

Э.И. ВОЛОГДИН

СЛУХ И ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКА

Курс лекций

Санкт-Петербург

2012

Содержание

<u>Содержание.....</u>	<u>2</u>
<u>1. Психоакустика и аудиотехника.....</u>	<u>3</u>
<u>2. Строение слуховой системы человека.....</u>	<u>4</u>
<u>3. Звуковые колебания.....</u>	<u>6</u>
<u>4. Объективные характеристики звука.....</u>	<u>8</u>
<u>5. Пороги слышимости.....</u>	<u>10</u>
<u>6. Критические полосы слуха.....</u>	<u>12</u>
<u>7. Пороги слышимости при маскировке.....</u>	<u>13</u>
<u>8. Уровень громкости.....</u>	<u>19</u>
<u>9. Громкость звука.....</u>	<u>22</u>
<u>10. Временные характеристики слуха.....</u>	<u>23</u>
<u>11. Адаптация слуха.....</u>	<u>24</u>
<u>12. Маскировка во временной области.....</u>	<u>25</u>
<u>13. Высота звука.....</u>	<u>25</u>
<u>14. Нелинейность слуха. Субъективные гармоники.....</u>	<u>27</u>
<u>15. Тембр звука.....</u>	<u>27</u>
<u>16. Разрешающая способность слуха.....</u>	<u>28</u>
<u>17. Бинауральный слух.....</u>	<u>31</u>
<u>18. Эффект предшествования.....</u>	<u>35</u>
<u>19. Бинауральное маскирование и демаскирование.....</u>	<u>35</u>
<u>Список литературы.....</u>	<u>36</u>

1. Психоакустика и аудиотехника

Изучением слуха и восприятия звука занимается наука под названием психоакустика. В этой науке на основе субъективных наблюдений устанавливаются закономерности взаимосвязи между объективными характеристиками звука и ощущениями его восприятия. Эти взаимосвязи лишь иногда описываются с помощью эмпирических формул, чаще представляются в виде графиков, а иногда они носят лишь описательный характер, например, для тембра звука.

Изучение психоакустики радиоинженерами, и особенно специалистами в области аудиотехники, в настоящее время необходимо потому, что результаты исследований в этой области используются в целом ряде разделов аудиотехники, которые изучаются как отдельные дисциплины.

В области аналоговой аудиотехники результаты, полученные в психоакустике, позволяет разрабатывать регуляторы уровня и тембра, акустические головки и акустические системы, шумоподавители, эквалайзеры и усилители мощности с учетом слухового восприятия. Без знаний в области психоакустики нельзя понять почему мы не слышим 20% нелинейные искажения громкоговорителей на низких частотах и нас крайне раздражают нелинейные искажений менее 0.1%, возникающие в транзисторных усилителях из-за центральной осечки.

Эти же знания необходимы при комплектовании звуковых студий и согласования между собой различной аудиоаппаратуры. Даже для того чтобы правильно измерить шум магнитофона, усилителя или целого звукового тракта требуется знание особенностей слуха человека и специальная аппаратура.

В цифровой аудиотехнике до сих пор существует необходимость понижения шума квантования, возникающего при аналого-цифровом преобразовании. Этот шум действует на слух значительно более раздражающе, чем шум аналоговой аудиоаппаратуры. Хотя максимальное отношение сигнал-шум для цифровой аудиоаппаратуры достигает 96...120 дБ, при воспроизведении записи реальных музыкальных программ оно не превышает 50...70 дБ. Существенное снижение шума квантования при разработке цифровой аудиоаппаратуры также возможно только с учетом особенностей слуха человека.

В проигрывателях компакт дисков помехоустойчивое кодирование звука, полная и частичная коррекция кодовых ошибок осуществляются без всякого учета особенностей слуха человека, почти также как в компьютерах. Как следствие, это исключает возможность существенного повышения скорости записываемых цифровых потоков. Поэтому на этих дисках не может быть записано больше двух звуковых каналов, что для современного качества звуковоспроизведения совершенно недостаточно.

В системах связи и звукового вещания крайне ограничены возможности выбора свободных частотных диапазонов, поэтому остро стоит задача понижения скорости цифровых звуковых потоков без снижения субъективного качества звучания.

В области цифровой звукозаписи для повышения качества воспроизведения звука требуется повышение частоты дискретизации и числа разрядов без увеличения размеров носителя и сокращения времени записи.

Для решения этих проблем в этих областях техники необходимо осуществить значительное сжатие звука с уменьшением скорости цифрового потока в 4...10 раз. Поэтому в этих областях техники стали использовать **субполосное кодирование**, при котором звуковой звук разделяется на множество полос шириной близкой к критической полосе слуха, а кодирование осуществляется в каждой полосе отдельно с выбором числа разрядов так, чтобы шумы квантования не ощущались на слух. Были

разработаны множество систем сжатия, основанные *на различных моделях слухового восприятия*, такие как MUSICAM, ATRAC и другие.

В настоящее время такое кодирование звука используется в европейской цифровой системе радиовещания DAB, оптических дисках системы DVD-Audio, магнитооптических мини-дисках, звуковых дисках системы MP-3 и для передачи высококачественного звука в сети Интернет.

Стереофонические аудиосистемы строятся на основе знаний бинауральных особенностях слуха человека. Такая способность слуха позволяет воспринимать объемное звучание с локализацией источников звука в пространстве.

2. Строение слуховой системы человека

Все передачи звуковых программ по системам вещания и связи предназначены для приема их человеком. Поэтому для правильного проектирования и эксплуатации этих систем необходимо понимать как устроена слуховая система человека и знать ее основные свойства.

Ухо состоит из трех частей: наружного уха, среднего и внутреннего. Две первые части служат передаточным звеном для подведения звуковых колебаний к слуховому анализатору, находящемуся во внутреннем ухе – улитке.

На рис. 1 приведена упрощенная схема органа слуха человека. Звуковые волны принимаются акустической рупорной антенной, функции которой выполняет ушная раковина 1.

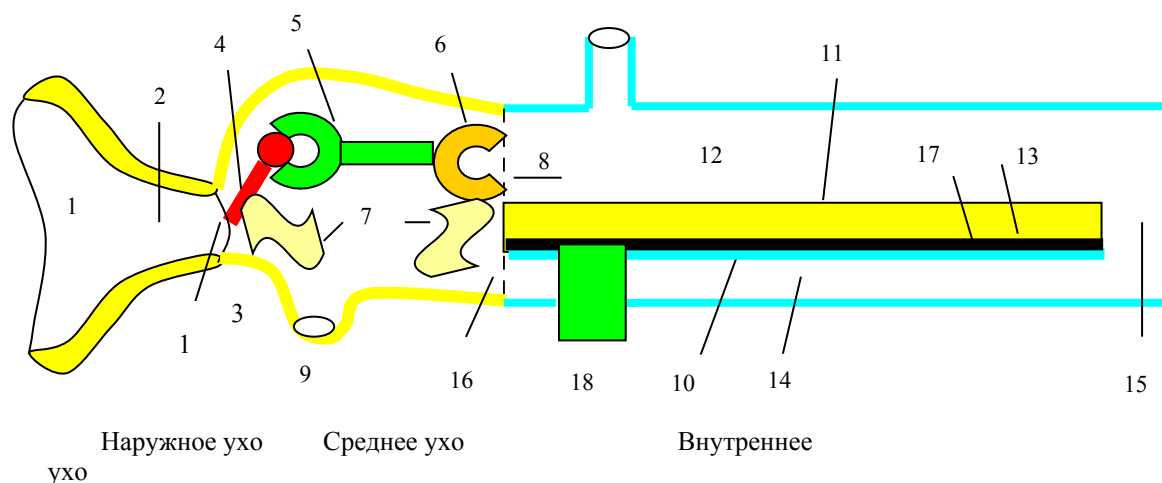


Рис. 1. Устройство уха человека

Далее через слуховой проход 2, который выполняет функции короткого волновода, звук воздействует на барабанную перепонку 3. Эта перепонка вогнута во внутрь и натянута. Эти три элемента образуют наружное ухо.

В полости среднего уха расположены три слуховые косточки: молоточек 4, наковальня 5 и стремя 6, которые шарнирно соединены между собой суставами и оснащены мышечной тканью из двух мышц 7. Рукоятка молоточка прикреплена к барабанной перепонке, а мышца молоточка поддерживает ее в натянутом состоянии. Основание стремени закрывает собой овальное окно 8, за которым находится внутренне ухо. Стремя в овальном окне закреплено не жестко и может совершать возвратно-поступательные движения.

Слуховые косточки образуют систему рычагов для передачи усилия от барабанной перепонки к стремени. Этот механизм превращает воздушные колебания с большой амплитудой колебательной скорости и небольшим давлением в механические колебания стремени с небольшой амплитудой колебательной скорости и высоким давлением. Евстахиева труба **9** соединяет барабанную полость с носоглоткой и служит для выравнивания статических давлений по обе стороны барабанной перепонки. Когда из-за простуды Евстахиева труба закупоривается, в ухе появляются неприятные ощущения.

Внутреннее ухо находится внутри височной кости, и оно полностью заполнено жидкостью – лимфой. Благодаря передаточному механизму среднего уха давление на эту жидкость уха со стороны стремени в 100 раз превосходит звуковое давление, действующее на барабанную перепонку. Внутреннее ухо объединяет в себе орган равновесия и **орган слуха – улитку**. На рисунке улитка показана спрямленной, длина канала улитки около 35 мм.

Пространство улитки разделено на три заполненных жидкостью спиральных канала, разделенных двумя перепонками: основной мембраной **10** и мембраной Рейснера **11**. Эти каналы называются лестницей предверия **12**, срединной лестницей **13** и лестницей барабана **14**. Между лестницей предверия и барабанной полостью находится овальное окно **8** (окно предверия), в котором расположено основание стремени, а между лестницей барабана и барабанной полостью среднего уха – круглое окно **16** (окно улитки), закрытое упругой мембраной. Срединная лестница заполнена эндолимфой, а две другие – перилимфой. Перелимфатические полости сообщаются между собой через отверстия вблизи вершины улитки, называемой геликотермой **15**. Эндолимфа и перелимфа имеют разные значения вязкости и плотности.

Основная мембрана представляет собой аморфную ненапрянутую перепонку, закрепленную по краям. Длина ее примерно 32 мм, ширина вблизи овального окна, т.е. у стремени, около 0,1 мм и вблизи вершины около 0,5 мм. Основная мембрана состоит из нескольких тысяч волокон, натянутых поперек улитки. Волокна слабо связаны между собой и поэтому могут колебаться независимо. Со стороны эндолимфы на основной мембране расположен кортиев орган **17**. Он содержит около 22 тысяч чувствительных волосковых клеток, чувствительных к давлению и деформациям основной мембраны. С волосковыми клетками контактируют окончания нервных волокон, которые объединяются в пучок, называемый слуховым нервом **18**. Он направляется к улитковому ядру ствола головного мозга.

При звуковых колебаниях стремечко приводит в движение мембрану овального окна. Под действием этих колебаний мембрана круглого окна колеблется в такт с мембраной овального, так как лимфа практически несжимаема. Лимфа колеблется касательно к поверхности основной мембраны, поперек ее волокнам. На колебания лимфы отзываются (резонируют) в зависимости от частоты колебаний только вполне определенные волокна. Около геликотермы расположены наиболее длинные волокна, резонирующие на низких частотах. В основании улитки (между овальным и круглым окнами) расположены наиболее короткие волокна, которые резонируют на высоких частотах. Сложный звук, состоящий из нескольких составляющих, далеко отстоящих по частоте друг от друга, возбуждает несколько групп волокон. Таким образом, **основная мембрана служит частотным анализатором**.

Границы воспринимаемого слухом частотного диапазона довольно широки (20... 20000 Гц), а **избирательность слуха невелика**. Полоса пропускания на уровне 0,71 у резонаторов слухового анализатора меняется от 35 Гц на низких частотах до 200 Гц на высоких. Вследствие ограниченности числа нервных окончаний вдоль основной мембраны, **человек запоминает во всем частотном диапазоне не более 250 градаций частоты**. Число этих градаций резко уменьшается с уменьшением интенсивности

звука и в среднем равно 150. Даже самые лучшие музыканты не замечают разницы в звучании, если частоты отличаются менее чем на 4%.

Если волокно основной мембраны при своих колебаниях не достает до ближайшей волосатой клетки, то человек звук не воспринимает. При увеличении амплитуды колебаний волокна, как только оно коснется ближайшей клетки, звук будет услышан. **Этот скачкообразный переход от слышимого состояния в неслышимое и обратно называется порогом слышимости.** При увеличении интенсивности звука выше пороговой, пока амплитуда колебаний волокон не увеличится настолько, чтобы коснуться еще одной клетки, слуховое ощущение остается постоянным. Как только одно из волокон коснется следующей клетки, слуховое ощущение еще раз повысится скачком. **Слуховое ощущение нарастает скачками по мере увеличения числа возбужденных клеток. Такие скачки называются порогом различения интенсивности.** Число этих скачков на средних частотах не превышает 250. Таким образом, по амплитуде имеет место дискретное восприятие звука. Для средних и высоких интенсивностей звука скачок получается при одинаковых относительных изменениях интенсивности звука.

3. Звуковые колебания

Мы слышим звук, который передается по воздуху и воспринимаем его как нечто первичное. Его воздействие на слух называется *раздражением*, а то что мы слышим – *ощущением*. Как раздражение, так и ощущение существенно зависят от характера звука, поэтому для изучения их взаимосвязи *все звуки* целесообразно разделить на группы в зависимости от их восприятия на слух.

Чистые тоны. В этом случае звуковое давление описывается синусоидальной функцией времени с постоянной амплитудой, частотой и фазой. Тоны на слух воспринимаются как тихие или громкие, высокие или низкие.

Созвучие. Это стационарный звук, состоящий из нескольких тонов, например, звук колокола. В большинстве случаев **под созвучием понимается комбинация основного тона и нескольких обертонов.** Звуковое давление созвучия представляет собой периодическую функцию времени: функция имеет несинусоидальную форму, спектр линейчатый с примерно одинаковыми составляющими – основное колебание не доминирует. К созвучиям также относятся гласные звуки речи. На рис. 2 приведен график спектра созвучия. По оси абсцисс графика откладывается текущая частота F , а по оси ординат – уровень звукового давления спектральных составляющих.

Амплитудно-модулированные звуковые колебания. Большинство звуков, которые мы слышим, являются нестационарными, амплитуда колебаний у них меняется в функции времени. Спектр АМ имеет среднюю частоту и две боковые составляющие.

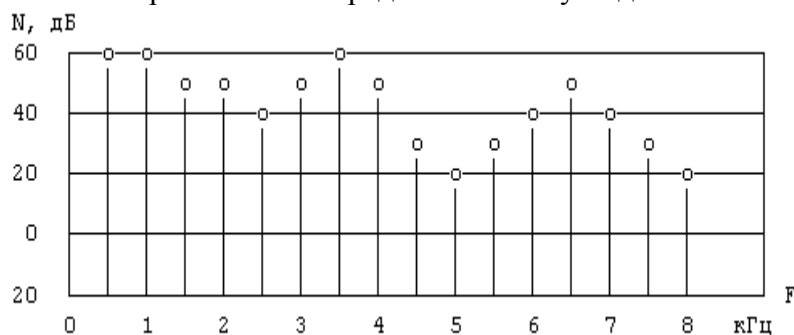


Рис. 2. График спектра созвучия

Пример, свисток спортивных судей. У этого звука средняя частота 1...2 кГц,

модулирующая частота 5...25 Гц. Модуляция периодическая, но несинусоидальная, спектр боковых составляющих не очень широкий.

Частотно-модулированные (ЧМ) звуковые колебания. Такие колебания характеризуется средней частотой, частотой модуляции и девиацией средней частоты. Важной характеристикой ЧМ-колебания является индекс модуляции, равный отношению девиации к модулирующей частоте. При малых индексах модуляции спектр ЧМ-колебания такой же, как у АМ-колебания. Чем больше этот индекс, тем больше число боковых составляющих спектра и шире спектр.

Частотный интервал между составляющими спектра ЧМ-колебания равен модулирующей частоте. На рис. 3 приведен пример спектра ЧМ-колебания, возникающего при игре на скрипке. По осям графика используются те же обозначения,

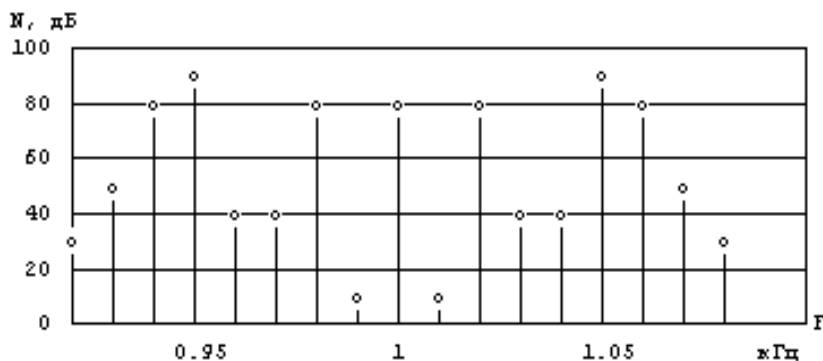


Рис. 3. График спектра звука с частотной модуляцией

что и на рис. 2.

В музыкальных звуках **ЧМ проявляется в виде вибрато**. В скрипичной игре девиация основного тона может достигать 10 Гц, при частоте модуляции 3 Гц. При этом индекс модуляции равен 3 и спектр имеет полосу 440 ± 13 Гц, в него входит 9 составляющих.

Биения. Два тона с одинаковыми амплитудами и частотами, но с изменяющейся фазой, воспринимаются на слух как **периодическое изменение громкости тона, что называется биением**. Такой звук имеет орган.

Шумы. Звуки, спектр которых непрерывен, называются шумами. В зависимости от характера огибающей спектральной плотности мощности шума они имеют условные названия: **белый, розовый и равномерно маскирующий**. В зависимости от ширины спектра шум может быть широкополосным, узкополосным, октавным, третьоктавными и др. Важнейшей характеристикой шума является частотная зависимость спектральной плотности мощности $R_{ш}$.

Белый шум. У данного шума уровень спектральной плотности мощности $N(R)_{бш}$ не зависит от частоты. В линейной шкале частот его график имеет вид прямой линии, параллельной оси частот. В октавной шкале частот график уровня спектральной плотности мощности этого шума имеет вид наклонной прямой линии с подъемом в область высоких частот с крутизной 3 дБ/октаву.

Розовый шум. У этого шума уровень спектральной плотности мощности $N(R)_{рш}$ в октавной шкале не зависит от частоты и его график имеет вид прямой линии, параллельной оси частот. В линейной шкале частот график уровня спектральной плотности мощности этого шума имеет вид прямой линии, спадающей к высоким частотам с крутизной 3 дБ/октаву.

Равномерно маскирующий шум. До частоты 500 Гц этот шум имеет характеристики белого шума, а выше он имеет характеристики розового шума. Это связано с критическими полосами слуха, которые до 500 Гц примерно одинаковы по ширине, а свыше 500 Гц их полоса линейно растет с частотой. Этот шум одинаково

маскирует во всем звуковом диапазоне частот. Он формируется из белого шума с помощью фильтра, который на частотах выше 500 Гц создает спад с крутизной 3 дБ/октаву.

На рис.4. приведены графики частотной зависимости уровня спектральной плотности мощности $N(R)_{ш}$ для всех рассмотренных звуковых шумов.

Узкополосный шум сопровождается звуки почти всех вокальных инструментов. Играя на флейте, музыкант возбуждает не только периодический тон, но и узкополосный шум от вдувания воздуха. Это придает выразительность звучанию.

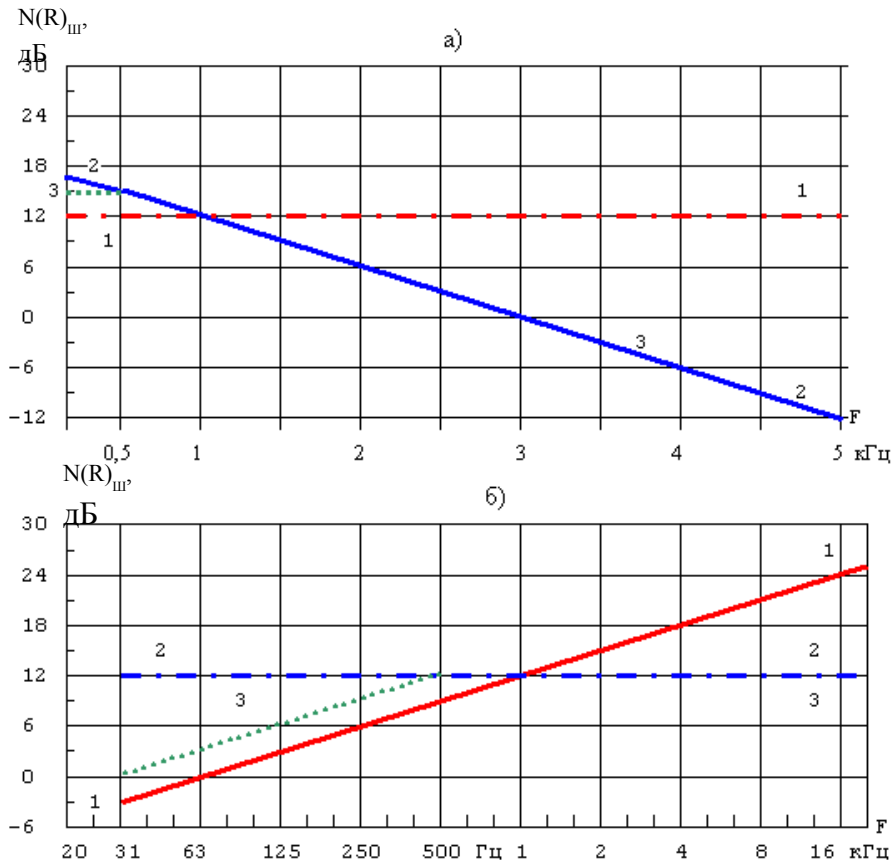


Рис.4. Графики спектральной плотности мощности шумов
а) линейная шкала частот, б) октавная шкала частот

(1- белый шум, 2 – розовый шум, 3 – равномерно маскирующий шум)
а) линейная шкала частот, б) октавная шкала частот

Такие шумы возникают при игре на смычковых инструментах, а также в речи и пении.

Импульсы и последовательности звуковых импульсов. Краткие звуки создают импульсы звукового давления. Речь человека представляет собой последовательность импульсов звукового давления различной амплитуды, частоты и длительности. Долгие гласные звуки сравнимы со стационарными тонами, краткие – лучше называть звуковыми импульсами. При длительности импульсов 50 мкс все спектральные составляющие лежат ниже 20 кГц. При уменьшении длительности до 20 мкс большая часть спектра находится за пределами 20 кГц.

4. Объективные характеристики звука

Воздействуя на слух, **звук вызывает раздражение**. В свою очередь **раздражение создает у человека субъективный эффект – ощущение**. Раздражение и его параметры – это физические величины, которые могут быть измерены. Параметры ощущения

(громкость, высота, тембр) измерить нельзя. О них можно лишь составить представление, на основании словесного описания испытуемого.

Интенсивность звука I . Она определяется как среднее количество звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу поверхности, и связана со звуковым давлением равенством

$$I = P^2 / Q_0,$$

где Q_0 – удельное сопротивление воздуха, $Q_0 = 1.23 \text{ кг/м}^3$. Единицей измерения интенсивности является Вт/м^2 .

Уровни интенсивности и децибелы. При исследовании восприятия изменений интенсивности звука было установлено, что **одинаковые относительные изменения интенсивности вызывают одинаковые абсолютные изменения слухового ощущения**, т.е. слуховое ощущение E пропорционально логарифму раздражающей силы. Математически это записывается в виде

$$E = a \lg I + C.$$

Интенсивность на пороге слышимости обозначим $I_{\text{пс}}$. При этом слуховое ощущение равно нулю, поэтому

$$C = -a \lg I_{\text{пс}},$$

откуда

$$E = a \lg (I / I_{\text{пс}}).$$

Для оценки величины слухового ощущения была предложена единица под названием «бел» ($a = 1$). Эта единица соответствует десятикратному отношению интенсивностей, поэтому была введена более мелкая единица – децибел, равная 0,1 бела. Слуховое ощущение в децибелах

$$E = 10 \lg (I / I_{\text{пс}}).$$

Диапазон изменения интенсивности звука составляет 10^{14} раз, а слуховое ощущение изменяется на 130 дБ. Это значит, что величина элементарного скачка по диапазону амплитуд в среднем равна 0,8 дБ, что соответствует изменению интенсивности в 1,2 раза.

Вследствие логарифмического закона восприятия звука и широкого диапазона интенсивностей слышимых звуков было введено понятие **уровня интенсивности**

$$N(I) = 10 \lg (I / I_0).$$

За нулевой уровень интенсивности условились принимать интенсивность звука, равную $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$. Эта интенсивность близка, но не равна, порогу слышимости для нормального слуха на частоте 1 кГц. Нулевой уровень по звуковому давлению P_0 определяется расчетным путем по формуле

$$P_0 = (I_0 Q_0 C_0)^{0.5} = 2.04 \cdot 10^{-5} \text{ Па}.$$

Интенсивность и звуковое давление связаны квадратичной зависимостью, поэтому **уровень звукового давления N** определяется равенством

$$N = 20 \lg (P / P_0),$$

но всегда уровни по звуковому давлению и интенсивности равны.

Из приведенных формул следует, что **каждое двукратное изменение интенсивности соответствует изменению уровня на 3 дБ. Каждое двукратное изменение звукового давления приводит к изменению его уровня на 6 дБ.**

Уровни интенсивности и звукового давления сложного звука суммируются алгебраически:

$$N(I) = 10 \lg [(I_a + I_b + I_c + \dots) / I_0] = N(I)_a + N(I)_b + N(I)_c + \dots$$

В качестве объективной характеристики широкополосных шумов с непрерывным спектром используются **спектральная плотность мощности R** , которая определяет распределение интенсивности звука по частоте и измеряется в Вт/м², Гц. Численно она равна интенсивности звука в полосе ΔF шириной 1 Гц

$$R = I / \Delta F.$$

Уровень спектральной плотности мощности шума вычисляется по формуле

$$N(R) = 10 \lg (R / R_0),$$

где R_0 – нулевой уровень спектральной плотности ($R_0 = 10^{-12}$ Вт/м², Гц).

Для большинства музыкальных инструментов спектральная плотность мощности равномерна до 3,5...4 кГц и далее уменьшается с крутизной 6 дБ/октаву.

Частота – 20...20000 Гц (диапазон – 10 октав).

Гармоническая октава – диапазон частот с отношением частот 2:1,

Октавная шкала частот. В этой шкале диапазон звуковых частот разделен только на октавы. Если в эту шкалу входит частота 1 кГц, она называется **основной шкалой**. Октавная шкала может быть разделена на меньшие отрезки: в пол-октавы, треть-октавы и т.д. Значения октавных частот и внутри октавы определяются расчетным путем. Октавные частоты:

$$F_{\text{ОКТ}} = 1000 \cdot 2^i, \text{ Гц}$$

где i – номер октавы, от 0 до ± 5 . Частоты внутри октав:

$$F_x = F_{\text{ОКТ}} \cdot 2^{j/x}$$

где x – число, указывающее на сколько частей делится октава (2, 3, 6, ...),

$$j = 0 \div (x - 1).$$

В электроакустике и аудиотехнике преимущественно используется основная треть октавная шкала частот.

5. Пороги слышимости

Порог слышимости – это минимальное звуковое давление, при котором еще существует слуховое ощущение. Наличие порога слышимости определяется строением слуховой системы человека. Этот порог характеризует чувствительность уха к интенсивности звуковой энергии. Величина порога слышимости зависит от характера используемых звуковых колебаний и условий измерений.

Порог слышимости называют абсолютным при измерении его на тональном звуке в полной тишине. Определяется он для людей в возрасте 18...20 лет при размещении источника звука перед слушателем. Длительность воздействия звука должна быть не меньше 250 мс. График частотной зависимости уровня абсолютного порога слышимости $N_{\text{АПС}}$ приведен на рис. 5. На этом графике по оси абсцисс отложена частота испытательного тона F_T , а по осям ординат звуковое давление P в Паскалях и

уровень звукового давления N в децибелах. Напомним, что уровень звукового давления и уровень его интенсивности всегда равны.

Чувствительность уха максимальна на частотах 2...5,0 кГц. На этих частотах абсолютный порог слышимости меньше $2 \cdot 10^{-5}$ Па. **За нулевой уровень принято звуковое давление $2E-5$ Па.** Следует заметить, что звуковое давление, возникающее вследствие броуновского движения молекул при температуре 25 градусов, составляет $5E-6$ Па. Если бы ухо было вдвое чувствительней, оно слышало бы непрерывный шум флуктуаций молекул воздуха и тока крови. Таким образом, чувствительность уха

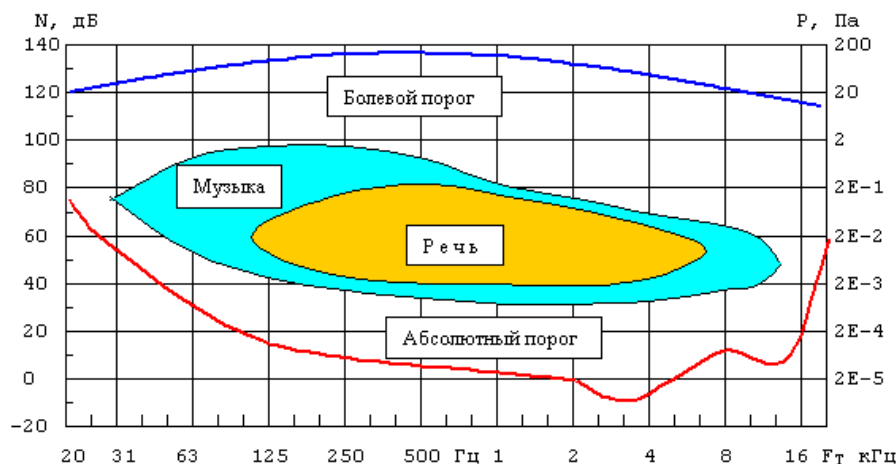


Рис.5. Области слышимости звук

находится на пределе биологической целесообразности.

Пороги слышимости разные для левого и правого уха, поэтому результаты измерений зависят от того, что используется при измерениях: громкоговоритель или телефоны. **При использовании телефонов абсолютный порог слышимости выше на 5...10 дБ.** С возрастом слух людей притупляется и быстрее всего на высоких частотах. Обычно на частоте 10 кГц чувствительность уха у 60-летнего человека на 20 дБ ниже, чем у 20-летнего.

При давлении от 60 до 80 Па возникает ощущение давления на уши – эта величина называется **порогом осязания**. При уровне давления около 100 дБ возникают неприятные ощущения. Давление от 150 до 200 Па причиняет боль и **называется болевым порогом**. Слуховая система человека приспособлена к звукам малой и средней интенсивности с уровнем давления не выше 90 дБ. Звуки с уровнем давлением уже больше 75 дБ приводят к изменению порогов слышимости и даже к полной глухоте. Степень повреждения пропорциональна времени воздействия. Иногда порог чувствительности восстанавливается через 16...20 часов.

Наибольшее влияние на сдвиг порога чувствительности оказывают высокие частоты. Понижение слуха по этим причинам лечению не поддается. Исследования показали, что в последние годы резко снизился порог слышимости у молодых людей, что возможно связано с образом их музыкальной жизни.

Области слышимости тональных звуков. Кривые абсолютного порога слышимости и порога болевого ощущения на рис. 5 ограничивают области слышимости музыки и речи.

Диапазон давлений : речь от 40 до 84 дБ,
музыка от 35 до 100 дБ.
Полоса частот: речь от 100 до 7000 Гц,
музыка от 31 до 15000 Гц.

В этой области чувствительность уха на граничных частотах понижается на 60...80 дБ. Поэтому очевидно, что совершенно бесполезно при цифровом кодировании передавать составляющие спектра звука не ниже абсолютного порога слышимости. Так как этот порог существенно зависит от частоты, то целесообразно кодирование производить в частотной области с помощью субполосной фильтрации.

Диапазон слышимых звуков составляет 120...130 дБ, однако уровень звукового давления на музыкальной программе не превышает 100 дБ, а для речи – 84 дБ. Причем этот диапазон существенно зависит от частоты. Это необходимо учитывать при выборе числа разрядов для различных программ и в зависимости от частотной полосы кодирования. Целесообразно также при кодировании иметь переключение речь/музыка, что позволит при передаче речи существенно сократить скорости цифровых потоков.

Кривая порога слышимости может быть также снята с помощью узкополосного шума и созвучий. **Особый интерес представляет порог слышимости шума с равномерной спектральной плотностью в звуковом диапазоне частот. Он равен +12 дБ.** Таким шумом являются ошибки квантования в цифровых звуковых трактах. Они в значительной мере определяют качество звучания.

6. Критические полосы слуха

При восприятии звука слуховой аппарат человека разделяет его на частотные группы, называемые критическими полосами. Эта особенность слуха является одним из важнейших его свойств. Понятия частотная группа и критическая полоса слуха тождественны. В диапазоне от 20 до 16000 Гц число критических полос равно 24. Ширина этих полос меняется от низких к высоким частотам нерегулярным образом: 80,100,100,100,110,120,140,150,160...Гц, на 20 кГц ширина полосы увеличивается до 5

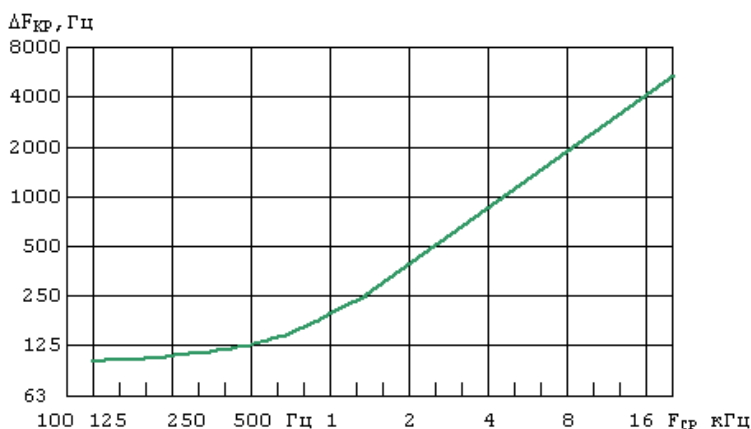


Рис.6. Графики зависимости ширины критической полосы слуха от ее средней частоты

кГц. Стандартом MPEG установлены нижние границы критических полос слуха: 20, 100, 200, 300, 400, 510, 630, 770, 920, 1080, 1270, 1480, 1720, 2000, 2320, 2700, 3150, 3700, 4440, 5300, 5400, 7700, 9500, 12000, 16000 Гц.

Критические полосы слуха не зависят от уровня интенсивности шума. В области до 500 Гц ширина частотных групп почти не зависит от средней частоты шума и равна примерно 100 Гц. В области выше 500 Гц она увеличивается пропорционально средней частоте (рис. 6). При этом

соблюдается не абсолютное, а относительное постоянство ширины полосы $\Delta F / F = \text{const}$. Ширина критической полосы при этом определяется равенством

$$\Delta F_{\text{кр}} = 0,2F.$$

В пределах частотных групп слух интегрирует возбуждение по частоте и не различает тонкой структуры возбуждения. На этом основании при субполосном кодировании звука в пределах каждой частотной группы достаточно передавать лишь одну максимальную составляющую спектра. По этой же причине **слух реагирует не на общую мощность шума, а на мощность шума в критических полосах.** Таким образом, при воздействии широкополосного шума слух как бы превращает сплошной спектр в дискретный. Такой спектр состоит из конечного числа составляющих по числу критических полос слухового аппарата.

Если ширина спектра узкополосного шума меньше ширины критической полосы слуха, **то уровень громкости в этой полосе определяется лишь общей энергией шума и совершенно не зависит от характера распределения интенсивности в полосе.** Она может быть распределена равномерно или сосредоточена в части полосы или быть в виде одного тона.

Критические полосы слуха оказалось удобно использовать в качестве **единицы субъективной высоты тона**, которую назвали **барк**. В настоящее время в

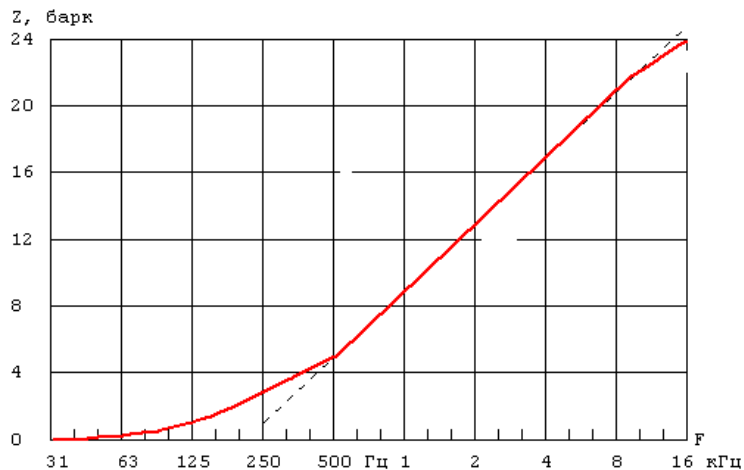


Рис.7. График перевода высоты тона из октавной шкалы частот в шкалу высоты тона в барках

психоакустических моделях слуха вместо частотных шкал используются шкалы высоты тона звука в барках. Такие же шкалы используются при расчете коэффициентов маскировки. На рис. 7 приведен график перевода частотной шкалы высоты тона в октавах в шкалу высоты тона в барках. По оси абсцисс отложена высота тона в октавах, а по оси ординат – высота тона Z в барках.

7. Пороги слышимости при маскировке

При одновременном воздействии на слух двух звуков один из них может не прослушиваться на фоне другого звука. **Этот эффект называется маскировкой.** Маскирующее действие различных звуков выявляется путем определения повышения порога слышимости испытательных тонов $N_{\text{ПС}}$ относительно абсолютного порога слышимости $N_{\text{АПС}}$. Понятия порога слышимости и уровня порога слышимости тождественны. **Коэффициент маскировки $K_{\text{М}}$** рассчитывается в децибелах как разность уровней этих двух порогов

$$K_{\text{М}} = N_{\text{ПС}} - N_{\text{АПС}}.$$

Маскировка чистым тоном. На рис. 8 приведены кривые маскировки испытательных тонов в диапазоне частот, когда маскирующим звуком является тоже тон, но с фиксированной частотой F_M и заданным уровнем интенсивности N_M . На этом рисунке по оси ординат откладывается уровень порога слышимости маскируемого тона $N_{ПС}$, а по оси абсцисс – его частота F_T и частота маскирующего звука F_M . По этим кривым для заданных значений N_M , F_M и F_T определяется порог слышимости маскируемого тона F_T и рассчитывается коэффициент маскировки тонального звука чистым тоном $K_{М,ТТ}$ (по приведенной выше общей формуле для коэффициента маскировки K_M).

Особенности маскировки чистым тоном. Эти особенности могут быть сформулированы следующим образом:

- маскировка максимальна, когда частоты F_T и F_M близки, чем дальше по частоте они расположены друг от друга, тем меньше коэффициент маскировки;

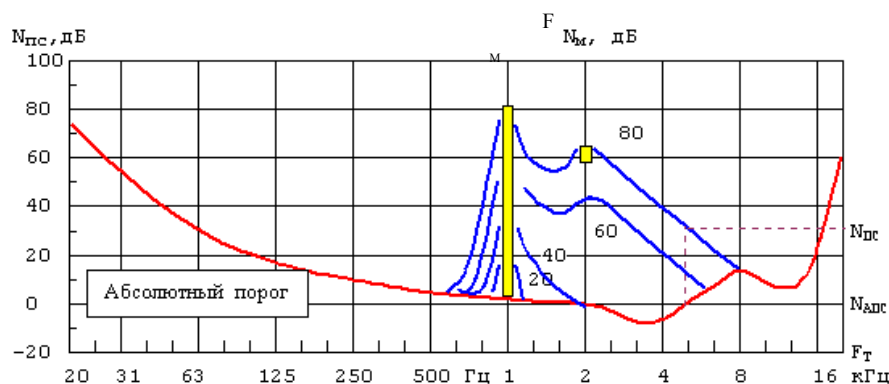


Рис.8. Кривые порога слышимости тона с частотой F_T при маскировке тоном с частотой $F_M = 1$ кГц

- коэффициент маскировки увеличивается по мере возрастания уровня интенсивности маскирующего тона N_M ;
- кривые маскировки существенно несимметричны по шкале частот, у них более резкий спад в сторону низких частот и плавное понижение в сторону верхних частот, поэтому маскировка сильнее проявляется в области высоких частот;
- сдвиг маскирующего звука по частоте приводит к изменению формы кривой маскировки.

Если частота тона F_T равна удвоенной, утроенной и выше частоте маскирующего тона F_M , то в широком диапазоне слышимости возникают биения, которые проявляются в виде провалов на графиках кривых маскировки, показанные штриховкой. Эти биения тем заметнее, чем больше уровень интенсивности маскирующего тона. Они возникают из-за нелинейности слуха.

Если маскировка осуществляется сразу несколькими тонами (созвучием), то кривая порога слышимости во всем частотном диапазоне созвучия лежит выше абсолютного порога слышимости. В этом случае кривые порога слышимости имеют множество максимумов и зон биений. При малой громкости высокий тон хорошо слышен одновременно с низким тоном. При высокой громкости высокие частоты могут полностью маскироваться низкими.

Маскировка узкополосным шумом. При маскировке тона с частотой F_T узкополосным шумом с центральной частотой F_M и уровнем интенсивности N_M (рис. 9) кривые маскировки примерно такие же, как при маскировке тоном с некоторыми отличиями:

- нет биений и провала коэффициента маскировки на средней частоте мешающего звука,

- максимум маскировки на 4 дБ ниже максимума уровня интенсивности маскирующего шума.

Для тональных звуков выше 1 кГц маскирующее действие шума значительное, в то время как частоты на октаву ниже частоты F_M практически не маскируются. Это очень важно, так как при дискретизации часто возникают искажения ниже спектра основного тона, которые не маскируются. Например, на частоте тона 9 кГц 5 гармоника ошибок

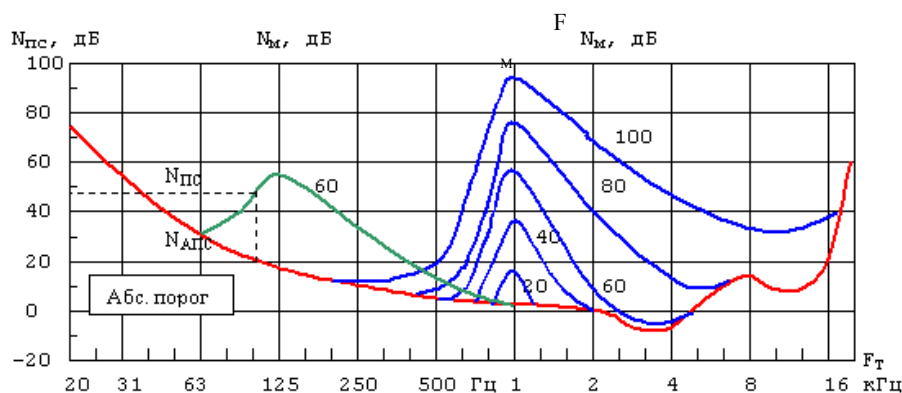


Рис.9. Кривые порога слышимости тона с частотой F_T при маскировке узкополосным шумом со средней частотой $F_{CP} = 1$ кГц

квантования с частотой дискретизации 44 кГц образуют паразитную составляющую в звуковом спектре с частотой 1 кГц.

Графики на рис. 9 позволяют рассчитать допустимое отношение сигнал-шум квантования (С/Ш) с учетом маскировки. Дело в том, что тональный сигнал и узкополосный шум маскируют не только тоны, но и широкополосные шумы квантования с равномерной спектральной плотностью. Для маскирующих звуков с большим уровнем интенсивности, например, 100 дБ, нижняя граница частотной области, где происходит маскирование шумов квантования, равна примерно 500 Гц. На этой частоте порог слышимости при маскировке на 20 дБ выше порога слышимости в тишине (это видно из графика на рис. 9).

В этом диапазоне критические полосы слуха в 10 раз меньше таких полос в области 2...5 кГц. Поэтому для шума квантования с равномерной спектральной плотностью допустимое увеличение уровня интенсивности шума в такой полосе составит 10 дБ. В результате порог слышимости шума увеличивается до 30 дБ. Если учесть, что пороговый уровень слышимости шума в тишине равен +12 дБ, то допустимое значение уровня интенсивности шума квантования составит 42 дБ, а допустимое отношение сигнал/шум квантования 58 дБ (100 - 42) дБ. Поэтому величина отношения С/Ш 60 дБ является нормой при цифровой передаче узкополосных сигналов в широкополосных трактах.

Маскировка шума квантования тональными звуками и узкополосными шумами имеет очень большое значение при кодировании звука, так как передавать составляющие спектра, которые маскируются, не нужно. Это позволяет существенно сократить необходимое число разрядов и, следовательно, избыточность в звуке и скорости цифровых потоков.

Смещение частоты маскирующего звука приводит к смещению кривой маскировки по оси частот (рис. 9). В области выше 1 КГц кривая маскировки меняется мало. На частотах ниже 1 кГц эта кривая видоизменяется достаточно сильно. Особенно важно, что она расширяется в область НЧ.

Маскировка тональных звуков широкополосным белым шумом. При маскировке тона белым шумом кривые маскировки существенно видоизменяются (рис. 10).

Эти особенности могут быть сформулированы следующим образом:

- вместо уровня интенсивности маскирующего звука для характеристики мощности шума используется уровень спектральной плотности мощности $N(R)_{\text{БШ}}$
- до частоты 500 Гц кривые маскировки идут горизонтально,
- на частотах выше 500 Гц порог слышимости повышается, это изменение составляет 3 дБ/октаву и при увеличении частоты в 10 раз порог возрастает на 10 дБ.

Такая зависимость объясняется тем, что органы слуха реагируют не на общую мощность, а на мощность шума в критических полосах слуха. Ниже 500 Гц все

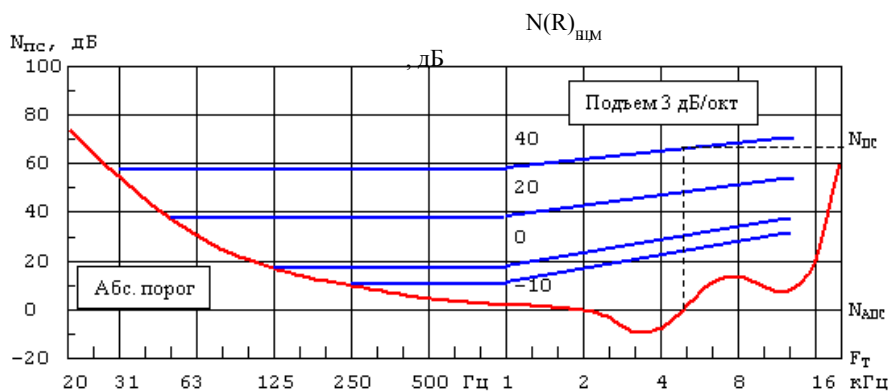


Рис.10. Кривые порога слышимости тона F_T при маскировке белым шумом

критические полосы слуха имеют одинаковую ширину, поэтому порог слышимости от частоты не зависит. В области частот, где ширина критических полос слуха пропорциональна средней частоте, при увеличении частоты в 10 раз порог слышимости возрастает на 10 дБ.

При маскировке шумом слух расчленяет широкополосный шум на частотные группы и может распознать испытательный тон с частотой F_T лишь тогда, когда его уровень всего на несколько децибел ниже уровня мешающего шума в частотной группе, где находится тон.

При маскировке тона белым шумом с уровнем спектральной плотности мощности $N(R)_{\text{БШ}}$ коэффициент маскировки определяется как разность между величинами порога слышимости тона и абсолютного порога слышимости этого же звука

$$K_{\text{М.ТШ}} = N_{\text{ПС}} - N_{\text{АПС}}$$

Например, при $N(R)_{\text{БШ}} = 40$ дБ на частоте 1 кГц порог слышимости тона равен 58 дБ, а абсолютный порог слышимости – 3 дБ, поэтому коэффициент маскировки тона шумом $K_{\text{М.ТШ}}$ равен 55 дБ.

Равномерно маскирующий шум. Это шум, который осуществляет одинаковую маскировку тональных звуков во всем звуковом диапазоне частот. Спектральная плотность мощности этого шума $N(R)_{\text{РМШ}}$ до частоты 500 Гц такая же как у белого шума $N(R)_{\text{БШ}}$. Выше 500 Гц спектральная плотность мощности $N(R)_{\text{РМШ}}$ уменьшается пропорционально частоте, как у розового шума.

Кривые маскировки тонального звука равномерно маскирующим шумом приведены на рис. 11. Расчет коэффициента маскировки производится также как и при белом шуме.

Маскировка тона шумом внутри критической полосы слуха. При такой маскировке, предполагается, что ширина полосы белого шума равна ширине критической полосы слуха и маскируемый тон находится посередине этой полосы. В такой ситуации величина маскировки оценивается с помощью *коэффициента*

маскировки K_M , показывающего, на сколько децибел порог слышимости маскируемого тона с частотой F_T ниже уровня интенсивности маскирующего шума $N_{МШ}$ в рассматриваемой критической полосе слуха.

Этот коэффициент маскировки тона шумом $K_{МТШ}$ определяется равенством:

$$K_{МТШ} = N_{пс} - N_{МШ},$$

где $N_{пс}$ – уровень порога слышимости тона при маскировке его шумом с уровнем интенсивности $N_{МШ}$. Для белого шума с уровнем спектральной плотности мощности

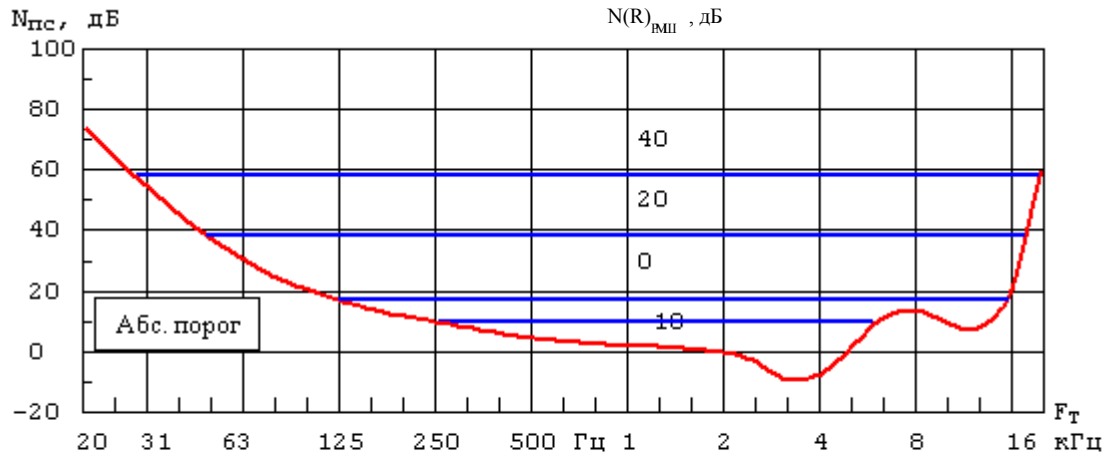


Рис. 11. Графики порога слышимости тона F_T при маскировке равномерно маскирующим шумом со спектральной плотностью $N(R)_{шш}$

$N(R)_{БШ}$ уровень интенсивности маскирующего шума $N_{МШ}$ в критической полосе $\Delta F_{кр}$, определяется двумя равенствами:

$$N_{МШ} = \begin{cases} N(R)_{БШ} + 10 \lg (\Delta F_{кр1} / 1 \text{ Гц}) & \text{при } F_T < 500 \text{ Гц,} \\ N(R)_{БШ} + 10 \lg (\Delta F_{кр2} / 1 \text{ Гц}) & \text{при } F_T > 500 \text{ Гц.} \end{cases}$$

До частоты 500 Гц $\Delta F_{кр1}$ равна 100 Гц, поэтому второе слагаемое в формуле равно 20 дБ и, следовательно, уровень маскирующего шума $N_{МШ}$ всегда выше уровня его спектральной плотности мощности на 20 дБ. Из графика на рис. 10 получаем, что коэффициент маскировки $K_{МТШ}$ равен минус 2 дБ. С увеличением ширины критической полосы слуха $\Delta F_{кр2}$ (на частотах выше 500 Гц) коэффициент маскировки уменьшается, достигая на самых верхних частотах значения минус 5...6 дБ.

Существенно хуже проявляется маскировка в ситуации, когда тон маскирует шум с полосой, равной критической полосе слуха. В этом случае коэффициент маскировки определяется равенством

$$K_{МШТ} = N_{псш} - N_{МТ},$$

где $N_{псш}$ и $N_{МТ}$ – соответственно порог слышимости шума, маскируемого тоном, и уровень маскирующего тона в децибелах. Этот коэффициент маскировки изменяется от минус 5...7 дБ на самых низких частотах до значения минус 35...40 дБ для самых верхних.

Графики маскировки при использовании шкалы высоты тона в барках. Частотные зависимости порога слышимости при маскировке в частотной шкале имеют очень сложную форму, поэтому их очень трудно представить в математической форме. При переходе от частотной шкалы к шкале высоты тона Z в барках эта проблема решается значительно проще. В этой шкале форма кривых маскировки не зависит от

величины высоты тона Z маскирующего тона и полностью определяется только уровнем его интенсивности. Поэтому в стандартах кодирования MPEG величина маскировки задается именно в шкале высоты тона в барках.

В качестве примера на рис. 12 приведены графики для коэффициентов маскировки

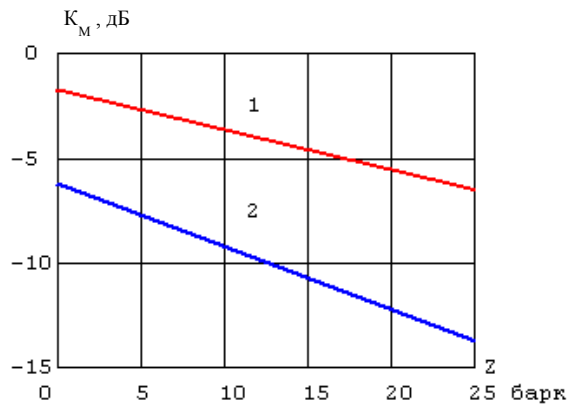


Рис.12. Графики зависимости коэффициента маскировки внутри частотной группы от высоты тона в барках (1- маскировка шума тоном, 2- маскировка тона шумом)

тона шумом и шума тоном внутри критической полосы слуха. На этих графиках по оси ординат откладывается величина коэффициента маскировки внутри критической полосы слуха. По оси абсцисс Z – откладывается высота тона в барках. Коэффициент маскировки рассчитывался с помощью аппроксимирующих функций:

$$K_{МТШ} = -2,025 - 0,175 z \quad (\text{для графика 1}),$$

$$K_{МШТ} = -5,025 - 0,275 z \quad (\text{для графика 2}).$$

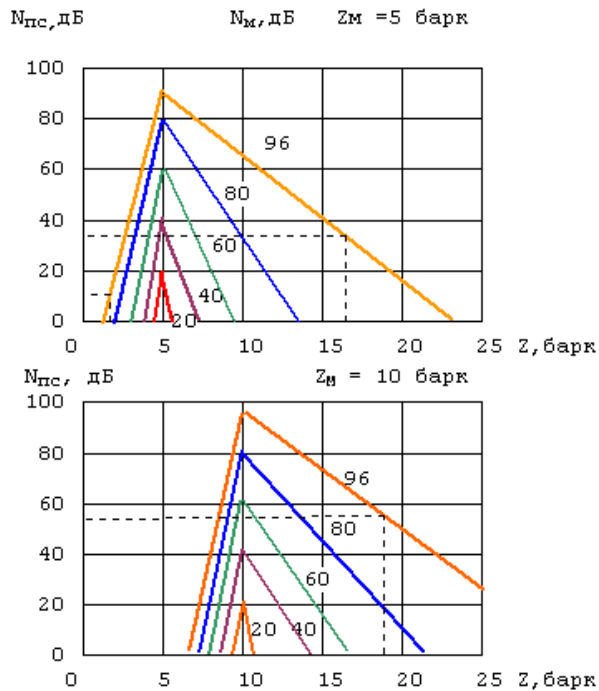


Рис.13. График зависимости порога слышимости тона с частотой F_T при маскировке тоном или узкополосным шумом с заданным значением Z_M

Как видно, с увеличением высоты тона Z коэффициент маскировки в обоих случаях уменьшается по линейному закону. Тон остается всегда слышимым, даже, если его уровень меньше уровня маскирующего звука. Маскировка шума тоном (график 2) проявляется значительно слабее.

На рис. 13 приведены кривые маскировки *вне критической полосы слуха*. В этом случае рассматривается маскировка составляющими одной полосы составляющих в других критических полосах. Маскирующими могут быть тоны или узкополосный шум. Графики справедливы в обоих случаях. Как видно, форма кривых маскировки не зависит от высоты маскирующего тона Z_M . Под коэффициентом маскировки при этом понимается уровень порога слышимости тона $N_{ПС}$ при заданных значениях Z_M и N_M .

8. Уровень громкости

Звуковое давление и интенсивность тонального звука, измеренные приборами, не дают представления об ощущении громкости. Между тем **человек может довольно точно установить равенство громкостей двух звуков** любого частотного состава. Это было использовано для введения понятия уровня громкости, позволяющего определить громкость одного звука относительно другого, принятого в качестве опорного. **За единицу уровня громкости приняли уровень интенсивности чистого тона с частотой 1000 Гц. Эта единица уровня громкости называется фон.** Уровень громкости далее будем обозначать символом G . Численно уровень громкости в фонах равен уровню интенсивности звука в децибелах на частоте 1000 Гц. Определение уровня громкости тонов других частот производится по графику **кривых равного уровня громкости**. Эти графики, называются **изофонами** (рис. 14.). На этих графиках представлена частотная зависимость звукового давления при различных уровнях громкости от 3 до 120 фон.

Каждая кривая получена путем субъективного сравнения громкости

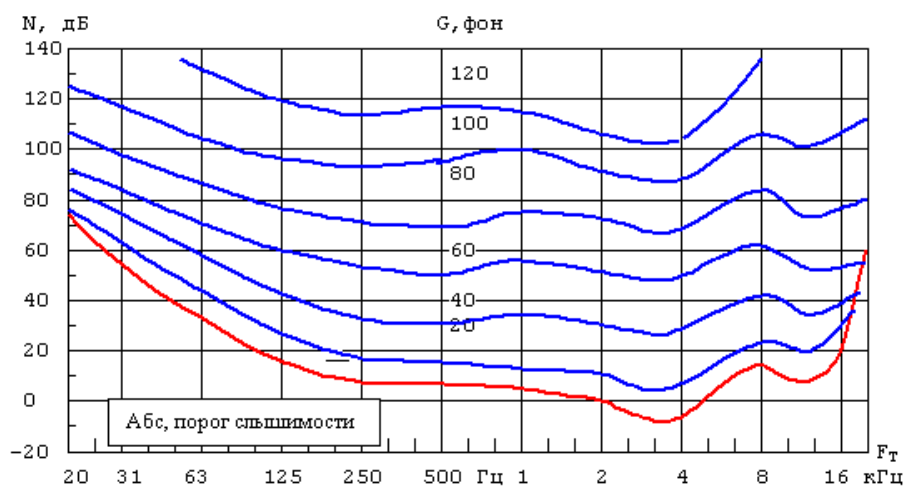


Рис.14. Кривые равного уровня громкости

синусоидального звука произвольной частоты с громкостью звука с частотой 1 кГц. Если звук с частотой 100 Гц имеет уровень 50 дБ, а равногромкий ему звук с частотой 1 кГц имеет уровень 40 дБ, то уровень громкости звука с частотой 100 Гц равен 40 фон.

Для всех изофонов характерно небольшое снижение в области частот 3...4 кГц и равномерный подъем при понижении частоты ниже 500 Гц. Величина подъема на разных уровнях неодинакова. При повышении уровня изофоны спрямляются, и подъем становится менее крутым. Это значит, что частотная характеристика слуха при больших уровнях звукового давления более равномерна, чем при малых. При малых

уровнях громкости форма изофон приближается к *кривой абсолютного порога слышимости*, которой *соответствует уровень громкости 3 фона*.

Для представления об уровне громкости звуков, с которыми мы постоянно сталкиваемся в жизни, приведем ряд примеров. Максимальный уровень громкости: в кабине самолета 125...130 фон, в поезде метро 85...90 фон, обычный разговор 55...60 фон, в библиотеке 25...30 фон.

Из кривых равного уровня громкости следует, что сохранение естественного звучания, которое соответствует условиям записи, возможно только при условии воспроизведения записи с тем же уровнем. В противном случае нарушаются соотношения между частотными составляющими. При больших уровнях воспроизведения происходит субъективное усиление НЧ составляющих. При малых уровнях возникает их субъективное подавление. Для сохранения тембра независимо от уровня в радиотехнике применяют компенсированные регуляторы усиления, в которых при уменьшении усиления осуществляется подъем частотной характеристики в области НЧ и ВЧ.

Свойство слуха по разному оценивать уровень громкости звука в зависимости от его частоты и уровня интенсивности используется в приборах. Например, в шумомерах при оценке шума в производственных помещениях и измерении отношения сигнал-шум с учетом слышимости низких частот. Для этого в шумомерах используют 3

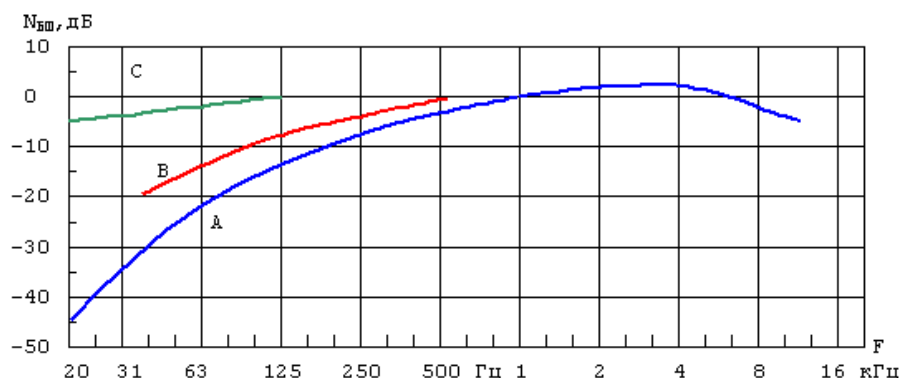


Рис.15. Взвешенные амплитудно-частотные характеристики фильтров для измерения уровня шумов

взвешивающих фильтра, которые ослабляют НЧ, как это делает слуховая система. Эти фильтры имеют разные амплитудно-частотные характеристики: А, В и С (рис. 15):

- кривая А со спадом 30 дБ на частоте 500 Гц по отношению к уровню на 1000 Гц,
- кривая В со спадом 12 дБ на частоте 500 Гц,
- кривая С со спадом 2 дБ на частоте 500 Гц.

Если эти кривые перевернуть снизу вверх, то получим изофоны и тогда кривая А соответствует изофоне 30 фон. С помощью этих кривых мы как бы оцениваем уровень громкости при различных уровнях звука:

- А – слабый уровень (30 дБ на 1 кГц) – дБА,**
- В – соответствует изофоне 70 дБ – дБВ,**
- С – соответствует изофоне 100 дБ (очень высокий уровень) – дБС**

График кривых равного уровня громкости существенно видоизменяется, если в качестве испытательного звука использовать *полосы шума шириной ΔF* . На графике рис.16 по оси абсцисс откладывается ширина полосы шума от 20 до 4 000 Гц. Центральная частота этих полос 1000 Гц. Для этой частоты критическая полоса шума равна 160 Гц. По оси ординат графика откладывается уровень интенсивности шума $N_{ш}$ в полосе, при которой достигается ощущение одной и той же громкости.

Как видно, в полосе шириной до 160 Гц, уровень громкости шума не зависит от его полосы. Он полностью определяется уровнем интенсивности шума $N_{ш}$. При увеличении полосы шума выше критической для обеспечения постоянного уровня громкости необходимо уменьшать уровень шума примерно на 3 дБ при каждом

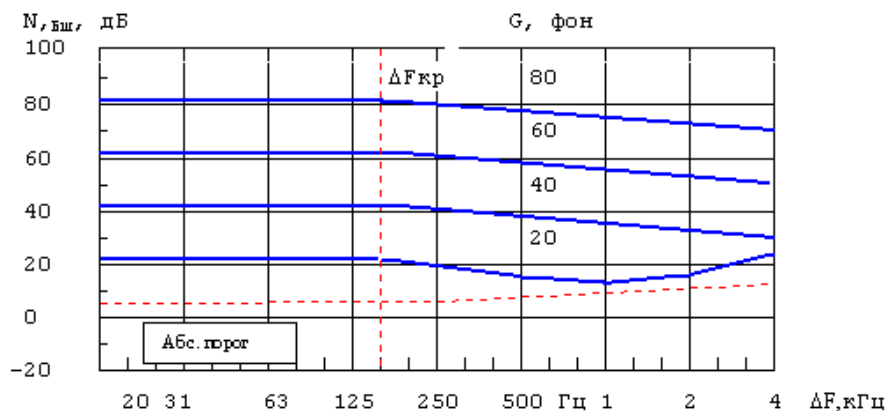


Рис.16. Кривые равного уровня громкости полос шума ($F_{cp}=1кГц$)

удвоении ширины полосы шума.

График кривых равного уровня громкости шума можно привести к виду, показанному на рис. 17. Из этих графиков видно, что пока ширина полосы шума меньше 160 Гц, а это критическая полоса для 1 кГц, уровень громкости шума при всех

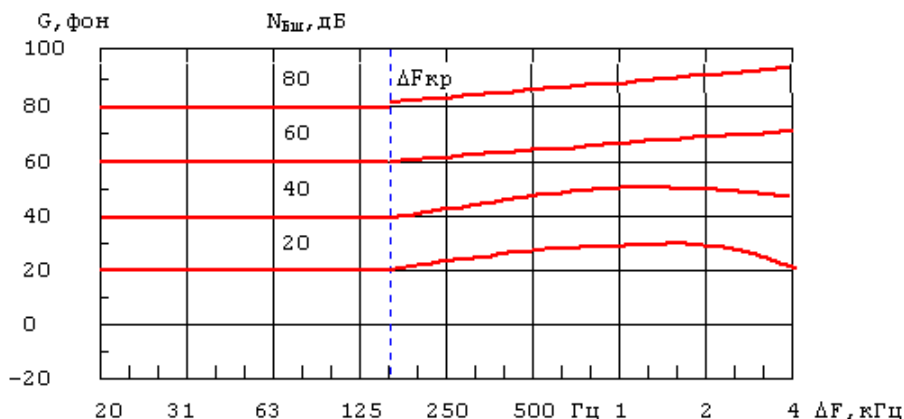


Рис.17. Зависимость уровня громкости шума $G_{ш}$ от ширины полосы шума при $F_{cp} = 1 кГц$

уровнях интенсивности шума от ширины полосы не зависит. При очень малых уровнях шума уровень громкости шума вообще не зависит от его полосы. При больших уровнях шума уровень его громкости увеличивается с расширением полосы.

В случае широкополосного шума при больших уровнях интенсивности шума уровень его громкости значительно превышает уровень громкости тона такого же уровня интенсивности, как и шума. Так, при уровне интенсивности тона с частотой 1 кГц 60 дБ уровень его громкости составляет 60 фон. При таком же уровне интенсивности широкополосного шума его уровень громкости значительно выше и равен 79 фон.

При малых уровнях интенсивности тона и шума (15 дБ и ниже) различие в уровнях громкости тона и широкополосного шума очень мало. При очень малых уровнях интенсивности (менее 5 дБ) уровень громкости шума уже меньше уровня громкости тона.

9. Громкость звука

Громкостью называется субъективное ощущение, позволяющее слуховой системе располагать звуки по шкале от тихих до громких звуков. Громкость звука связана, прежде всего, с давлением звука. Обычно, чем больше звуковое давление, тем громче звучит акустическая система. Однако, это не всегда так. Громкость также зависит от частоты, спектрального состава, длительности звука и его локализации в пространстве. Термин громкость иногда заменяют абсолютной громкостью, относительной или субъективной громкостью - это все одно и то же.

Необходимость введения понятия громкости связана с тем, что на практике часто представляет интерес не уровень громкости, выраженный в фонах, а величина, показывающая во сколько раз данный звук громче другого. Представляет интерес также вопрос о том, как складываются громкости двух разных тонов. Так, если имеются два тона разных частот с уровнем 70 фон, это не значит, что суммарный уровень громкости равен 140 фон.

Для оценки громкости принята специальная единица СОН. Громкость 1 сон – это громкость тонального звука с частотой 1 кГц с уровнем 40 дБ.

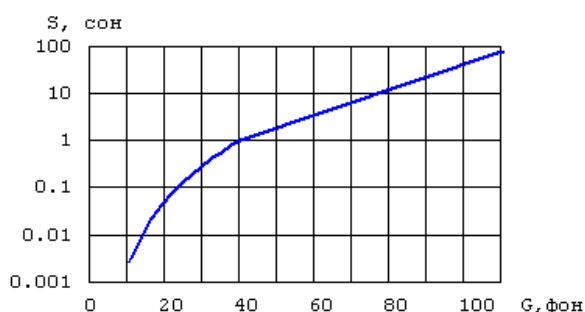


Рис.18. График связи между громкостью и уровнем громкости звука

Зависимость громкости от уровня звукового давления является сугубо нелинейной, у нее логарифмический характер. При увеличении уровня давления звука на 10 дБ громкость его возрастает в 2 раза. Это значит, что уровням громкости 40, 50 и 60 фон соответствуют громкости 1, 2 и 4 сона.

График на рис. 18 позволяет вычислить уровень громкости сложного звука с дискретным спектром. Пусть мы имеем 3 тона: 100, 500 и 3500 Гц с уровнями звукового давления 84, 77 и 71

дБ. Требуется определить уровень громкости сложного звука. По кривым равного уровня громкости (рис. 14) определяем уровень громкости каждой составляющей. Они все попадают на одну кривую, поэтому у всех один уровень громкости 80 фон. По графику на рис. 18 определяем громкость каждой составляющей – 21,5 сон. Общая громкость равна сумме – 64,5 сон. По этому же графику находим общий уровень громкости – 93 фона.

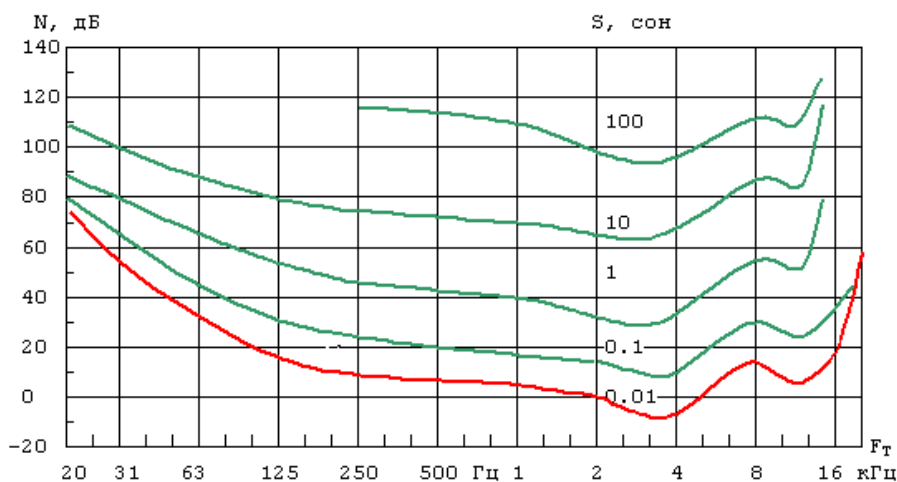


Рис.19. Кривые равной громкости тональных звуков

Приведенный на рис. 18 график громкости S для уровней громкости G выше 40 фон хорошо аппроксимируется формулой

$$S = 2^{(G-40)/10} \text{ сон, } G > 40 \text{ фон.}$$

Для меньших значений уровней громкости можно воспользоваться формулой Стивенса для частоты 1 кГц $S(1000 \text{ Гц}) = 42 P^{0.6}$.

$$S(1000 \text{ Гц}) = 42 P^{0.6}.$$

С помощью этих формул приведенный выше график кривых равного уровня громкости, может быть пересчитан в график кривых равной громкости (рис. 19). Для этого требуется заменить значения уровня громкости в фонах соответствующим значением громкости в сонах.

Для представления о громкости звуков, с которыми мы постоянно сталкиваемся в жизни, приведем ряд примеров. Максимальная громкость звука в кабине самолета 600...800 сон, громкость шума в поезде метро 30...45 сон, громкость обычного разговора 3...5 сон, громкость шума в библиотеке 0,2...0,4 сона.

В случае широкополосного шума при больших уровнях звукового давления громкость шума значительно превышает громкость тона. Так, при уровне звукового давления 60 дБ тона с частотой 1 кГц его громкость составляет 4 сона, а громкость широкополосного шума с таким же уровнем давления почти в 4 раза больше и равна 15 сон.

При малых уровнях звукового давления (около 15 дБ) громкости тона и широкополосного шума практически одинаковы и равны 0.06 сона. При еще меньших звуковых давлениях громкость широкополосного шума становится меньше громкости тона.

10. Временные характеристики слуха

Слуховой аппарат инерционен: при исчезновении звука слуховое ощущение исчезает не сразу, а постепенно, уменьшаясь до нуля. **Время в течение, которого ощущение по уровню громкости уменьшается на 9...10 фон называется постоянной временем слуха. В среднем она равна 30...50 мс.**

Если к слушателю приходят два коротких звуковых импульса, одинаковые по составу и уровню, но один из них запаздывает, то они будут восприниматься слитно, когда запаздывание не превышает 50 мс. При больших интервалах запаздывания оба импульса воспринимаются раздельно. **Это явление называется эхом**, оно проявляется, когда разность хода прямого и отраженного звуков более 18 м.

Если уровень запаздывающего звука намного меньше уровня первого, то он не будет принят раздельно, даже если время запаздывания больше 50 мс. Это обусловлено эффектом маскировки- ощущение от первого звука маскирует второй.

К временным характеристикам слуха относится явление **послемаскировки**: слабые звуки, идущие сразу после громких звуков, оказываются полностью или частично замаскированными из-за последствия предыдущего звука. К этим характеристикам звука относится и **время установления высоты тона звука**. Для этого необходимо два – три периода колебаний, чтобы слух мог приближенно оценить высоту звука. На низких частотах **время установления составляет около 30 мс**, на высоких частотах – оно несколько меньше.

11. Адаптация слуха

При воздействии на барабанную перепонку уха достаточно длительного звука большой интенсивности воспринимаемая громкость постепенно уменьшается. Это значит, что во время действия длительного громкого звука *падает чувствительность уха*. После прекращения действия звука чувствительность слуха постепенно восстанавливается. Это явление называется *адаптацией слуха*.

Явление адаптации слуха поясняется рисунками 20 и 21. На этих рисунках в качестве примера приведено воздействие звука в виде импульсов длительностью по 2 минуты на чувствительность слуха. При уровне звукового давления 94 дБ (рис. 20, а) происходит плавное понижение воспринимаемого уровня громкости с 94 до 85 фон (рис. 20, б). Скорость падения уровня громкости по времени от 0 до 40 с высокая, затем она уменьшается почти до нуля.

При последующем скачкообразном возрастании звукового давления на 6 дБ (рис. 20,б) уровень громкости сначала возрастает на 9 фон, а затем вновь начинает уменьшаться. Однако, уменьшение уровня громкости в этом случае заметно меньше с 95 до 88 фон. Это значит, что степень адаптации тем выше, чем громче утомляющий звук.

На рис. 21,б показано изменение воспринимаемого уровня громкости при скачкообразном уменьшении звукового давления с 94 до 85 дБ. При этом скачок уменьшения уровня громкости составляет почти 20 фон. Затем происходит адаптация

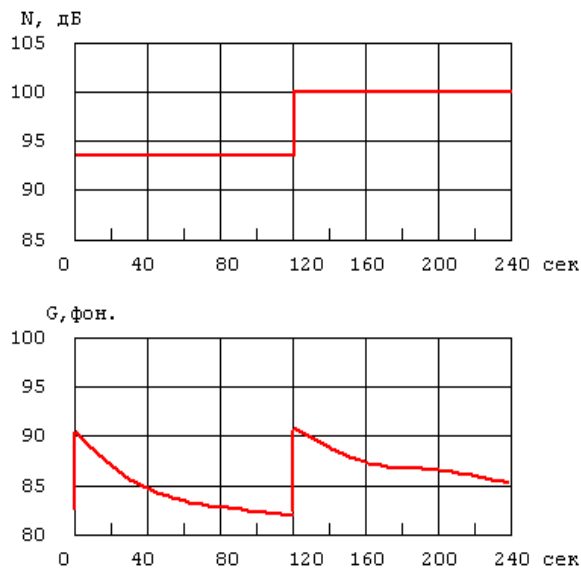


Рис.20. График адаптации слуха человека при увеличении уровня громкости звука на 6 дБ.

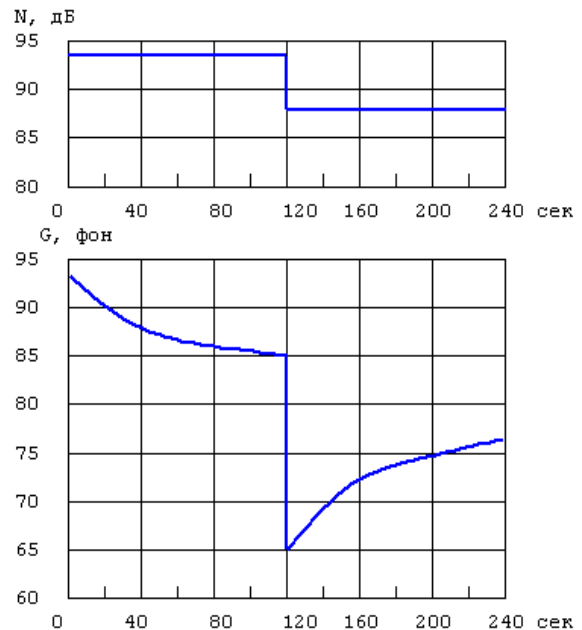


Рис.21. График адаптации слуха человека при уменьшении звукового давления на 6 дБ.

слуха к тишине и чувствительность уха частично восстанавливается, а воспринимаемый уровень громкости через 2 минуты возрастает на 12 фон.

Таким образом, адаптация проявляется в виде потери чувствительности слуха при достаточно длительном воздействии громкого звука и восстановлении ее при уменьшении громкости утомляющего звука. Защитная способность уха обладает инерцией – этот механизм начинает работать через 30...40 мс после начала звука. Полная защита слуха от воздействия высоких уровней не достигается даже за 150 мс. Поэтому для слуха наиболее опасны очень короткие громкие звуки.

12. Маскировка во временной области

До сих пор мы определяли коэффициент маскировки в предположении, что маскируемый и маскирующий звуки присутствуют одновременно. Однако, из-за явления адаптации слуха возникают ситуации, когда достаточно громкие звуки маскируют, делают практически неслышимыми, звуки, следующие за ними. В некоторых случаях маскируются предшествующие звуки.

Такой вид маскировки, когда звуки не перекрываются по времени, называется временной маскировкой. Она разделяется на *предмаскировку и послемаскировку.* Послемаскировка проявляется на интервале времени 100–200 мс после окончания маскирующего звука. Предмаскировка проявляется на значительно более короткие временные интервалы около 10 мс. Длительность предмаскировки в очень сильной степени зависит особенностей конкретных людей. По этой причине механизмы временной маскировки при цифровом кодировании звука пока не используются. Однако, звукорежиссерам эти механизмы надо знать.

Основные особенности временной маскировки:

- послемаскировка более эффективна, чем предмаскировка,
- более высокий уровень маскировки наблюдается при поступлении маскирующего звука через короткий временной интервал вслед за маскируемым звуком,
- маскировка выражена сильнее когда маскирующий и маскируемый звуки подаются в одно ухо,
- уровень маскировки обычно резко падает при увеличении временного интервала свыше 15 мс,
- увеличение уровня интенсивности маскирующего звука на 10 дБ вызывает сдвиг порога маскировки на 3 дБ,
- длительность маскирующего звука влияет на степень предмаскировки, но не на послемаскировку,
- временная маскировка зависит от частотного соотношения маскирующего и маскируемого звуков, маскировка проявляется сильнее, когда частоты этих звуков близки.

13. Высота звука

Высотой звука называется субъективная количественная мера его ощущения, для которого главным параметром раздражения является частота. Высотой обладают только чистые тоны и периодические звуки, причем у последних высота определяется частотой основного тона. Высота может в некоторой степени меняться от громкости звука, его спектрального состава и длительности.

Музыкальный строй. В музыке *система звуков, отобранных по высотному признаку, называется звукорядом или музыкальным строем.* Существуют два вида музыкальных строев: слуховой отбор (ладовый, народный) и теоретический строй (расчетный). Второй является общепризнанным. В основе этого строя лежит особенность: при любом абсолютном значении частоты звука F *одинаковые относительные изменения частоты создают ощущение одинакового прироста высоты.* Например, изменение частоты со 132 до 264 Гц и с 524 до 1048 Гц

воспринимается на слух как увеличение высоты тона на одну и ту же величину или на один и тот же высотный интервал – октаву.

Октавой в музыке называется разница по высоте между двумя тонами, при которой они воспринимаются как тождественные. Октава является основным интервалом, определяющим периодичность музыкального строя. Помимо октавного разбиения музыкальный строй разбивается на 3 регистра: низкий, средний и высокий. Октава состоит из 7 основных тонов и 5 дополнительных – всего 12. Они образуют высотный интервал, называемый полутоном. Интервальные коэффициенты для полутона и треть октавного звуков

$$h_{1/2} = 2^{1/12} = 1.06 ; \quad h_3 = 2^{1/3} = 1.26.$$

В электроакустике и аудиотехнике в основном используются октавные и треть октавные шкалы частот. Это позволяет сразу по графикам АЧХ определять крутизну среза фильтров в дБ/октаву. Частотный интервал в октавах

$$n = 3.33 \lg (F_B / F_H).$$

Если задано число октав n , то

$$(F_B / F_H) = 2^n .$$

Таким образом, **восприятие высоты тона пропорционально логарифму изменения частоты звука.**

Мелодическая высота тона. Проведенные недавно исследования показали, что

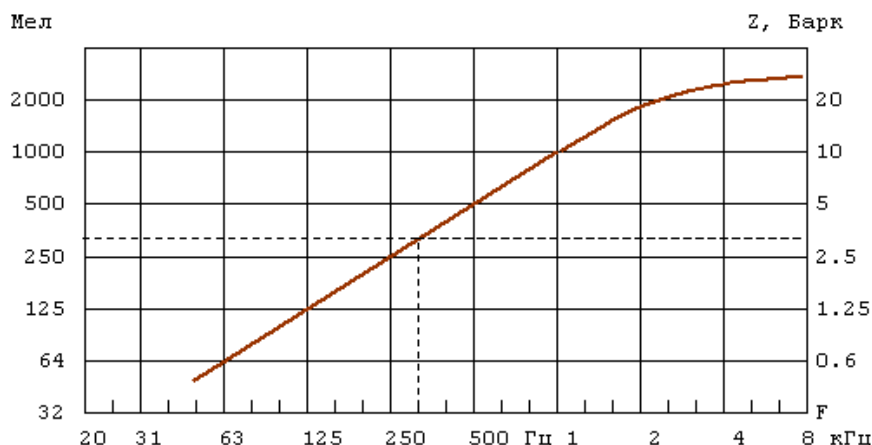


Рис.22. Зависимость высоты тона в мелах от частоты в герцах

область пригодности логарифмического закона ограничена третьей октавой (1048 Гц). Выше этой частоты надо увеличивать интервальные коэффициенты и тем больше, чем больше высота тона. Поэтому различают **два вида октав: гармоническую (точно по формулам) и мелодическую**, когда октава определяется на слух.

До частоты 500 Гц мелодические октавы не отличаются от гармонических. **Свыше 500 Гц мелодическая октава не равна отношению частот 1:2 и в верхней части диапазона составляет 1:10.** Поэтому в качестве **субъективной единицы высоты тона была принята величина мел.** При этом условились, что 315 Гц соответствуют 315 мел. Зависимость между этими величинами линейная примерно до 2000 Гц (рис. 22). Дальше эта зависимость становится резко нелинейной и высота тона в мелах не превышает 3000.

Высота тона в барках. Высоту тона можно также определять путем измерения порога слышимости при маскировке по частотным группам. **При увеличении любой частоты на частотную группу приводит к возрастанию высоты тона на 1 барк**

или 100 мел. График рис. 22 можно использовать для перехода от частотной шкалы высоты тона в герцах к шкале высоты тона звука в барках.

14. Нелинейность слуха. Субъективные гармоники.

Слуховой аппарат человека является нелинейной системой. Нелинейность слуха проявляется в том, что при громких звуках в *слуховом аппарате возникают гармоники: 2, 3 и вплоть до 9* (рис. 23). Эти гармоники называются субъективные, так как их нет в исходном звуке.

Пока уровень звукового давления не превышает 40 дБ субъективные нелинейные искажения не возникают. При увеличении уровня интенсивности первичного тона свыше 60 дБ величина субъективных гармоник резко возрастает до 10...50% и может превысить интенсивность основного тона. Это имеет существенное значение для восприятия низких частот 16...100 Гц. Предполагается, что звуки с частотой ниже 100 Гц воспринимаются не сами по себе, а из-за создаваемых ими гармоник, т.е. из-за нелинейности слуха.

Субъективные гармоники 2, 3, 4 и 5 порядков не приводят к заметному ухудшению качества звучания, они только меняют тембр. Благодаря им звучание часто становится лучше. Гармоники более высокого порядка, особенно нечетные,

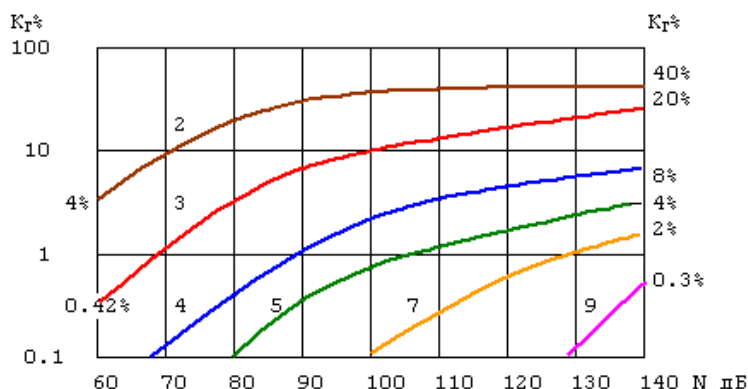


Рис.23. Зависимость субъективных гармоник от уровня звукового давления (1 + 9 номера гармоник)

заметно ухудшают качество звучания. Еще до войны фирма Филип разработала малогабаритный ламповый радиоприемник, в котором хорошо воспроизводились низкие частоты. Это достигалось за счет введения "синусоидальных" нелинейных искажений – второй и третьей гармон

15. Тембр звука

Тембром звука называется его особая окраска, позволяющая отличить данный звук от других звуков такой же высоты и громкости. Тембр – это субъективная качественная характеристика звука. На тембр оказывают влияние следующие факторы:

Спектр звука. Музыкальные звуки являются периодическими колебаниями, спектр которых дискретен и содержит кроме основного тона ряд обертонов (гармоники). **Количество обертонов и соотношение их амплитуд является наиболее важным фактором, определяющим тембр звука.**

Установлено, что обертоны выше 8 не улучшают тембр. Пере-груженность обертонами создает ощущение тяжести звучания. Чрезмерная обедненность состава обертонов приводит к бесцветности тембра.

Временные факторы. Другим физическим фактором, определяющим тембр, является длительность атаки (нарастания) звука и длительность его затухания. При этом *обертоны и основной тон могут иметь разные длительности атаки и затухания.* Звук фортепиано характеризуется короткой атакой и длительным затуханием, тогда как для органа наоборот. Поэтому тембр этих инструментов совершенно различны.

Вибрато. Очень существенное влияние на тембр имеет вибрато. *Этим термином обозначается небольшая амплитудная или частотная модуляция основного тона звука или его обертонов, происходящая с частотой не выше 10...12 Гц.* Чаще всего такая модуляция осуществляется механическим способом, например, колебаниями пальца, прижимающего струну.

Созвучие. Интересные особенности тембра возникают при одновременном воспроизведении целой группы звуков. Например, унисонное звучание. Под этим понимают одновременное воспроизведение несколькими музыкальными инструментами звуков одной и той же высоты. В этом случае никогда нет полного тождества звуков всех инструментов. Это связано со следующими факторами:

- нельзя воспроизвести звук одной и той же высоты с абсолютной точностью, в результате имеет место разброс по частоте, то есть воспроизводится не одна частота, а узкая группа дискретных частот,
- нельзя осуществить полную синхронность атаки и затухания, поэтому возникает временная зона звучания,
- музыкальные инструменты не идентичны и они имеют существенные отличия по тембру.

16. Разрешающая способность слуха

Под разрешающей способностью слуха понимаются минимальные изменения звукового давления или частоты, которые могут быть замечены слухом. Разрешающую способность иногда называют *дифференциальным порогом восприятия.*

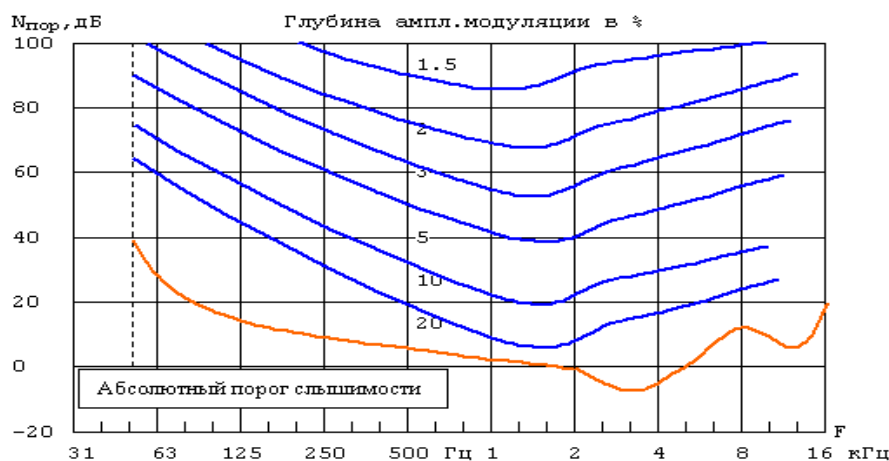


Рис.24. Кривые равной заметности амплитудной модуляции с частотой 4 Гц

Амплитудные слуховые пороги определяются как минимально заметная на слух амплитудная модуляция. Наибольшая чувствительность слуха к амплитудной модуляции имеет место при частоте модуляции 4 Гц.

Графики на рис. 24 иллюстрируют как меняется пороговое значение уровня звукового давления $N_{пор}$, при котором заметна на слух амплитудная модуляция заданной величины от 1,5 до 20%.

Как видно из этих графиков:

- чем меньше глубина амплитудной модуляции, тем выше пороговое значение уровня звукового давления, при котором эта модуляция заметна;
- уровень порога заметности амплитудной модуляции по звуковому давлению минимален в области частот 1...2 кГц, к нижним и верхним частотам он существенно возрастает;
- кривые равной заметности амплитудной модуляции почти повторяют форму кривых равного уровня громкости.

Разрешающая способность слуха к амплитудной модуляции определяется отношением приращения звукового давления к среднему значению давления – $\Delta P/P$. В зависимости от уровня громкости и частоты амплитудно-модулированного колебания разрешающая способность может быть от 2 до 40 %.

На рис. 25 представлена зависимость разрешающей способности слуха к

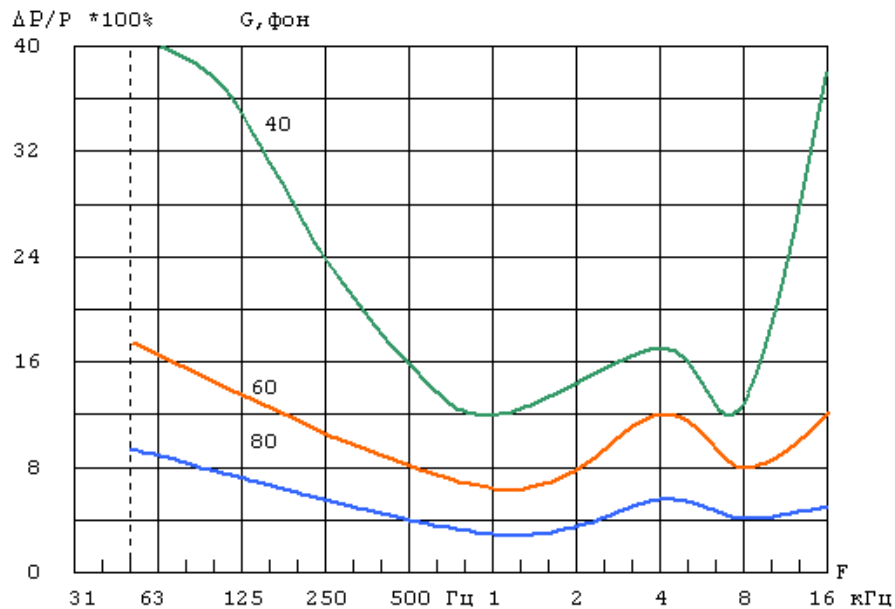


Рис.25. Кривые амплитудной разрешающей способности слуха

амплитудной модуляции от уровня громкости модулированного звука и его частоты.

Как видно:

- разрешающая способность слуха к амплитудной модуляции очень сильно зависит от уровня громкости модулированного звука;
- чем ниже уровень громкости, тем больше зависимость разрешающей способности слуха от частоты.

Частотные слуховые пороги определяются как минимально заметная на слух частотная модуляция. Наибольшая чувствительность слуха к частотной модуляции имеет место при частоте модуляции 4 Гц.

Графики на рис. 26 иллюстрируют как меняется пороговое значение уровня звукового давления $N_{пор}$, при котором заметна на слух частотная модуляция заданной величины от 0,2 до 10%.

Как видно из этих графиков:

- значения глубины частотной модуляции, которая заметна, значительно меньше, чем при амплитудной модуляции;
- чем меньше глубина частотной модуляции, тем выше пороговое значение уровня звукового давления, при котором эта модуляция заметна;

- уровень порога заметности частотной модуляции по звуковому давлению минимален в области частот 2...4 кГц, к верхним и особенно к нижним частотам он существенно возрастает;
- абсолютные значения заметных изменений частоты составляют от 2 до 10 Гц.

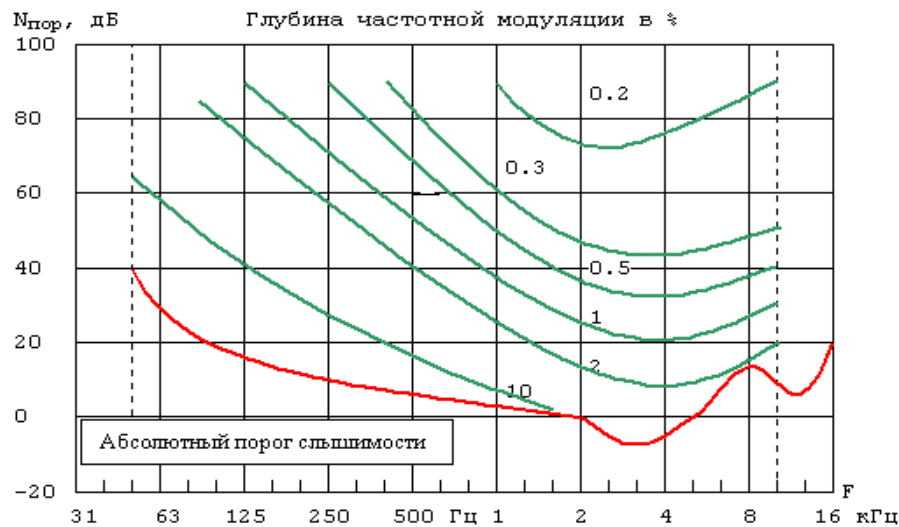


Рис.26. Кривые равной заметности частотной модуляции с частотой 4 Гц

Как видно из рис. 27:

- частотная разрешающая способность определяется отношением удвоенной глубины модуляции к частоте несущей;
- она сильно зависит от уровня громкости звука, чем меньше уровень громкости модулированного звука, тем меньше разрешающая способность слуха к частотной модуляции;
- с уменьшением уровня громкости звука резко становится частотная зависимость частотной разрешающей способности слуха.

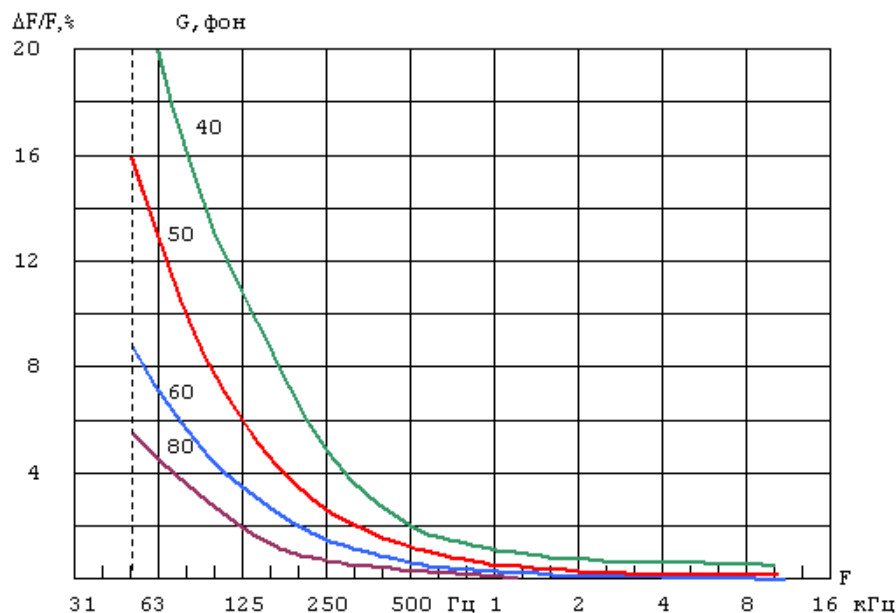


Рис.27. Кривые частотной разрешающей способности слуха

Амплитудная и частотная модуляция звука могут иметь как положительное, так и отрицательное значения. Поэтому вопрос, что лучше – высокая или низкая разрешающая способности не имеет однозначного ответа. В музыке для обогащения звучания часто используется преднамеренная амплитудная и частотная модуляция (тремоло, амплитудное и частотное вибрато).

С другой стороны, из-за несовершенства технической аппаратуры записи и воспроизведения звука имеет место паразитная амплитудная и частотная модуляция, например, детонация в магнитофонах, которая резко ухудшает качество звучания. Желательно, чтобы такая паразитная модуляция была незаметна на слух. В какой то мере это реализуется выбором частоты модуляции и ограничением ее глубины ниже порога слышимости. В музыке частота модуляция должна быть ближе к 4 Гц, а в магнитофонах – как можно выше или ниже этой частоты.

17. Бинауральный слух

Бинауральным слухом называется его способность определять направление прихода звуковой волны, т.е. локализовать положение источника звука в пространстве. Эта способность достигается благодаря пространственной не совмещенности двух ушей в сочетании с экранирующим влиянием головы. Поэтому всегда имеет место не идентичность возбуждения правого и левого уха. Этот факт обеспечивает человеку возможность воспринимать пространственный звуковой мир и оценивать перемещение источников звука в этом пространстве.

К числу основных свойств бинаурального слуха можно отнести:

- **пространственную локализацию**
- **эффект предшествования,**
- **бинауральное суммирование громкости,**
- **бинауральную демаскировку.**

Такие возможности слуха достигаются благодаря 3 факторам:

1. **Временным** – возникающим из-за несовпадения моментов воздействия одинаковых фаз звука на левое и правое ухо.

2. **Амплитудным** – возникающим из-за неодинаковой величины звуковых давлений на левое и правое ухо вследствие дифракции звуковой волны вокруг головы, например, образования акустической тени со стороны обратной источнику звука.

3. **Спектральным** – возникающим из-за разницы в спектральном составе звуков, воспринимаемых левым и правым ухом, вследствие не одинакового экранирующего влияния головы и ушных раковин на НЧ и ВЧ составляющие спектра сложного звука.

Локализация источников звука. Прослушивая звучание симфонического оркестра в концертном зале слушатель отчетливо воспринимает и разделяет расположение инструментов в горизонтальной плоскости на сцене, их расположение по глубине, а также ощущает пространственность звукового образа. Механизмы локализации источников звука по глубине, в горизонтальной и вертикальной плоскостях различаются.

Азимутальная локализация источников звука. Если под некоторым углом φ к медианной плоскости головы 1-1 слушателя находится источник звука (рис.28), то фронтальная локализация включает определение азимута (угла φ) и расстояния l до источника звука. Вследствие дифракции звуковой волны вокруг головы слушателя и частотно-зависимого затухания этой волны с расстоянием звука к правому и левому ушам слушателя приходят не одинаковыми. Они отличаются по уровню интенсивности

на величину ΔN и по времени на величину Δt , а также являются функцией азимута и частоты Φ . Эти параметры и являются носителями информации о локализации источника звука.

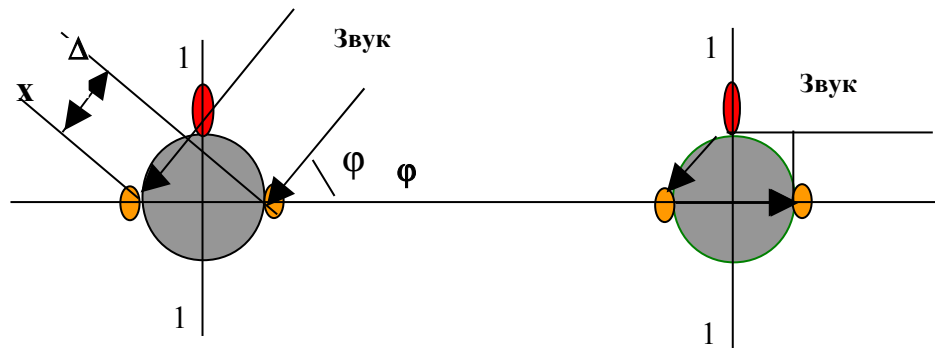


Рис.28. Возникновение разности по времени прихода звуковой волны в левое и правое уши

Разность времени Δt прихода одинаковых фаз звука к ушам определяется равенством

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{C_0},$$

где Δx – разность хода звуковой волны до левого и правого уха, C_0 – скорость распространения звука в воздухе (340 м/с). В свою очередь Δx зависит от размеров головы человека, точнее от расстояния между ушами B , которое в среднем равно 18 см.

$$\Delta x = \frac{B}{2} + \frac{B \cdot \pi}{4}$$

Максимальная разность хода достигает 23 см при расположении источника под углом 90 градусов (сбоку). В этом случае она больше среднего расстояния между ушами $B = 18$ см и меньше наикратчайшего расстояния вокруг головы, равного 28 см (рис. 28).

При такой разности хода максимальное время задержки равно 0,63 мс. Однако, это справедливо только для синусоидальных звуков с частотой не выше 800 Гц. На больших частотах время запаздывания становится больше половины периода колебания, поэтому понятие фазы теряет смысл.

Низкие частоты имеют длину волны больше, чем диаметр головы слушателя, поэтому они огибают голову и не дают акустической тени. Звуки высокой частоты

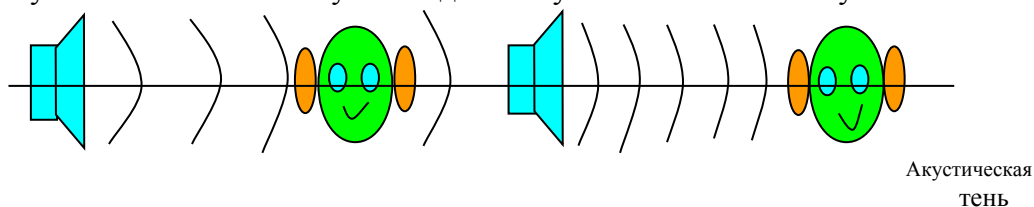


Рис.29. Образование акустической тени

имеют длину волны меньше, чем диаметр головы слушателя, поэтому они не проходят к левому уху. Возникающая при этом вследствие явления дифракции акустическая тень, уменьшает интенсивность звука, поступающего в левое ухо (рис. 29).

Из опыта следует, что чистые тоны высоких частот (свыше 8 кГц) почти не поддаются локализации. Также слабо выражена способность локализации на частотах ниже 300 Гц. На частотах меньше 150 Гц локализация отсутствует вообще. На этом

основании не важно, где размещать НЧ акустические системы при стерео воспроизведении звука .

Наибольшая точность локализации достигается при восприятии сложных звуков и звуковых импульсов. При этом важным фактором является спектральный состав звуков. Так, если звук содержит НЧ и ВЧ составляющие и действует под углом 90 градусов на правое ухо, то в левом ухе ВЧ составляющих не будет из-за тени головы.

Наименьший осязательный угол восприятия отклонения источника звуковых импульсов равен 3° . Эту величину следует считать бинауральной разрешающей способностью слуха для фронтального направления. Точность локализации источников звука, расположенных слева и справа, значительно меньше и составляет примерно 12° . Для тылового направления эта величина равна около 6° .

При локализации источников звука параметры ΔN и Δt полностью взаимозаменяемы. При оценке азимута орган слуха обменивает эквивалентное значение интенсивностной разности $\Delta N_{ЭК}$ на временную разность

$$\Delta N_{ЭК} = K_3 \Delta t,$$

где K_3 – коэффициент эквивалентности. Суммарное значение эквивалентной интенсивности $\Delta N_{СУМ}$ определяется суммой

$$\Delta N_{СУМ} = \Delta N + K_3 \Delta t.$$

Она является дополнительным фактором для определения азимута.

Величины Δt и ΔN являются не только линейными функциями азимутального угла, но зависят также от частоты. Они изменяются при переходе от одной частотной группы слуха к другой, оставаясь примерно *постоянными в пределах одной частотной группы*.

На низких частотах (ниже 500 Гц) $\Delta N \ll K_3 \Delta t$, т.е. большую роль играет временной фактор. В диапазоне средних частот от 500 до 5000 Гц оба этих фактора примерно в равной степени способствуют созданию ощущения направления.

Таким образом, при оценке азимута источника звука голова и ушные раковины выполняют функцию пространственного фильтра. Суждение о величине углового смещения источника звука от медианной плоскости связано с оценкой слуховой

системой временных и интенсивностных различий пары бинауральных звуков. Такая оценка осуществляется в каждой частотной группе слуха и сравнивается с заученными, приобретенными в результате опыта образцами, которые хранятся в слуховой памяти. Все это и позволяет определить азимут.

Локализация источников звука в вертикальной плоскости. Способность определять направление прихода звука в вертикальной плоскости у человека развита очень слабо и разрешение составляет всего 10...15 градусов. Эта способность связана с ориентацией и формой ушей.

Механизм восприятия звука в плоскости фронт-тыл. Когда один источник излучения (ГрА или ГрВ) расположен во фронтальной плоскости или тыловой с азимутом ϕ , тогда расстояния распространения звука до ушей разные (r_1 и r_2). В этой ситуации в

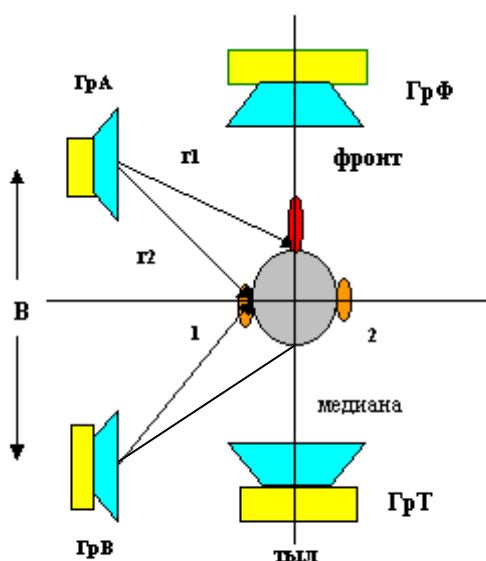


Рис.30. К вопросу восприятия звука в области фронт-тыл

локализации принимают оба параметра: ΔN и Δt . Если источник звука расположен в

медианной плоскости (ГрФ или ГрТ), тогда значения ΔN и Δt для них практически одинаковы ($r_1 = r_2$) и а невозможно оценить азимутальный угол φ источника звука относительно медианной плоскости (рис. 30). Несмотря на это локализация оказывается безошибочной за счет дополнительного спектрального анализа бинауральной пары звуков.

Орган слуха человека имеет как бы два разных механизма для оценки местоположения источника звука в пространстве. Один из них (фронт-тыл) определяет находится ли источник спереди или сзади слушателя, другой определяет направление на источник звука относительно медианной плоскости (угол φ). Если источники звука находятся в медианной плоскости, то $r_1 = r_2$.

Ключевым моментом для понимания работы механизма фронт-тыл при этом является зависимость, показанная на рис. 31. Эта зависимость представляет собой график изменения разности уровней звукового давления $\Delta N_{\text{фТ}}$ на правое и левое уши в зависимости от частоты между уровнями давлений фронтального $N_{\text{ф}}$ и тылового $N_{\text{т}}$ громкоговорителей

$$\Delta N_{\text{фТ}} = N_{\text{ф}} - N_{\text{т}}$$

Как видно из графика, на одних частотных полосах $N_{\text{ф}} > N_{\text{т}}$, на других наоборот. Для уверенной фиксации слушателем фронтального или тылового направления достаточно иметь различие громкоговорителей по звуковому давлению больше 1,5...2 дБ. Условия работы фронт-тыл ухудшаются, если громкоговорители находятся вне

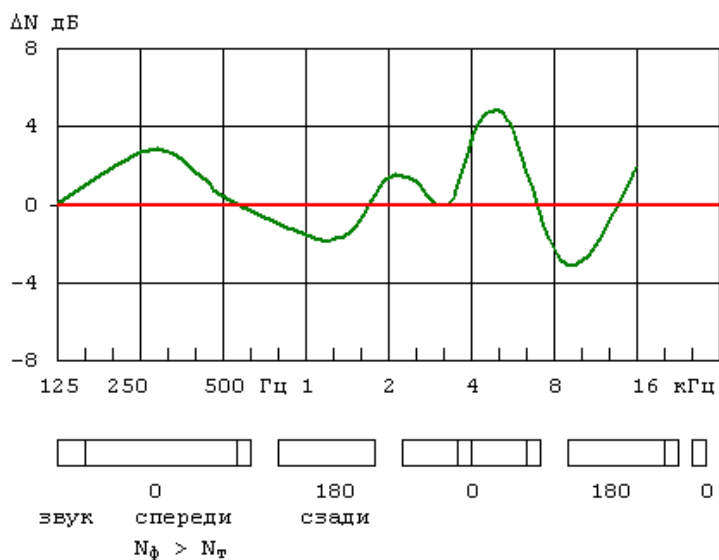


Рис. 31. К вопросу восприятия звука в медианной плоскости

медианной плоскости. Этот механизм вообще не работает при $\varphi = 90$ и 270 градусов.

Локализация источников звука по глубине. Наряду с определением направления на источник звука слушатель уверенно оценивает расстояние до источника звука.

1. При средних расстояниях до источника звука 3...15 м приближение и удаление источника звука сопровождается изменением его интенсивности. В свободном звуковом поле на НЧ увеличение расстояния вдвое сопровождается уменьшением уровня звукового давления на 6 дБ. На слух расстояние всегда определяется меньше, чем оно есть. Ошибка растет с увеличением расстояния.

2. На близких расстояниях менее 3 м на глубинную локализацию оказывает влияние дифракция на ушной раковине и голове, т. е. сказывается разность уровней

интенсивности и временные задержки. Точность глубинной локализации при смещении широкополосного источника от 50 до 150 см не превышает 15–30 %

3. При больших расстояниях свыше 15 м начинают сказываться затухание, зависящее от расстояния, проходимого звуковой волной. При этом ВЧ составляющие затухают быстрее, меняется тембр. На распространение звука оказывает влияние влажность воздуха и направление ветра. Увеличение амплитуды НЧ составляющих спектра звука вызывает ощущение приближения источника звука. Искусственное уменьшение ВЧ составляющих спектра воспринимается как удаление источника звука.

4. В отличие от азимутальной локализации глубинная локализация возможна при моноуральном слушании, однако, бинауральное восприятие существенно повышает точность оценки расстояния. При этом орган слуха подсознательно оценивает величины Δt и $N_{\text{ср}} / \Delta N$, где $N_{\text{ср}}$ – среднее значение интенсивностей звуков, действующих на левое и правое уши. При расстояниях больше 10 м эти факторы не работают.

18. Эффект предшествования

В помещениях, где наряду с прямым звуком на слушателя воздействует значительное число отраженных волн важным фактором, стимулирующим глубинную локализацию является эффект предшествования. *Суть этого эффекта состоит в отделении слуховой системой прямого звука от его реверберационных продолжений.* Суждение о направлении на источник звука формируют прямые звуки, в то время как часть следующих за ними повторения на интервале от 1..5 до 30...50 мс подавляется слуховой системой. При больших задержках подавления не происходит.

Благодаря эффекту предшествования оказывается возможной слуховая пеленгация источника звука в помещениях, где в точку расположения слушателя наряду с прямым звуком поступает значительное число волн, отраженных от его поверхностей.

19. Бинауральное маскирование и демаскирование

Когда маскирующий и маскируемый звуки поступают в разные уши то следует говорить о **бинауральной маскировке**. Величина сдвига слухового порога при бинауральном маскировании всегда гораздо меньше, чем при моноуральном маскировании и проявляется она в большей степени на высоких частотах.

Бинауральная маскировка возникает только при условии, если время воздействия маскирующего звука не менее 250 мс. Наиболее выражено маскирование когда маскируемый и маскирующий звук близки по частоте. При этом в отличие от моноурального маскирования отсутствуют биения и *маскирование выражено в очень узкой полосе частот, этот диапазон совпадает с шириной критических полос слуха* (рис. 32). Степень бинауральной маскировки нарастает, когда оба звука имеют пульсирующий характер, что характерно для речи и музыки.

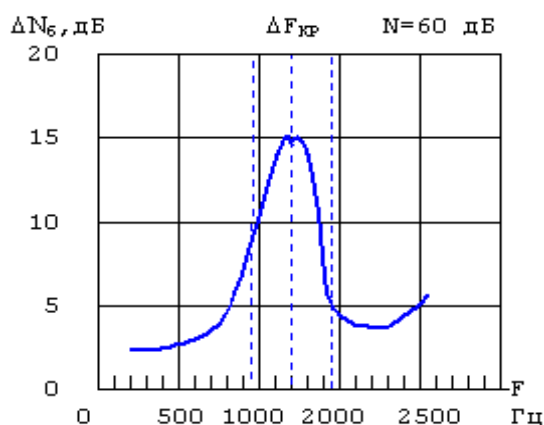


Рис.33. График бинауральной маскировки

Способность настраиваться на один из многих одновременно действующих источников звуков составляет одну из удивительных особенностей человеческого

слуха. Одной из важнейших составляющих этой особенности слуха человека является бинауральная демаскировка звуков.

Бинауральной демаскировкой называют снижение порога маскировки при выделении отдельных звуков из одновременно действующей на слушателя их совокупности. Это достигается путем дополнительной обработки входной информации как в периферийном, так и центральном отделах слуховой системы и мозга. Обычно звуки имеют перекрывающиеся спектры, поэтому классическая теория фильтров с ее областями пропускания и затухания здесь абсолютно несостоятельна. Ухо является значительно более тонким инструментом.

Бинауральная демаскировка предполагает использование слуховой системой временных и интенсивностных различий пар бинауральных звуков, соответствующих отдельным источникам для их разделения друг от друга. Некоторые исследователи полагают, что в основе этого явления лежит чувствительность к сдвигу фаз между звуками на частотах ниже 1500 Гц.

Если в стереотелефоны подать одновременно один и тот же шум, и один и тот же маскируемый звук, то кроме шума ничего не услышим. Если же маскируемый звук подать только в одно ухо, то мы его будем слышать, его уровень субъективно повышается. Этот эффект и называется бинауральной демаскировкой. При этом шум и звук локализируются в разных местах головы. Шум в середине головы, а звук ближе к уху, на который он подается. Таким образом, демаскировка осуществляется из-за разной субъективной локализации шума и звука.

Аналогичное явление происходит при тихом разговоре в шумной аудитории, например, на дискотеке. Человек непроизвольно поворачивает голову и находит положение, при котором в оба уха поступает одинаковый шум, который воспринимается в середине головы. Звук разговора локализируется в другом месте ближе к уху и он хорошо слышен. Этот механизм работает только при наличии в спектре звука НЧ составляющих.

Когда маскирующий и маскируемый звуки поступают в разные уши, этот процесс называется **бинауральным маскированием**. Величина сдвига слухового порога при бинауральном маскировании всегда гораздо меньше, чем при моноуральном маскировании и проявляется она в большей степени на высоких частотах.

Бинауральная маскировка возникает только при условии, если время воздействия маскирующего звука не менее 250 мс. Наиболее выражено маскирование когда маскируемый и маскирующий звук близки по частоте. При этом в отличие от моноурального маскирования отсутствуют биения и **маскирование выражено в очень узкой полосе частот, этот диапазон совпадает с шириной критических полос слуха** (рис. 32).

Список литературы

1. Вахитов Я.Ш. Слух и речь, Конспект лекций. 1973.
2. Цвикер Э., Фелькеллер Р. Ухо как приемник информации, 1971.
3. Радиовещание и электроакустика / Под ред. Ю.А. Ковалгина. – 1998.
4. Акустика: Справочник / Под ред. М.А. Сапожкова. – 1989.
5. Алдошина И.А. Основы психоакустики // Звукорежиссер. – 1999...2003. – N 1.....10.