических систем (громкоговорителей), на которые подаётся монофонический, одинаковый сигнал. В этих условиях, излучаемые всеми громкоговорителями звуковые волны будут накладываться друг на друга, обеспечивая векторное суммирование звуковых давлений в каждой точке пространства. Если предположить в простейшем случае, что происходит сложение двух абсолютно одинаковых волн с равными эффективными значениями давлений, то при совпадении их по фазе, суммарное давление удвоится. А при совпадении таких волн в противофазе, суммарное давление, в идеале, будет стремиться к нулю. Благодаря этому в пространстве возникнет неравномерность звукового поля.

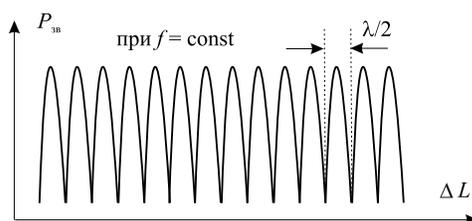


Рис. 2.16: Эффект гребенчатого фильтра при фиксированной частоте.

На рисунке (2.15) показана зависимость звукового давления от частоты в фиксированной точке пространства, при неподвижных источниках звука в условиях интерференции. А на рисунке (2.16) показана зависимость звукового давления от линейного смещения в пространстве, вдоль звукового луча при фиксированной частоте звуковых колебаний. Эти зависимости справедливы, если звуковой луч отражённой волны распространяется параллельно звуковому лучу падающей волны.

Расстояние между соседними минимумами (или максимумами) на этих диаграммах равно половине длины волны. Форма таких зависимостей напоминает гребешок, поэтому говорят, что интерференция проявляется в виде **эффекта гребенчатого фильтра**.

Учитывая особенности распространения и поглощения звуковых волн на разных частотах, можно сказать, что наиболее заметно влияние интер-

ференции проявляется на высоких частотах. В то же время, наиболее сильное влияние на низких частотах, на звуковое поле оказывают резонансы.

На практике, в условиях интерференции, слушатель будет слышать звук, пропущенный через фильтр с амплитудно-частотной характеристикой, соответствующей рисунку (2.15). А если слушатель будет перемещаться в пространстве, то он будет слышать ещё и модуляцию по амплитуде на высоких частотах.

В реальных условиях интерференция возникает при суперпозиции более, чем двух когерентных волн, поэтому неравномерность звукового поля не так ярко выражена, как в описанном выше случае. И всё же, её влияние на звук достаточно заметное, особенно поблизости стен с жестким покрытием.

2.2.8 Эффект Доплера

Каждому человеку приходилось наблюдать, как изменяется тональность звука от проезжающего мимо на большой скорости автомобиля. Вначале, когда автомобиль приближается, звук от него имеет повышенную тональность. Затем, когда автомобиль находится вблизи наблюдателя, тональность выравнивается до нормальной. И, когда автомобиль удаляется, тональность понижается относительно нормальной.

Изменение тональности звука, т. е. смещение спектра звуковых частот вдоль оси частот, при условии, что источник и приемник звука движутся друг относительно друга, называют *эффектом Доплера*. Причём, если источник и приемник сближаются, то спектр частот смещается в сторону повышения частот. А если источник и приемник взаимно удаляются, то спектр частот смещается в сторону понижения частот.

Если считать, что \vec{V} – скорость движения источника относительно приёмника, причём $+\vec{V}$ при сближении, а $-\vec{V}$ при удалении, f – частота звука неподвижного источника относительно приёмника, f_d – частота звука с эффектом Доплера, тогда:

$$\frac{f_d}{f} = \frac{\vec{V} + \vec{c}}{\vec{c}} \quad (2.12)$$

Рассмотрим механизм данного процесса. Предположим, что источник и приемник звука сближаются. Тогда, в каждый новый момент времени расстояние между ними будет меньше, чем в предыдущий момент. Из этого следует, что каждое новое изменение фазы волны будет приходить к приемнику раньше, чем в неподвижном состоянии. Другими словами, колебательный процесс будет происходить быстрее, и, следовательно, чаще. Что и требовалось доказать.

При взаимном удалении приёмника и источника, процесс происходит в обратной зависимости.

Глава 3

Основы психоакустики

3.1 Основные свойства слуха человека

3.1.1 Физиология слуха человека

Для того чтобы можно было полноценно анализировать работу систем озвучивания и звукозаписи, а также на основе этого их проектировать, необходимо учитывать физиологические свойства слуха человека.

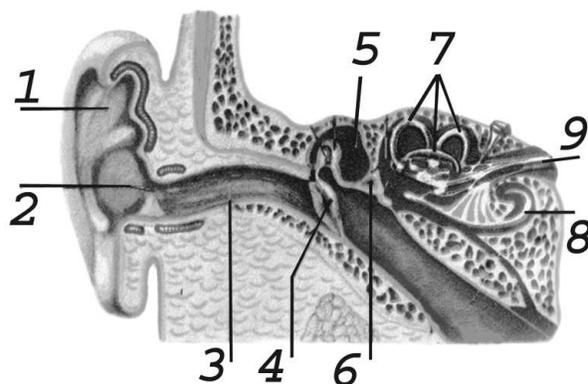


Рис. 3.1: Строение слухового аппарата человека: 1 – ушная раковина; 2 – наружное слуховое отверстие; 3 – наружный слуховой проход; 4 – барабанная перепонка; 5 – барабанная полость; 6 – стремя; 7 – молоточек; 8 – улитка; 9 – улитковый слуховой нерв.

Ухо состоит из трех частей:

- наружное ухо, состоящее из ушной раковины и наружного слухового прохода

- среднее ухо, включающее барабанную перепонку и слуховые косточки
- внутреннее ухо, представленное улиткой — полой, спирально закрученной трубкой, она заполнена так называемыми жидкостями внутреннего уха и связана со слуховым нервом.

Слуховой аппарат человека представляет собой преобразователь акустических колебаний в электрические импульсы, которые поступают по нервам в мозг. Мозг анализирует эти импульсы и распознаёт их, сравнивая с запомненными ранее слуховыми образами.

Рассмотрим последовательность таких преобразований. Сначала ушная раковина формирует звуковое поле благодаря своей форме и размерам. Форма определяет направленность восприятия звука. А размеры определяют эффективность направленной чувствительности слуха на высоких частотах. Поскольку размеры ушной раковины соизмеримы с длинами волн в диапазоне частот около 7...10 kHz ($\lambda = 5...3,4$ см), то и чувствительность к направлению на источник звука наиболее заметна на этих и более высоких частотах. Это справедливо при моноуральном слушании (т.е. слушании одним ухом). При слушании бинауральном (т.е. слушании двумя ушами), чувствительность к направлению на источник звука заметно повышается, это определяется разницей фазы звуковой волны, приходящей к двум ушам. Но об этом мы поговорим позднее. Через наружный слуховой проход звуки передаются на барабанную перепонку, расположенную в конце слухового прохода и отделяющую его от среднего уха. Энергия звуковой волны вызывает механические колебания барабанной перепонки, которые передаются на подвижную систему косточек, находящихся в среднем ухе. Эта система состоит из молоточка, наковальни и стремечка, соединенного с улиткой внутреннего уха. Такая система рычагов нужна для усиления колебаний барабанной перепонки. Движения стремечка вызывают волнообразные колебания жидкости внутреннего уха. Эти волны, в свою очередь, передаются на так называемые волосковые клетки, расположенные вдоль всей длины улитки. В состав основной (базиллярной) мембраны входят около 24 000 поперечных волосковых клеток, слабо связанных между собой.

Как мозг различает звуки? Слуховой нерв оканчивается 23 500 тысячами тончайших нервных окончаний. Каждое окончание начинается от определенного участка улитки и передает информацию о сигналах определенной звуковой частоты. Низкочастотные звуки — например, шум машины или поезда, передаются по волокнам, исходящим из верхушки улитки, а высокочастотные — например, щебет птиц, — по волокнам, связанным с ее основанием. Таким образом, различные звуки вызывают электрическое возбуждение различных волокон слухового нерва. Именно эти различия спо-

способен воспринимать и интерпретировать мозг. Разрыв волосковых клеток приводит к необратимой потере слуха. По мере увеличения возраста человека, количество разрушенных волосковых клеток увеличивается. Особенно активно происходит их разрушение в условиях повышенного уровня шумов. Известны случаи, когда разрыв волокон происходил таким образом, что вызывал постоянное, непрерывное возбуждение нервного окончания. В результате этого у человека возникало ощущение, что он непрерывно слышит звук работающей электропилы. И, как следствие этого, возникало нервное расстройство, депрессия.

Необходимо сделать риторический вывод, что звукооператор или звукоорежиссёр должен особенно трепетно заботиться о своем профессиональном инструменте — слухе. Больше склонны к разрывам волокна, передающие сигналы о высокочастотных звуках. Поэтому с возрастом у человека ухудшается слух в первую очередь на высоких частотах. В таких случаях звуки слышны приглушенно, как будто уши закрыты ватой.

До настоящего момента речь шла о том, как человек слышит звуки с помощью ушей. Но мы воспринимаем звук и другими частями тела. Это не маловажное уточнение, поскольку в задачу звукоорежиссера входит общее воздействие на слушателя: физиологическое, информационное, эмоциональное.

Одним из способов восприятия звука является ощущение вибраций. Особенно заметны вибрации на низких частотах. При малых интенсивностях звуковых колебаний чувствительность к вибрациям не высока. Но при относительно больших интенсивностях - порядка $0,02 \dots 0,05 \text{ W/m}^2$ (что соответствует примерно $25 \dots 60 \text{ W}$ электрической мощности, выделяемой на акустических системах, при прослушивании на расстоянии 1 м), на частотах ниже нескольких сотен герц, вибрации ощущаются достаточно отчетливо. Поэтому восприятие звука через головные телефоны, при том же звуковом давлении и частотном спектре, существенно отличается от восприятия через акустические системы. Вибрации передаются через кости скелета человека и, кроме этого, воспринимаются через мягкие ткани, кожу. Необходимо отметить, что частотный диапазон восприятия вибраций выходит за пределы звукового. Другими словами человек может воспринимать и инфранизкие частоты. Правда, справедливости ради, надо отметить, что абсолютное большинство акустических систем не могут излучать эффективно инфразвуковые колебания.

Несколько иная картина складывается в области верхних частот звукового диапазона, а также в ультразвуковом диапазоне (выше 20 kHz). Длительное время считалось, что человек не слышит ультразвук и поэтому не имеет смысла уделять внимание этой части диапазона. Мой практический опыт работы с ультразвуком дает право утверждать, человек способен вос-

принимать и эту часть спектра. Механизм такого восприятия достоверно не известен. Можно предположить, что воздействие осуществляется через волосяной покров. Волос обладает малой инерционностью и в то же время, через волосяную сумку, связан с нервными окончаниями. Ультразвук достаточно хорошо поглощается волосом и передается к нервным окончаниям. Кроме этого, возможно, ультразвук воспринимается через кожу головы. При малых интенсивностях чувствительность к ультразвуку невысока, но при больших интенсивностях воздействие становится ощутимым. Субъективно ультразвук воспринимается как дискомфортное, необъяснимое давление. Сочетание ультразвуковых составляющих с высокочастотными составляющими звукового диапазона формирует несколько иное субъективное восприятие звука, чем при отсутствии таковых. Возможно, эта разница определяется взаимной модуляцией звуковых и ультразвуковых гармоник. Готов с покорностью принять возражение, что подавляющее число микрофонов не способно преобразовывать звук на ультразвуковых частотах. Но сейчас мы говорим только о способности человека воспринимать звуки на разных частотах.

3.1.2 Восприятие звука по частоте

Необходимо отметить две основные особенности слуха, связанных с частотой. Первая — дискретность восприятия частот. Вторая — восприятие изменения тона звука в логарифмической зависимости от частоты звуковых колебаний.

Согласно теории Г. Гельмгольца (1863г.) предполагается, что волосковые клетки основной мембраны имеют разную длину, толщину и массу, в результате этого они имеют разные собственные резонансные частоты. Под воздействием звука определённой частоты, волосковые клетки, резонансная частота которых близка к этой частоте, начинают колебаться с большей амплитудой, чем другие волокна, возбуждая одно из окончаний слухового нерва сильнее, чем другие.

Таким образом, можно провести аналогию между физиологической системой слуха человека и набором узкополосных, резонансных фильтров, которые перекрывают звуковой диапазон частот. Такие полосы частот, в которых интенсивность звука воспринимается постоянной при изменении частоты звука, называют **критическими полосками слуха**.

Ширина полосы пропускания каждого такого фильтра (Δf), по уровню — 3 дВ, различна на разных участках шкалы частот звукового диапазона. Модель человеческого слуха, описывающая его частотные свойства, представляет собой 140 параллельных резонансных звеньев, каждому из которых соответствует своя критическая полоска слуха. Другими словами, мы

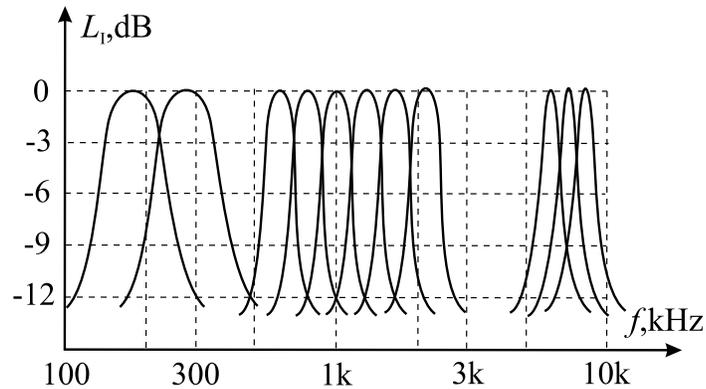


Рис. 3.2: Амплитудно-частотные характеристики модели частотных полосовых фильтров, соответствующих критическим полоскам слуха.

имеем своеобразный анализатор спектра частот звука.

Но способность различать частотные свойства звука этим не ограничивается. На частотах до 1000 Hz мозг способен различать и анализировать раздражения нервных окончаний, колебаниями волосковых клеток, как отдельные импульсы. Это позволяет иметь более высокую дифференцирующую чувствительность слуха к девиации частоты чистого тонального сигнала в области низких частот.

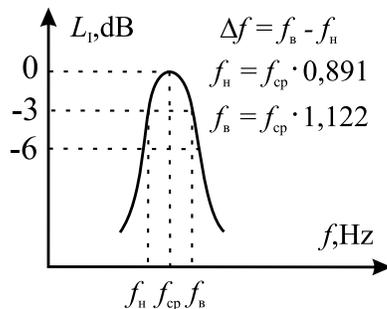


Рис. 3.3: Определение полосы пропускания третьоктавного фильтра.

А затем мозг дифференцирует и анализирует все доступные параметры звука, выполняя при этом роль своеобразного компьютера.

И всё же человек — не компьютер. Мы определяем не в буквальном смысле частоту, а субъективно — высоту тона звука. На низких и средних частотах, до 1000 Hz, для чистого синусоидального колебания, высота тона почти пропорциональна частоте. А на более высоких частотах, высота то-

В дополнение к вышесказанному, необходимо отметить, что чувствительность к девиации частоты тонального звукового сигнала, определяется также разницей интенсивности возбуждения нервных окончаний в соседних резонансных полосках слуха.

Итак, мы можем сделать первый вывод, что определение частоты звука человеком происходит комплексно. Сначала звук в ухе разделяется и фильтруется по частот-

на восприятия зависит от частоты колебаний в логарифмическом масштабе. Условились считать высоту тона на частоте 1000 Hz при уровне ощущения 40 dB, равной 1000 мел (или 10 барк). Но на практике применять шкалу частот до 1000 Hz линейной, а выше — логарифмической не удобно, поэтому принято во всем звуковом диапазоне частот применять логарифмический масштаб. В этом случае за единицу высоты тона принято считать октаву. Изменение частоты звука в два раза, соответствует изменению тона на одну октаву. Основной, центральной частотой, относительно которой считают октавы, является частота 1000 Hz. Учитывая, что ширина критических полосок слуха примерно равна 1/3 октавы (см.рис.3.3), на практике широко применяют деление звукового частотного диапазона на третьоктавные полосы.

3.1.3 Восприятие звука по амплитуде

Из ряда закономерностей восприятия звука по амплитуде колебаний можно выделить две основные: дискретность и логарифмическую зависимость ощущения уровня громкости от интенсивности.

Итак, в чем же заключается дискретность восприятия уровня громкости? Если громкость звука изменяется плавно, то при небольших приращении интенсивности звука, человек не может заметить эту разницу. С другой стороны, если интенсивность звука будет изменяться скачкообразно и величина таких приращений будет равна 0,2...3 dB, то человек будет воспринимать изменение уровня громкости как плавное изменение. На основе этого можно сказать, что существуют дискретные градации интенсивности звука, в пределах которых мы не различаем разницу.

Причиной такого свойства является механизм возбуждения нервных окончаний волосковыми клетками. Остановимся на этом подробнее. Рассмотрим, как будет происходить процесс восприятия громкости звука при увеличении интенсивности от нулевого уровня до больших, предельных значений.

Представим, что амплитуда звуковых колебаний постепенно возрастает, начиная с нуля. Волосковые клетки постепенно увеличивают амплитуду колебаний, но нервные окончания находятся на некотором расстоянии от них и поэтому, до определённого момента, клетки не соприкасаются с нервами. В этом случае возбуждение нервных окончаний не происходит и человек звук не слышит. При дальнейшем увеличении амплитуды колебаний наступает момент, когда волосковые клетки достигают нервных окончаний и вызывают их возбуждение. С этого момента человек начинает слышать звук. Такое пороговое значение звукового давления или интенсивности, при котором человек начинает слышать звук, называют *порогом слышимости*.

Вероятно, природа позаботилась о том, чтобы мы не слышали избыточную звуковую информацию ниже порога слышимости, например звук пульсации крови в кровеносных сосудах и т.д.

Для взрослого человека со здоровым слухом, порог слышимости на частоте $f = 1000$ Hz равен: $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па, что соответствует уровню звукового давления $L_P = 0$ dB и интенсивности звука $I_0 = 10^{-12}$ W/m², или $L_I = 0$ dB.

$$L_P = 20 \cdot \lg \frac{P}{P_0}, \text{ dB} \quad (3.1)$$

$$L_I = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0}, \text{ dB} \quad (3.2)$$

По формулам (3.1) и (3.2) определяются относительный уровень звукового давления P и относительный уровень интенсивности звука I .

Порог слышимости имеет разные значения на разных частотах, но об этом поговорим чуть позже.

При дальнейшем увеличении интенсивности звука, разница станет заметной, когда амплитуда колебаний волосковых клеток увеличится настолько, что они станут соприкасаться с другим нервным окончанием, более удаленным, но относящимся к этой же частотной группе. Величина такого дискретного скачка, при малых уровнях интенсивности, до 30 dB, равна примерно 2...3 dB, а при уровнях выше 30 dB — равна примерно 0,2...0,6 dB. На разных частотах величина заметного скачка — также разная.

Продолжаем увеличивать интенсивность звука, и наблюдаем ещё одну закономерность. Величина последующих скачкообразных приращений громкости звука имеет логарифмическую зависимость от приращений интенсивности звука. Проще говоря, мы субъективно ощущаем увеличение громкости звука на одинаковые приращения (линейное суммирование), а интенсивность звука при этом увеличивается в какое-то число раз с одинаковым коэффициентом (умножение на коэффициент). В связи с этим, на практике принято широко использовать не логарифмическую шкалу давлений или интенсивностей звука (P, I), а линейную (L_P, L_I). Это больше соответствует субъективным особенностям восприятия звука человеком, т.к. нам легче манипулировать линейными шкалами, чем логарифмическими. Такие шкалы применяются в индикаторных устройствах, регуляторах и т.д.

И всё же выносливость человека не безгранична. При достижении некоторого уровня давления, звук начинает вызывать неприятные ощущения, а при дальнейшем увеличении — вызывает болевые ощущения. Синусоидальные звуковые колебания с уровнем давления $L_P = 100$ dB, соответствуют одному из порогов неприятного ощущения. При уровне звукового давления $L_P = 130$ dB, возникает ощущение закладывания ушей. При уровне

звукового давления $L_p = 140$ dB, возникает боль в ушах.

До настоящего момента мы рассматривали физические характеристики звуковых колебаний. Но для простого слушателя все эти характеристики не представляют никакого интереса. Для него важно — какова громкость звука? Для того, чтобы можно было связать субъективное ощущение громкости с физическими характеристиками звуковых колебаний, принято использовать такую характеристику, как **уровень громкости** G . Условились за уровень громкости любого звука или шума считать равный по громкости относительный уровень звукового давления чистого тона на частоте 1000 Hz. За единицу уровня громкости принято считать (фон).

$$G = 20 \lg\left(\frac{P_{Э1000}}{P_0}\right), \text{ фон} \quad (3.3)$$

3.1.4 Кривые равной громкости

Сначала определим, что называют кривой равной громкости. Если мы слушаем чистый тональный звук, то на разных частотах необходимо будет изменять уровень звукового давления, чтобы громкость звучания оставалась неизменной. Измеряя ряд значений давлений при разных частотах для равной громкости, получим графическую зависимость $P_{зв}(f)$. Это и есть **кривая равной громкости**.

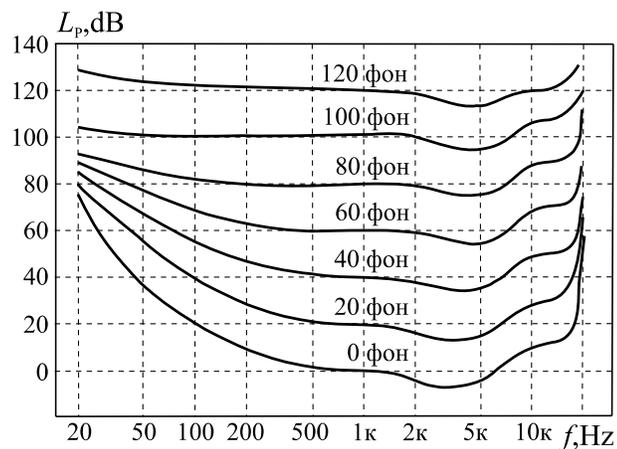


Рис. 3.4: Семейство кривых равной громкости.

Кривые равной громкости при разных уровнях давлений отличаются. Как видно из рисунка (3.4), при высоких уровнях давлений кривая становится более ровной, чем при низких уровнях и чувствительность слуха на

всех частотах звукового диапазона примерно одинакова. При низких уровнях давлений, чувствительность слуха, на разных частотах, существенно отличается. На основании этого можно сделать вывод, что тихое прослушивание фонограмм по частотному балансу будет отличаться от громкого прослушивания.

Чтобы учесть это свойство слуха, в регуляторах громкости звуковой аппаратуры применяют так называемую тонкомпенсацию. Для этого используют фильтр-корректор амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) с изменяемой степенью коррекции в зависимости от положения регулятора громкости. Само собой разумеется, что АЧХ такого фильтра должна соответствовать форме кривых равной громкости.

3.1.5 Динамический диапазон слуха человека

Динамическим диапазоном слуха называют разницу между максимальным уровнем звукового давления, допустимым для прослушивания, и порогом слышимости.

$$\Delta L = L_{P_{max}} - L_{P_0}, \text{ dB} \quad (3.4)$$

На разных частотах динамический диапазон имеет разные значения. Его можно определять дифференциально, в зависимости от частоты, но тогда для наиболее полной его оценки необходимо использовать графическую зависимость.

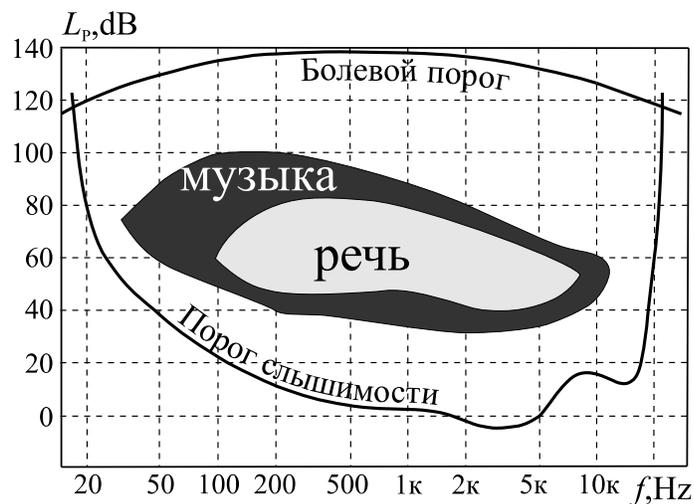


Рис. 3.5: Границы динамического диапазона слуха человека.

Кроме этого, можно также использовать интегральную оценку с использованием "розового" шума. Спектральный состав "розового" шума приближается к спектральному составу симфонической музыки. Разумеется, такой метод оценки даёт менее точный, более субъективный результат.

Из рисунка (3.5) видно, что акустическая музыка и речь занимает лишь часть динамического диапазона слуха. Однако необходимо отметить, что в некоторых современных стилях электронной музыки (например "New age") динамический диапазон может достигать 100 dB и выше.

3.1.6 Нелинейные свойства слуха

Для наиболее полного понимания нелинейных свойств слуха, нам необходимо воспользоваться такими определениями, как передаточная характеристика, нелинейные искажения и высшие гармоники из ряда Фурье. Более глубоко с ними можно познакомиться в курсе "Усилители".

Коротко напомним, что *передаточная* (или *проходная*) характеристика это графическая зависимость выходного сигнала от входного, при передаче его через четырёхполюсник. Существует два типа передаточных характеристик: статическая и динамическая. *Статическая* характеристика определяет зависимость мгновенного значения выходного сигнала от мгновенного значения входного сигнала. *Динамическая* характеристика определяет зависимость действующего значения выходного сигнала от действующего значения входного. В идеале статическая проходная характеристика должна представлять собой прямую линию. Тогда форма выходного сигнала будет точно повторять форму входного. Если статическая передаточная характеристика имеет кривизну, то выходной сигнал будет передан с искажениями. Такие искажения называют *нелинейными*. Если на вход четырёхполюсника подаётся чистый синусоидальный сигнал, а на выходе сигнал искажен, то в его составе, в соответствии с преобразованием Фурье, присутствует ряд высших гармоник. Поэтому такие искажения иногда называют *гармоническими*.

Слуховой аппарат человека тоже можно представить в виде четырёхполюсника, на вход которого поступает акустический сигнал, а с выхода электрические импульсы передаются в мозг. При прослушивании звуков с относительно небольшими уровнями давлений, до 60 dB, они будут восприниматься без заметных искажений. Однако, при дальнейшем увеличении уровня звукового давления, человек начинает слышать звук с нелинейными искажениями, хотя исходный акустический сигнал будет излучаться без искажений. Чем больше будет превышать уровень звукового давления значение 60 dB, тем более искаженным будет восприниматься звук. На основании этого можно сказать, что слух человека обладает нелинейной пере-

даточной характеристикой при уровнях звукового давления, превышающих 60 dB. На рисунках (3.6) показаны: первая, основная гармоника с разными уровнями и мнимые высшие гармоники.

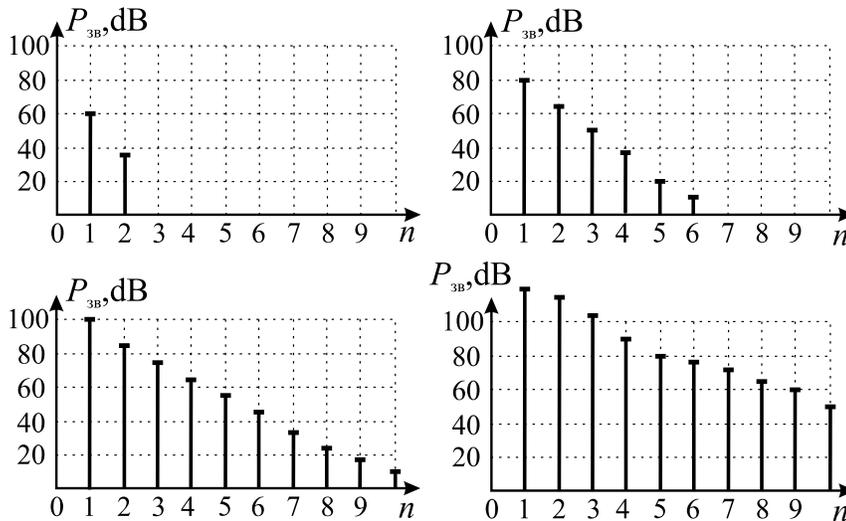


Рис. 3.6: Соотношение мнимых высших (n) гармоник при разных уровнях первой гармоники.

Итак, можно сделать вывод, что для максимально комфортного прослушивания музыки и для наиболее объективной оценки качества фонограмм, необходимо стремиться создавать условия с минимальным уровнем посторонних шумов и с небольшим уровнем громкости фонограммы в пределах требуемого динамического диапазона. В противном случае, звукорежиссёр рискует не объективно оценивать качество фонограммы. Разумеется, что при контроле фонограмм с динамическим диапазоном, превышающим 60 dB, приходится искать разумный компромисс. В этом случае можно порекомендовать слушать фонограмму несколько раз с разными уровнями: отдельно контролировать нижнюю часть динамического диапазона и отдельно — верхнюю.

Хочу обратить особое внимание звукорежиссёров, работающих в студиях звукозаписи, на это, казалось бы не очень важное свойство слуха, поскольку контрольное прослушивание фонограмм при уровнях давления близких к 100...120 dB достаточно распространенная ошибка.

3.1.7 Последствия воздействия звука на слух

Итак, нам уже известно, что динамический диапазон слуха человека достаточно широк. Однако воздействие громких звуков на слух не прохо-

дит для него бесследно. В условиях громкого шума происходит адаптация слуха, которая сопровождается повышением порога слышимости. Другими словами понижается чувствительность слуха. Такое изменение порога слышимости может быть обратимым или необратимым. Если человек находится в течение нескольких часов в шумных условиях, при уровнях звукового давления до 100...110 dB, то его порог слышимости в среднем повышается на 20...30 dB. Степень повышения порога слышимости зависит от частотного спектра звука, от длительности звучания пиковых уровней давления и от ряда других факторов. После этого, в течение 12 часов, в тишине, слух восстанавливается примерно на 90%. Через сутки отдыха слух восстанавливается почти на 100%. Но всё же не стоит обольщаться. При систематическом повторении таких истязаний над своим здоровьем длительное время, слух начинает ухудшаться необратимо. Такую потерю слуха восстановить или излечить невозможно.

Существует несколько гипотез, объясняющих причины таких изменений. Согласно одной из них, при длительном и сильном возбуждении нервных окончаний волосковыми клетками, нервы разрушаются и больше не восстанавливаются. Согласно второй, происходит разрыв волосковых клеток, после чего они тоже не восстанавливаются. Наиболее вероятно, что в определённой мере, в разных случаях имеет место и первый вариант и второй.

По мере увеличения возраста человека его слух также необратимо ухудшается. Причём, более всего ухудшается чувствительность слуха на высоких частотах. Особенно активно происходит потеря слуха, если человек вынужден длительное время находиться в шумных условиях. Даже если средний уровень шума при этом находится в диапазоне 60...90 dB.

Необходимо обратить особое внимание на опасность повреждения слуха при прослушивании звука через головные телефоны.

Как уже было сказано ранее, звук воздействует на человека комплексно — через слуховой аппарат и через тело. Вибрации, действующие на тело, усиливают субъективное ощущение силы звука, особенно в низкочастотной области звукового диапазона. Низкочастотные удары басовых барабанов, вибрации от бас-гитары и контрабаса существенно усиливают слуховое впечатление.

Но при прослушивании музыки через головные телефоны звук воздействует только через уши. Причём, даже если головные телефоны высококачественные (что, согласитесь, бывает не всегда), ощущение большой силы звука не возникает. При достижении звукового давления в слуховом проходе, близкого к предельным значениям — 120...130 dB, у слушателя появляется лишь только раздражающий зуд в ушах. А если прослушивание происходит в условиях шумной улицы с множеством других отвлекающих

факторов, то такой слушатель имеет реальный шанс достаточно быстро, необратимо и существенно потерять свой слух.

В такой ситуации можно порекомендовать быть внимательными к своим ощущениям и не злоупотреблять здоровьем, поворачивая регулятор громкости радиоприемника или плеера до максимального предела.

3.1.8 Восприятие фазовых характеристик звука

Было проведено ряд опытов по определению чувствительности слуха к фазовым характеристикам звука. На основании этих опытов можно утверждать, что временные задержки звуковых составляющих, приводящие к смещению фаз, существенно влияют на восприятие звука.

Опыты проводились при двух разных условиях:

- при прослушивании через головные телефоны, с достаточно хорошей акустической изоляцией между левым и правым ушами,
- при прослушивании через широкополосные акустические системы в помещении.

Рассмотрим последовательно характерные особенности слуха, которые были проявлены в этих опытах.

Первое, что следует отметить, это невысокая чувствительность к сдвигу фаз между правым и левым каналами при прослушивании через головные телефоны. Причём, эта чувствительность проявляется наиболее заметно, если сдвиг фаз изменяется во времени. Изменение сдвига фаз может происходить скачкообразно или плавно. В качестве такого сигнала могут быть несколько одинаковых звуковых импульсов, следующих друг за другом, с небольшими паузами между ними и отличающимися по фазе в правом и левом каналах, или тональный стереосигнал с различной модуляцией фаз в каналах.

Если временная задержка между каналами, вызывающая сдвиг фаз, становится меньше 0,5...1 мс, то чувствительность слуха к ней заметно уменьшается. Мозг, анализирующий информацию о звуке между левым и правым каналами, не может различать временную разницу меньше указанного значения. Исходя из этого, можно определить максимальную частоту тонального сигнала, для которого человек может различать фазовый сдвиг 180° . Предельная частота будет равна примерно 1000 Hz. На более низких частотах, изменение фаз звуковых колебаний между каналами, субъективно воспринимается как перемещение в пространстве источника звука. При этом никакого заметного влияния на "окраску" звука не происходит.

Совсем иная ситуация возникает при бинауральном прослушивании звука с фазовой модуляцией в каналах, через акустические системы в помещении.

Излучаемые двумя или более акустическими системами звуковые поля суммируются, в результате этого в пространстве формируется сложная интерференционная картина со всеми присущими ей свойствами. Наиболее существенными при субъективной оценке проявлениями в таких условиях, являются изменение неравномерности звукового давления в пространстве и "эффект гребенчатого фильтра". Особенно заметными становятся эти явления при динамическом изменении фаз сигналов в каналах.

Отличительной особенностью субъективного восприятия звука в помещении по сравнению с прослушиванием через головные телефоны, является наличие дополнительной "окраски", которая формируется благодаря "эффекту гребенчатого фильтра". Именно это свойство проявляется наиболее ярко.

3.1.9 Восприятие звука по тембру

Что же такое тембр звука? На сегодняшний день не существует абсолютно однозначного определения такой характеристики звука, как тембр. Много известных ученых—исследователей давали свои определения, но со временем, с развитием науки и техники эти определения в той или иной мере дорабатывались и уточнялись. Поэтому я только попытаюсь выделить из общего ряда наиболее важное.

Изначально тембр можно определить как окраска звука. Эту характеристику в большей мере можно назвать субъективной, чем объективной, по той причине, что она связана с достаточно большим числом разнообразных объективных характеристик звука. Полный перечень таких характеристик до настоящего времени однозначно ещё не определён. Однако ряд из них мы можем обсудить и оценить.

Предположим, что мы сравниваем два звука с одинаковым уровнем и одинаковой тональностью, которые воспроизводятся однотипными музыкальными инструментами — например щипковыми струнными. Почему же звучание таких инструментов может достаточно сильно отличаться?

Разница звучания будет в первую очередь определяться следующими характеристиками:

- разницей частотного спектра звуков,
- формой огибающей для каждого обертона,
- наличием субгармоник,

- фазовой разницей каждого обертона и субгармоник.

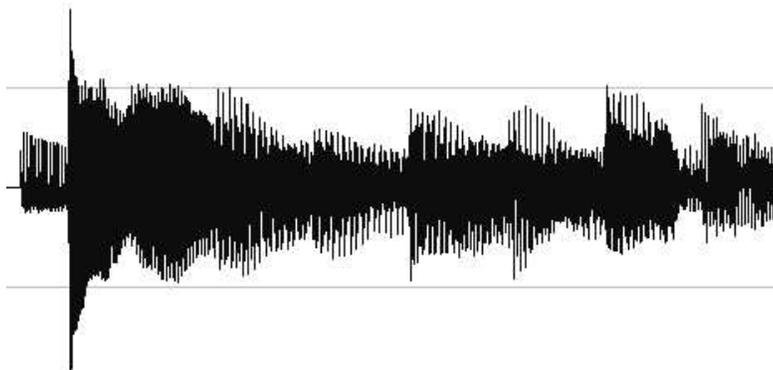


Рис. 3.7: Волновая форма музыкального фрагмента, исполняемого на акустической гитаре.

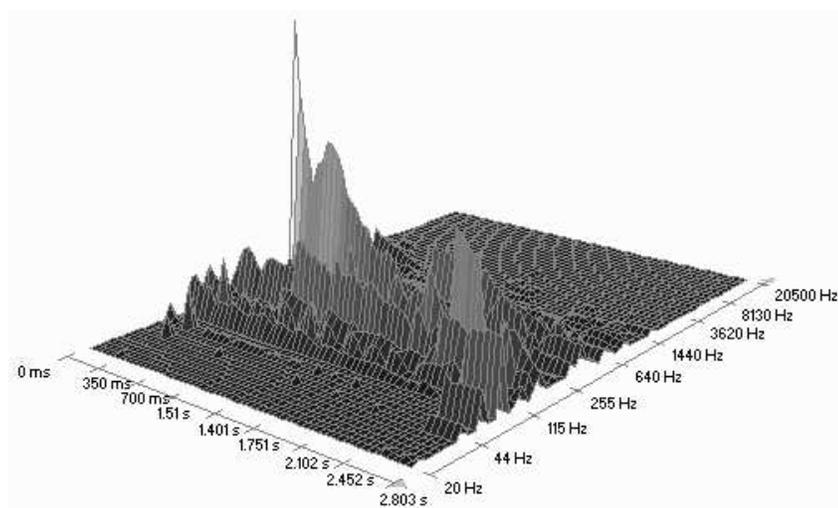


Рис. 3.8: Спектрограмма предыдущего музыкального фрагмента.

Рассмотрим эти характеристики более детально по пунктам.

Если разложить функцию зависимости звукового давления от времени $p_{зв}(t)$, другими словами волновую форму, с помощью преобразования Фурье на элементарные гармонические составляющие, то получим некую сумму синусоидальных звуковых колебаний с определенными, изменяющимися во времени, амплитудами, частотами и фазами.

$$p_{зв}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} P_{max.n} \cdot \sin(n \cdot \omega t + \varphi_n) \quad (3.5)$$

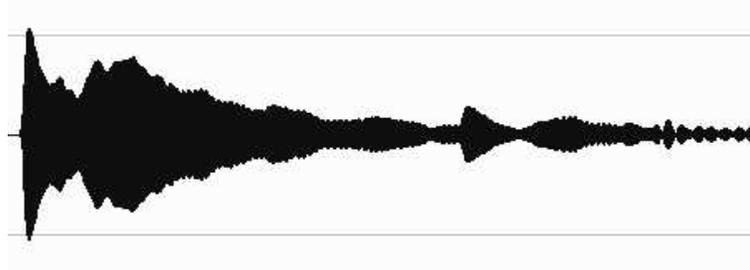


Рис. 3.9: Волновая форма музыкального фрагмента после фильтрации полосовым фильтром на частоте 392 Hz (нота Соль).

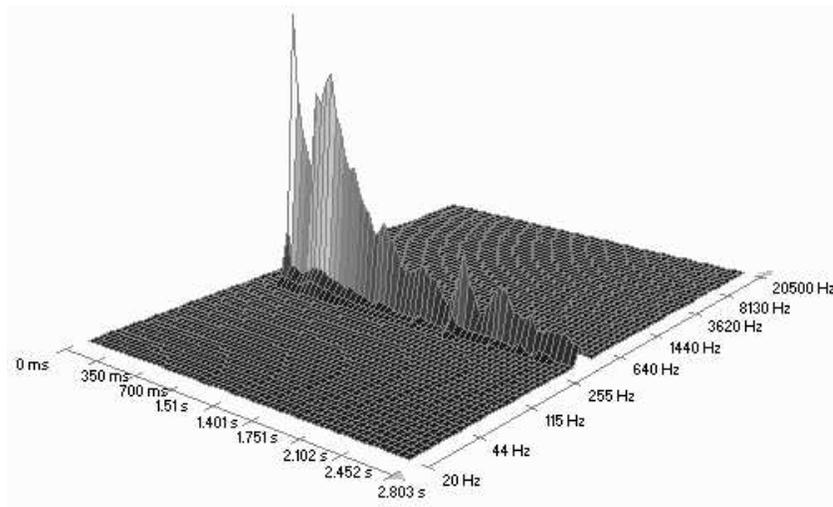


Рис. 3.10: Спектрограмма музыкального фрагмента после фильтрации полосовым фильтром на частоте 392 Hz.

Тембр звучания в значительной мере будет определяться количественным и качественным составом гармонических колебаний из приведенного ряда (наличием чётных, нечётных или всех гармоник).

Кроме этого, если построить графическую зависимость амплитуды от времени для каждой составляющей ряда, то можно получить форму их огибающих. Ряд практических опытов свидетельствует о том, что формы огибающих также оказывают значительное влияние на субъективное восприятие звука. Изменение формы огибающей, особенно во время атаки, может изменить звук до неузнаваемости.

На рисунках (3.7, 3.8, 3.9, 3.10) показаны волновые формы и спектрограммы звучания акустической гитары с полным спектром частот и в узкой полосе частот, после фильтрации узкополосным фильтром на частоте

392 Hz. После фильтрации можно достаточно хорошо рассмотреть форму амплитудной огибающей выделенной гармоники.

В результате взаимодействия между гармоническими составляющими, с близкими частотами, могут возникать новые, разностные гармоники, с частотами более низкими, чем основная, первая гармоника. Эти составляющие называют *низкочастотными биениями* или субгармониками. Такая ситуация может возникнуть при суммировании нескольких разных звуков (например при колебании двух струн в унисон).

И последний пункт, который нам необходимо рассмотреть — это фазовые характеристики звука. До недавнего времени считалось, что человек не различает сдвиг фаз гармонических составляющих в сложных звуках. Однако последние исследования в области психоакустики свидетельствуют об обратном. Таким образом можно говорить, что фазовые задержки составляющих преобразования Фурье, тоже влияют в некоторой мере на тембр звука.

Во время чтения этих строк у читателя могут возникнуть сомнения — есть ли практическая польза от всех этих "мелочей" и будет не прав. Можно назвать как минимум две сферы звуковой индустрии, где эти знания просто незаменимы. Это разработка алгоритмов компрессии звуковой информации и разработка новейших систем моделирования объемного звука. Существует ряд различных алгоритмов компрессии - ATRAC, MPEG, MUSICAM, ASPEC и др., где используются в полной мере психофизиологические особенности слуха человека. Но ещё более важная область, на мой взгляд, это исследования и разработка адаптивных математических моделей объемных звуковых полей. История развития звукотехники начинается от простого монозвука, затем переходит к массовому использованию стереозвука. При этом делаются попытки перейти на квадразвук, который не получил широкого распространения. В настоящее время достаточно активно внедряются системы объемного звука: Dolby Digital 5.1, Dolby Digital EX 6.1 и другие. Однако воспроизводимый этими системами звук ещё далёк от того, который можно слышать при записи в студии. Поэтому сотни научно-исследовательских коллективов продолжают активную работу по изучению психоакустики и использованию её для проектирования новых систем озвучивания. И, как мне представляется, звукорежиссёр—профессионал никак не может обойти эту сферу знаний.

3.1.10 Направленные свойства слуха

Слух человека позволяет определять направление на источник звука и расстояние до него. Другими словами, слух позволяет *локализовать ис-*

точник звука. Рассмотрим причины и предельные возможности этой способности.

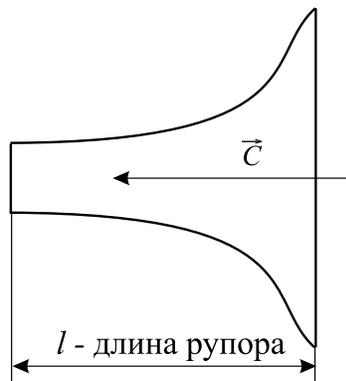


Рис. 3.11: Форма рупора в разрезе.

Ушная раковина и слуховой проход представляют собой своего рода рупор. Забегая несколько вперед, отмечу, что рупор обладает направленными свойствами, как при приеме звука, так и при излучении. Направленные свойства рупора начинают проявляться при условии, если его длина равна или больше четверти длины звуковой волны ($l \geq \frac{\lambda}{4}$). Необходимо отметить, что кроме строения уха, на локализацию источника влияют размеры и строение головы слушателя. Благодаря

возникновению акустической тени от головы, степень направленности слуха немного повышается.

На основании этого можно сделать вывод, что наиболее эффективно эти свойства проявляются в диапазоне частот от 5...7 кГц до 20 кГц. Точность определения направления при этом равна углу примерно 20°.

Итак, при моноуральном слушании направленные свойства слуха будут проявляться, если в спектре частот будут присутствовать высокочастотные гармоники. В противном случае, при наличии в спектре только низкочастотных гармоник, определить направление на источник звука или очень сложно или невозможно. Это будет зависеть от верхней границы частотного спектра.

При бинауральном слушании появляется так называемый **стереоакустический эффект**. Бинауральное слушание заметно повышает чувствительность слуха к ряду характеристик звука. Это связано с тем, что при слушании одним ухом происходит субъективная оценка абсолютных параметров звука, а при слушании двумя ушами к абсолютной оценке добавляется и относительная, сравнительная оценка. При сравнении двух близких параметров легче заметить разницу или сходство между ними, чем при оценке одного параметра. Благодаря такому свойству, заметно повышается дифференцирующая способность слуха.

Так, при бинауральном слушании, понижается порог слышимости в среднем на 6...8 дВ, в диапазоне звуковых частот, для "розового" шума. Но в наибольшей степени повышается точность локализации источника звука. Это возможно вследствие того, что слушатель различает разницу фаз проходящей волны.

Звуковая волна проходит некоторое расстояние l_L от источника до левого уха и некоторое расстояние l_R до правого уха. Когда источник находится строго на центральной оси слушания, прямо перед слушателем или сзади него, тогда $l_L = l_R$ и фронт волны будет достигать обоих ушей одновременно. Когда источник находится под углом к центральной оси слушания, тогда $l_L \neq l_R$ и фронт волны будет приходить с опережением или запаздыванием к одному уху относительно другого. Как следствие, в один и тот же момент времени, звуковая волна будет приходить к обоим ушам с разными фазами.

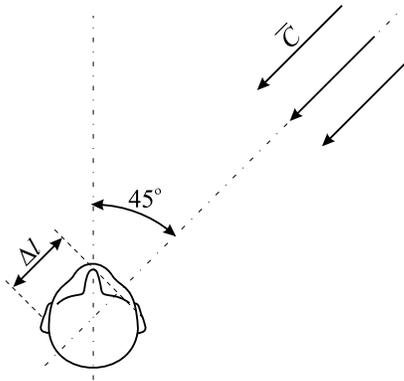


Рис. 3.12: Вектор скорости звука \vec{c} под углом 45° к оси слушания.

Теперь, для большей наглядности, рассмотрим конкретный пример. Допустим, что источник звука находится под углом 45° к центральной оси слушания, на достаточно большом расстоянии. Определим — на какой частоте f гармонического колебания возникнет сдвиг фаз 90° между волнами, пришедшими к левому и правому ушам? Напомню, что сдвиг фаз 90° соответствует четверти длины волны.

Предположим, что расстояние между ушами слушателя равно 16 см,

$$\text{тогда : } \Delta l = 11,3 \text{ см} = 0,113 \text{ м}$$

$$\text{временная задержка : } \Delta t = \frac{\Delta l}{c} = \frac{0,113}{340} = 3,32 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$$

$$\text{период : } T = \frac{\Delta t}{\Delta \varphi} \cdot 360^\circ = \frac{3,32 \cdot 10^{-4}}{90^\circ} \cdot 360^\circ = 1,328 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$$

$$\text{частота : } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,328 \cdot 10^{-3}} = 753 \text{ Hz}$$

Из данного примера видно, что сдвиг фаз 90° произойдет на частоте 753 Hz. А это уже средние частоты. И гораздо больше источников звука попадают в эту область частот. К ним относятся речь, музыка и множество других звуков. Разумеется, чем выше частота колебаний, тем к большему сдвигу фаз приведет задержка или опережение Δt и, соответственно, будет выше точность локализации источника звука. Бинауральное слушание позволяет определять направление на источник в диапазоне частот от нескольких сотен герц до 20 kHz, и точность определения повышается до $3 \dots 4^\circ$.

Как уже упоминалось выше, слушатель может также определять и расстояние до источника, правда точность определения невысока. В пределах нескольких метров погрешность будет около 20...30%, но при больших расстояниях погрешность существенно возрастает. Если при малых расстояниях определение дальности до источника происходит в основном за счёт направленности слуха, то при больших — в основном за счёт изменения интенсивности звука и изменения спектральных характеристик. Однако точность определения расстояния не так уж и важна, более важно то, что слушатель слышит перспективу, объемные характеристики звукового поля. Например, он может слышать относительное расположение музыкальных инструментов симфонического оркестра в пространстве.

И в заключение данной темы, хочу обратить внимание читателя на то, чему обычно уделяют незаслуженно мало внимания. Дело в том, что человек обладает способностью к обучению благодаря памяти. Не является исключением и слух. Мы имеем слуховую память, запоминаем отдельные звуки и целые слуховые образы. Ни у кого не вызывает сомнения наличие зрительной памяти, способность узнавать визуально знакомых людей и предметы. Аналогично мы запоминаем и узнаём слуховые образы. Так вот определение целого ряда характеристик звука, их субъективная оценка происходит не только за счёт их измерения, но и за счёт сравнения их со слуховыми образами. В том числе и локализация источника звука в значительной мере зависит от слухового опыта. По этой же причине могут возникать и ошибки в определении характеристик звука, если слушатель попадает в непривычную, незнакомую среду. К этому можно добавить, что максимальная точность локализации источника звука возможна только при комплексной оценке всех, перечисленных выше, характеристик звуковых колебаний. Взаимодополняя и уточняя различные параметры звука, можно составить наиболее полный и точный слуховой образ.

3.2 Эффект маскировки

В реальных условиях мы слышим множество различных звуков, отличающихся по спектральному составу, по интенсивности, по локализации и т. д. Каждый из этих звуков может влиять в той или иной мере на восприятие слушателем других звуков. Такое влияние, при котором у слушателя ослабляется способность различать часть звуковых составляющих из общего суммарного спектра, называют *эффектом маскировки*. Эффект маскировки может проявляться по-разному при различных сочетаниях характеристик звуковых составляющих. Рассмотрим более детально особенности данного эффекта.

3.2.1 Маскировка звука по уровню

Одним из параметров звуковых колебаний, влияющим на маскирование, является уровень мешающего звука (*маскёра*). При повышении уровня маскёра, у слушателя будет повышаться порог слышимости и, как следствие, будет понижаться чувствительность к основному звуковому сигналу. Если повышенный порог слышимости превысит уровень полезного сигнала, то слушатель перестанет его различать. Можно утверждать, что чем выше уровень маскёра, тем больше повышается порог слышимости и, тем сильнее будет маскироваться полезный сигнал.

Уровнем маскировки называют разницу между порогом слышимости при воздействии маскёра L_{pm} и порогом слышимости при его отсутствии L_{p0} .

$$M = L_{pm} - L_{p0}, \text{ dB} \quad (3.6)$$

Представляет интерес вопрос — как будет зависеть порог слышимости от различного характера маскёров?

Если маскёр представляет собой чистый тональный звук, то область повышения порога слышимости напоминает резонансную кривую. Причём, эта кривая совпадает с соответствующей по частоте критической полоской слуха.

Если маскёром является звуковой сигнал с более широким спектром частот, то порог слышимости повысится во всех критических полосках слуха, с которыми совпадают частотные составляющие маскёра.

Если маскёр представляет собой "белый" шум, тогда порог слышимости повысится равномерно во всём диапазоне звуковых частот.

3.2.2 Маскировка звука в частотной области

Практические опыты свидетельствуют о том, что эффект маскировки проявляется неодинаково в разных областях частотного спектра и зависит от частотных свойств маскёра и маскируемого звука.

Эффект маскировки будет сильнее, если маскёр охватывает более низкочастотную часть спектра, чем маскируемый звук. Проще говоря, басы являются более сильным маскёром для высокочастотных звуков, чем наоборот.

Если маскёр и маскируемый звук являются чистыми тональными сигналами (рисунок 3.13), маскировка будет тем сильнее, чем ближе будут частоты обоих сигналов, но до определённого предела. Если разница частот не будет превышать несколько десятков герц, тогда возникнут низкочастотные биения и эффект маскировки будет ослаблен. В то же время, если разница частот будет слишком велика (по крайней мере на несколько поряд-

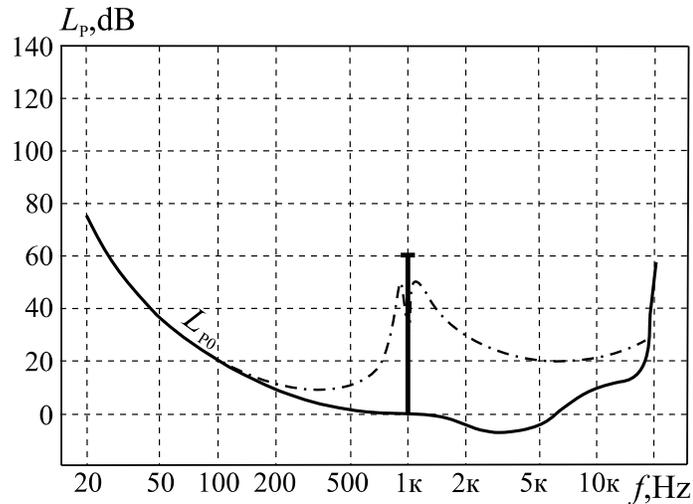


Рис. 3.13: Повышение порога слышимости (штрих-пунктирная кривая) при тональном маскёре с уровнем давления 60 дВ и частотой 1 кГц.

ков), то эффективность маскировки тоже заметно уменьшится. Необходимо обратить внимание ещё на одну особенность. Для тонального сигнала, амплитудно-частотная зависимость кривой маскировки асимметрична относительно шкалы частот. В сторону увеличения частот порог слышимости убывает медленнее, чем в сторону понижения.

К сказанному можно добавить, что чем шире спектр частот маскёра относительно спектра частот маскируемого звука, тем сильнее маскировка.

3.2.3 Эффект Хааса

Если в пространстве находятся два отдельных источника, которые излучают одинаковые звуки, с равными интенсивностями, но один из них опережает по времени другой, то для слушателя, опережающий звук будет доминировать над другим. Такую особенность восприятия звука называют **эффектом Хааса** или эффектом предшествования.

Эффект предшествования оказывает дополнительное влияние на локализацию источника звука. Его можно наблюдать при условии, если временная задержка между двумя звуками не превышает значение 50 мс. В этом случае можно утверждать, что опережающий звук является маскёром для задержанного.

Если звук представляет собой последовательность различных коротких импульсов и временная задержка между ними равна или превышает значе-

ние 50 мс, то тогда они воспринимаются как эхо. Если звук состоит из длинных импульсов (например, звучание смычковых струнных инструментов), то восприятие их как эхо, будет заметно при задержках более 100...200 мс.

3.2.4 Маскировка звука во временной области

Эффект маскировки зависит и от временных характеристик звуковых сигналов.

На него влияют:

- длительность маскёра и маскируемого звука,
- момент начала каждого из сигналов при одновременном звучании,
- последовательность возникновения при неодновременном звучании.

В данный момент хочу обратить внимание читателя на то, что эффект маскировки, как и многие другие свойства слуха, зависит от ряда характеристик звуковых колебаний комплексно. Другими словами, между этими зависимостями часто существуют корреляции. Однако разделение этого вопроса на отдельные составляющие, необходимо только для того, чтобы облегчить процесс изучения материала читателем. В остальных же случаях, для более полного описания эффекта, характеристики предпочтительнее рассматривать комплексно, при их взаимном влиянии.

Первое, что необходимо отметить — чем больше длительность маскёра и, чем меньше длительность маскируемого звука, тем сильнее маскировка.

Второе — если первым появляется маскёр, а затем маскируемый звук, при дальнейшем одновременном прослушивании, маскировка также будет сильнее, чем при обратной последовательности.

И третье — если маскёр и маскируемый звук не совпадают по времени, то маскировка всё же будет проявляться. В этом случае имеет значение порядок следования звуковых фрагментов и длительность интервалов между ними. Если маскёр появляется перед маскируемым звуком, то такая маскировка называется предшествующей или **предмаскировкой**, а если — после, то **постмаскировкой**.

Обращает на себя внимание третий случай, особенно для варианта с постмаскировкой. Такой эффект, вероятно, свидетельствует о том, что звуковая информация воспринимается человеком блоками. Мозг объединяет последовательность дискретных звуковых параметров в отдельные блоки, интегрирует их в отдельные слуховые образы и запоминает. В противном случае, сложно логически объяснить действие маскёра, возникающего после маскируемого звука. Ведь слуховой порог, как следствие, должен повыситься только после появления маскёра.

При предмаскировке эффект проявится сильнее, чем при постмаскировке. Причиной этому как раз и служит то, что к маскировке, возникающей благодаря общему интегрированию слухового образа, добавляется эффект повышения порога слышимости по уровню. При постмаскировке этот эффект отсутствует из-за обратного порядка следования звуков. Причём, повышение порога слышимости обладает инерционностью. После окончания действия маскёра, порог слышимости будет понижаться (восстанавливаться) постепенно. Этот эффект называют *слуховым впечатлением*. Время, в течение которого уровень громкости уменьшается на 8,7 фон, называют *постоянной времени слуха*. В среднем она равна примерно 0,15...0,20 с.

В дополнение к вышесказанному, можно добавить, что есть ещё понятие *самомаскировки*. Смысл самомаскировки заключается в повышении порога слышимости в результате воздействия основного звукового сигнала, и влиянии его на уровень восприятия самого себя.

3.2.5 Пространственное демаскирование

В предыдущих параграфах уже шла речь о дополнительных преимуществах, которые обеспечивает бинауральное слушание. Но существует ещё одно — способность различать звуки, которые при моноуральном слушании достаточно хорошо маскируются посторонними шумами.

Достаточно провести несложный эксперимент: в шумном помещении, заполненном разговаривающими людьми, необходимо попытаться слушать речь одного из присутствующих, сначала одним ухом (закрывая другое), а затем двумя. Разница будет заметна. В первом случае значительно сложнее выделить из общего шума требуемый звук.

Анализ причин такого свойства слуха разделим на две составляющие: акустическую и психофизиологическую.

Первая составляющая определяется способностью слуха локализовать источник звука в пространстве благодаря фазовым и спектральным различиям звуковых волн, приходящим к левому и правому ушам. Другими словами, можно ограничить зону слушания в пространстве по направлению и по дальности.

Вторая составляющая определяется способностью мозга сравнивать звуки со слуховыми образами в памяти и узнавать среди них знакомые, повышая тем самым степень идентификации. Такое сравнение происходит по характеру, тембру звучания и по смысловой информации, заложенной в наблюдаемый звук. Этим процессом можно управлять, в некоторой степени, волевым усилием слушателя. Должен заметить, что способность узнавать

и идентифицировать звуки позволяет получать и обратный эффект, при котором знакомые и привычные звуки слушатель не замечает, а незнакомые наоборот выделяет из общего звукового фона. В данном случае всё будет зависеть от того, на что направлено внимание слушателя.

3.2.6 Восприятие импульсных звуков

В этом параграфе речь пойдёт о восприятии коротких звуковых импульсных сигналов. Если длительность импульсов превышает 200 мс, то они воспринимаются как непрерывные звуки.

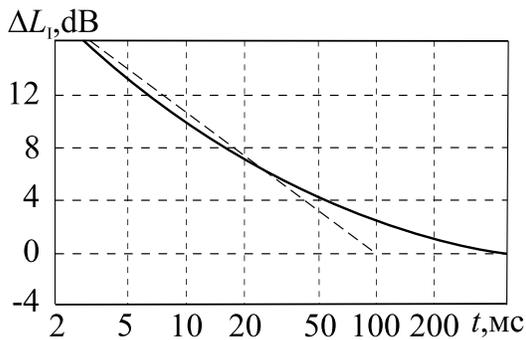


Рис. 3.14: Зависимость разности уровней интенсивностей от длительности импульса для равногромкого тонального сигнала на частоте 1 кГц.

в ту же частотную группу.

Первая характерная особенность восприятия импульсного тонального сигнала заключается в том, что уровень слышимой громкости зависит от длительности импульса. Чем короче импульс, при неизменном уровне интенсивности, тем меньше уровень слышимой громкости. Если необходимо сохранить неизменный уровень громкости, при уменьшении длительности импульса, то тогда необходимо повысить его уровень интенсивности. Зависимость между длительностью импульса и требуемым изменением уровня интенсивности для сохранения равной громкости, показана на рисунке 3.14.

Из этого следует, что громкость импульса определяется произведением интенсивности на длительность. На рисунке (3.15) показаны три импульса, которые будут восприниматься с одинаковой громкостью.

$$I_1 \cdot t_1 = I_2 \cdot t_2 = I_3 \cdot t_3$$

Для серии повторяющихся одинаковых импульсов, громкость восприятия

В этом случае, связь между характеристиками звуковых колебаний и их субъективным восприятием описывается в соответствии с теми закономерностями, которые мы уже рассмотрели ранее. Если длительность импульсов меньше 200 мс, то они будут восприниматься несколько иначе. Эту разницу восприятия нам и предстоит изучить.

На слух узкополосные шумовые звуки воспринимаются аналогично чистым тональным импульсам, попадающим

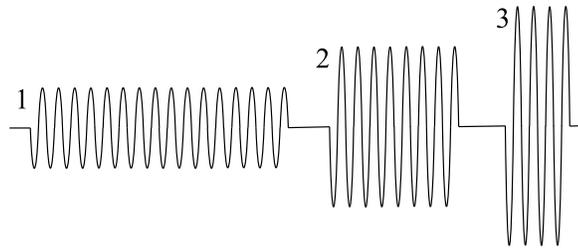


Рис. 3.15: Три тональных импульса, воспринимаемые с равной громкостью.

будет также зависеть от частоты их повторения. Чем выше частота повторения, тем с большей громкостью будут восприниматься импульсы, и — наоборот. Предельная частота повторений равна 100 Hz. Если частота повторений меньше 100 Hz, то данная закономерность проявляться не будет.

Что же касается широкополосных шумовых сигналов, то их громкость будет определяться помимо названных характеристик ещё и шириной частотного спектра.

Таким образом, можно утверждать, что громкость восприятия импульсных звуковых сигналов будет определяться средним, интегральным значением звуковой энергии (интенсивности) за некоторый интервал времени.

Существует ещё одна особенность восприятия импульсных звуков. Для тональных импульсов длительностью менее 200 мс, пороги слышимости будут более высокими, чем для непрерывного сигнала. Определить порог слышимости импульсов можно по формуле (3.7).

$$I_{\text{и.п.с.}} = I_0 \cdot \frac{200}{t} \quad (3.7)$$

где $I_{\text{и.п.с.}}$ — порог слышимости импульсного сигнала,

t — длительность импульса в миллисекундах.

Комментарий из практики. В Одесском театре Музыкальной Комедии длительное время существовала проблема с качеством дополнительного звукоусиления. По утверждениям главного режиссера, актеров и слушателей — "...в зале ничего не слышно...".

После изучения акустических условий в зрительном зале удалось определить ряд недостатков. В их числе было использование более десятка ненаправленных микрофонов, работающих в дальней зоне приёма (около 3–4 метров).

Помимо этого, все микрофонные линии со входов микшерной консоли были просуммированы в один общий моноканал. В итоге получалась невероятная смесь сигналов. После чего, усиленная суммарная звуковая смесь, подавалась на десяток акустических систем, распределённых по порталам, козырьку, потолку и боковым лоджиям.

Вероятно читатель уже понимает — насколько много разных временных задержек возникало для отдельных звуковых составляющих по пути следования сигнала от источника

звука до микрофонов, далее по тракту звукоусиления, и затем от акустических систем до слушателя. Попросту говоря, в результате получался звуковой хаос.

После разделения каналов звукоусиления и выравнивания, по мере возможности, временных задержек, звук стал более разборчивым, но не достаточно. Дело в том, что вместе с основным, полезным звуком синхронно усиливался и маскёр, который состоял из низкочастотного топота по сцене, широкополосного шума вентиляторов и т. д.

Ситуацию удалось исправить только применением остронаправленных микрофонов, благодаря чему существенно снизился уровень маскёра. После этого в зале можно было достаточно легко различать даже шепот на сцене. Жалобы на качество звука прекратились.

Глава 4

Основы электроакустики

4.1 Основы теории преобразователей

4.1.1 Электромеханические преобразователи

Устройства, способные преобразовывать механическую энергию в электрическую или электрическую в механическую, называют *электромеханическими преобразователями*.

Та часть преобразователя, которая определяет его механические свойства и их связь со способностью преобразовывать механическую энергию в электрическую или наоборот — электрическую в механическую, называют *механической стороной преобразователя*. А та часть преобразователя, которая определяет его электрические свойства и их связь со способностью преобразования, называют *электрической стороной преобразователя*.

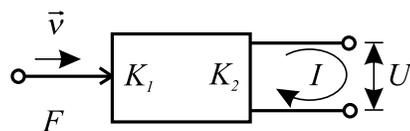


Рис. 4.1: Общая схема электромеханического преобразователя

Предполагается, что с механической стороны преобразователя есть безинерционная податливая поверхность, на которую воздействует сила, приводящая ее в движение с некоторой скоростью.

Для представления механической стороны используют две механические характеристики: \vec{F} — сила, воздействующая на преобразователь и \vec{v} — скорость.

Для представления электрической стороны используют две электрические характеристики: U - напряжение на электрических выводах преобразователя и I - ток, проходящий через них.

Величины K_1 и K_2 называют **коэффициентами электромеханической связи**.

Взаимосвязь между указанными характеристиками описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \vec{F} = K_2 \cdot \vec{I} + \bar{z} \cdot \vec{v} \\ \bar{U} = \bar{Z} \cdot \vec{I} + K_1 \cdot \vec{v} \end{cases}$$

Где: \bar{z} - механическое сопротивление механической стороны преобразователя, \bar{Z} - комплексное сопротивление электрической стороны преобразователя.

Если механическая сторона зажата ($\vec{v} = 0$), тогда $\bar{Z} = \frac{\bar{U}}{\vec{I}}$, или если выходная электрическая цепь разомкнута ($\vec{I} = 0$), тогда $\bar{z} = \frac{\vec{F}}{\vec{v}}$.

Преобразователи, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую, называют **генераторами**. А преобразователи, предназначенные для преобразования электрической энергии в механическую, называют **двигателями**.

Связь между механической и электрической стороной может осуществляться с помощью электромагнитного или электростатического поля, фотоэффекта, пьезоэффекта или способности материалов изменять электрическую проводимость при изменении силы механического воздействия на него (тензоэффект). Остановимся на этом подробнее.

4.1.2 Электромагнитные преобразователи

Данный принцип преобразования основан на законе электромагнитной индукции, а также на силовом взаимодействии между проводником, с проходящим по нему электрическим током, и магнитным полем. Такое силовое взаимодействие описывается в электротехнике "правилом левой руки".

В первом случае проводник помещается в статическое силовое магнитное поле и, при механическом смещении проводника под воздействием внешних механических сил, в нем индуцируется ЭДС (электродвижущая сила). Так создается генератор. Во втором случае проводник также помещается в статическое силовое магнитное поле, но по нему пропускают электрический ток, благодаря которому возникает его собственное динамическое магнитное поле. Между вторичным динамическим и первичным статическим магнитным полем возникает силовое взаимодействие, которое приводит про-

водник в движение, если он имеет определенную степень свободы. Так создается двигатель.

Первые два типа преобразователей можно условно назвать электродинамическими. Существует третий тип преобразователей, в которых процесс преобразования осуществляется за счет изменения магнитного поля, точнее — величины магнитного потока. Такой тип преобразователя можно условно назвать магнитоэлектрическим. Как и в первых двух случаях, на его основе может быть создан и генератор и двигатель.

Помимо указанных выше типов существуют еще и магнитострикционные преобразователи, но в звуковом диапазоне частот они не эффективны, поэтому их мы рассматривать не будем.

4.1.3 Электростатические преобразователи

Принцип действия электростатических преобразователей основан на силовом взаимодействии между электрическими зарядами. В простейшем случае такие преобразователи представляют собой две плоские обкладки конденсатора, на которые подается поляризующее напряжение. Благодаря этому напряжению происходит перераспределение электрических зарядов на обкладках. На той обкладке, к которой подключен положительный потенциал, накапливаются отрицательные заряды, а на обкладке, к которой подключен отрицательный потенциал, накапливаются положительные заряды. В результате этого между обкладками формируется силовое электростатическое поле.

Если изменить величину поляризующего напряжения, то и сила взаимодействия между обкладками изменится. Это приведет к механическому смещению обкладок, друг относительно друга, если хотя бы одна из них имеет определенную соответствующую степень свободы. Такой преобразователь является двигателем.

Если к одной из заряженных обкладок приложить механическую силу, которая приведет к ее смещению относительно другой обкладки, при этом необходимо учесть, что с изменением расстояния между зарядами на обкладках изменится и сила взаимодействия между ними, то произойдет перераспределение зарядов. В свою очередь это приведет к соответствующему изменению потенциалов на обкладках, если в цепи подачи поляризующего напряжения достаточно большое электрическое сопротивление. Такой преобразователь является генератором.

Более конкретно электродинамические и электростатические преобразователи мы рассмотрим в последующих разделах.

4.1.4 Пьезоэлектрические преобразователи

Принцип действия преобразователей данного типа основан на пьезоэффекте. Существует ряд керамических материалов, которые обладают способностью изменять электрические потенциалы на некоторых своих гранях, если к ним приложена механическая сила. В то же время, если к этим граням приложить электрическое напряжение, то это вызовет механическую деформацию данного материала. Для того чтобы можно было эффективно использовать такие свойства пьезокерамических материалов, необходимо обеспечить надежный электрический контакт с поверхностью соответствующих граней на молекулярном уровне. По этой причине обеспечение контакта простым механическим подсоединением проводников к граням не позволяет реализовать пьезоэффект. Требуемый электрический контакт может быть обеспечен металлизацией соответствующих поверхностей с помощью химических, гальванических методов. Однако гальваническая металлизация граней пьезокерамических материалов отличается не очень высокой надежностью и долговечностью. Со временем часто можно наблюдать отслоение металлизации от поверхности кристаллов, что приводит к заметному ухудшению качества работы пьезопреобразователей. Вероятно этот, наиболее существенный недостаток и ограничивает применение пьезокерамических преобразователей.

К пьезоэлектрическим материалам относятся такие, наиболее распространенные виды керамики, как ТБК-3, НБС-1, ЦТСНВ-1, ЦТС-19, ЦТС1-23, ЦТСС-1, ЦТБС-3 и др.

Известны два вида пьезоэффекта — продольный и поперечный. При продольном пьезоэффекте вектор механической силы совпадает с направлением поляризации кристалла. При поперечном — вектор силы направлен перпендикулярно направлению поляризации.

4.1.5 Анализ свойств преобразователей методом электро-механических аналогий

Для того чтобы можно было объективно оценить качество работы преобразователя, необходимо определить критерии оценок. Для этого удобно использовать понятие идеального преобразователя. Будем считать *идеальным* такой преобразователь, который обеспечивает преобразование энергии механических или электрических колебаний без потерь, т.е. с КПД = 100%, в бесконечно широкой полосе частот и с коэффициентами нелинейных, динамических и интермодуляционных искажений равными нулю.

Методы оценки электрической стороны достаточно хорошо известны и относительно просты. Однако оценка свойств механической стороны пре-

образователя представляет собой более сложную задачу, решение которой не позволяет получить абсолютно достоверные и точные результаты. Для того чтобы упростить в некоторой мере решение такой задачи, принято использовать метод электромеханических аналогий. Данный метод основан на замене элементарных механических узлов в колебательной системе на элементарные узлы в электрической схеме, поведение которых можно описать математически одинаково с достаточно высокой точностью совпадения в указанных системах.

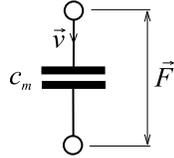
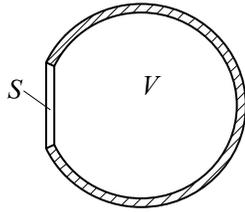
Рассмотрим некоторые аналогии между механическими и электрическими колебательными системами:

- механическая сила \vec{F} соответствует электрическому напряжению U ,
- скорость движения \vec{v} соответствует электрическому току I ,
- механическое сопротивление \bar{z} соответствует электрическому сопротивлению \bar{Z} ,
- невесомая пружина с зафиксированным одним концом соответствует последовательному включению в электрическую цепь конденсатора,
- невесомая пружина, через которую передается механическая сила, соответствует параллельному подключению к электрической цепи конденсатора,
- жесткая механическая линия, обладающая массой m и, следовательно, инерцией, соответствует последовательному включению в электрическую цепь индуктивности,
- резонатор Гельмгольца соответствует последовательному электрическому резонансному контуру.

Используя электрические аналоги механических узлов преобразователя, можно составить электрическую схему. Затем можно составить схему электрической стороны, связать эти две схемы коэффициентами преобразования и, на основе полученной объединенной электрической схемы, рассчитать амплитудно-частотные характеристики преобразователя. В идеале они должны быть линейными.

4.1.6 Электрические аналоги акустических элементов

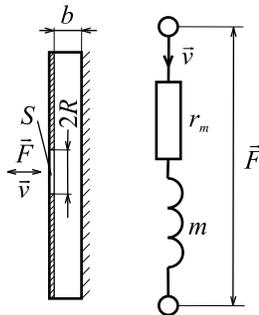
Рассмотрим некоторые примеры акустических элементов, механические колебательные свойства которых описываются аналогично колебательным свойствам электрических компонентов.



Полая сфера, с внутренним объемом V , и открытой горловиной, площадью S . Где c_m — гибкость колебательной системы "воздух — сфера", \vec{v} — колебательная скорость, \vec{c} — скорость звука и \vec{F} — сила, действующая на массу воздуха в области горловины данной колебательной системы, j — мнимая единица комплекс-

ного числа.

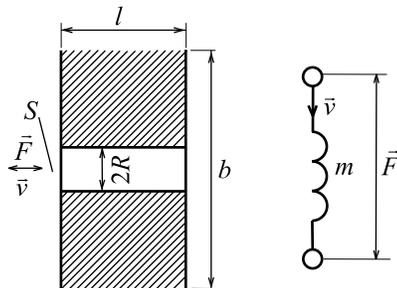
$$\bar{z}_{\text{BX}} = j \frac{1}{\omega \cdot c_m}; \quad c_m = \frac{V}{\rho c^2 S^2}$$



Круглое отверстие с радиусом R и площадью S (в бесконечно тонкой стенке), излучающее в одну сторону, при $b \ll \lambda$. Где m — масса воздуха, r_m — акустическое активное сопротивление.

$$\bar{z}_{\text{BX}} = r_m + j\omega m; \quad r_m = \frac{\pi \rho \omega^2 R^4}{2c}$$

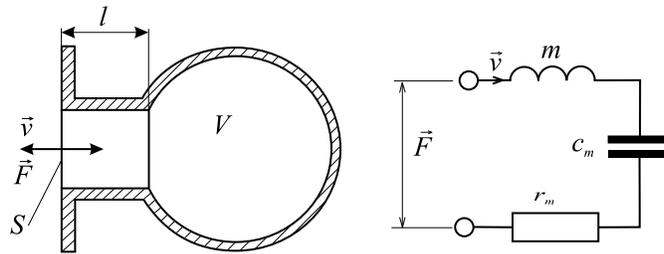
$$m = \frac{\pi^2 \rho R^3}{2}; \quad \text{при } R \ll \lambda, \quad r_m \rightarrow 0$$



Труба с поперечным сечением отверстия $S = \pi \cdot R^2$ и длиной l в толстой широкой стене без учета потерь, b — ширина стены, при $l \ll \lambda_{\text{min}}$, $b \gg \lambda_{\text{max}}$.

$$\bar{z}_{\text{BX}} = j\omega m; \quad m = \pi \rho R^2 l_{\text{ЭКВ}}$$

$$\text{где } l_{\text{ЭКВ}} = l + \frac{16R}{3\pi}$$



Резонатор Гельмгольца представляет собой полую сферу с внутренним объемом V , переходящую в жесткую трубу длиной l , диаметром $2R$ и площадью сечения S , которая оканчивается жестким фланцем.

$$\bar{z}_{\text{вх}} = r_m + j\omega m + \frac{1}{j\omega c_m}$$

$$\text{где: } r_m = S^2 \left[\frac{\rho\omega^2}{4\pi c} + \left(\frac{l}{\pi R^2} \right) \sqrt{2\rho\mu\omega} \right], \quad m = \rho S(l + 1,48R), \quad c_m = \frac{V}{\rho c^2 S^2}$$

$$\mu - \text{коэффициент вязкости воздуха, } \mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Н}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$$

Резонансную частоту можно определить по формуле:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{(l + 1,48R)V}} \quad (4.1)$$

Данные примеры были приведены для того, чтобы продемонстрировать влияние конструктивных элементов преобразователей (микрофонов или громкоговорителей) на их акустические свойства. На основе сказанного выше можно сделать вывод, что различные конструктивные элементы электроакустических преобразователей оказывают влияние на их частотную характеристику и коэффициент преобразования. Помимо этого, технологические материалы, применяемые для изготовления подвижных частей преобразователя, и их техническая конструкция оказывают дополнительное влияние на линейность преобразования, что предопределяет наличие искажений на выходе. Всё это объясняет, почему одностипные микрофоны или громкоговорители обладают индивидуальными качественными характеристиками, которые могут заметно отличаться друг от друга.

4.1.7 Приемники давления и градиента давления

4.1.8 Явление обратимости

Как уже было сказано выше, электроакустические преобразователи могут быть двигателями или генераторами. Однако ряд из них способны вы-

полнять обе функции — как двигателя так и генератора. Такие преобразователи называют **обратимыми**. Если преобразователь способен выполнять только одну из указанных функций, тогда его называют **необратимым**. Способность преобразовывать акустическую энергию в электрическую и наоборот — электрическую в акустическую называют **обратимостью** преобразователя.

К числу обратимых относятся: электродинамические, электромагнитные, электростатические, пьезокерамические и некоторые другие виды преобразователей. К числу необратимых можно отнести угольные и оптические преобразователи.

Другими словами можно сказать, что электродинамический микрофон может преобразовывать звук в электрический сигнал, а при подключении его к источнику гармонического электрического сигнала может излучать звук. Правда, эффективность излучения звука (особенно на низких и средних частотах) невелика. Наряду с этим, электродинамический громкоговоритель можно использовать как для излучения звука, так и для преобразования звука в электрический сигнал, т.е. его можно использовать в качестве микрофона. И в этом случае качество преобразования будет невысоким. В первую очередь пострадает частотная характеристика преобразования. Несмотря на такие недостатки, в некоторых системах (например, в селекторной связи или в домофонах) громкоговорители успешно используют и для излучения звука и в качестве микрофона.

Необходимо обратить внимание ещё на один аспект проявления обратимости. При неоптимальном согласовании микрофонов с микрофонными предварительными усилителями, а также громкоговорителей — с усилителями мощности, обратимость может оказывать заметное влияние на качество преобразования. В этом случае может ухудшиться частотная характеристика преобразования, могут увеличиться нелинейные, динамические и интермодуляционные искажения. Например, при воздействии звука на подвижную, гибкую мембрану микрофона на его электрической стороне возникают электрические колебания. Электрический сигнал поступает на вход предварительного усилителя. Во входных цепях усилителя данный сигнал усиливается, но при этом могут возникать собственные паразитные электрические процессы (например, динамические колебания), которые частично могут проникать обратно в электрическую цепь микрофона, вызывая слабое вторичное звуковое излучение. Затем снова этот звук преобразовывается в электрический сигнал и далее поступает на вход усилителя. Так возникает прямая и обратная взаимосвязь акустической стороны с электрической.

4.2 Микрофоны

4.2.1 Электродинамические микрофоны

Рассмотрим устройство и принцип действия электродинамического микрофона.

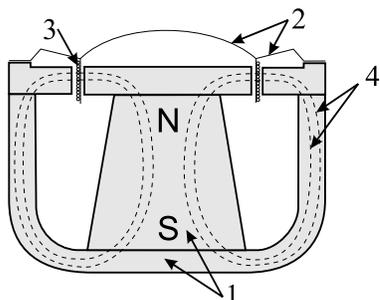


Рис. 4.2: Устройство электродинамического микрофона: 1- магнитная система, 2-мембрана, 3-звуковая катушка, 4-путь силовых магнитных линий.

В качестве преобразователя (см. рис.4.2 и рис.4.3) в таком микрофоне используется цилиндрическая катушка (3) из тонкого медного провода, закрепленная лаком на тонком бумажном каркасе. Каркас катушки закреплен на мягкой, гибкой и легкой мембране (2). По периметру мембраны сформирован рифленый гофр, который обеспечивает большую степень гибкости и подвижности катушки вдоль оси симметрии, а край периметра мембраны приклеен жестко к поверхности магнитной системы.

Магнитная система (1) изготовлена таким образом, чтобы в верхней её части оставался цилиндрический магнитный зазор, в котором и помещается катушка.

Магнитная система (1) изготовлена таким образом, чтобы в верхней её части оставался цилиндрический магнитный зазор, в котором и помещается катушка.

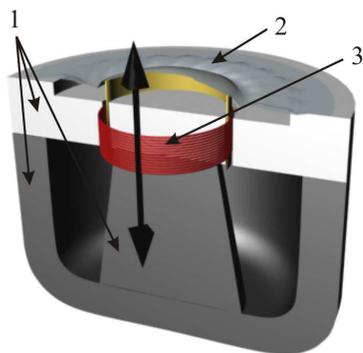


Рис. 4.3: Внешний вид магнитной системы (1), мембраны (2) и звуковой катушки (3) электродинамического микрофона (в разрезе).

Намагничивание магнитной системы осуществляют так, чтобы силовые магнитные линии пересекали магнитный зазор (см. рис. 4.2) и, следовательно, витки провода катушки. По закону электромагнитной индукции, в проводе катушки, при её движении в силовом магнитном поле, возбуждается электродвижущая сила (ЭДС). Причем, чем больше скорость движения проводника относительно силового магнитного поля, тем больше ЭДС. Другими словами, чем больше скорость изменения магнитного потока, пересекающего проводник, тем больше ЭДС.

Согласно закону электромагнитной индукции упрощенно можно определить:

$$-e = \frac{d\Phi}{dt}; \text{ где : } e - \text{ ЭДС, } \Phi - \text{ магнитный поток, } t - \text{ время}$$

$$-E = n \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \text{ где : } E - \text{ полная ЭДС, } n - \text{ количество витков катушки}$$

Для улучшения качества преобразования звуковых колебаний микрофоном на высоких частотах, т.е. при больших колебательных скоростях, подвижная часть мембраны с катушкой должна быть максимально легкой, малоинерционной. В то же время, для увеличения ЭДС, количество витков в катушке тоже должно быть максимально большим. Но, с увеличением количества витков провода, увеличивается его масса и ухудшается качество преобразования микрофоном на высоких частотах. По этой причине возникает необходимость находить компромисс между частотными потерями и величиной ЭДС, которую способен обеспечить микрофон. На практике всегда можно заметить, что микрофоны одной фирмы-производителя и одной степени сложности (одной ценовой категории) либо обладают более высокой чувствительностью и более узким частотным диапазоном, либо более широким частотным диапазоном и меньшей чувствительностью.



Рис. 4.4: Внешний вид электродинамического микрофона (в разрезе).

скрипящей окраской".

Если на мембрану воздействует поток воздуха — дыхание или ветер, то он вызывает дополнительный шумовой сигнал. Для защиты от таких помех применяют ветрозащитный колпачек, который представляет собой мелкоя-

На качество работы микрофона существенно влияет материал, из которого изготовлена мембрана. Существует такое явление, как акустическая эмиссия, которое заключается в том, что при деформации или разрушении материала, он может излучать собственные звуковые колебания, призвуки. Во время работы звуковые колебания преобразуемого сигнала будут вызывать колебательные движения мембраны, что будет приводить к периодической деформации гофра и, как результат, к появлению дополнительных призвуков. Сигнал, принятый с такого микрофона, будет отличаться "хриплой или

чеистую металлическую сетку и под ней дополнительно крепится капроновая сетка (см. рис. 4.4).

При эксплуатации динамических микрофонов наиболее слабым местом является магнитная система, которая собирается методом склейки. От непроизвольного удара отдельные компоненты могут отрываться, зажимая мембрану между собой. Кроме этого, если в магнитный зазор попадает пыль или мелкие металлические осколки, они тоже заметно ухудшают качество работы микрофона. Отсюда вывод — микрофоны необходимо беречь от ударов, резких сотрясений и пыли.

4.2.2 Ленточные микрофоны

Ленточные микрофоны можно отнести к разновидности динамических микрофонов. Физический принцип преобразования у ленточного микрофона аналогичен принципу преобразования динамического микрофона с цилиндрической звуковой катушкой. Вся разница заключается только в форме магнитной системы и проводника, генерирующего ЭДС.

4.2.3 Конденсаторные микрофоны

Конденсаторный микрофон представляет собой две обкладки конденсатора (см. рис.4.5), одна из них — жесткая и является корпусом (4), другая тонкая, легкая, мягкая и податливая — является мембраной микрофона (1).

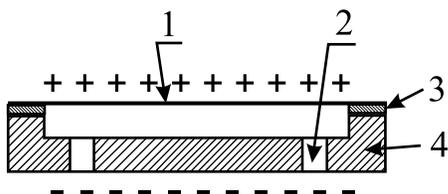


Рис. 4.5: Устройство конденсаторного микрофона: 1-мембрана, 2-отверстия для компенсации давления, 3-изоляционные прокладки, 4-корпус.

Учитывая то, что поляризующее напряжение подается через резистор с большим сопротивлением $R > 1\text{M}\Omega$, вторичное перераспределение зарядов вызывает модуляцию постоянного поляризующего напряжения переменным звуковым сигналом. Переменная составляющая напряжения, через

На мембрану относительно корпуса подаётся поляризующее напряжение E (см. рис.4.6), благодаря которому происходит перераспределение электрических зарядов на обкладках конденсатора. Между обкладками возникает электростатическое силовое поле. При смещении мембраны относительно корпуса под воздействием звукового давления и взаимодействия электрического силового поля между обкладками, происходит вторичное динамическое перераспределение зарядов.

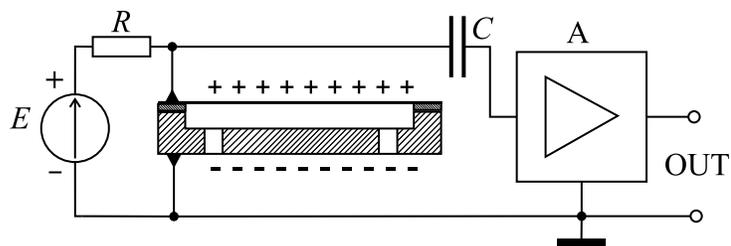


Рис. 4.6: Схема подключения преобразователя конденсаторного микрофона.

разделительный конденсатор C , подаётся на вход предварительного микрофонного усилителя. Входное сопротивление усилителя должно быть по возможности максимально большим $R_{\text{вх}} > R$. В противном случае вход усилителя будет шунтировать по переменному току преобразователь, что приведёт к существенному ослаблению сигнала, т.е. уменьшению чувствительности микрофона. Для реализации большого входного сопротивления усилителя применяют полевые транзисторы или электронные лампы. Наиболее высокое качество работы с минимальным уровнем шумов и высокими динамическими (скоростными) характеристиками могут обеспечить ламповые усилители.

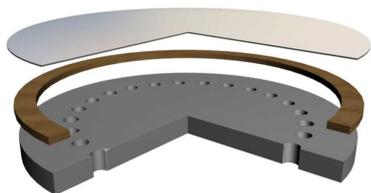


Рис. 4.7: Упрощенный внешний вид компонентов преобразователя конденсаторного микрофона.

Для того, чтобы обеспечить электрическую проводимость мембраны на пленку, изготовленную из пластического материала, наносят тонкий слой металлизации (чаще всего из алюминия). Такая мембрана требует условий работы и хранения с невысоким уровнем влажности и химической активности окружающей среды. В противном случае она может достаточно быстро разрушаться.

При повышении напряжения поляризации чувствительность микрофона увеличивается. Обычно напряжение поляризации подаётся по сигнальному кабелю в виде "фантомного" питания с микрофонного пульта или предварительного микрофонного усилителя от 12V до 48V. Более высокое напряжение питания может вызывать электрический пробой между обкладками.

Для того, чтобы обеспечить электрическую проводимость мембраны на пленку, изготовленную из пластического материала, наносят тонкий слой металлизации (чаще всего из алюминия).

4.2.4 Конденсаторные электретные микрофоны

Электретные микрофоны можно отнести к типу конденсаторных микрофонов, хотя они и имеют характерную конструктивную особенность. Электретный преобразователь состоит из двух обкладок конденсатора аналогично конденсаторному преобразователю, описанному выше, но мембрана не требует дополнительного напряжения поляризации. Электретная плёнка электризуется ещё на этапе изготовления и затем сохраняет свой заряд постоянно.

Технология изготовления упрощенно состоит из следующих этапов. Сначала материал, из которого изготавливают электретную пленку, плавят, т.е. переводят в жидкое состояние. Затем, под действием электрического поля, осуществляют электризацию материала (перераспределение зарядов), поскольку в расплавленном состоянии электрические заряды (ионы) обладают подвижностью. После электризации материал охлаждается, переходя в твердое состояние, при этом ионы теряют свою подвижность. Другими словами, электрические заряды, в некотором смысле, "запекаются" в пленке. Во всем остальном принцип действия электретного преобразователя аналогичен конденсаторному. Для съема электрического потенциала с мембраны, её покрывают тонким слоем металла.

Технические свойства и характеристики электретных микрофонов и обычных конденсаторных микрофонов во многом сходны. Однако обычные конденсаторные микрофоны, за счет более сильной поляризации, чем это возможно в электретных микрофонах, обладают более высокой чувствительностью. К недостаткам электретных микрофонов можно отнести те же недостатки, которые свойственны и обычным конденсаторным микрофонам. Требования к условиям эксплуатации и хранения также аналогичны.

4.2.5 Оптические микрофоны

До настоящего времени оптические микрофоны не получили широкого применения в звуковой индустрии. Однако, на мой взгляд, они имеют хорошую перспективу благодаря ряду преимуществ. Сначала рассмотрим принцип действия таких микрофонов.

Как можно видеть на рис.4.8 световой луч излучается светодионом в стекловолокно, затем распространяется по нему до мембраны, после чего отражается от металлизированной её поверхности в сторону второго стекловолокна. По второму стекловолокну свет распространяется обратно к приемному фотодиоду. Поскольку при выходе из первого стекловолокна пучок света имеет форму конуса, то интенсивность светового потока уменьшается с удалением от конца стекловолокна. При колебании мембраны происходит

изменение расстояния пути распространения светового луча и, в результате этого, изменяется доля световой энергии, падающей на поверхность второго стекловолокна. Благодаря такой конструкции колебательные движения мембраны вызывают модуляцию светового потока, который принимается фотодиодом и преобразуется в электрические колебания.

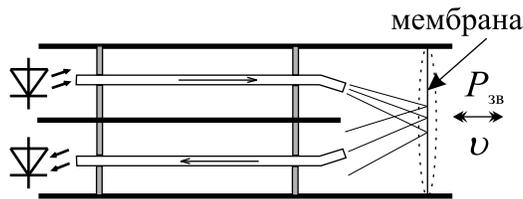


Рис. 4.8: Упрощенная конструкция оптического микрофона.

ми наведенных помех.

Принципиальная конструкция акусто-оптического преобразователя предопределяет широкие возможности для реализации микрофонов самого высокого качества. Но, до настоящего времени, на рынке звукового оборудования пока таких образцов не видно. Подробная техническая и технологическая информация на эту тему тоже закрыта. В то же время, можно с уверенностью предположить, что основные трудности в изготовлении оптических микрофонов предопределены электрическими и оптическими свойствами светодиодов и фотодиодов. В первую очередь — их шумовыми характеристиками и линейностью частотных и амплитудных характеристик преобразования.

Если учесть, что длина стекловолокон может достигать нескольких сотен метров без потери качества передаваемого сигнала, то тогда в точке установки микрофона можно практически полностью избежать влияния различных электромагнитных полей, которые являются для динамических и конденсаторных микрофонов источника-

4.2.6 Основные технические характеристики микрофонов

Номинальный диапазон рабочих частот.

Диапазон частот, в котором нормированы (т.е. определены и заданы) его технические характеристики, называют **номинальным**.

Модуль полного электрического выходного импеданса.

Выходной электрический импеданс микрофона это сопротивление электрической стороны преобразователя микрофона.

Выходной электрический импеданс микрофона зависит от частоты сигнала, поэтому представлен комплексным числом. В техническом описании

микрофона может применяться модуль импеданса на частоте 1 кГц, или интегральное, усредненное значение его в диапазоне частот. Ответим на вопрос: зачем нужна эта характеристика?

Как известно выход микрофона подключается ко входу отдельного предварительного микрофонного усилителя или микшерного пульта. Если входное сопротивление усилителя будет меньше или незначительно превышать выходное сопротивление микрофона, то вход усилителя будет шунтировать выход микрофона. Это приведет к ослаблению выходного сигнала микрофона, ухудшению его частотных характеристик, увеличению нелинейных и других видов искажений. В таком случае говорят о несогласованности выходного импеданса микрофона с входным импедансом усилителя. Входной импеданс усилителя должен превышать выходной импеданс микрофона по меньшей мере в 5 раз, а в лучшем случае в сотни раз. Однако значительное повышение входного импеданса усилителя схемотехническими методами часто сопряжено с применением полевых транзисторов, главным недостатком которых является высокий уровень собственных шумов в области нижних частот. Исходя из указанных условий, технически наиболее оптимальный вариант согласования – 1 к 25...50. Поэтому при подключении микрофона к усилителю или микшерному пульту необходимо убедиться в соблюдении данного условия. Обычно в техническом описании пультов указывают непосредственно рекомендуемый импеданс микрофона.

Чувствительность.

В общем случае *чувствительность микрофона* (E) это отношение напряжения на его выходе к звуковому давлению, воздействующего на него, и измеряется в милливольтках на паскаль (mV/Pa).

$$E = \frac{U_{\text{вых}}}{P_{\text{зв}}}$$

Но, для более полного определения свойств микрофона, применяют несколько различных видов чувствительности: в свободном поле, в диффузном поле, осевая, по тылу, на определенной частоте, в диапазоне частот. Остановимся на этом подробнее.

Чувствительность микрофона в различных направлениях относительно его рабочей оси чаще всего бывает разной. Измеряя выходное напряжение одного и того же микрофона в сложном диффузном поле с изменяющимся соотношением давлений первичной и вторичных волн, при неизменном среднем суммарном давлении, достаточно проблематично получить объективное значение, которое однозначно характеризовало бы его чувствительность. Поэтому приходится отдельно определять чувствительность в сво-

бодном поле, в частности, когда источник звука находится на рабочей оси микрофона прямо по фронту. Отдельно - при расположении источника звука на рабочей оси, но с обратной стороны, по тылу.

Похожая ситуация возникает при определении чувствительности на разных частотах. Разные микрофоны, особенно динамические, имеют неравномерную зависимость чувствительности от частоты принимаемого звукового сигнала. В некоторых микрофонах эта неравномерность может быть достаточно большой. Напряжение на выходе микрофона при тональном звуковом сигнале на одной частоте может существенно отличаться от напряжения при тональном сигнале с тем же давлением на другой частоте. Поэтому наиболее объективно можно определить среднюю чувствительность в рабочем диапазоне частот, например при использовании в качестве источника звука "розовый шум" или "белый шум".

Уровень чувствительности - величина относительная, измеряется в децибелах и определяется отношением реальной чувствительности к начальной чувствительности микрофона. Где начальная чувствительность представляет собой эталонную величину и равна $E_0 = 1 \text{ В/Па}$.

$$N_{mic} = 20 \lg \frac{E_{mic}}{E_0}$$

Частотная характеристика чувствительности.

Более полную характеристику качества микрофона в рабочем диапазоне частот позволяет обеспечить зависимость его чувствительности от частоты сигнала. Эта зависимость может быть представлена графически в виде амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). АЧХ измеряют при постоянном звуковом давлении на разных частотах, при неподвижном положении микрофона и источника звука в свободном звуковом поле. Должен

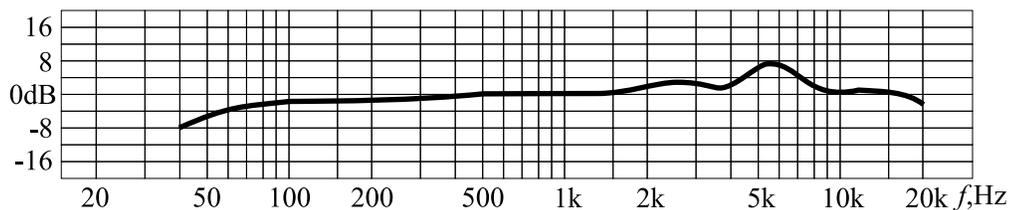


Рис. 4.9: Амплитудно-частотная характеристика динамического микрофона M 58 фирмы "Beyerdynamic". Уровень 0 dB соответствует чувствительности 1,3 мВ/Па

при этом заметить, что ряд фирм-производителей микрофонов, для повышения рейтинга своей продукции используют следующую хитрость. АЧХ

микрофона можно измерять с высокой точностью при тональном (синусоидальном) сигнале, тогда на характеристике будут видны все пики и провалы, связанные с резонансами и антирезонансами преобразователя.

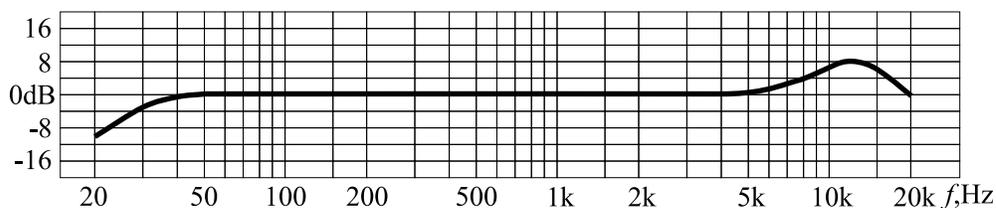


Рис. 4.10: Амплитудно-частотная характеристика конденсаторного микрофона MCE 52 фирмы "Beyerdynamic". Уровень 0 dB соответствует выходному напряжению 18 mV при уровне звукового давления 124 dB

Если же в качестве источника звука используют фильтрованный в узкой полосе частот, например 1/3 октавы, "розовый шум" и измерения проводятся для таких полос во всем диапазоне частот, то тогда характеристика становится более усредненной, плавной, хоть в основном и соответствует реальной. АЧХ микрофона является достаточно важной характеристикой и в значительной мере определяет, с какой тембровой окраской будет приниматься звук при преобразовании.

Еще одна из характеристик, позволяющая оценивать чувствительность микрофона в рабочем диапазоне частот, **неравномерность частотной характеристики**. Данный параметр показывает разницу между максимальным и минимальным уровнями чувствительности микрофона в номинальном диапазоне частот.

$$\Delta N = N_{max} - N_{min}$$

Коэффициент гармоник.

Коэффициент гармоник микрофонов определяет уровень нелинейных искажений, возникающих при преобразовании звуковых гармонических колебаний в электрический сигнал. При малых уровнях звуковых давлений, когда мембрана микрофона смещается на небольшие расстояния, коэффициент гармоник обычно небольшой (не более 0,5%). Причем, чем меньше амплитуда колебаний мембраны, тем обычно меньше коэффициент гармоник. Но при больших уровнях давления, особенно на низких частотах, амплитуда колебаний мембраны увеличивается до крайних значений, при которых она ограничивается механической гибкостью подвески, гофром. Тогда коэффициент гармоник заметно увеличивается. На практике принято

указывать не сам коэффициент гармоник, а максимальный уровень звукового давления, при котором коэффициент гармоник увеличивается до предельного нормированного значения – 0,5%.

Уровень собственных шумов.

На выходе любого микрофона в составе напряжения основного сигнала присутствует напряжение посторонних шумов, которых в исходном звуковом сигнале нет. Существует несколько источников паразитных шумов: внешние наведенные помехи, внутренние флуктуационные шумы носителей электрических зарядов в электрических компонентах преобразователя и шумы, возникающие в результате ударов молекул газов, входящих в состав воздуха, о поверхность мембраны. С первой шумовой составляющей можно бороться с помощью электрического экранирования или применением симметричной схемы подключения с использованием "витой пары". А две следующие шумовые составляющие остаются постоянными для каждого конкретного микрофона. Поэтому их можно объединить в один коэффициент, который будет отражать шумовые свойства микрофона. Для удобства принято считать, что микрофон является идеальным преобразователем, в котором отсутствуют собственные шумы, но на его входе есть мнимый звуковой источник шумового сигнала, который после преобразования создает на выходе шумовое напряжение, эквивалентное реальному выходному напряжению шумов. Тогда источник шума можно оценить звуковым давлением шумового сигнала и найти его уровень относительно порога слышимости $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па.

$$N_{ш} = 20 \lg \frac{P_{ш}}{P_0}$$

Такой относительный уровень звукового давления источника мнимого шумового сигнала и называют **уровнем собственных шумов** микрофона.

Динамический диапазон.

Мы уже определили, что минимальная амплитуда преобразуемого звука, ограничена собственными шумами микрофона, а максимальная – нелинейными искажениями. На основании этого можно говорить, что полный диапазон уровней звукового давления, которое можно принимать и преобразовывать в электрический сигнал, равен разнице максимального уровня звукового давления и уровня собственных шумов. Этот диапазон можно назвать полным **динамическим диапазоном микрофона**.

$$D = N_{\max} - N_{ш}, \text{ dB}$$

Однако любой профессионал согласится с тем, что если полезный звуковой сигнал сравним по уровню с шумовым сигналом, то качественным его назвать нельзя.



Рис. 4.11: Динамический диапазон микрофона.
пазону минус 20...30 дВ.

$$D = N_{\text{макс}} - N_{\text{ш}} - 20...30, \text{ дВ}$$

Характеристика направленности.

Характеристикой направленности микрофона называют зависимость чувствительности E_{Θ} от угла поворота рабочей оси микрофона относительно направления на источник звука. Нормированная характеристика направленности $R(\Theta)$ определяется отношением чувствительности микрофона при повороте на угол Θ к чувствительности при прямом направлении его рабочей оси на источник звука, т.е. при $\Theta = 0$.

$$R(\Theta) = \frac{E_{\Theta}}{E_0}$$

Коэффициент направленности.

Для определения степени направленности микрофона применяют понятие **коэффициента направленности**. Данный коэффициент полезен для оценки степени повышения чувствительности прямо по рабочей оси по сравнению с ненаправленным микрофоном. Кроме этого, отношение коэффициента направленности на рабочей оси по фронту к коэффициенту направленности на рабочей оси по тылу позволяет оценить селективность микрофона в направлении к полезному источнику звука и его способность по-

лезный звуковой сигнал должен превышать уровень шума как минимум на 10 дВ, а ещё лучше – на 20 дВ. Таким образом реальный динамический диапазон сужается на 10...20 дВ. Если же к качеству преобразования предъявляются высокие требования и по коэффициенту гармоник, то рекомендуется брать запас и по перегрузке, хотя бы на 10 дВ. В результате реальный динамический диапазон микрофона будет равен полному динамическому диа-

давливать прием нежелательных источников звука, находящихся с тыльной стороны.

Для микрофонов с симметричной характеристикой относительно рабочей оси коэффициент направленности определяется так:

$$\Omega = \frac{1}{\frac{1}{2} \int_0^{\pi} R^2(\Theta) \sin \Theta d\Theta} \quad (4.2)$$

Отношение коэффициентов направленности фронт-тыл определяется так:

$$\Omega_{\text{фрон/тыл}} = \frac{\frac{1}{2} \int_{\pi/2}^{\pi} R^2(\Theta) \sin \Theta d\Theta}{\frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} R^2(\Theta) \sin \Theta d\Theta} \quad (4.3)$$

Диаграмма направленности.

Диаграмма направленности это графическое изображение зависимости чувствительности микрофона от угла поворота рабочей оси микрофона относительно направления на источник звука, показанное в полярной системе координат. На рис. 4.12 показаны основные виды диаграмм направленности. Поскольку преобразователи микрофонов относительно рабочей оси, чаще всего, симметричны, то объемные изображения диаграмм направленности также симметричны относительно нее, особенно на низких частотах благодаря дифракции.

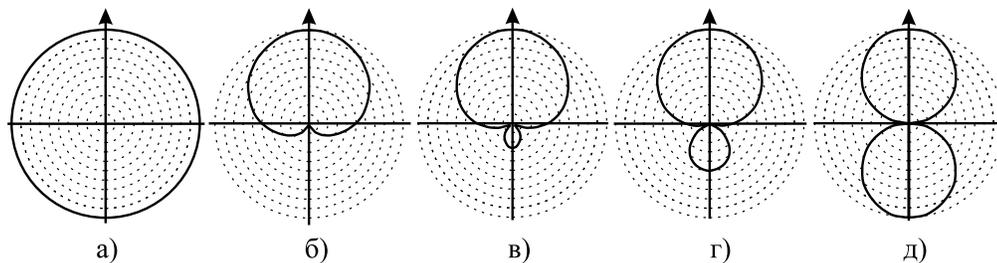


Рис. 4.12: Виды нормированных диаграмм направленности микрофонов: а — ненаправленная, б — кардиоида, в — суперкардиоида, г — гиперкардиоида, д — косинусоида.

Для кардиоиды коэффициент направленности $\Omega_{\text{фрон/тыл}} = 7$, для суперкардиоиды $\Omega_{\text{фрон/тыл}} = 13,9$, а для косинусоиды $\Omega_{\text{фрон/тыл}} = 1$.

Необходимо обратить внимание на то, что диаграмма направленности одного и того же микрофона может отличаться на разных частотах. В большинстве случаев направленные микрофоны на высоких частотах обладают более высокой степенью направленности, чем на низких частотах. Это связано с увеличением длины звуковых волн при уменьшении частоты. Данное свойство может отражаться на менее очевидном, на первый взгляд, свойстве — изменении частотной характеристики микрофона. Дело в том, что при повышении коэффициента направленности на высоких частотах, повышается и чувствительность, формируя тем самым искажение АЧХ в рабочем диапазоне частот. Поэтому, при работе с направленным микрофоном в свободном поле на относительно больших расстояниях до источника звука, будет наблюдаться некоторый "завал низких частот". Причем степень "завала" будет соответствовать степени изменения коэффициента направленности.

Для более доступного понимания данной зависимости, её можно объяснить так. Если представить диаграмму направленности в качестве мнимого пространственного тела с объёмом V , то данный объём, для одного и того же микрофона, при разных формах диаграмм будет примерно одинаков. Тогда, при повышении степени направленности, объём V в некотором смысле будет "перекачиваться", перераспределяться по рабочей оси, что и приведёт к повышению чувствительности в этом направлении.

4.2.7 Остронаправленные микрофоны

К группе остронаправленных микрофонов можно отнести такие микрофоны, которые обладают диаграммой направленности типа гиперкардиоида или еще более узкой. Для повышения степени направленности применяют несколько способов, один из которых основан на использовании параболического рефлектора. В фокусе рефлектора устанавливается сам электроакустический преобразователь. Принцип действия такого рефлектора аналогичен принципу действия оптического рефлекторного телескопа или электромагнитной радиолокационной антенны. Острота диаграммы направленности такой системы в значительной мере зависит от соотношения длины звуковой волны и диаметра рефлектора с учетом степени кривизны параболы (или фокусного расстояния). Чем меньше длина волны, тем более острая диаграмма направленности. Из этого можно сделать вывод, что в области средних и низких частот размеры такой системы должны быть достаточно большими, порядка нескольких метров или десятков метров. Если размер рефлектора не превышает одного метра, эффективность системы будет проявляться только в области высоких частот (от нескольких килогерц и выше). К недостаткам таких микрофонов можно отнести отно-

сительно большие размеры и, как следствие, неудобство использования в реальных условиях. Наиболее эффективно их можно использовать, например, для записи птичьего пения на природе, когда записываемый частотный диапазон охватывает преимущественно высокочастотную область и нет жестких ограничений в размерах, используемого для записи оборудования.



Рис. 4.13: Параболический рефлектор

Другой способ повысить направленность микрофона основан на применении так называемой "микрофонной пушки". Такая система представляет собой жесткую трубу с нарезанными вдоль её длины поперечными узкими пазами (щелями), в основании которой установлен микрофонный капсюль. Принцип действия основан на сложении совпадающих по фазе звуковых волн и вычитании их при совпадении в противофазе. Звуковые волны, распространяющиеся под углом к рабочей оси микрофона (центральной оси симметрии трубы), через щели проникают во внутреннюю полость и затем продолжают распространяться вдоль трубы и суммируются. Проходя различное расстояние, эти волны задерживаются на различные интервалы времени. Временная задержка приводит к фазовому смещению.

Для повышения эффективности направленных свойств такого микрофона в области средних и низких частот, необходимо увеличивать длину трубы так, чтобы длина звуковых волн в рабочем диапазоне частот была



Рис. 4.14: "Микрофонная пушка"

меньше или соразмерна длине трубы. Если длина "микрофонной пушки" 30...50см., то ее эффективность будет проявляться в области высоких частот, что ограничивает ее применение, в основном, для записи речевого сигнала. Поскольку разборчивость речи определяется согласными звуками (шипящими и свистящими), то выделение источника речевого сигнала с помощью короткой "микрофонной пушки" достаточно приемлемо.



Рис. 4.15: Диаграмма направленности "микрофонной пушки"

Такие "микрофонные пушки" часто используются в условиях, когда возникает необходимость ослабить влияние посторонних звуков и выделить один основной источник, например для репортажей. К недостаткам таких микрофонов можно отнести относительно высокую неравномерность частотной характеристики, которая определяется интерференционными процессами. В силу указанного недостатка, применять такие микрофоны для записи фонограмм со студийным качеством не рекомендуется.

4.2.8 PZM микрофоны

Аббревиатуру PZM можно расшифровать, как микрофон зонного давления (pressure zone microphone). Остановимся на принципе действия такого микрофона.

Как уже было сказано ранее, в помещении присутствует такое явление, как интерференция акустических волн. В результате интерференции увеличивается пространственная неравномерность звукового поля, а в стационарной точке пространства увеличивается неравномерность частотной характеристики звукового поля (эффект гребенчатого фильтра). Однако, вблизи поверхностей, отражающих звуковые волны, проявление интерференции ослабевает и неравномерность звукового поля уменьшается, если расстояние до отражателя существенно меньше длины звуковой волны. Физику данного процесса понять несложно. Для этого необходимо вспомнить, что интерференция возникает при суперпозиции когерентных волн. В данном случае падающая и отраженная волны являются когерентными. При этом, если фазовый сдвиг одной волны относительно другой равен 0° , 360° или $n \cdot 360^\circ$, где n -целое число, тогда эти волны складываются. Если фазовый сдвиг равен 180° или $(n \cdot 360^\circ + 180^\circ)$, тогда волны вычитаются. Но, если падающая и отраженная волны сдвинуты по фазе на малый угол - порядка нескольких градусов, тогда при суперпозиции этих волн, результат будет определяться их сложением практически в одинаковой фазе. Благодаря этому суммарный уровень звукового давления повысится примерно на 3дВ, и взаимное вычитание будет исключено. Следует также обратить внимание на то, что таким способом полностью избавиться от влияния интерференции нельзя, т.к. в суммарном звуковом поле, у отражающей поверхности, будут присутствовать когерентные волны, отраженные от других поверхностей помещения. Но эти составляющие, вероятнее всего, будут менее интенсивными, чем прямой звук, за счет удаленного рассеяния и поглощения в помещении и их влияние на результирующее поле будет менее значимым. Применяя для звукозаписи PZM можно достичь более естественного



Рис. 4.16: PZM микрофон

звучания фонограммы для ряда акустических музыкальных инструментов

и минимизировать эффект "ближней зоны" за счет большего удаления источника звука от микрофона. Кроме того, будет уменьшена модуляция по уровню в отдельных полосах частот (преимущественно на высоких частотах) при движении источника звука относительно микрофона. При этом в фонограмме будет больше составляющих естественной реверберации помещения.



Рис. 4.17: PZM микрофон

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что для достижения наиболее высокого качества фонограммы необходимо уделять серьезное внимание акустическим свойствам помещения. Однако можно отметить, что даже при не очень хорошо подготовленной акустике помещения, звучание фонограммы с применением PZM "выигрывает" по сравнению с фонограммой, записанной с традиционными способами применения микрофонов. Субъективно такая фонограмма звучит более естественно и "тепло".

4.2.9 Радиомикрофоны

К группе радиомикрофонов можно отнести три разновидности микрофонов: ручные, петличные и гарнитурные. Функционально такие микрофоны представляют собой преобразователь с микрофонным предусилителем, частотный модулятор, радиопередатчик и автономный источник питания (аккумулятор или батарейка). Кроме этого, для приема и восстановления аналогового аудиосигнала, используется станция. Станция представляет собой стационарный радиоприемник с частотным детектированием радиосигнала, усилителем и фильтрами. В приемной станции на выход поступает аналоговый аудиосигнал, который подается на вход микшерного пульта.

Передача радиосигнала осуществляется в УКВ радиодиапазоне. Одной из основных проблем, возникающих при радиопередаче, является наличие так называемых "мертвых зон". Главная причина появления таких зон - интерференция электромагнитных радиоволн. Радиомикрофоны и станции часто имеют возможность осуществлять переключение передачи-приема в несколь-



Рис. 4.18: Гарнитурный радиомикрофон со станцией

ких радиоканалах. Таких каналов может быть от одного до нескольких десятков. Это позволяет использовать несколько радиомикрофонов одновременно без взаимного влияния на работу друг друга. Наличие дополнитель-



Рис. 4.19: Ручной радиомикрофон со станцией

ных резервных радиоканалов позволяет также осуществлять передачу на радиочастотах с наименее сложным интерференционным полем, увеличивая стабильность радиосвязи. Кроме того, для уменьшения нестабильности связи, в станциях часто используются приемные антенны в виде двух телескопических антенн, расположенных на расстоянии и под углом друг к другу. В этом случае, если одна телескопическая антенна попадает в "мертвую зону", то вторая - более вероятно попадает в зону с достаточным уровнем

радиосигнала, что повышает стабильность приёма. Еще одним существенным недостатком радиомикрофонов можно считать чувствительность к радиочастотным помехам. Такие помехи могут быть вызваны посторонними радиопередатчиками, в частности системами мобильной связи или радиотелефонами. Следует также отметить, что преобразование аудиосигнала в частотно-модулированный и обратно влечет за собой некоторое повышение уровня шумов тракта передачи и, как следствие, сужение динамического диапазона звукового сигнала.

Несмотря на высокое качество современных радиомикрофонов, в силу указанных недостатков применять их для высококачественной студийной звукозаписи не рекомендуется. Основная область применения таких микрофонов - вещательные радиостудии, телевизионные студии, театральные залы (в системах звукоусиления) и концертные площадки.

4.2.10 Сравнительные характеристики разных типов микрофонов

Мы уже имели возможность убедиться в большом разнообразии видов и типов микрофонов. Перед начинающим звукорежиссером может возникнуть вопрос - какой микрофон и в каких условиях предпочтительнее применять? Разумеется, что дать ответ на этот вопрос можно, сравнив преимущества и недостатки разных микрофонов.

Прежде всего необходимо учитывать, что часто качество микрофона определяется его ценовой категорией, но наша цель - определить тенденции, связанные с конструктивными особенностями микрофонов.

В первую очередь следует выделить конденсаторные микрофоны с ламповым предусилителем - так называемые "ламповые" микрофоны. Конденсаторные микрофоны чаще всего имеют наиболее высокие качественные характеристики. К таким характеристикам можно отнести широкий диапазон рабочих частот, широкий динамический диапазон, высокую линейность частотной характеристики и высокую чувствительность. По этим показателям несколько "проигрывают" динамические микрофоны. В то же время, при субъективной оценке, конденсаторным микрофонам присуща некоторая "жестковатость" звучания на высоких частотах. Впрочем здесь вступает в силу влияние ценовой категории, другими словами дорогой конденсаторный микрофон может "звучать" не хуже динамического. Особую "теплоту" в звучание добавляет применение лампового предусилителя. В то же время, конденсаторные микрофоны в большинстве своем, более уязвимы к воздействию пыли, влаги и других воздействий по сравнению с динамическими. Кроме этого, при использовании микрофона для вокала, такой

недостаток динамического микрофона, как неравномерность частотной характеристики может превратиться в преимущество. Подчеркивая в голосе наиболее приятные форманты и подавляя менее приятные, динамический микрофон может стать более предпочтительным для использования, чем конденсаторный. При этом неравномерность частотной характеристики служит в некотором смысле роль эквалайзера. Однако в этом случае певец становится зависимым от наличия или отсутствия такого микрофона, который помимо прочего необходимо подбирать индивидуально и хранить при себе постоянно. Некое промежуточное положение по качеству звучания между конденсаторными и динамическими (катушечными) занимают ленточные динамические микрофоны. Такие микрофоны по ряду характеристик приближаются к конденсаторным, но сохраняют "мягкость" звучания динамических. Ленточные микрофоны отличаются повышенной уязвимостью, в первую очередь к механическим воздействиям (ударам, вибрациям). Высокие требования предъявляются к их способу хранения, в том числе – положению и ориентации в пространстве. Если такой микрофон хранить в таком положении, когда ленточка – звуковая мембрана расположена горизонтально, то со временем ленточка начинает провисать из-за текучести металла. Что, в свою очередь, приводит к ухудшению качественных характеристик. При сравнении конденсаторных микрофонов с внешним напряжением поляризации и электретных конденсаторных микрофонов, вторые несколько уступают первым по уровню собственных шумов, но в остальном имеют сходные характеристики.

4.2.11 Общие рекомендации по выбору микрофонов

В данном параграфе, подводя итоги предыдущему материалу, можно выработать некоторые правила по подбору и эксплуатации микрофонов.

Начнем с того, что в паспортных данных на микрофоны различных фирм – производителей и для разных моделей приводятся рекомендации – для каких целей предназначен микрофон. Например: микрофон для звукоусиления вокала, фортепиано, ударных инструментов, медных духовых, скрипок, виолончелей. . . , или для студийной записи и т.д. Таким образом, выбор следует начинать с рекомендаций производителя микрофона.

Следующий шаг должен основываться на оценке технических характеристик. Исходя из предназначения микрофона, необходимо обратить внимание на диаграмму направленности. Для сценического вокала предпочтительнее выбирать микрофон с суперкардиоидой или гиперкардиоидой. Это позволит иметь больший запас по индексу тракта звукоусиления. Для индивидуальной студийной звукозаписи вокала или акустических музыкальных инструментов без звукового сопровождения, но с мониторингом через

головные телефоны, лучше использовать ненаправленные микрофоны. В этом случае уменьшится зависимость от пространственного перемещения источника – меньше будет заметна модуляция звука, вызванная покачиванием головы вокалиста или музыкального инструмента и т.д. В то же время, при записи группы разных музыкальных инструментов, для лучшего их разделения, более целесообразно применять направленные микрофоны. Впрочем в каждой конкретной ситуации необходимо подходить к выбору микрофона индивидуально. Более глубоко и подробно вникать в принципы расстановки и применения микрофонов мы не будем, т.к. это уже тема другой науки – "Звукорежиссура". Кроме вышесказанного, следует обратить внимание на рабочий диапазон частот, учитывая при этом целевое назначение микрофона – он должен соответствовать диапазону частот источника звука. Оценивая нелинейность частотной характеристики, предпочтение следует отдать более линейной. Оценивая уровень собственных шумов, для студийной звукозаписи, следует выбрать наиболее малошумящий микрофон. При выборе для работы на сцене – требования к уровню шумов могут быть менее жесткими.

Следует помнить, что микрофоны одного модельного ряда имеют следующую зависимость – при более высокой чувствительности и малых собственных шумах, микрофон обычно имеет более узкий диапазон рабочих частот, и наоборот – при широком диапазоне рабочих частот, у него сужается динамический диапазон. Это свойство проявляется наиболее заметно в динамических микрофонах.

И завершать выбор необходимо субъективным прослушиванием в реальных акустических условиях. Только после этого можно принимать решение о приобретении и использовании микрофона.

4.3 Громкоговорители и акустические системы

Громкоговорители представляют собой электроакустические преобразователи, предназначенные для преобразования электрической энергии в акустическую и являются основными компонентами акустических систем. Акустические системы, в свою очередь, являются последним звеном в тракте звукоусиления. От качества акустических систем зависит в большой степени качество работы всей системы звукоусиления. Каким бы ни был дорогим и качественным весь комплекс звукового оборудования, плохие акустические системы могут свести на нет все его преимущества. Не меньшее значение имеет умение правильно комплектовать комплекс акустическими системами, а также согласовывать их с усилителями мощности и эксплуатировать.

В данном разделе мы рассмотрим основные типы громкоговорителей, которые используются в подавляющем большинстве акустических систем. Рассмотрим конструктивные особенности и проанализируем качественные характеристики, преимущества и недостатки громкоговорителей и акустических систем. Кроме этого определим некоторые принципы и правила работы с ними.

4.3.1 Основные характеристики громкоговорителей

Рабочая плоскость громкоговорителя - плоскость, параллельная излучающей поверхности громкоговорителя и проходящая через эту поверхность.

Рабочая ось громкоговорителя - прямая, проходящая через центр излучающей поверхности громкоговорителя и перпендикулярная рабочей плоскости.

Номинальный импеданс - электрическое сопротивление резистора, на котором будет выделяться такая же электрическая мощность, как и на полном комплексном сопротивлении на электрических выводах громкоговорителя, к которым подводится электрическая мощность звукового сигнала.

Номинальная мощность - Максимальная электрическая мощность неискаженного звукового сигнала, при которой нелинейные искажения громкоговорителя не будут превышать заданные.

Максимальная синусоидальная мощность - Максимальная электрическая мощность непрерывного синусоидального сигнала в заданном диапазоне частот, подводимого к громкоговорителю, при котором он длительно выдерживает её без механических и тепловых повреждений.

Максимальная кратковременная мощность - Максимальная электрическая мощность шумового сигнала в заданном диапазоне частот, подводимого к громкоговорителю, в течении 1 сек., при котором он выдерживает её без необратимых механических и тепловых повреждений. Испытания повторяются 60 раз с интервалами в 1 мин.

Максимальная долговременная мощность - Максимальная электрическая мощность шумового сигнала в заданном диапазоне частот, подводимого к громкоговорителю, в течении 1 мин., при котором он выдерживает её без необратимых механических и тепловых повреждений. Испытания повторяются 10 раз с интервалами в 2 мин.

Частота основного механического резонанса - Частота синусоидального электрического сигнала, подведенного к громкоговорителю, при которой модуль его полного комплексного сопротивления имеет свой первый максимум со стороны нижней частоты рабочего диапазона.

Эквивалентный объем головки громкоговорителя - закрытый объем воздуха, имеющий акустическую гибкость, равную гибкости подвижной системы громкоговорителя.

Номинальный диапазон частот - Диапазон частот, в котором заданы электрические и электроакустические характеристики громкоговорителя.

Характеристическая чувствительность - Среднее звуковое давление, которое развивает громкоговоритель в рабочем диапазоне частот на расстоянии 1 м. от рабочей поверхности, на рабочей оси, при подведенной электрической мощности 1 W.

Уровень характеристической чувствительности - Характеристическая чувствительность, выраженная в децибелах.

$$L_{\text{хч}} = 20 \lg\left(\frac{\text{ХЧ}}{2 \cdot 10^{-5}}\right), \text{ dB} \quad (4.4)$$

Неравномерность частотной характеристики - Разность между максимальным и минимальным уровнями звукового давления в заданном диапазоне частот ($L_{p\text{max}} - L_{p\text{min}}$), dB.

Диапазон рабочих частот - Диапазон частот, внутри которого частотная характеристика, усредненная в 1/3 октавных полосах, не выходит за пределы поля допусков.

Диаграмма направленности - Графическая зависимость звукового давления громкоговорителя (P) от угла между рабочей осью и направлением в точку измерения (α), изображенная в полярной системе координат, измеренная в условиях свободного звукового поля. Диаграмма направленности может быть измерена для одной частоты сигнала или для полосы частот.

Коэффициент осевой концентрации - показывает повышение звукового давления на рабочей оси громкоговорителя при направленном излучении, относительно звукового давления громкоговорителя при ненаправленном излучении, в условиях свободного звукового поля и при прочих равных условиях. Определяется, как отношение квадрата значения звукового давления на рабочей оси, на заданном расстоянии (r) от центра излучающей поверхности громкоговорителя, к среднему по сфере квадрату значения звукового давления, если излучающая поверхность находится в центре сферы с радиусом (r).

Коэффициент полезного действия - При преобразовании электрической энергии в акустическую, часть её преобразуется в звуковые колебания, а часть - в тепло и электромагнитное излучение. Вторую часть энергии можно считать потерями преобразования. Отношение акустической мощности, излучаемой при преобразовании, к электрической мощно-

сти, подводимой к громкоговорителю называют коэффициентом полезного действия (КПД).

$$\text{КПД} = \frac{P_a}{P_g} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

4.3.2 Электродинамические громкоговорители

4.3.3 Электростатические громкоговорители

4.4 Акустические системы

Глава 5

Тракт звукоусиления

В данной главе мы рассмотрим акустические аспекты тракта звукоусиления в различных условиях. Сначала определим: что будем называть трактом звукоусиления и характерные особенности его составляющих? Затем проанализируем их более детально и выработаем некоторые практические рекомендации по оптимизации тракта.

5.1 Структура тракта звукоусиления

В контексте акустических процессов, происходящих при звукоусилении, можно выделить следующие составляющие:

- непосредственно источник звука, например диктор или солист
- распространение прямого звука от источника до слушателя
- распространение звука от источника до микрофона
- усиление, обработка электрического сигнала системой звукоусиления и подача его на акустические системы
- распространение звука от акустических систем до слушателя и, в том числе, до микрофона.

Теперь будет уместно определить главную проблему, которая и накладывает основные ограничения на возможности работы системы звукоусиления. Она заключается в явлении акустического самовозбуждения, другими словами, в её переходе в режим автогенерации. Остановимся на этом подробнее.

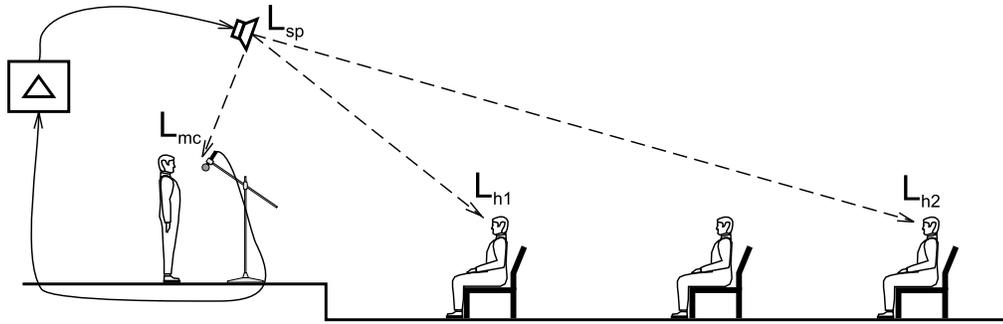


Рис. 5.1: Пространственная схема тракта звукоусиления

Звук, принимаемый микрофоном, усиливается и подаётся на акустические системы. От акустических систем звук распространяется в пространстве согласно законам акустики в различных направлениях, в том числе и к микрофону. После этого он снова усиливается и передается по тому же тракту, повторяя тот же процесс. Такой процесс называют обратной связью. Для того чтобы система звукоусиления перешла в режим автогенерации, должны быть выполнены два условия положительной обратной связи: петлевой коэффициент усиления должен быть больше единицы и сдвиг фазы сигнала, поступающего на вход системы, должен быть равен нулю или быть кратным 360° . Если петлевой коэффициент усиления меньше единицы, но близок к ней, тогда усиливаемый звук приобретает неприятную звенящую окраску. Если сдвиг фазы сигнала будет кратным или равен 180° , тогда такая обратная связь называется отрицательной. В этом случае генерация не возможна и, более того, общий уровень звука понижается. С помощью отрицательной обратной связи можно, например, уменьшать уровень зашумленности в пространстве.

Модуль коэффициента усиления тракта по полной петле, с положительной обратной связью, где K_0 — коэффициент передачи системы звукоусиления и β_0 — коэффициент обратной связи:

$$|K| = \frac{K_0}{1 - \beta_0 \cdot K_0} \quad (5.1)$$

Модуль коэффициента усиления тракта по полной петле, с отрицательной обратной связью:

$$|K| = \frac{K_0}{1 + \beta_0 \cdot K_0} \quad (5.2)$$

Наиболее существенное влияние на процесс звукоусиления оказывает обратная акустическая связь в закрытых помещениях, где уровень диффуз-

ного, вторичного звукового поля существенно выше, чем на открытых площадках. В таких условиях, к вышеназванным составляющим тракта звукоусиления добавляются и, отраженные от внутренних поверхностей помещения, вторичные звуковые волны.

5.2 Влияние обратной связи на частотную характеристику звукового поля

Необходимо обратить особое внимание также и на степень влияния обратной связи на неравномерность звукового поля, как в пространстве, так и по шкале частот.

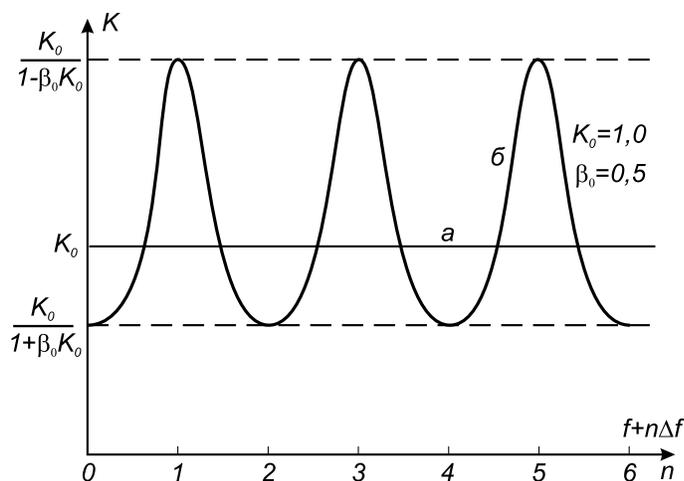


Рис. 5.2: Амплитудно-частотная характеристика тракта

На рисунке (рис. 5.2) показаны две АЧХ: a — без обратной связи; b — с обратной связью, близкой к самовозбуждению.

Положение усугубляется тем, что звуковые волны, распространяясь в пространстве, изменяют фазу в зависимости от частоты и от пути прохождения. В результате этого на одних частотах обратная связь становится положительной, а на других — отрицательной. Это приводит к увеличению неравномерности амплитудно-частотной характеристики тракта. Причём неравномерность АЧХ изменяется при перемещении микрофона в пространстве или ином изменении звукового поля. Компенсировать такую неравномерность вручную оперативно, с помощью эквалайзера, практически невозможно. Правда, современные процессоры динамического эквалайзинга в сочетании с лимитерами, позволяют отслеживать и компенсировать такие

изменения АЧХ тракта. Но радикально решить данную проблему это не позволяет. Улучшить акустические условия работы системы звукоусиления, можно оптимизируя характеристики тракта звукоусиления.

5.3 Индексы тракта звукоусиления

Для того, чтобы можно было оценивать уровни усиления звука в различных точках тракта и соотносить их с уровнями звукового поля, принято использовать понятие индексов тракта звукоусиления.

Индекс усиления — повышение уровня звукового давления в точке нахождения слушателя L_h по отношению к уровню звукового давления в точке установки микрофона L_{mc} с помощью системы звукоусиления.

$$Q = L_h - L_{mc} \quad (5.3)$$

Оптимальный индекс — индекс усиления, при котором слушатель будет воспринимать звук максимально разборчиво и комфортно. Оптимальный индекс для музыкальных программ: $Q = 12 \dots 16$ dB, оптимальный индекс для речевых программ: $Q = 10 \dots 14$ dB.

Рациональный индекс — индекс усиления, при котором достигается максимальная разборчивость речи, если дальнейшее увеличение усиления приведёт к ухудшению разборчивости речи в результате перегрузки слуха.

Фактический индекс — конкретное значение индекса звукоусиления реального тракта.

Предельный индекс при критическом уровне усиления — индекс усиления, при котором система звукоусиления будет работать не устойчиво, на пороге возникновения автогенерации.

$$Q_{max} = q_{mc}(\theta_{mc}) + L_h - L_{mc} \quad (5.4)$$

Где: $q_{mc}(\theta_{mc})$ — направленность микрофона, выраженная в dB,
 θ_{mc} — угол между рабочей осью микрофона и звуковым лучом, приходящим от акустической системы.

$$q_{mc}(\theta_{mc}) = -20 \lg R_m(\theta_{mc}) \quad (5.5)$$

Где: $R_m(\theta_{mc})$ — характеристика направленности микрофона.

При $\theta_{mc} = 0$, $R_m = 1$.

Эта составляющая в формуле (5.4) учитывает направленные свойства микрофона. Если микрофон имеет диаграмму направленности в виде сферы, то $q_{mc}(\theta_{mc}) = 0$ dB. Если диаграмма направленности имеет форму кар-

диоиды, суперкардиоиды или гиперкардиоиды и т.п., то индекс усиления повышается за счёт ослабления чувствительности микрофона в боковых направлениях.

На практике рассчитывать на повышение предельного индекса усиления за счет применения остронаправленных микрофонов можно про условия, если они неподвижны и угол $\theta_{mc} \neq 0$.

Рекомендуемый запас по усилению, относительно предельного критического индекса, для устойчивой работы системы звукоусиления, должен быть примерно равен 12дВ.

$$Q_{max} = q_{mc}(\theta_{mc}) + L_h - L_{mc} - 12 \quad (5.6)$$

5.4 Временные характеристики тракта звукоусиления

Как видно из схемы тракта звукоусиления, разные звуковые волны преодолевают различное расстояние, распространяясь к слушателю. Это приводит к тому, что они задерживаются на разные интервалы времени и, как следствие, достигают слушателя не одновременно. В результате таких временных задержек ухудшается разборчивость речи. Должен обратить внимание на то, что в данном случае не имеет значение, между какими именно волнами возникает задержка. Существенна только разница уровней звуковых давлений этих волн и величина времени задержки.

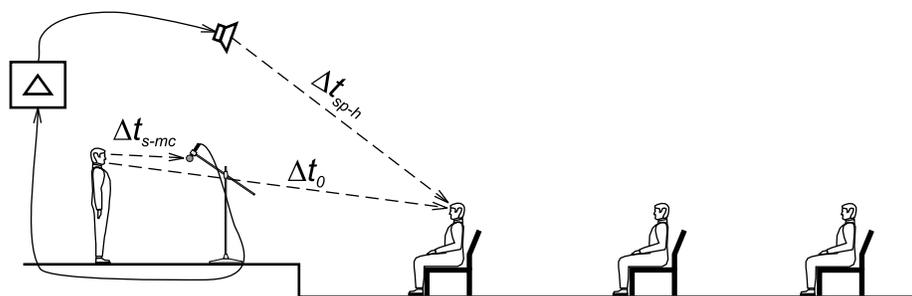


Рис. 5.3: Временные задержки тракта

На рисунке (рис.5.3) показаны звуковые лучи, вдоль которых распространяются звуковые волны, задерживаясь при этом на интервалы времени: Δt_0 - время задержки звуковых волн при распространении от первичного источника до слушателя; Δt_{s-mc} - время задержки звуковых волн при

распространении от источника до микрофона; Δt_{sp-h} - время задержки звуковых волн при распространении от громкоговорителя до слушателя.

Суммарное время задержки, определяемое системой звукоусиления:

$$\Delta t_{\Sigma} = \Delta t_{s-mc} + \Delta t_{sp-h} \quad (5.7)$$

Для того, чтобы разница прихода звуковых волн к слушателю не оказывала существенного влияния на разборчивость речи, необходимо чтобы она не превышала значение 50 мсек.

$$|\Delta t_0 - \Delta t_{\Sigma}| \leq 50ms$$

Аналогичный подход применяется при проектировании и анализе многоканальных систем звукоусиления. Для компенсации разницы времени прихода звуковых волн в таких системах применяют линии задержек.

При озвучивании в закрытых помещениях, на разборчивость речи также оказывает заметное влияние и вторичное звуковое поле, т.е. отраженные от внутренних поверхностей вторичные звуковые волны.

5.5 Оптимизация тракта звукоусиления

На основании рассмотренных выше особенностей работы систем звукоусиления, можно предложить некоторые рекомендации по оптимизации характеристик тракта.

Для уменьшения склонности системы звукоусиления к самовозбуждению, необходимо уменьшить ту долю звуковой энергии, которая излучается акустическими системами, а затем принимается микрофоном или группой микрофонов. Это позволит уменьшить коэффициент обратной связи системы.

Ослабить обратную связь можно следующими способами:

- применить акустические системы или группы акустических систем с направленным излучением
- увеличить расстояние от акустических систем до микрофонов
- применить остронаправленные микрофоны
- уменьшить расстояние от источников первичного звука до микрофонов.

Рассмотрим подробнее каждый из перечисленных пунктов. Прежде всего, должен отметить, что использование предложенных методов оптимизации тракта звукоусиления, должно осуществляться индивидуально, с учетом конкретных акустических условий озвучиваемых площадок или залов.

Применение акустических систем с повышенным индексом направленности позволяет обеспечить более высокий уровень звукового давления в зоне нахождения слушателей и, наряду с этим, ослабить давление в точке установки микрофонов. К такой группе акустических систем можно отнести рупорные излучатели. Однако при этом не следует забывать о недостатках рупоров – достаточно высокой неравномерности амплитудно-частотной характеристики и динамических резонансных искажениях. Поэтому область

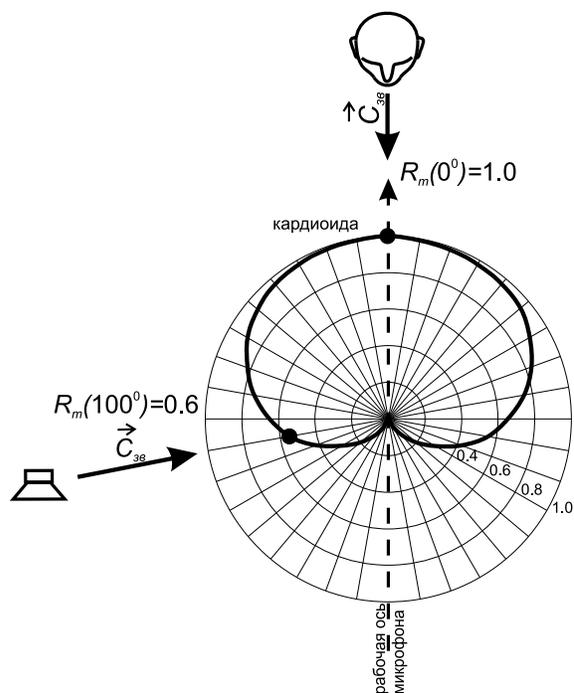


Рис. 5.4: Повышение предельного индекса за счет применения микрофона с кардиоидной диаграммой направленности

применения таких систем ограничена мероприятиями, где требования к качеству звука не очень высоки. Кроме рупоров, повысить степень направленности позволяет применение линейных массивов. Разумеется, особое внимание следует обратить на оптимальное размещение и ориентацию в пространстве таких акустических систем.

Второй фактор, влияющий на уровень обратной связи, – это удаление

акустических систем от микрофонов. Чаще всего их принято разносить в стороны или вверх относительно сцены.

Третий фактор — это применение микрофонов с характеристикой направленности в виде кардиоиды, суперкардиоиды или гиперкардиоиды (см. рис. 5.4). В этом случае необходимо принимать меры, которые позволят предотвратить поворот микрофонов рабочей осью в сторону акустических систем.

Четвертый фактор — максимально возможное приближение микрофона к источнику первичного звука. Примером может служить применение ручных микрофонов или микрофонных гарнитур. Это позволяет увеличить уровень звукового давления у микрофона от источника первичного звука относительно уровня давления от акустических систем, что позволит увеличить запас по усилению без риска ввести тракт в режим самовозбуждения.

И, в завершение, должен отметить необходимость учета временных задержек тракта с применением компенсирующих линий задержек при инсталляции системы звукоусиления (см. рис. 5.5).

В остальном же, инсталляция системы звукоусиления — это творческий процесс, который требует профессионального опыта.

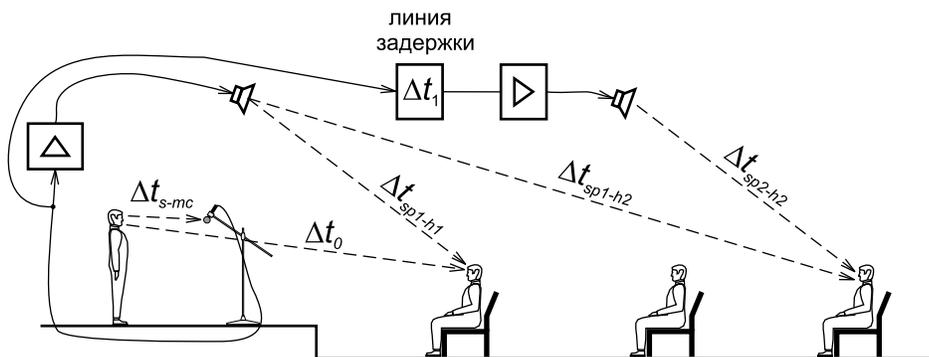


Рис. 5.5: Использование линии задержки для выравнивания времени прихода звуковых волн

Глава 6

Анализ и коррекция акустических свойств среды

6.1 Акустические условия в закрытых помещениях

6.1.1 Анализ архитектурных особенностей зоны озвучивания

Каждое помещение, в котором применяется звуковое оформление мероприятий, обладает своей индивидуальной внутренней архитектурой, которая предопределяет его акустические свойства. Для анализа таких свойств необходимо определить те элементы внутренней архитектуры, которые вносят наиболее существенный вклад в формирование звукового поля в данном помещении.

Геометрическая форма зала и её влияние на звуковое поле

Первое, на что следует обратить внимание, это размеры и форма помещения. Размер помещения, в контексте его акустики, можно условно разделить на малые и большие. К малым относятся помещения с внутренним объемом примерно до 100 м^3 , а к большим - более 100 м^3 . Малые помещения имеют такие внутренние размеры, при которых могут возникать достаточно сильные резонансы. Эти резонансы ещё называют **собственными частотами помещения**. Они будут возникать, если длина звуковой волны λ или $n \cdot \lambda$ будут равны расстоянию между двумя параллельными стенами или между полом и потолком, если n равно $\frac{1}{2}$, 1, 2, 3... . С увеличением значения n более 5, при оптимальном звукопоглощении, добротность резонансов

нансов уменьшается, их влияние на звуковое поле менее заметно и поэтому ими можно пренебречь. На наличие и характер резонансов влияет и форма помещения. Наиболее сильные резонансы и максимальное их количество могут возникать в помещениях прямоугольной формы. Зная линейные размеры помещения, можно рассчитать резонансы по формуле (2.5).

В простом, малом прямоугольном помещении частоты резонансов будут определяться его высотой H , шириной B и длиной L . Если какие-либо из этих размеров будут равны или близки по значению, тогда резонансы, определяемые ими, будут заметно усилены и неравномерность звукового поля существенно увеличится. Вследствие этого, для наиболее равномерного распределения частот резонансов по шкале частот, соотношение между указанными размерами должны удовлетворять **правилу "золотого сечения"**.

$$H : B : L = 3 : 5 : 8$$

Тогда и неравномерность звукового поля будет уменьшена.

Несколько иначе резонансы проявляются в больших залах. Вследствие того, что фронт звуковых волн чаще всего является сферическим, преодолевая большие расстояния, эти волны значительно рассеиваются в свободном пространстве зала. При суперпозиции прямых и отраженных волн, совпадающих по фазе, существенного накопления звуковой энергии не произойдет, т.к. каждая последующая отражённая волна обладает значительно меньшей интенсивностью. Таким образом, можно говорить, что добротность основных резонансов в больших залах невысока. Однако необходимо обратить внимание на локальные резонансы. Если в зале для слушателей есть архитектурные конструкции, образующие две параллельные плоскости, например между дном балкона и полом партера, то в этом промежуточном пространстве возникают благоприятные условия для резонанса с более высокой добротностью. В таких локальных зонах неравномерность звукового поля увеличивается.

6.1.2 Диффузное звуковое поле в помещении

Если соотнести реальные размеры основных источников звука в помещениях с размерами самого помещения, то эти источники можно считать точечными. Вследствие этого, фронты излучаемых звуковых волн в большинстве случаев являются сферическими. Чем дальше распространяется фронт волны от источника звука, тем больше он приближается к плоской форме на ограниченном участке его площади. В свою очередь плоский фронт, при суперпозиции падающей и отраженной волны, формирует ярко выраженное поле интерференции или, в соответствующих условиях, — поле резонансов.

Для ослабления этих недостатков и повышения равномерности звукового поля, рекомендуется отражающие поверхности делать рельефными и выпуклыми. Это искажает форму фронта отраженной волны и повышает степень диффузности звукового поля, что позволяет повысить его равномерность.

В классических театральных залах диффузность звукового поля повышается благодаря художественным барельефам. В новых современных залах применяются специальные рассеивающие щиты.

6.1.3 Поглощение звука в помещениях

Каждый элемент внутренних архитектурных и технических конструкций поглощает в той или иной мере звук. Помимо этого, сами зрители также являются достаточно эффективными звукопоглотителями. Всё это влияет на акустические свойства помещения. Поэтому, для полноценного анализа акустических свойств зала необходимо учитывать коэффициенты поглощения каждого элемента. Пренебречь можно только теми элементами, которые имеют небольшую площадь и не оказывают заметного влияния на суммарный результат анализа.

Прежде всего, проведём классификацию типов поглотителей. Все типы поглотителей можно условно разделить на такие категории. К первой относятся те элементы конструкций, которые нельзя модернизировать. Например, вентиляционные решётки. Их нельзя убрать из помещения или закрыть другими материалами, не нарушив при этом их функциональность. К этой категории можно отнести и ряд элементов внутреннего дизайна зала, которые несут эстетическую нагрузку. Ко второй категории звукопоглотителей можно отнести зрителей и исполнителей. Эта категория отличается непостоянством и некоторой непрогнозируемостью в количественном измерении. К третьей категории можно отнести те элементы, которые можно активно модернизировать для того, чтобы улучшить акустику зала. Первую категорию приходится принимать как факт и учитывать в расчетах. Вторую категорию можно определять в расчетах по средним статистическим значениям. И третью — можно выбирать, рассчитывать и корректировать.

Для третьей категории звукопоглотителей применяют различные материалы и конструкции, которые тоже можно условно разделить на три вида: пористые поглотители, пористые перфорированные экраны и резонансные.

Различные виды поглотителей имеют разную эффективность в звуковом диапазоне частот. Для достижения требуемой характеристики звукопоглощения применяют комбинации из разных поглотителей. Причем, для каждого конкретного помещения рекомендуется производить индивидуальную настройку с подбором и установкой поглотителей.

Пористые поглотители

К пористым поглотителям можно отнести мягкие материалы на тканевой основе: ковры, войлок, минеральная вата, стекловата, кулисы и др. А также – жесткие материалы, имеющие пенистую структуру, известковая штукатурка, фиброакустит, арборит и материалы на основе вязких веществ (битумные смолы, поролон и т.д.). Кроме этого, ряд фирм производит акустические поглотители, предназначенные для отделки помещений со специализированными требованиями к их акустическим свойствам. Такие материалы имеют наибольший коэффициент поглощения преимущественно в области частот от 500 Hz и выше.

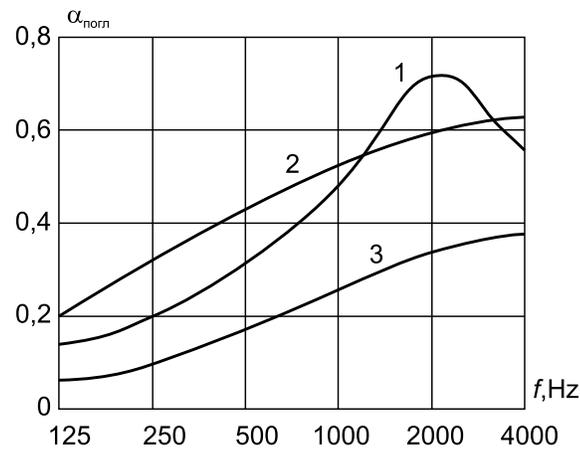


Рис. 6.1: Коэффициент поглощения пористых поглотителей

На рисунке 6.1: 1—фиброакустит в плитах ($d = 3,5$ см), 2—арборит в плитах ($d = 2$ см), 3—ковер с ворсом на бетонном полу, где d — толщина плиты.

На коэффициент поглощения этими материалами влияет и расстояние между поглотителем и стенкой, на которую они крепятся. При увеличении этого расстояния, коэффициент поглощения несколько увеличивается.

Конструктивно пористые поглотители могут представлять собой плоские плиты, маты или конструкции, собранные из клиновидных элементов, направленных острыми краями в сторону внутреннего пространства помещения. Последний из перечисленных поглотителей, может обеспечивать наиболее высокую степень поглощения в широком диапазоне частот. Поэтому такой поглотитель применяется в измерительных лабораториях для исследований и экспериментальных работ.

Пористые перфорированные экраны

Описание: Пористый перфорированный экран представляет собой жесткий плоский лист со сквозными отверстиями, расположенный параллельно стене на некотором расстоянии. Пространство между перфорированным листом и стеной заполняется мягким поглотителем, например минеральной ватой или стекловатой. В зависимости от того, как перфорирован лист (имеет значение размер отверстий и плотность перфорации на единицу площади), такая конструкция может считаться перфорированным экраном или резонатором Гельмгольца. Если плотность перфорации большая и отверстия имеют внутреннюю конусообразную форму (см. рис. 6.3), тогда можно считать, что это перфорированный экран. Если плотность перфорации относительно невелика, размер отверстий и толщина листа определены расчетом по соответствующей методике, тогда можно считать, что это система резонаторов Гельмгольца (см. рис. 6.4). Справедливости ради, надо отметить, что и перфорированный экран и система резонаторов Гельмгольца практически одно и то же, за исключением некоторых особенностей в их свойствах. Остановимся на этом подробнее.

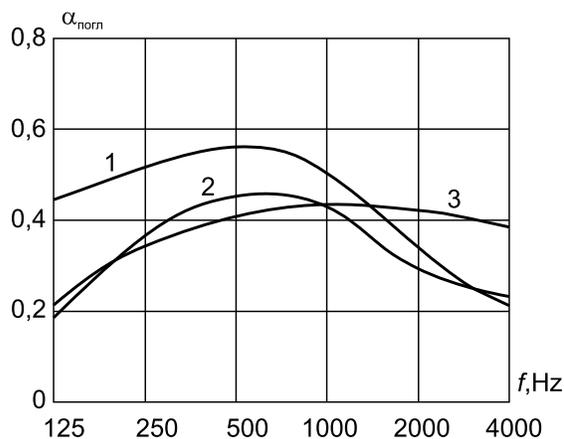


Рис. 6.2: Коэффициенты поглощения перфорированных экранов

На рисунке 6.2: 1—перфорация круглыми отверстиями, $d = 3\text{мм}$, $l = 10\text{см}$, $D = 7\text{мм}$, $b = 3\text{см}$; 2—перфорация круглыми отверстиями, $d = 3\text{мм}$, $l = 5\text{см}$, $D = 7\text{мм}$, $b = 3\text{см}$; 3—перфорация щелевыми отверстиями, $d = 3\text{мм}$, длина щели $4,5\text{см}$, расстояние между щелями по вертикали 2см , расстояние между щелями по горизонтали 1см , воздушное пространство между листом фанеры и стеной заполнено матами из асбестовой ваты. Где: d —толщина листа, l —расстояние между листом и стеной, D —диаметр отверстия, b —расстояние между отверстиями.

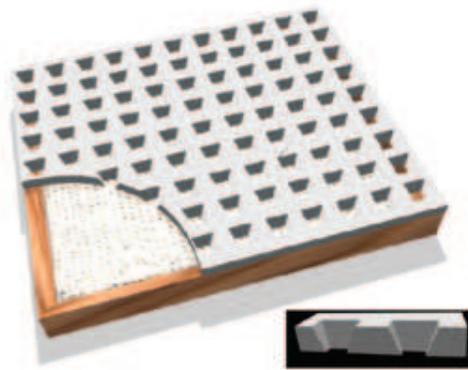


Рис. 6.3: Перфорированный экран

Принцип действия перфорированного экрана заключается в том, что звуковые колебания падают на его поверхность со стороны, на которой площадь отверстий больше, чем с противоположной. Поэтому акустическое сопротивление в этом случае меньше, чем при падении звуковой волны с обратной стороны. Благодаря этому звук более эффективно распространяется со стороны пространства студии или зала в пространство между стеной и экраном, чем в обратном направлении. Та часть звуковой волны, которая прошла в пространство между стеной и экраном многократно отражается от внутренних поверхностей и поглощается внутренним поглотителем. Разумеется, и в этом случае возможны различные резонансы. Например: резонанс самого экрана, который обладает некоторой упругостью, полуволновой или волновой резонанс, определяемый параллельными плоскостями экрана и стены, резонанс внутренней упругой массы воздуха и т.д. Но добротность таких резонансов не может быть высокой из-за того, что все они демпфированы внутренним поглотителем и имеют соответствующую геометрическую структуру.

Система резонаторов Гельмгольца несколько отличается конструктивно от перфорированного экрана. Главное отличие заключается в том, что отверстия перфорации в жестком листе являются горловиной резонатора, а пространство между листом и стеной — внутренним объемом резонатора, при этом суммарная площадь отверстий меньше, чем соответствующая площадь отверстий в перфорированном экране. Размеры отверстий, их глубина и суммарное количество определяют свойства резонанса. Изменяя перечисленные параметры, можно настраивать резонансную частоту. Наиболее удобно настраивать резонатор Гельмгольца в таких поглотителях изменением расстояния между панелью и стеной. Поглощение звука будет про-

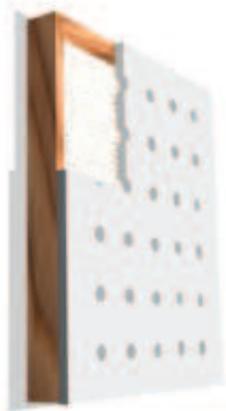


Рис. 6.4: Система резонаторов Гельмгольца

исходить за счет затрат энергии на резонанс и сопутствующего поглощения в пористом поглотителе, которым заполнено внутреннее пространство резонатора.

Поглотитель на основе резонатора Гельмгольца более эффективен в относительно узкой полосе низких частот, а перфорированный экран – в более широкой полосе частот.

Расчет резонаторов Гельмгольца:

$$f_1 = \frac{c_{зв}^{\vec{}}}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{d \cdot V}} \quad (6.1)$$

где: f_1 —основная частота резонанса, $c_{зв}^{\vec{}}$ —скорость звука в воздухе, S —площадь поперечного сечения горла резонатора (отверстия), d —длина горла резонатора (толщина панели), V —объем полости резонатора.

Если перфорация распределена по поверхности листа равномерно, тогда:

$$f_1 = \frac{c_{зв}^{\vec{}}}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l_{эфф} \cdot d^2 \cdot h}} \quad (6.2)$$

где: $l_{эфф}$ —эффективная толщина листа, h —расстояние от листа до стены, остальные обозначения аналогичны предыдущим.

Если отверстия представляют собой щели, тогда:

$$f_1 = \frac{c_{зв}^{\vec{}}}{2\pi} \sqrt{\frac{b}{l_{эфф} \cdot a \cdot h}} \quad (6.3)$$

где: b —ширина щели, a —расстояние между щелями, остальные обозначения аналогичны предыдущим.

Данный расчет не дает точного результата, поэтому требует дополнительной корректирующей настройки при изготовлении и монтаже.

Резонансные поглотители



Рис. 6.5: Щит Бекеши

Описание: Резонансный поглотитель представляет собой плоский сплошной податливый лист, например тонкая фанера или холст, установленный параллельно стене на жестких ребрах из деревянных брусков.

Резонансные свойства такой конструкции определяются упругостью воздуха, заключенного во внутреннем пространстве между стеной и листом, и упругими свойствами самого листа. Поглощение звука осуществляется за счет потерь на изгиб листа и за счет поглощения во внутренней полости резонатора. Для повышения степени поглощения звука во внутренней полости, ее заполняют пористым поглотителем возле жестких ребер. На основе такой конструкции изготавливают поглотители под названием "щиты Бекеши".

Резонансные поглотители наиболее эффективны в узкой полосе частот и менее эффективны в высокочастотной области звукового диапазона.

На рисунке 6.6: 1— 3-мм фанера с воздушным промежутком 5см, края демпфированы стекловатой; 2— 3-мм фанера с воздушным промежутком

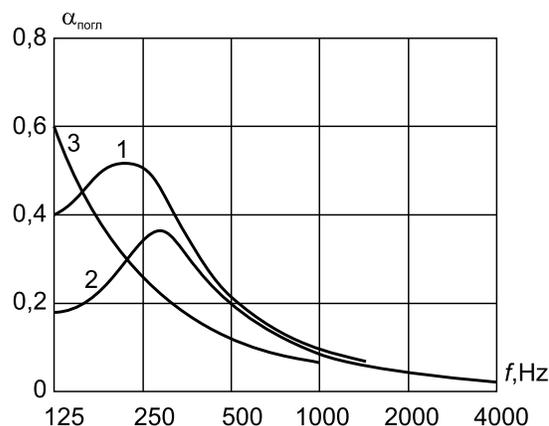


Рис. 6.6: Коэффициенты поглощения щитов Бекеша

5см, без демпфирования; 3— 6-мм фанера с воздушным промежутком 10см, края демпфированы стекловатой.

Расчет щита Бекеша для натянутого холста:

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho \cdot t \cdot b}} \quad (6.4)$$

для фанерного листа при соотношении длины к ширине (2:1):

$$f_n = 3,45 \cdot 10^3 \left(\frac{t}{l^2}\right) \quad (6.5)$$

где: n —порядок резонансной частоты, l —длина полотна или листа фанеры, ρ —плотность холста, t —толщина холста или фанеры, b —ширина полотна, F —сила натяжения полотна (Н).

Данный расчет не дает точного результата, поэтому требует дополнительной корректирующей настройки при изготовлении и монтаже.

6.1.4 Звукоизоляция

Как говорил известный музыкант Г.Нейгауз: "... звук — сама материя музыки ... звук должен быть закутан в тишину, звук должен покоиться в тишине, как драгоценный камень в бархатной шкатулке". Действительно, для полноценной работы со звуком должны быть созданы условия с минимальным уровнем посторонних шумов. Особенно высокие требования к обеспечению

низкого уровня шумов предъявляются в студиях звукозаписи. В наш технологичный век о полной тишине можно только мечтать, особенно в условиях крупных городов. Единственный реальный способ избавиться от посторонних шумов — применить эффективную звукоизоляцию. Разумеется, можно порекомендовать строить студии вдали от транспортных магистралей, промышленных предприятий,строек. Но на практике это далеко не всегда возможно.

Наиболее проблематично бывает избавиться от низкочастотных вибраций и детонаций. При этом эффективная звукоизоляция должна обеспечивать максимальный уровень звукового давления шумов внутри студии не более, чем 20 . . . 25 dB, что соответствует нижнему пределу чувствительности большинства конденсаторных микрофонов.

Рассмотрим основные принципы и технические решения, которые позволяют обеспечить приемлемый уровень звукоизоляции помещений от посторонних шумов. Прежде всего определим пути проникновения внешних шумов в помещение:

- дифракция и проникание через щели и отверстия в дверях и окнах
- детонации через твердые несущие конструкции здания (стены, фундамент, пол, потолок)
- изгибные деформации оконных стекол, дверей, стен, пола, потолка под воздействием звукового давления
- шумы от вентиляционных механизмов, двигателей, трансформаторов, лифтов.

Исходя из перечисленных пунктов, можно рекомендовать следующие меры для повышения уровня звукоизоляции.

Необходимо устранять все щели и отверстия, соединяющие данное помещение с внешним пространством, кроме технологических вентиляционных воздуховодов. Вентиляционные конструкции должны быть снабжены глушителями. Все механизмы, вызывающие вибрации и детонации должны быть установлены на демпфирующих подушках. Стены должны быть массивными и жесткими. Окна необходимо собирать из тройного стеклопакета с плотной герметизацией. Двери должны быть плотными и массивными, покрытыми слоем звукопоглотителя и тщательно подогнаны. Для большей эффективности рекомендуется использовать двойные двери с разделяющим их тамбуром. Однако всех этих мер недостаточно для достижения требуемой звукоизоляции. Поэтому приходится применять ряд дополнительных решений для получения оптимального результата.

Одним из способов существенно улучшить звукоизоляцию является построение студии по принципу: коробка – в коробке. При этом внутренняя часть помещения должна быть установлена на свой, изолированный фундамент. Никакие жесткие связи конструктивных элементов внутренней коробки помещения с внешними не допустимы. Даже один гвоздь, соединяющий внутреннюю коробку с внешней, может существенно ухудшить качество звукоизоляции. Пол должен быть плавающим, т.е. установлен на амортизирующие подушки и не должен иметь жестких связей, контактов с фундаментом и стенами. Потолки применяют подвесные, с амортизирующими подвесками. Пространство между стенами внутренней коробки и стенами внешней коробки заполняется звукопоглотителем, например стекловатой. Определённую роль в звукоизоляции играют и звукопоглотители внутри самой студии.

Для повышения эффективности звукоизоляции от тех шумов, которые передаются за счет изгибных волн в стенах, потолках и т.д., рекомендуется применять многослойную структуру. Оконные стекла рекомендуется устанавливать под углом друг относительно друга.

6.1.5 Реверберация

На акустику в зале наиболее сильное влияние оказывает такой процесс, как реверберация. Звук, распространяясь от источника в разных направлениях, отражаясь от препятствий и меняя направление, формирует сложное диффузное звуковое поле. Поскольку скорость звука относительно невысока, то после окончания излучения первичным источником, в зале некоторое время слышно вторичное звуковое поле. Если слушатель находится в какой-либо одной локальной зоне, то в данную зону, после окончания первичного звукового сигнала продолжают распространяться множественные вторичные звуковые волны, отраженные от внутренних поверхностей зала. Все эти волны образуют суперпозицию в каждой точке пространства данного помещения. Количество отражений для любой волны может равняться, разумеется, от одного до бесконечности. Учитывая, что после очередного отражения, часть энергии звуковой волны теряется и нелинейно рассеивается в пространстве, каждая последующая отраженная волна ослабляется по интенсивности. В результате этого, в помещении можно наблюдать постепенное убывание интенсивности суммарного звукового поля после прекращения излучения первичным источником. Это явление и называется **реверберацией**. Время, в течение которого звуковое давление $P_{зв}$ суммарного вторичного звукового поля после выключения первичного источника звука уменьшается в 1000 раз, что соответствует -60 dB, называют **временем реверберации** $T_{рев}$.

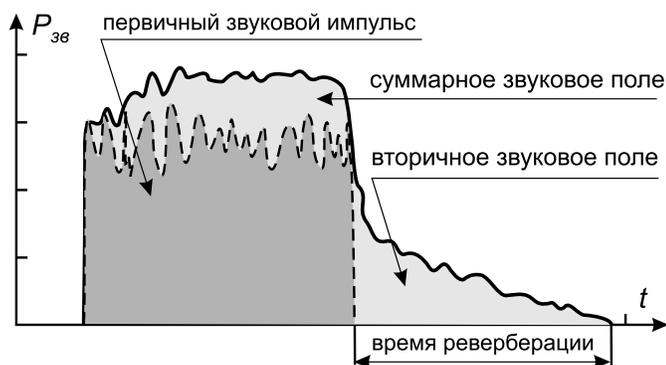


Рис. 6.7: Кривые звуковых давлений с процессом реверберации

На разных частотах, волны могут иметь разные формы фронтов, а так же, при отражениях, в разной степени поглощаться поверхностями помещения. Вследствие этого, время реверберации в одном и том же помещении на разных частотах разное. Поэтому следует различать общее, суммарное время реверберации в звуковом диапазоне частот и время реверберации на отдельных частотах, либо в отдельных узких полосах частот. Общее время реверберации в звуковом диапазоне частот измеряется с использованием "розового" шума. Время реверберации в узких полосах частот, например шириной в $\frac{1}{3}$ октавы, измеряется с использованием "розового" шума отфильтрованного $\frac{1}{3}$ октавным полосовым фильтром. Время реверберации на отдельных частотах измеряется с использованием тонального генератора. Рекомендуемое общее оптимальное время реверберации для некоторых

Таблица 6.1: Оптимальное время реверберации

Зал для слушателей	Объём, м ³	$T_{\text{рев}}$, сек
Драматический театр	15000	1,4 – 1,6
Музыкальный и оперный театр	15000	1,6 – 1,8
Концертный зал	15000	2 – 2,2
Студия звукозаписи для джазовой музыки	4000	0,9 – 1,1
Заглушенная студия звукозаписи	200	0,15
Речевая студия	100	0,4

помещений приводится в таблице (6.1).

6.1.6 Расчет времени реверберации

Определение внутреннего объёма зала

Определить внутренний объёма зала можно из технической документации на данное здание или непосредственным измерением.

Расчет фонда поглощения зала

Фонд поглощения зала позволяет учесть способность внутренних отражающих поверхностей зала поглощать звуковую энергию и обозначается A . Для расчета фонда поглощения необходимо определить площадь отражающих поверхностей с однородным покрытием и одинаковым коэффициентом поглощения.

Таблица 6.2: Перечень материалов

n	Тип материала отражающей поверхности или покрытия
1	Стены оштукатуренные, покрытые масляной краской
2	Проём сцены
3	Вентиляционные решетки
4	Двери лакированные, сосновые
5	Ковёр безворсовый
⋮	⋮
11	Слушатели

1. Необходимо составить пронумерованный перечень материалов (см. пример: табл. 6.2), из которых состоят отражающие поверхности и затем все данные свести в таблицу, в которой указать значения коэффициентов поглощения, соответствующей площади и расчетные значения частных фондов поглощения для соответствующей частоты (см. пример: табл. 6.3).

2. Частные фонды поглощения рассчитываются по формуле:

$$A_n = S_n \cdot \alpha_n$$

Таблица 6.3: Расчет фонда поглощения на частоте 125 Hz

n	1	2	3	4	5	...	11
α_n	0,01	0,2	0,3	0,3	0,02	...	0,33
$S_n, \text{м}^2, \text{чел.}$	1200	80	6	24	500	...	450
A_n	12	16	1,8	7,2	10	...	148,5

3. После этого необходимо повторить расчет с заполнением аналогичной таблицы для каждой из следующих частот: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz.
4. Следующим шагом расчета является определение среднего коэффициента поглощения для всего зала и соответствующей частоты по формуле:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\sum A_n}{\sum S_n} = 0,087$$

и, затем определяем α' по формуле: $\alpha' = -\ln(1 - \alpha_{\text{ср}}) = 0,09$

5. Результаты вычислений сводим в таблицу (6.4).

Таблица 6.4: Расчет коэффициентов поглощения

f, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha_{\text{ср}}$	0,087	...	...	...	...	...
α'	0,09	...	...	...	...	...

Расчет времени реверберации

Расчет времени реверберации, для каждой из перечисленных частот, осуществляется по формуле Эйринга.

$$T_{\text{рев}} = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{\text{ср}})}, \text{ или } T_{\text{рев}} = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \alpha'} \quad (6.6)$$

где: $S = \sum S_n$, и $\alpha' = -\ln(1 - \alpha_{\text{ср}})$

Результаты вычислений сводим в таблицу (6.5). Полученные расчетные значения $T_{\text{рев}}$ необходимо сравнить с требуемыми оптимальными значениями $T_{\text{опт}}$ для данного зала (табл. 6.6). Если расчетные значения $T_{\text{рев}}$ отлича-

Таблица 6.5: Расчет времени реверберации

f , Hz	125	250	500	1000	2000	4000
α'	0,09	...	...	...	...	...
$T_{\text{рев}}$, сек	3,8	...	...	...	...	...

Таблица 6.6: Оптимальное времени реверберации

f , Hz	125	250	500	1000	2000	4000
$T_{\text{опт}}$, сек	2,0	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7

ются более, чем на 10% от требуемых $T_{\text{опт}}$, тогда необходимо заменить часть отражающих поверхностей с соответствующими коэффициентами поглощения на соответствующих частотах и пересчитать повторно значения $T_{\text{рев}}$.

Такую коррекцию звукопоглощающих покрытий необходимо повторять до получения требуемого результата.

6.1.7 Концепция LEDE

Концепции LEDE (Live End - Dead End) заключается в принципе отделки аппаратных студий звукозаписи, при котором передняя часть студии ограничена максимально эффективным поглотителем, а задняя часть — эффективным отражателем. Другими словами, передняя зона студии - "мертвая",

а задняя - "живая". Изначально такая концепция была предложена в 1978 г. Доном Дэвисом специально для студий звукозаписи. Но последующий опыт применения такого подхода на практике, показал его эффективность и для ряда других, более универсальных задач. Итак, в чем же "изюминка" этой концепции?

Прежде всего, необходимо отметить, что звучание музыки и речи в помещении с очень малым временем реверберации или наоборот - слишком большим, заметно ухудшает его качество и снижает разборчивость. С другой стороны, для максимальной разборчивости речи требуется время реверберации примерно 0,3-0,4 сек, однако для музыкальных студий звукозаписи оптимальное время реверберации равно примерно 0,8-1,1 сек. Частично решить данное противоречие можно в максимально заглушенной студии, со временем реверберации 0,3-0,4 сек (иногда даже 0,1-0,2 сек), применив в последующем искусственную реверберацию. Но искусственная реверберация не всегда может успешно и адекватно заменить естественную, даже с помощью самых дорогих ревербераторов. Кроме этого, если источник звука находится на некотором расстоянии от стен, у которых коэффициент поглощения на каких либо частотах невелик, то в таких случаях возникают так называемые фантомные, мнимые источники за счет отражений (см. раздел 2.2.2).

Концепция LEDE позволяет сохранить оптимальное время реверберации для музыкальных студий при достаточно высокой разборчивости речи и максимально ослабить появление фантомных источников. Для улучшения равномерности звукового поля в таких студиях, на задней стенке устанавливаются рассеивающие рельефные отражатели.

6.2 Расчёт мощности системы звукоусиления

Существует ряд методик расчёта мощности звукоусилительных систем для различных акустических условий. Мы рассмотрим одну, на мой взгляд, наиболее оптимальную и приближенную к практике.

Сначала необходимо выбрать требуемое звуковое давление в зоне озвучивания. Затем необходимо учесть поправки, которые будут отражать влияние особенностей акустических условий в месте проведения мероприятия.

Следующий шаг расчёта определяет расчёт и выбор акустических систем на основе значений, полученных в предыдущем пункте.

6.2.1 Выбор требуемого звукового давления

Выбор требуемого звукового давления осуществляется исходя из характера проводимого мероприятия и условий техники безопасности. Рассмотрим несколько, наиболее типичных вариантов.

Звукоусиление в театральных залах предполагает обеспечение высокой разборчивости речи и комфортного прослушивания музыки. Избыточное повышение среднего уровня звукового давления может привести к негативным последствиям в виде неприятных субъективных ощущений у слушателей. Кроме этого, в театре повышенный уровень "электронного" звука нарушает камерность восприятия, живого общения актеров со зрителями. С другой стороны, каждый слушатель в любом месте зала должен слышать достаточный по уровню и разборчивости звук. В реальных условиях сложно обеспечить равномерное по уровню давления и частотным характеристикам звуковое поле. Поэтому, наиболее высокие требования к качеству звука предъявляются в партере, примерно с первого до пятнадцатого ряда. Первые несколько рядов находятся в непосредственной близости от сцены и уровень прямого звука достаточен для комфортного восприятия. С пятнадцатого ряда уже есть необходимость в дополнительном звукоусилении. Однако, при воспроизведении фонограмм, её уровень должен быть сбалансирован с уровнем прямого звука, чтобы не маскировать друг друга. Исходя из вышесказанного, в таких условиях можно порекомендовать средний уровень звукового давления, в районе пятнадцатого ряда, около 70... 80 dB. В случае использовании фонограмм со звуковыми эффектами импульсного, взрывного характера, может возникнуть необходимость обеспечить уровень давления в 90... 100 dB.

В кинотеатрах средний уровень звукового давления рекомендуется более высокий, чем в театрах. Это обусловлено тем, что в кино характер звука отличается большой насыщенностью музыки и различными техногенными сценами. Кроме этого, просмотр фильмов будет более комфортным в центре зала. Поэтому требуемый уровень звукового давления рекомендуется обеспечивать в зоне центральных рядов зрителей. Средний уровень звукового давления должен быть 80... 90 dB, а для звуков взрывного характера — 100... 110 dB.

На концертных площадках или в концертных залах средний уровень звукового давления должен быть ещё выше — 100... 110 dB. В этом случае нельзя забывать о риске травмировать слух зрителей, особенно вблизи сцены. Аналогичны требования и к звуку на дискотеках.

И в завершение, можно добавить, что приоритет в выборе требуемого уровня звукового давления должен определять сам звукорежиссёр исходя из конкретных условий.

6.2.2 Определение влияния местных акустических условий на интенсивность звукового поля

Рассмотрим характерные особенности акустических условий на открытых площадках. Звуковое поле в данном случае определяется, в основном, первичным источником звука и системой звукоусиления. Характеристики звукового поля приближаются к характеристикам свободного поля. Внешнее окружение не оказывает существенного влияния на него, или оказывает незначительное влияние. Чаще всего, наибольшую долю в изменение результирующего поля относительно свободного, вносит земля или покрытие, отражая часть звуковой энергии. Учитывая то, что на земле находятся сами слушатели, которые являются эффективным поглотителем звука, доля отраженной энергии может быть достаточно мала. Если же вблизи находятся эффективные отражатели, например стены домов или другие конструкции, уровень звукового давления может несколько повыситься. Это зависит от места расположения отражателей, их ориентации в пространстве, размеров, расстояния и т.д. В этом случае необходимо строить лучевые эскизы и анализировать конкретные свойства отражателей. В частности, на летних площадках, сзади сцены может находиться арка или стена, которые могут повысить уровень давления на 1...2 дВ. Если отражатель находится на расстоянии сотен метров, то их влияние может проявиться в виде эхо. В обычных условиях нет особой необходимости рассчитывать степень повышения интенсивности звука или давления, поскольку погрешность основных расчетов, вероятно, будет превышать степень влияния отражателя. Выбранную поправку надо вычесть из требуемого уровня звукового давления, определённого в предыдущем пункте.

Для закрытых помещений величина поправки на повышение уровня давления, за счет вторичного звукового поля будет более существенной. Определение этой поправки требует более детального рассмотрения.

В закрытых помещениях вторичное звуковое поле в значительной мере зависит от фонда поглощения и геометрической конфигурации зала. Абсолютно точный расчет в таких залах практически невозможен, поэтому можно воспользоваться некоторыми упрощениями. Одно из которых — использование среднего коэффициента поглощения для определения энергии отраженных волн. Другими словами допустим, что вся первичная звуковая энергия падает на одну поверхность, с площадью равной общей суммарной площади внутренней поверхности зала, затем отражается и распространяется в зал. Энергия отраженных волн суммируется и данный цикл повторяется n раз.

Если рассматривать зал с оптимальным временем реверберации, то средний коэффициент поглощения в звуковом диапазоне частот будет равен при-

мерно $\alpha_{\text{погл}} = 0,25 \dots 0,27$.

Теперь можно определить степень увеличения суммарной звуковой энергии за счёт сложения вторичного звукового поля с первичным. Если принять интенсивность первичного звукового поля за единицу, то при $\alpha_{\text{погл}} = 0,27$ первая отражённая волна будет иметь интенсивность 0,73 от интенсивности первичной волны, вторая - 0,53 от первичной, третья - 0,39 и т.д. В результате получим суммарную интенсивность.

$$I_0 + \Delta I = \sum_{n=0}^{\infty} I_n \cdot (1 - \alpha_{\text{погл}})^n \quad (6.7)$$

Переведём приращение суммарной интенсивности в относительный уро-

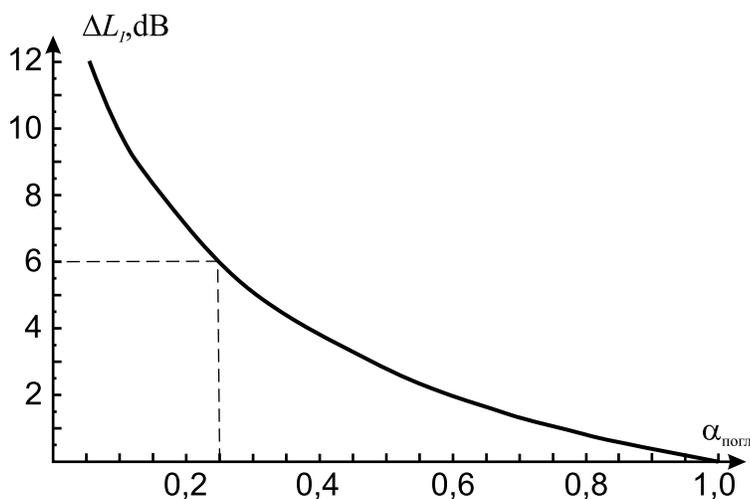


Рис. 6.8: Зависимость повышения уровня интенсивности от $\alpha_{\text{погл}}$.

вень:

$$L_{\Sigma I} = 10 \cdot \lg\left(\frac{I_0 + \Delta I}{I_0}\right)$$

Если $\alpha_{\text{погл}} = 0,25$, то интенсивность увеличится в 4 раза или на 6 dB, а если $\alpha_{\text{погл}} = 0,27$, то интенсивность увеличится в 3,7 раза или на 5,7 dB.

Разумеется, надо отметить, что такие соотношения интенсивностей будут несколько отличаться в разных местах зала, но для расчета мощности необходимо принять усредненное значение. Кроме того, в расчете не учитывались потери звука на диссипацию. Однако в залах, на низких и средних частотах, потери на диссипацию невелики, поэтому ими можно пренебречь.

Итак, можно сказать, что в зале с оптимальной реверберацией средний уровень интенсивности звука или давления повысится примерно на 6 дВ. Эту поправку и необходимо вычесть из требуемого звукового давления в зоне озвучивания.

6.2.3 Расчёт мощности акустических систем

Прежде всего, рассмотрим некоторые закономерности излучения звука акустическими системами (АС) и, на основе этого выполним расчёт подводимой к ним электрической мощности.

Как уже упоминалось ранее, характеристика направленности акустических систем различна на разных частотах. Если АС представляет собой закрытый тип корпуса или закрытый корпус с фазоинвертором, то на низких частотах характеристика направленности приближается к форме сферы. Поэтому в расчёте примем за исходное условие, что излучение звука АС — не направленное. Тогда можно утверждать, что интенсивность звука в свободном поле будет уменьшаться, с удалением от АС, в обратной квадратичной зависимости, а звуковое давление, соответственно, — в обратной пропорциональной зависимости. Такое утверждение справедливо, поскольку интенсивность звука связана с давлением квадратичной зависимостью:

$$I = \frac{P_{\text{эф}}^2}{\rho \cdot c_{\text{зв}}^2} \quad \text{или: } P_{\text{эф}} = \sqrt{I \cdot \rho \cdot c_{\text{зв}}^2}$$

Другими словами, с увеличением расстояния от АС до слушателя в n раз, звуковое давление будет уменьшаться в n раз. Следует заметить, что в данном случае потери на диссипацию и рассеяние в воздухе мы не учитываем, поскольку эти явления наиболее сильно влияют на процесс распространения звука на высоких частотах и на расстояниях более сотни метров.

Необходимо отметить, что отношение электрических мощностей, подводимых к АС равно отношению квадратов звуковых давлений, соответствующих данным мощностям.

$$\frac{P_{\text{эл1}} \cdot \text{КПД}}{P_{\text{эл2}} \cdot \text{КПД}} = \frac{P_{\text{ак1}}}{P_{\text{ак2}}} = \frac{I_1 \cdot S \cdot \cos \psi}{I_2 \cdot S \cdot \cos \psi} = \frac{\frac{P_{\text{эф1}}^2}{\rho \cdot c_{\text{зв}}^2}}{\frac{P_{\text{эф2}}^2}{\rho \cdot c_{\text{зв}}^2}} = \frac{P_{\text{эф1}}^2}{P_{\text{эф2}}^2} \quad (6.8)$$

Теперь рассмотрим связь электрической стороны АС с акустической, чтобы учесть её КПД. Для каждой АС, в паспортных данных даётся характеристическая чувствительность (ХЧ). На основе ХЧ можно рассчитать звуковое давление на рабочей оси, на расстоянии 1 м, при соответствующей

подводимой электрической мощности или наоборот — из звукового давления определить электрическую мощность.

К вышесказанному следует добавить, что расчет мощности надо проводить по верхнему пределу, т.е. для пиковых нагрузок, чтобы не допускать искажений и не подвергать повышенному износу систему звукоусиления. Для этого рекомендуется брать запас по перегрузке, +6dB прибавки к требуемому пиковому уровню. От ещё более высоких перегрузок защищать систему звукоусиления следует при помощи лимитеров.

Итак, на основе оговоренных выше условий, можно предложить следующий алгоритм расчета:

1. выбираем требуемый пиковый уровень звукового давления в точке расположения слушателя, для закрытого помещения, в зале для зрителей, например: 100 dB и прибавляем запас по перегрузке +6dB
2. вычитаем поправку на повышение уровня давления за счет вторичного звукового поля (для закрытого помещения): $106 - 6 = 100$ dB.
3. переводим уровень давления в точке нахождения слушателя в давление:

$$\text{Если: } L_P = 20 \cdot \lg \frac{P_{\text{эф}}}{P_0} \quad \text{тогда: } P_{\text{эф}} = P_0 \cdot 10^{\frac{L_P}{20}}$$

$$P_{\text{эф}} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{\frac{100}{20}} = 2 \text{ Па}$$

4. определяем расстояние от АС до слушателя, например: 15м.
5. определяем требуемое звуковое давление на рабочей оси АС, на расстоянии 1м:

$$P_{\text{эф1}} = 15 \cdot 2 \text{ Па} = 30 \text{ Па}$$

6. переводим обратно звуковое давление в относительный уровень давления:

$$L_{P1} = 20 \cdot \lg \frac{30}{2 \cdot 10^{-5}} = 123,5 \text{ dB}$$

7. определяем, во сколько раз повысится звуковое давление при 123,5dB относительно давления, которое обеспечивает АС при электрической мощности 1W, если ХЧ, например, равно $96 \frac{\text{dB}}{\text{м}\sqrt{\text{W}}}$:

$$123,5 - 96 = 27,5 \text{ dB}$$

$$\frac{P_{\text{эф1}}}{P_{\text{хч}}} = 10^{\frac{\Delta L_P}{20}} = 10^{\frac{27,5}{20}} = 23,7$$

8. определяем электрическую мощность, подводимую к АС и обеспечивающую требуемое звуковое давление в точке нахождения слушателя из формулы (6.8):

$$\text{Если: } \frac{P_{\text{эл}}}{1W} = \frac{P_{\text{эф1}}^2}{P_{\text{хч}}^2} \quad \text{тогда: } P_{\text{эл}} = 1W \cdot 23,7^2 = 561,7W$$

Если для озвучивания применяются две или более АС, тогда расчетную мощность необходимо разделить на два или соответствующее количество АС, например: $561,7 = 2 \times 280,9W$

Однако следует обратить внимание на то, что предыдущее утверждение справедливо лишь в том случае, когда две или более АС расположены таким образом, что озвучивают одну общую локальную зону. Тогда, излучаемые ими звуковые энергии суммируются.

Если в звуковом тракте используется многоканальная система усиления и, каждый канал с АС озвучивает свою отдельную локальную зону, тогда для каждой локальной группы АС необходимо рассчитывать электрическую мощность индивидуально.

Для открытых площадок, расчет электрической мощности АС аналогичен расчету в закрытом помещении, кроме поправки - 6dB, которой следует пренебречь. Однако, если на открытой площадке для озвучивания применяются остронаправленные АС, как правило это рупорные системы, тогда расчет электрической мощности несколько изменится. Для таких АС в паспортных данных приводится зависимость уровня звукового давления от расстояния между АС и зоной озвучивания. Исходя из этой зависимости, необходимо определить перепад уровней давлений между зоной озвучивания и уровнем давления на расстоянии 1м от АС. Затем выполняются пункты 1, 7 и 8 предыдущего расчета, с учетом ХЧ акустических систем.

6.2.4 Анализ временных задержек в зоне озвучивания

Как уже говорилось ранее, задержка во времени двух или более звуковых сигналов не меньше, чем на 40...50 мс друг относительно друга, влияет на их разборчивость слушателем. Особенно заметно ухудшение разборчивости проявляется для речевого сигнала. Поэтому необходимо провести анализ зала с построением лучевых эскизов, расчетом временных задержек и интенсивности отраженных лучей по сравнению с основным звуковым сигналом. Если в результате анализа определено, что отраженные лучи будут заметно ухудшать разборчивость речи, тогда необходимо выработать рекомендации по устранению данного недостатка.

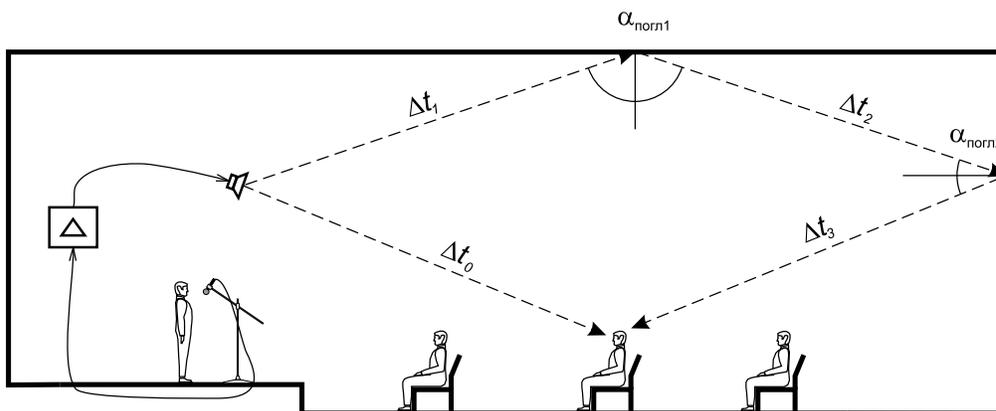


Рис. 6.9: Пример построения лучевого эскиза

Построение лучевых эскизов выполняется на чертежах анализируемого зала.

Поскольку разборчивость речи определяется, в основном, глухими согласными звуками, то анализ задержек может быть ограничен частотным диапазоном примерно от 1 до 7 кГц. Если вторичный отраженный луч задержан относительно первичного, основного, более чем на 40...50 мс, тогда необходимо определить разницу относительных уровней интенсивности $\Delta L_I = (L_{I\text{перв}} - L_{I\text{отр}})$ в третьоктавных полосах, в диапазоне частот 1...7 кГц. Критерий значимости влияния отраженного луча на разборчивость речи должен быть таким. Модуль разницы относительных уровней интенсивности $|\Delta L_I|$ должен быть не менее 15 дБ.

Расчет уровней интенсивности отраженных лучей осуществляется с применением соответствующих коэффициентов поглощения отражателей, на которые падают данные лучи, на соответствующих частотах. При этом надо учитывать ослабление интенсивности звука с удалением от источника (см. раздел 6.2.3)

$$\Delta L_I = 10 \cdot \lg\left(\left(\frac{l_{\text{втор}}}{l_{\text{перв}}}\right)^2\right)$$

где: $l_{\text{втор}}$, $l_{\text{перв}}$ — длина полного, суммарного пути отраженных и первичного лучей.

$$I_{\text{отр}} = (1 - \alpha_{\text{погл}}) \cdot I_{\text{пад}}$$

Если $|\Delta L_I| \leq 15$ дБ, то в точке падения лучей необходимо заменить присутствующий отражатель на другой, с более высоким коэффициентом поглощения.

Пример анализа и расчета для рис. 6.9:

1. Определяем длину пути, указанных на лучевом эскизе, звуковых лучей.

$$l_0 = 17,5 \text{ м}, l_1 = 19 \text{ м}, l_2 = 18 \text{ м}, l_3 = 19 \text{ м}$$

2. Определяем время распространения звука вдоль лучей.

$$\Delta t_0 = \frac{l_0}{c_{зв}} = \frac{17,5}{340} = 0,051 \text{ сек}$$

$$\Delta t_1 = \frac{19}{340} = 0,056 \text{ сек}; \Delta t_2 = \frac{18}{340} = 0,053 \text{ сек}; \Delta t_3 = \frac{19}{340} = 0,056 \text{ сек}$$

3. Определяем временную задержку вторичной волны относительно первичной.

$$\Delta t_{3,0} = 0,056 + 0,053 + 0,056 - 0,051 = 0,114 \text{ сек}$$

Из данного расчета видно, что временная задержка превышает величину 50 мс, поэтому необходимо определить разницу уровней интенсивностей первичной и вторичной волны.

4. Определяем – на сколько уменьшится уровень интенсивности за счет удаления от источника? Считаем, что фронт волны – сферический.

$$\Delta L_I = 10 \cdot \lg\left(\left(\frac{19 + 18 + 19}{17,5}\right)^2\right) = 10,1 \text{ dB}$$

5. Определяем – на сколько уменьшится уровень интенсивности вторичной волны за счет поглощения при двух отражениях, на частоте 2000 Hz?

Предположим, что в точке первого отражения поверхность покрыта плитами арборита толщиной 2 см. Тогда: $\alpha_{\text{погл1}} = 0,6$. Предположим, что в точке второго отражения поверхность покрыта известковой штукатуркой по деревянной обрешетке. Тогда: $\alpha_{\text{погл2}} = 0,07$.

$$I_2 = I_1 \cdot (1 - \alpha_{\text{погл1}}) = I_1 \cdot (1 - 0,6)$$

$$I_3 = I_2 \cdot (1 - \alpha_{\text{погл2}}) = I_2 \cdot (1 - 0,07) = I_1 \cdot (1 - 0,6) \cdot (1 - 0,07) = I_1 \cdot 0,372$$

$$\Delta L_I = 10 \cdot \lg\left(\frac{I_1}{I_1 \cdot 0,372}\right) = 4,3 \text{ dB}$$

6. Суммарное ослабление вторичной волны относительно первичной будет равно: $10,1 + 4,3 = 14,4 \text{ dB}$, что меньше 15 dB . Из расчета можно сделать вывод, что вторичная волна будет несколько ухудшать разборчивость речи. Поэтому рекомендуется заменить покрытие поверхности, в точке второго отражения, на покрытие с более высоким коэффициентом поглощения.

Приложение А

Звукопоглощающие материалы

А.1 Резонансные звукопоглотители

А.2 Синтетические звукопоглотители

Приложение В

Звукоизоляционные материалы

Литература

- [1] Фурдуев В.В., Акустические основы вещания. — М.: Связьиздат, 1960. — 320 стр., илл.
- [2] Кузнецов Л.А., Акустика музыкальных инструментов. — М.: Легпром-бытиздат, 1989. — 368 стр., илл.
- [3] Ефимов А.П., Никонов А.В., Сапожков М.А., Шоров В.И., Акустика: Справочник — М.: Радио и связь, 1989. — 336 стр., илл.
- [4] Сапожков М.А., Звукофикация открытых пространств. — М.: Радио и связь, 1985. — 304 стр., илл.
- [5] Емельянов Е.Д., Звукофикация театров и концертных залов. — М.: Искусство, 1989. — 272 стр., илл.
- [6] Филип Ньюэлл, Project-студии: Маленькие студии для великих записей /Пер. с англ. Зиненко Ю., Поворознюка А.; Под ред. Кравченко А. — Винница, 2002. — 271 с., илл.