

Лекция 1. Введение в звук

1.1 Общая теория звука

Что же такое звук, это ощущение, которое воспринимает слуховой орган "ухо" (само по себе явление существует и без участия «уха» в процессе, но так проще для понимания), возникающее при возбуждении барабанной перепонки звуковой волной. Ухо в данном случае выступает в роли "приёмника" звуковых волн различной частоты.

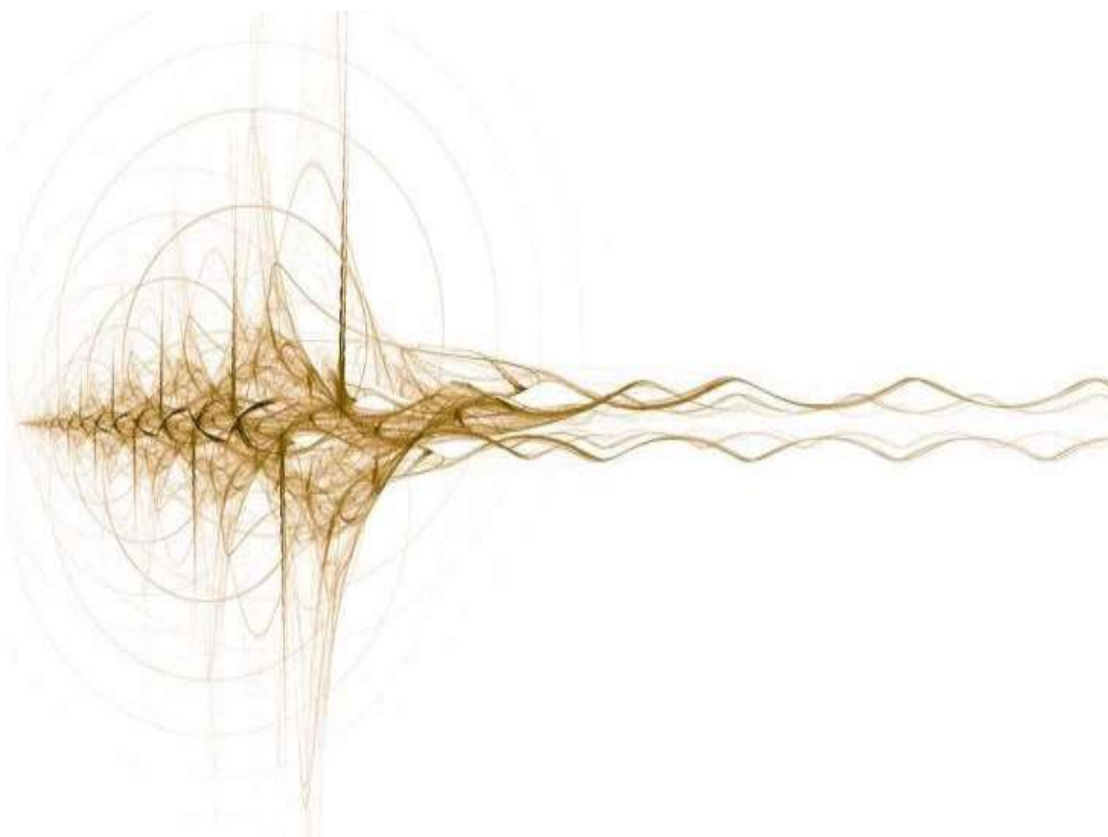


Рисунок 1.1 – Звуковая волна

Звуковая волна же представляет собой, по сути, последовательный ряд уплотнений и разрежений среды (чаще всего воздушной среды в обычных условиях) различной частоты. Природа звуковых волн колебательная, вызываемая и производимая вибрацией любых тел. Возникновение и распространение классической звуковой волны возможно в трёх упругих средах: газообразных, жидких и твёрдых. При возникновении звуковой волны в одном из этих типов пространства неизбежно возникают некоторые изменения в самой среде, например, изменение плотности или давления воздуха, перемещение частиц воздушных масс и т.д.

Поскольку звуковая волна имеет колебательную природу, то у неё имеется такая характеристика, как частота. **Частота** измеряется в герцах (в честь немецкого физика Генриха Рудольфа Герца), и обозначает количество колебаний за период времени, равный одной секунде. Т.е., например, частота

20 Гц обозначает цикл в 20 колебаний за одну секунду. От частоты звука зависит и субъективное понятие его высоты. Чем больше звуковых колебаний совершается за секунду, тем «выше» кажется звучание. У звуковой волны так же имеется ещё одна важная характеристика, имеющая название – длина волны. **Длиной волны** принято считать расстояние, которое проходит звук определённой частоты за период, равный одной секунде. Для примера, длина волны самого низкого звука в слышимом диапазоне для человека частотой 20 Гц составляет 16,5 метров, а длина волны самого высокого звука 20000 Гц составляет 1,7 сантиметра.



Рисунок 1.2 – Длина волны

Человеческое ухо устроено таким образом, что способно воспринимать волны только в ограниченном диапазоне, примерно 20 Гц – 20000 Гц (зависит от особенностей конкретного человека, кто-то способен слышать чуть больше, кто-то меньше). Таким образом, это не означает, что звуков ниже или выше этих частот не существует, просто человеческим ухом они не воспринимаются, выходя за границу слышимого диапазона. Звук выше слышимого диапазона называется **ультразвуком**, звук ниже слышимого диапазона называется **инфразвуком**. Некоторые животные способны воспринимать ультра и инфразвуки, некоторые даже используют этот диапазон для ориентирования в пространстве (летучие мыши, дельфины). В случае, если звук проходит через среду, которая напрямую не соприкасается с органом слуха человека, то такой звук может быть не слышим или сильно ослабленным в последствии.

В музыкальной терминологии звука существуют такие важные обозначения, как октава, тон и обертон звука. **Октава** означает интервал, в котором соотношение частот между звуками составляет 1 к 2. Октава обычно очень хорошо различима на слух, в то время как звуки в пределах этого интервала могут быть очень похожими друг на друга. Октавой также можно назвать звук, который делает вдвое больше колебаний, чем другой звук, в одинаковый временной период. Например, частота 800 Гц, есть ни что иное,

как более высокая октава 400 Гц, а частота 400 Гц в свою очередь является следующей октавой звука частотой 200 Гц. Октава в свою очередь состоит из тонов и обертонов. Переменные колебания в гармонической звуковой волне одной частоты воспринимаются человеческим ухом как **музыкальный тон**. Колебания высокой частоты можно интерпретировать как звуки высокого тона, колебания низкой частоты – как звуки низкого тона. Человеческое ухо способно чётко отличать звуки с разницей в один тон (в диапазоне до 4000 Гц). Несмотря на это, в музыке используется крайне малое число тонов. Объясняется это из соображений принципа гармонической созвучности, всё основано на принципе октав.

Рассмотрим теорию музыкальных тонов на примере струны, натянутой определённым образом. Такая струна, в зависимости от силы натяжения, будет иметь "настройку" на какую-то одну конкретную частоту. При воздействии на эту струну чем-либо с одной определённой силой, что вызовет её колебания, стабильно будет наблюдаться какой-то один определённый тон звука, мы услышим искомую частоту настройки. Этот звук называется основным тоном. За основной тон в музыкальной сфере официально принята частота ноты "ля" первой октавы, равная 440 Гц. Однако большинство музыкальных инструментов никогда не воспроизводят одни чистые основные тона, их неизбежно сопровождают призвуки, именуемые **обертонами**. Тут уместно вспомнить важное определение музыкальной акустики, понятие тембра звука. **Тембр** – это особенность музыкальных звуков, которые придают музыкальным инструментам и голосам их неповторимую узнаваемую специфику звучания, даже если сравнивать звуки одинаковой высоты и громкости. Тембр каждого музыкального инструмента зависит от распределения звуковой энергии по обертонам в момент появления звука.

Обертоны формируют специфическую окраску основного тона, по которой мы легко можем определить и узнать конкретный инструмент, а также чётко отличить его звучание от другого инструмента. Обертоны бывают двух типов: гармонические и негармонические. **Гармонические обертоны** по определению кратны частоте основного тона. Напротив, если обертоны не кратны и заметно отклоняются от величин, то они называются **негармоническими**. В музыке практически исключается оперирование некротными обертонами, поэтому термин сводится к понятию "обертон", подразумевая под собой гармонический. У некоторых инструментов, например, фортепиано, основной тон даже не успевает сформироваться, за короткий промежуток происходит нарастание звуковой энергии обертонов, а затем так же стремительно происходит спад. Многие инструменты создают так называемый эффект "переходного тона", когда энергия определённых обертонов максимальна в определённый момент времени, обычно в самом начале, но потом резко меняется и переходит к другим обертонам. Частотный диапазон каждого инструмента можно рассмотреть отдельно, и он обычно ограничивается частотами основных тонов, который способен воспроизводить данный конкретный инструмент.

В теории звука также присутствует такое понятие как шум. **Шум** – это любой звук, который создаётся совокупностью несогласованных между собой источников. Всем хорошо знаком шум листвы деревьев, колышимой ветром и т.д.

От чего зависит громкость звука? Очевидно, что подобное явление напрямую зависит от количества энергии, переносимой звуковой волной. Для определения количественных показателей громкости, существует понятие – интенсивность звука.

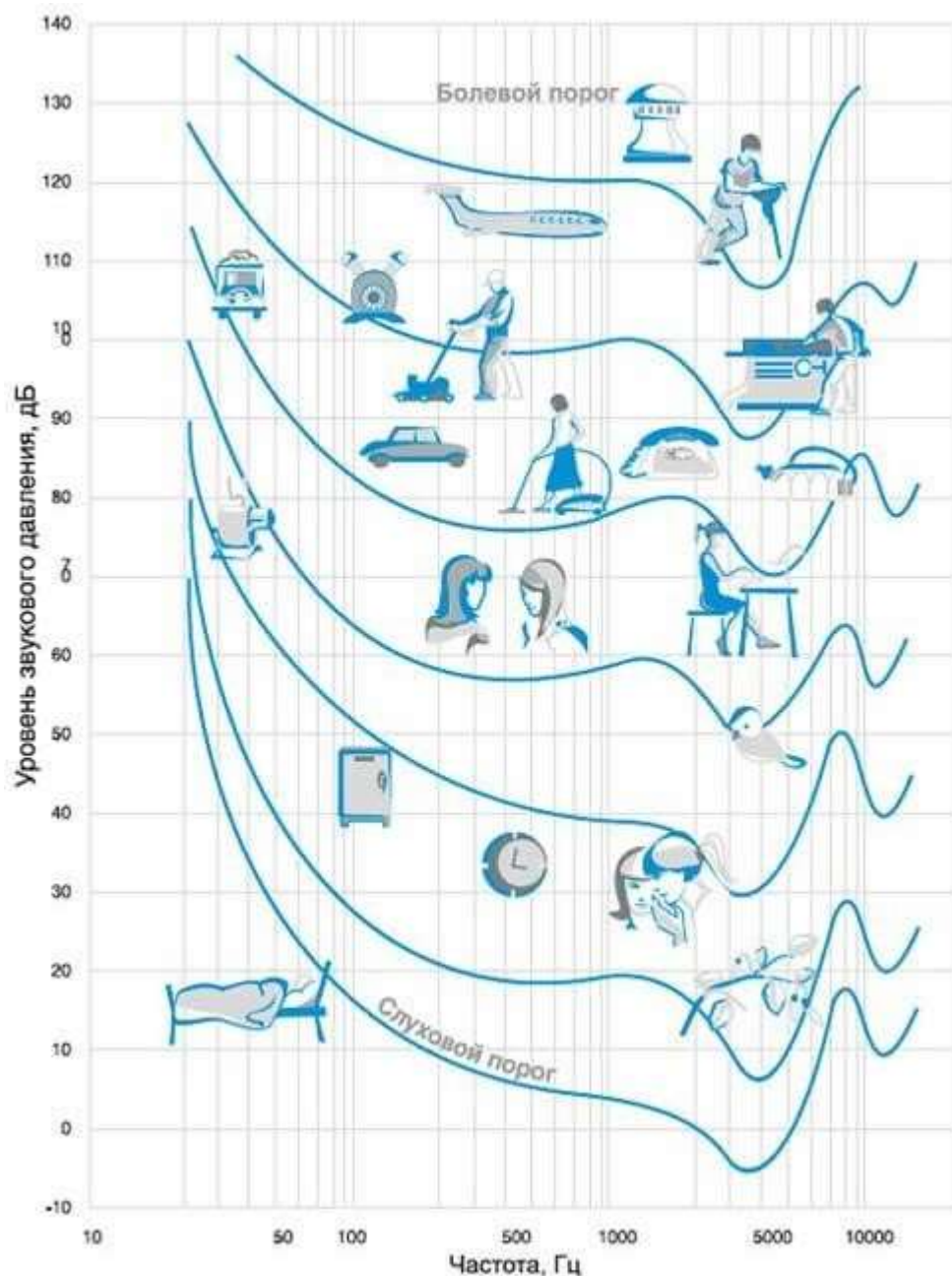


Рисунок 1.3 – Звуковое давление

Интенсивность звука определяется как поток энергии, прошедший через какую-то площадь пространства (например, см^2) за единицу времени (например, за секунду). При обычном разговоре интенсивность составляет примерно 9 или 10 Вт/см^2 . Человеческое ухо способно воспринимать звуки

достаточно широкого диапазона чувствительности, при этом восприимчивость частот неоднородна в пределах звукового спектра. Так наилучшим образом воспринимается диапазон частот 1000 Гц – 4000 Гц, который наиболее широко охватывает человеческую речь.

Поскольку звуки столь сильно различаются по интенсивности, удобнее рассматривать её как логарифмическую величину и измерять в децибелах (в честь шотландского учёного Александра Грэма Белла). Нижний порог слуховой чувствительности человеческого уха составляет 0 Дб, верхний 120 Дб, он же ещё называется "болевым порог" (рисунок 1.3). Верхняя граница чувствительности так же воспринимается человеческим ухом не одинаково, а зависит от конкретной частоты. Звуки низких частот должны обладать гораздо большей интенсивностью, чем высокие, чтобы вызвать болевой порог. Например, болевой порог на низкой частоте 31,5 Гц наступает при уровне силы звука 135 дБ, когда на частоте 2000 Гц ощущение боли появится при уже при 112 дБ. Имеется также понятие звукового давления, которое фактически расширяет привычное объяснение распространение звуковой волны в воздухе. **Звуковое давление** – это переменное избыточное давление, возникающее в упругой среде в результате прохождения через неё звуковой волны.

1.2 Волновая природа звука

Чтобы лучше понять систему возникновения звуковой волны, представим классический динамик, находящийся в трубе, наполненной воздухом. Если динамик совершит резкое движение вперёд, то воздух, находящийся в непосредственной близости диффузора на мгновение сжимается. После этого воздух расширится, толкая тем самым сжатую воздушную область вдоль по трубе.



Рисунок 1.4 – Волновая природа звука

Вот это волновое движение и будет впоследствии звуком, когда достигнет слухового органа и "возбудит" барабанную перепонку. При возникновении звуковой волны в газе создаётся избыточное давление, избыточная плотность и происходит перемещение частиц с постоянной скоростью. Про звуковые волны важно помнить то обстоятельство, что вещество не перемещается вместе со звуковой волной, а возникает лишь временное возмущение воздушных масс.

Если представить поршень, подвешенный в свободном пространстве на пружине и совершающий повторяющиеся движения "вперёд-назад", то такие колебания будут называться гармоническими или синусоидальными (если представить волну в виде графика, то получим в этом случае чистейшую синусоиду с повторяющимися спадами и подъёмами). Если представить динамик в трубе (как и в примере, описанном выше), совершающий гармонические колебания, то в момент движения динамика "вперёд" получается известный уже эффект сжатия воздуха, а при движении динамика "назад" обратный эффект разрежения. В этом случае по трубе будет распространяться волна чередующихся сжатий и разрежений. Расстояние вдоль трубы между соседними максимумами или минимумами (фазами) будет называться **длиной волны**. Если частицы колеблются параллельно направлению распространения волны, то волна называется **продольной**. Если же они колеблются перпендикулярно направлению распространения, то волна называется **поперечной**. Обычно звуковые волны в газах и жидкостях – продольные, в твердых же телах возможно возникновение волн обоих типов. Поперечные волны в твердых телах возникают благодаря сопротивлению к изменению формы. Основная разница между этими двумя типами волн заключается в том, что поперечная волна обладает свойством поляризации (колебания происходят в определенной плоскости), а продольная – нет.

1.3 Скорость звука

Скорость звука напрямую зависит от характеристик среды, в которой он распространяется. Она определяется (зависима) двумя свойствами среды: упругостью и плотностью материала. Скорость звука в твёрдых телах соответственно напрямую зависит от типа материала и его свойств. Скорость в газовых средах зависит только от одного типа деформации среды: сжатие-разрежение. Изменение давления в звуковой волне происходит без теплообмена с окружающими частицами и носит название адиабатическое.

Скорость звука в газе зависит в основном от температуры – возрастает при повышении температуры и падает при понижении. Так же скорость звука в газообразной среде зависит от размеров и массы самих молекул газа, – чем масса и размер частиц меньше, тем "проводимость" волны больше и больше соответственно скорость.

В жидкой и твёрдой средах принцип распространения и скорость звука аналогичны тому, как волна распространяется в воздухе: путём сжатия-

разряжения. Но в данных средах, помимо той же зависимости от температуры, достаточно важное значение имеет плотность среды и её состав/структура. Чем меньше плотность вещества, тем скорость звука выше и наоборот. Зависимость же от состава среды сложнее и определяется в каждом конкретном случае с учётом расположения и взаимодействия молекул/атомов.

Скорость звука в воздухе при $t, ^\circ\text{C}$ 20: 343 м/с.

Скорость звука в дистиллированной воде при $t, ^\circ\text{C}$ 20: 1481 м/с.

Скорость звука в стали при $t, ^\circ\text{C}$ 20: 5000 м/с.

1.4 Стоячие волны и интерференция

Когда динамик создаёт звуковые волны в ограниченном пространстве неизбежно возникает эффект отражения волн от границ. В результате этого чаще всего возникает **эффект интерференции** – когда две или более звуковых волн накладываются друг на друга. Особыми случаями явления интерференции являются образование: 1) Биений волн или 2) Стоячих волн. **Биения волн** – это случай, когда происходит сложение волн с близкими частотами и амплитудой. Картина возникновения биений: когда две похожие по частоте волны накладываются друг на друга. В какой-то момент времени при таком наложении, амплитудные пики могут совпадать "по фазе", а также могут совпадать и спады по "противофазе". Именно так и характеризуются биения звука. Важно помнить, что в отличие от стоячих волн, фазовые совпадения пиков происходят не постоянно, а через какие-то временные промежутки. На слух такая картина биений различается достаточно чётко, и слышится как периодическое нарастание и убывание громкости соответственно. Механизм возникновения этого эффекта предельно прост: в момент совпадения пиков громкость нарастает, в момент совпадения спадов громкость уменьшается. **Стоячие волны** возникают в случае наложения двух волн одинаковой амплитуды, фазы и частоты, когда при "встрече" таких волн одна движется в прямом, а другая – в обратном направлении. В участке пространства (где образовалась стоячая волна) возникает картина наложения двух частотных амплитуд, с чередованием максимумов (т.н. пучностей) и минимумов (т.н. узлов). При возникновении этого явления крайне важное значение имеет частота, фаза и коэффициент затухания волны в месте отражения. В отличие от бегущих волн, в стоячей волне отсутствует перенос энергии вследствие того, что образующие эту волну прямая и обратная волны переносят энергию в равных количествах и в прямом и в противоположном направлениях. Для наглядного понимания возникновения стоячей волны, представим пример из домашней акустики. Допустим, у нас есть напольные акустические системы в некотором ограниченном пространстве (комнате). Заставив их играть какую-нибудь композицию с большим количеством баса, попробуем изменить местоположение слушателя в помещении. Таким образом слушатель, попав в зону минимума (вычитания) стоячей волны ощутит эффект того, что баса стало очень мало, а

если слушатель попадает в зону максимума (сложения) частот, то получается обратный эффект существенного увеличения басовой области. При этом эффект наблюдается во всех октавах базовой частоты. Например, если базовая частота составляет 440 Гц, то явление "сложения" или "вычитания" будет наблюдаться также на частотах 880 Гц, 1760 Гц, 3520 Гц и т.д.

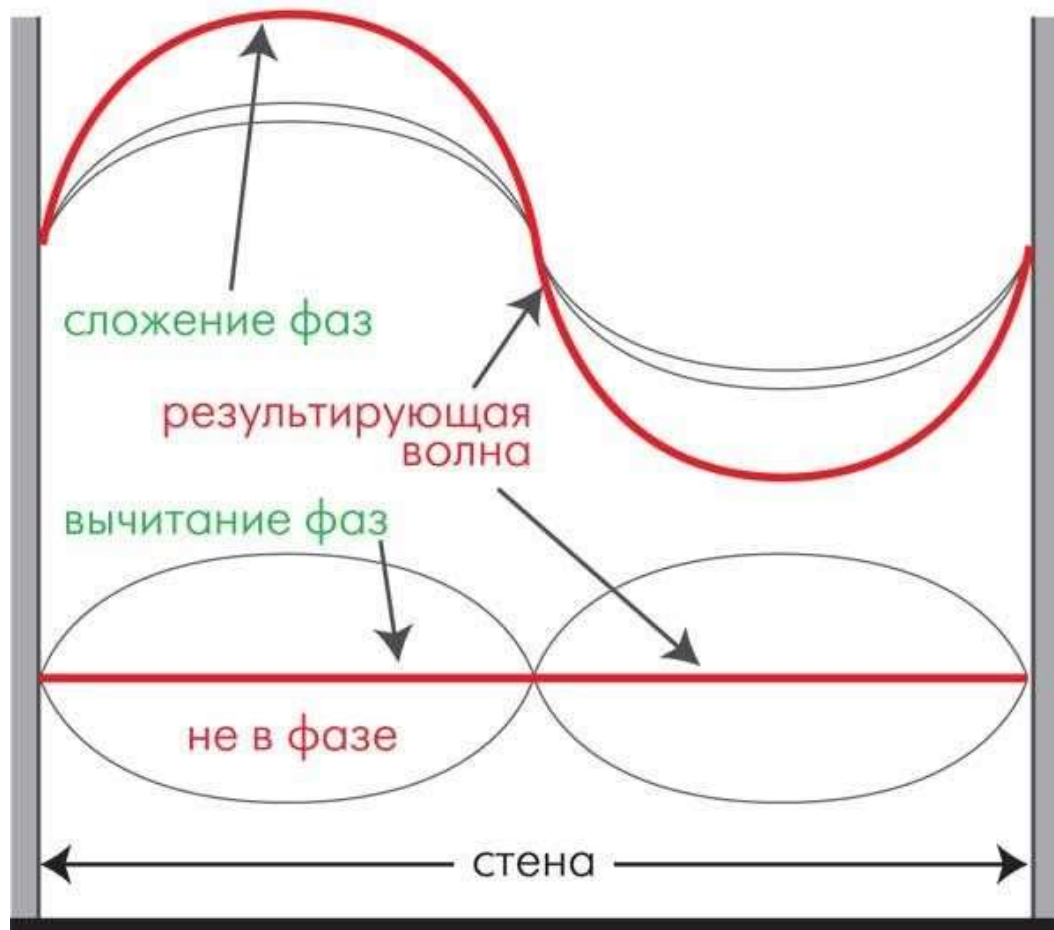


Рисунок 1.5 – Стоячие волны

1.5 Явление резонанса

У большинства твёрдых тел имеется собственная частота резонанса. Понять этот эффект достаточно просто на примере обычной трубы, открытой только с одного конца. Представим ситуацию, что с другого конца трубы подсоединяется динамик, который может играть какую-то одну постоянную частоту, её также впоследствии можно менять. Так вот, у трубы имеется собственная частота резонанса, говоря простым языком – это частота, на которой труба "резонирует" или издаёт свой собственный звук. Если частота динамика (в результате регулировки) совпадёт с частотой резонанса трубы, то возникнет эффект увеличения громкости в несколько раз. Это происходит потому, что громкоговоритель возбуждает колебания воздушного столба в трубе со значительной амплитудой до тех пор, пока не найдётся та самая «резонансная частота» и произойдёт эффект сложения. Возникшее явление

можно описать следующим образом: труба в этом примере "помогает" динамике, резонируя на конкретной частоте, их усилия складываются и "выливаются" в слышимый громкий эффект. На примере музыкальных инструментов легко прослеживается это явление, поскольку в конструкции большинства присутствуют элементы, называемые резонаторами (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Резонатор (резонаторное отверстие)

Нетрудно догадаться, что **резонатор** служит цели усилить определённую частоту или музыкальный тон. Для примера: корпус гитары с резонатором в виде отверстия, сопрягаемого с объёмом; Конструкция трубки у флейты (и все трубы вообще); Цилиндрическая форма корпуса барабана, который сам по себе является резонатором определённой частоты.

1.6 Частотный спектр звука и АЧХ

Поскольку на практике практически не встречаются волны одной частоты, то возникает необходимость разложения всего звукового спектра слышимого диапазона на обертоны или гармоники. Для этих целей существуют графики, которые отображают зависимость относительной энергии звуковых колебаний от частоты. Такой график называется графиком

частотного спектра звука. **Частотный спектр звука** бывает двух типов: дискретный и непрерывный. Дискретный график спектра отображает частоты по отдельности, разделённые пустыми промежутками. В непрерывном спектре присутствуют сразу все звуковые частоты.

В случае с музыкой или акустикой чаще всего используется обычный график **амплитудно-частотной характеристики** (сокращённо "АЧХ"). На таком графике представлена зависимость амплитуды звуковых колебаний от частоты на протяжении всего спектра частот (20 Гц – 20 кГц). Глядя на такой график легко понять, например, сильные или слабые стороны конкретного динамика или акустической системы в целом, наиболее сильные участки энергетической отдачи, частотные спады и подъёмы, затухания, а также проследить крутизну спада.

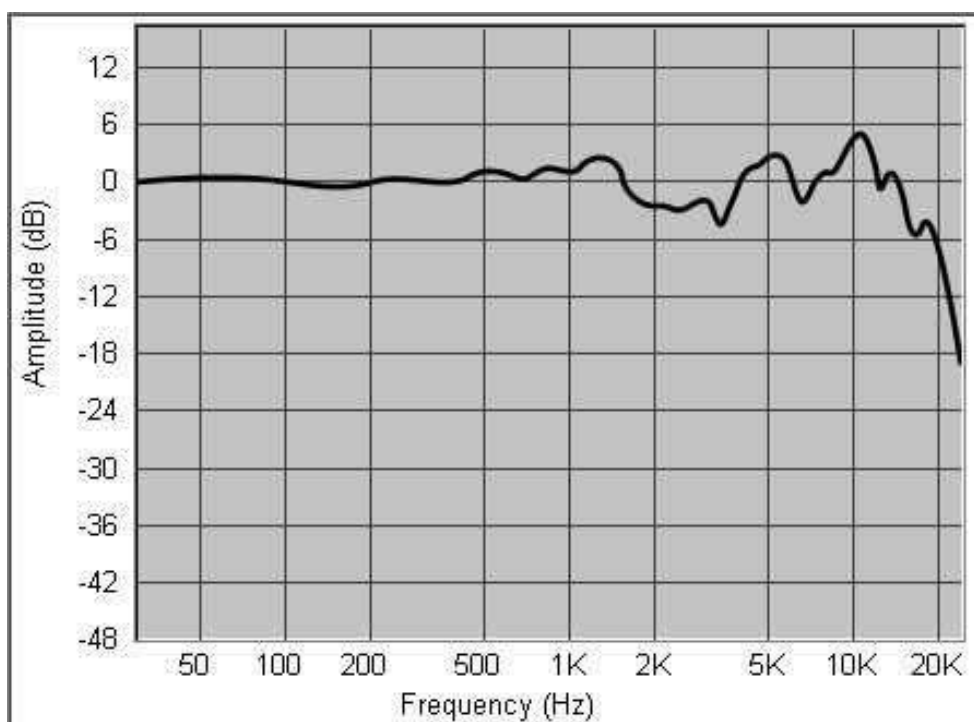


Рисунок 1.7 – Амплитудно-частотная характеристика звукового сигнала

1.7 Распространение звуковых волн, фаза и противофаза

Процесс распространения звуковых волн происходит во всех направлениях от источника. Простейший пример для понимания этого явления: камешек, брошенный в воду (рисунок 1.8).

От места, куда упал камень, начинают расходиться волны по поверхности воды во всех направлениях. Однако представим ситуацию с использованием динамика в некотором объёме, допустим закрытом ящике, который подключён к усилителю и воспроизводит какой-то музыкальный сигнал. Несложно заметить (особенно при условии, если подать мощный НЧ сигнал), что динамик совершает стремительное движение "вперёд", а потом такое же стремительное движение "назад". Остаётся понять, что когда

динамик совершает движение вперёд, он излучает звуковую волну, которую мы слышим впоследствии. А вот что происходит, когда динамик совершает движение назад? А происходит парадоксально тоже самое, динамик совершает тот же звук, только распространяется он в нашем примере всецело в пределах объёма ящика, не выходя за его пределы (ящик закрыт). В целом, на приведённом выше примере можно наблюдать достаточно много интересных физических явлений, наиболее значимым из которых является понятие фазы.



Рисунок 1.8 – Волновые колебания на воде

Звуковая волна, которую динамик, находясь в объёме, излучает в направлении слушателя – находится "в фазе". Обратная же волна, которая уходит в объём ящика, будет соответственно противофазной. Остаётся только понять, что подразумевают эти понятия? **Фаза сигнала** – это уровень звукового давления в текущий момент времени в какой-то точке пространства (рисунок 1.9). Фазу проще всего понять на примере воспроизведения музыкального материала обычной напольной стерео-парой домашних акустических систем. Представим, что две такие напольные колонки установлены в некотором помещении и играют. Обе акустические системы в этом случае воспроизводят синхронный сигнал переменного звукового давления, притом звуковое давление одной колонки складывается со звуковым давлением другой колонки. Происходит подобный эффект за счёт синхронности воспроизведения сигнала левой и правой АС

соответственно, другими словами, пики и спады волн, излучаемых левыми и правыми динамиками, совпадают.

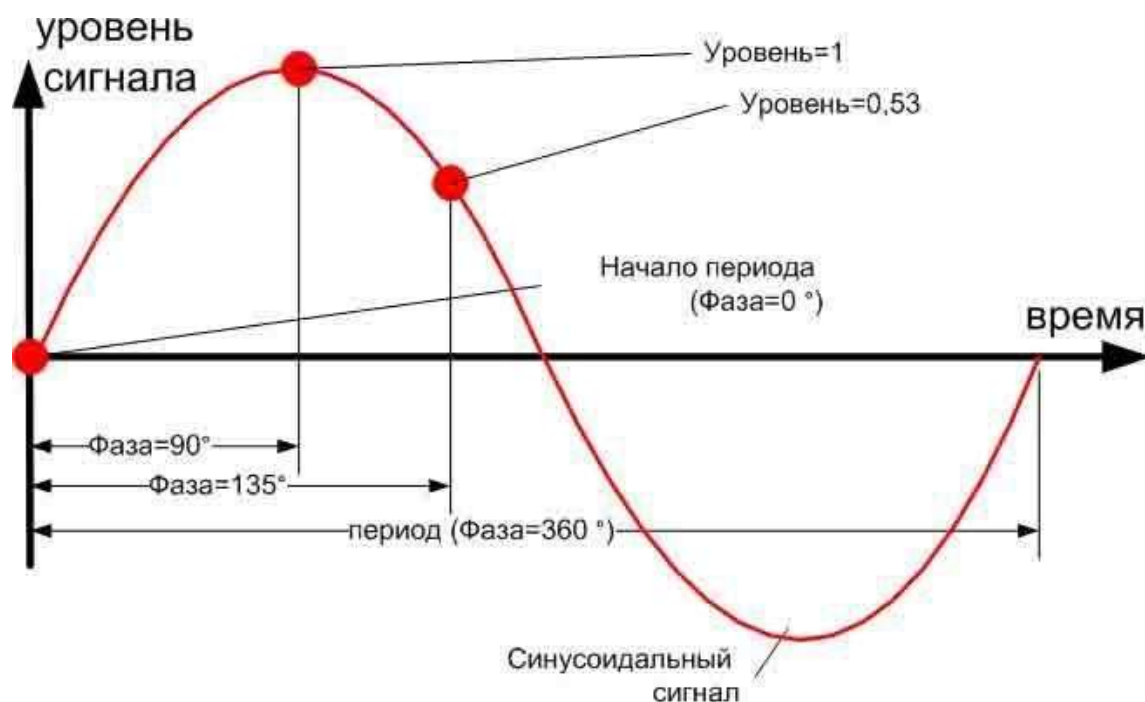


Рисунок 1.9 – Фаза звукового сигнала

А теперь представим, что давления звука по-прежнему меняются одинаковым образом (не претерпели изменений), но только теперь противоположно друг другу. Подобное может произойти, если подключить одну акустическую систему из двух в обратной полярности ("+" кабель от усилителя к "-" клемме акустической системе, и "-" кабель от усилителя к "+" клемме акустической системы). В этом случае противоположный по направлению сигнал вызовет разницу давлений, которую можно представить в виде чисел следующим образом: левая акустическая система будет создавать давление "1 Па", а правая акустическая система будет создавать давление "минус 1 Па". В результате, суммарная громкость звука в точке размещения слушателя будет равна нулю. Это явление называется противофазой. Если рассматривать пример более детально для понимания, то получается, что два динамика, играющие "в фазе" — создают одинаковые области уплотнения и разряжения воздуха, чем фактически помогают друг другу. В случае же с идеализированной противофазой, область уплотнения воздушного пространства, созданная одним динамиком, будет сопровождаться областью разряжения воздушного пространства, созданной вторым динамиком. Выглядит это примерно, как явление взаимного синхронного гашения волн. Правда, на практике падения громкости до нуля не происходит, и мы услышим сильно искажённый и ослабленный звук.

Самым доступным образом можно описать это явление так: два сигнала с одинаковыми колебаниями (частотой), но сдвинутые по времени. Ввиду этого, удобнее представить эти явления смещения на примере обычных

круглых стрелочных часов. Представим, что на стене висит несколько одинаковых круглых часов. Когда секундные стрелки этих часов бегут синхронно, на одних часах 30 секунд и на других 30, то это пример сигнала, который находится в фазе. Если же секундные стрелки бегут со смещением, но скорость по-прежнему одинакова, например, на одних часах 30 секунд, а на других 24 секунды, то это и есть классический пример смещения (сдвига) по фазе. Таким же образом фаза измеряется в градусах, в пределах виртуальной окружности. В этом случае, при смещении сигналов относительно друг друга на 180 градусов (половина периода), и получается классическая противофаза. Нередко на практике возникают незначительные смещения по фазе, которые так же можно определить в градусах и успешно устранить.

Волны бывают плоские и сферические. Плоский волновой фронт распространяется только в одном направлении и редко встречается на практике. Сферический волновой фронт представляет собой волны простого типа, которые исходят из одной точки и распространяется во всех направлениях. Звуковые волны обладают свойством **дифракции**, т.е. способностью огибать препятствия и объекты. Степень огибания зависит от отношения длины звуковой волны к размерам препятствия или отверстия. Дифракция возникает и в случае, когда на пути звука оказывается какое-либо препятствие. В этом случае возможны два варианта развития событий:

1) Если размеры препятствия намного больше длины волны, то звук отражается или поглощается (в зависимости от степени поглощения материала, толщины препятствия и т.д.), а позади препятствия формируется зона "акустической тени".

2) Если же размеры препятствия сравнимы с длиной волны или даже меньше её, тогда звук дифрагирует в какой-то мере во всех направлениях.

Если звуковая волна при движении в одной среде попадает на границу раздела с другой средой (например, воздушная среда с твёрдой средой), то может возникнуть три варианта развития событий:

1) волна отразится от поверхности раздела;

2) волна может пройти в другую среду без изменения направления;

3) волна может пройти в другую среду с изменением направления на границе, это называется "преломление волны".

Отношением избыточного давления звуковой волны к колебательной объёмной скорости называется волновое сопротивление. Говоря простыми словами, **волновым сопротивлением среды** можно назвать способность поглощать звуковые волны или "сопротивляться" им. Коэффициенты отражения и прохождения напрямую зависят от соотношения волновых сопротивлений двух сред. Волновое сопротивление в газовой среде гораздо ниже, чем в воде или твёрдых телах. Поэтому если звуковая волна в воздухе падает на твёрдый объект или на поверхность глубокой воды, то звук либо отражается от поверхности, либо поглощается в значительной мере. Зависит это от толщины поверхности (воды или твёрдого тела), на которую падает искомая звуковая волна. При низкой толщине твёрдой или жидкой среды,

звуковые волны практически полностью "проходят", и, наоборот, при большой толщине среды волны чаще отражаются. В случае отражения звуковых волн, происходит этот процесс по хорошо известному физическому закону: "Угол падения равен углу отражения". В этом случае, когда волна из среды с меньшей плотностью попадает на границу со средой большей плотности - происходит явление **рефракции**. Оно заключается в изгибе (преломлении) звуковой волны после "встречи" с препятствием, и обязательно сопровождается изменением скорости. Рефракция зависит также от температуры среды, в которой происходит отражение.

В процессе распространения звуковых волн в пространстве неизбежно происходит снижение их интенсивности, можно сказать затухание волн и ослабление звука. На практике столкнуться с подобным эффектом достаточно просто: например, если два человека встанут в поле на некотором близком расстоянии (метр и ближе) и начнут что-то говорить друг другу. Если впоследствии увеличивать расстояние между людьми (если они начнут отдаляться друг от друга), тот же самый уровень разговорной громкости будет становиться всё менее и менее слышимым. Подобный пример наглядно демонстрирует явление снижения интенсивности звуковых волн. Почему это происходит? Причиной тому различные процессы теплообмена, молекулярного взаимодействия и внутреннего трения звуковых волн. Наиболее часто на практике происходит превращение звуковой энергии в тепловую. Подобные процессы неизбежно возникают в любой из 3-ёх сред распространения звука и их можно охарактеризовать как **поглощение звуковых волн**.

Интенсивность и степень поглощения звуковых волн зависит от многих факторов, таких как: давление и температура среды. Также поглощение зависит от конкретной частоты звука. При распространении звуковой волны в жидкостях или газах возникает эффект трения между разными частицами, которое называется вязкостью. В результате этого трения на молекулярном уровне и происходит процесс превращения волны из звуковой в тепловую. Другими словами, чем выше теплопроводность среды, тем меньше степень поглощения волн. Поглощение звука в газовых средах зависит ещё и от давления (атмосферное давление меняется с повышением высоты относительно уровня моря). Что касается зависимости степени поглощения от частоты звука, то принимая во внимание вышеназванные зависимости вязкости и теплопроводности, поглощение звука тем выше, чем выше его частота. Для примера, при нормальной температуре и давлении, в воздухе поглощение волны частотой 5000 Гц составляет 3 Дб/км, а поглощение волны частотой 50000 Гц составит уже 300 Дб/м.

В твёрдых средах сохраняются все вышеназванные зависимости (теплопроводность и вязкость), однако к этому добавляется ещё несколько условий. Они связаны с молекулярной структурой твёрдых материалов, которая может быть разной, со своими неоднородностями. В зависимости от этого внутреннего твёрдого молекулярного строения, поглощение звуковых волн в данном случае может быть различным, и зависит от типа конкретного

материала. При прохождении звука через твёрдое тело, волна претерпевает ряд преобразований и искажений, что чаще всего приводит к рассеиванию и поглощению звуковой энергии. На молекулярном уровне может возникнуть эффект дислокаций, когда звуковая волна вызывает смещение атомных плоскостей, которые затем возвращаются в исходное положение. Либо же, движение дислокаций приводит к столкновению с перпендикулярными им дислокациями или дефектами кристаллического строения, что вызывает их торможение и как следствие некоторое поглощение звуковой волны. Однако, звуковая волна может и резонировать с данными дефектами, что приведет к искажению исходной волны. Энергия звуковой волны в момент взаимодействия с элементами молекулярной структуры материала рассеивается в результате процессов внутреннего трения.