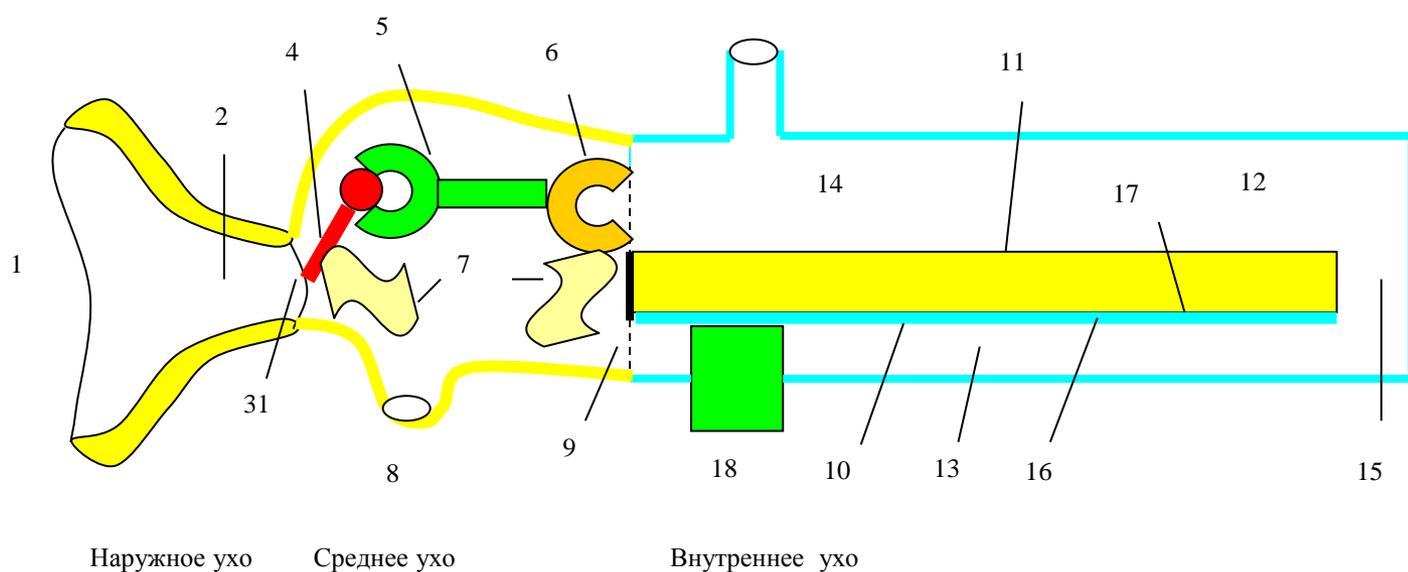


СЛУХ И ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

**СТРОЕНИЕ СЛУХОВОЙ СИСТЕМЫ
ЧЕЛОВЕКА**



Устройство органа слуха

Ухо состоит из трех частей: *наружного, среднего и внутреннего уха*. Две первые части служат передаточным звеном для подведения звуковых колебаний к *слуховому анализатору*, находящемуся во внутреннем ухе – *улитке*. **Звуковые волны принимаются акустической рупорной антенной, функции которой выполняет ушная раковина 1.** Далее через слуховой проход 2, который выполняет функции

короткого волновода, звук воздействует на барабанную перепонку 3, которая вогнута во внутрь и натянута. Эти три элемента образуют наружное ухо. К остальным элементам органа слуха относятся:

4 – молоточек;

5 – наковальня;

6 – стремя («стремечко»);

4; 5; 6 шарнирно соединены между собой суставами и оснащены мышечной тканью из двух мышц 7;

8 – Евстахиева труба;

9 – улитка (на схеме показана спрямленной, длина канала улитки составляет около 35 мм);

10 – основная мембрана;

11 – мембрана Рейснера;

12 – лестница преддверия;

13 – срединная лестница, заполненная эндолимфой и лестница барабана;

14 – перилимфа, заполняющая лестницы преддверия и барабана;

15 – геликотрема;

16 - кортиев орган (орган Корти);

17 – покровная мембрана.

Восприятие по частоте

При звуковых колебаниях стремечко приводит в движение мембрану овального окна. Одновременно под действием этих колебаний колеблется лимфа касательно к поверхности основной мембраны, поперек ее волокнам. На колебания лимфы отзываются (резонируют) в зависимости от частоты колебаний только вполне определенные волокна. Сло-

жний 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 *частотная 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 окончания вдоль основной мембраны, человек запоминает во всем частотном диапазоне не более 250 градаций изменения 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 значения частот отличаются менее чем на 4%.

Гармонические колебания воспринимаются на слух как «чистые» или «простые» тоны, лишенные всякой музыкальной особенности. Постепенное увеличение частоты от 16 до 20000 Гц вызывает восприятие постепенно изменяющегося тона от самого низкого (басового) до наиболее высокого.

За объективную единицу (ступень) изменения высоты тона, приближенно отражающей субъективное восприятие, принята октава, соответствующая изменению частоты в два раза.

Если исходная частота равна F_0 , то каждой октаве соответствуют частоты: $F_1 = 2F_0$; $F_2 = 2F_1 = 2^2F_0$; $F_3 = 2F_2 = 2^3F_0$; ...; $F_n = 2^nF_0$.

Следовательно, число октав n , на которое повысился тон, будет

$$n = \log_2 \frac{F_n}{F_0} = 3,34 \lg \frac{F_n}{F_0}$$

Принимая $F_0 = 20$ Гц и $F_n = 20000$ Гц, найдем слышимое человеком число октав:

$$3,34 \lg \frac{20000}{20} = 3,34 \cdot 3 = 10$$

Текст

Полутон соответствует изменению частоты в $\sqrt[12]{2} \approx 1,054$ раза, т.е. он равен 1/12 октавы.

Деление октавы на части

Текст

Дифференциальный порог слышимости

См. выше

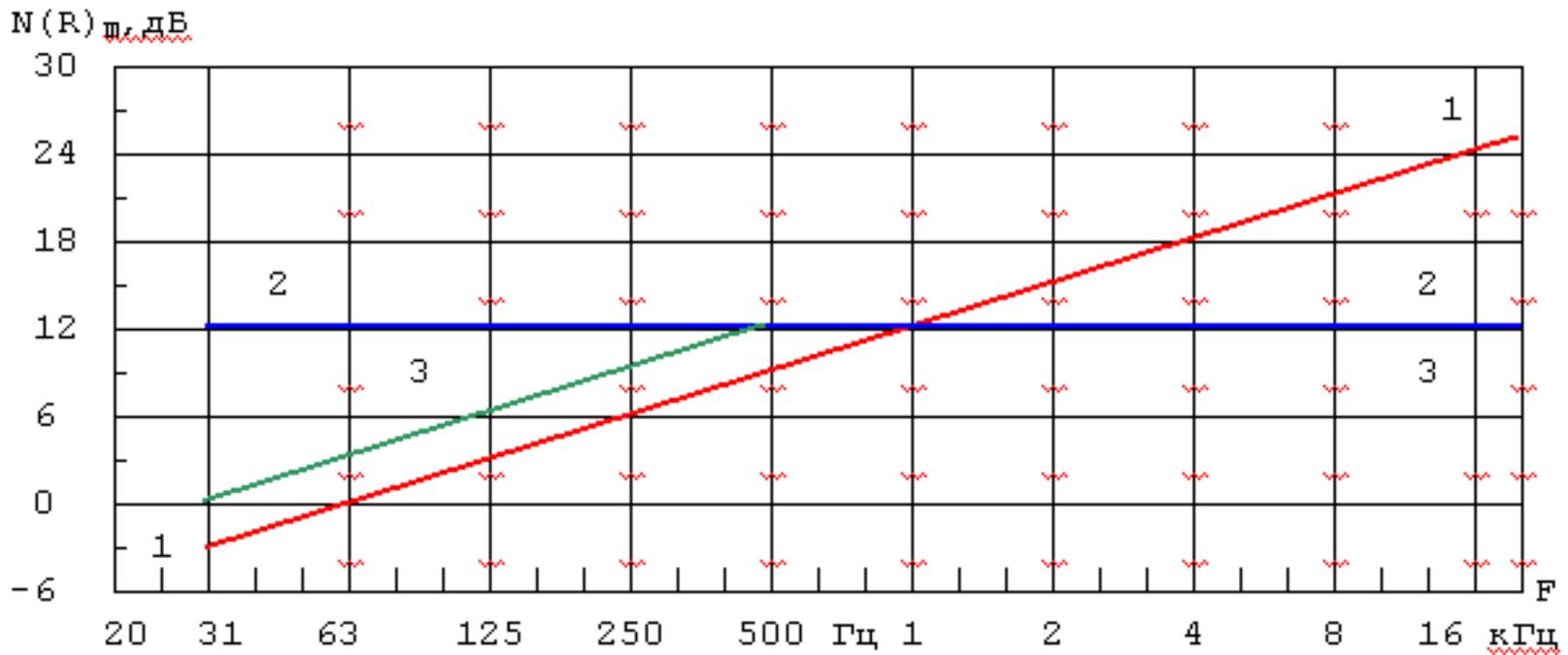
ЗВУКОВЫЕ СИГНАЛЫ

Испытание аппаратуры.....

Текст

Белый шум. У данного шума спектральная плотность мощности не зависит от частоты. В октавной шкале частот график спектра мощности этого шума имеет вид наклонной прямой линии с подъемом в область высоких частот с крутизной 3 дБ/октаву (прямая 1).

Розовый шум. У этого шума спектральная плотность мощности в октавной шкале не зависит от частоты и ее график имеет вид прямой линии, параллельной оси частот. В линейной шкале частот график спектральной плотности этого шума имеет вид прямой линии спадающей к высо-



Частотная зависимость спектральной плотности мощности шума (1 – белый шум, 2 – розовый шум, 3- равномерно маскирующий шум) в октавной шкале частот

ким частотам с крутизной 3 дБ/октаву (пямая 2).

Равномерно маскирующий шум. До частоты 500 Гц этот шум имеет характеристики белого шума, а выше он имеет характеристики розового шума. Это связано с кри-

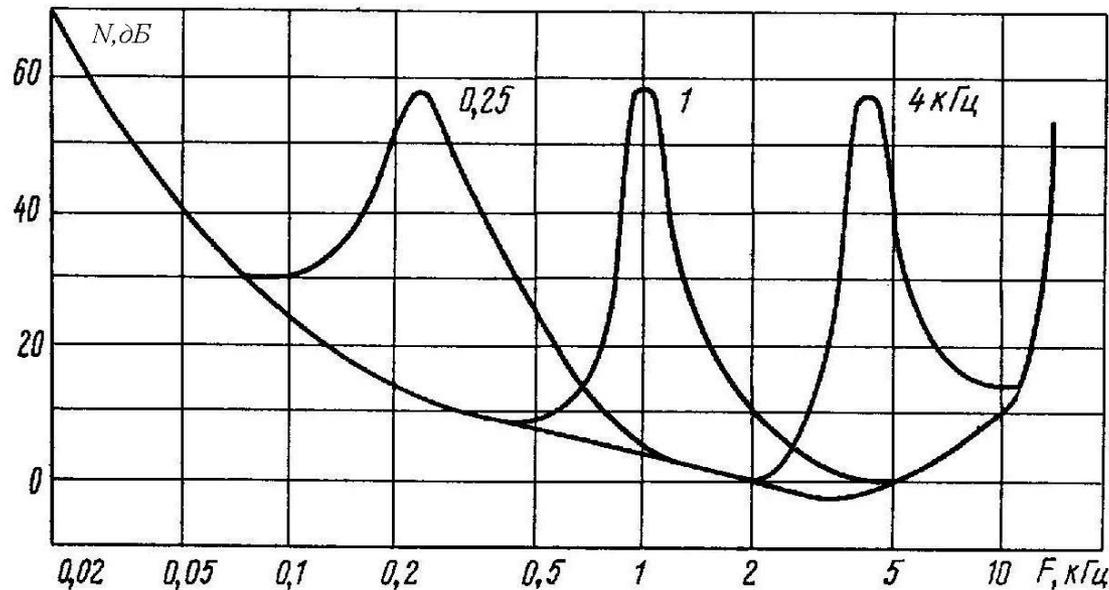
тическими полосами (частотными группами) слуха, которые до 500 Гц примерно одинаковы по ширине, а свыше 500 Гц их полоса линейно растет с частотой. Этот шум одинаково маскирует во всем звуковом диапазоне частот. Он формируется из белого шума с помощью фильтра, который на частотах выше 500 Гц создает спад с крутизной 3 дБ/октаву (прямая 3).

КРИТИЧЕСКИЕ ПОЛОСЫ СЛУХА

При восприятии звука слуховой аппарат человека разделяет его на полосы, называемые *критическими полосами* (или *частотными группами*) слуха. Для доказательства этого приведем два психоакустических эксперимента.

Первый касается маскировки чистого тона полосой шума, у которой средняя частота совпадает с частотой тона. Если

полоса частот узкая, то одного и того же маскирующего действия можно достигнуть двояко: увеличивая мощность шума или расширяя его полосу. Начиная с некоторой полосы частот шума $\Delta F_{кр}$, дальнейшее ее увеличение перестает влиять на маскирующее действие, которое теперь зависит только от мощности маскера. Величину $\Delta F_{кр}$ называют *критической полосой слуха*.



Маскировка узкополосными шумами со средними частотами полос 0,25; 1 и 4 кГц

Второй экспериментальный факт относится к фазочувствительности слуха. Если к уху, возбужденному тоном частоты F_0 , подвести еще один или несколько тонов с частотами F_1, F_2, \dots , достаточно близкими к F_0 , то суммарное звуковое давление будет

$$p_{зв}(t) = p_{зв0m} \cos 2\pi F_0 t + p_{зв1m} \cos(2\pi F_1 t + \varphi_1) + p_{зв2m} \cos(2\pi F_2 t + \varphi_2) + \dots,$$

и взаимодействие колебаний на основной мембране можно поставить в зависимость от начальных фаз $\varphi_1, \varphi_2, \dots$

Опыты с трехтональными сигналами показали, что при симметричном расположении частот $F_1 < F_2$ в двусторонней окрестности F_0 фазы φ_1, φ_2 перестают влиять на пороги заметности дополнительных тонов, если $F_2 - F_1 \geq \Delta F_{кр}$. Наименьшая разность частот $F_2 - F_0 = F_0 - F_1$, при которой незаметны фазовые различия, называют *фазовой граничной частотой* $F_{зп}$; $\Delta F_{кр} \cong 2F_{зп}$. Таким образом, ширина зо-

ны возбуждения по критерию заметности фазовых сдвигов хорошо совпадает с таковой по критерию полосы маскирующего шума.

В полосе частот от 20 до 16000 Гц число критических полос равно 24. Ширина этих полос возрастает от низких к высоким частотам. В области частот до 500 Гц ширина частотных групп ($\Delta F_{кр}$) равна примерно 100 Гц. На частотах выше 500 Гц она увеличивается пропорционально средней частоте, F_{cp} . При этом соблюдается относительное постоянство ширины критической полосы слуха $\Delta F / F - const$ ($\Delta F_{кр} = 0,2 F_{cp}$).

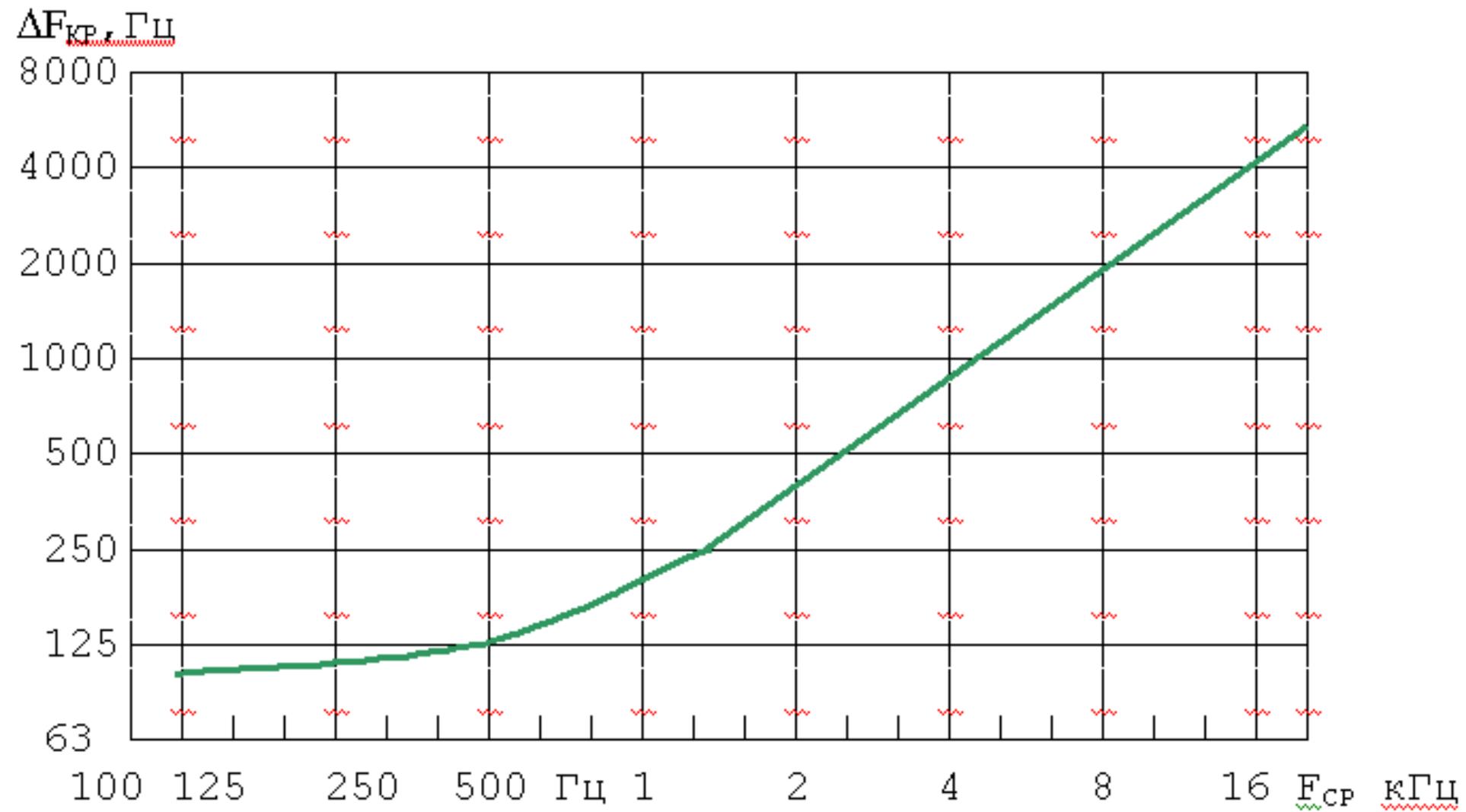


График зависимости ширины критической полосы
 слуха от ее средней частоты F_{cp}

При воздействии широкополосного шума слуховой анализатор как бы превращает сплошной спектр в дискретный, состоящий из конечного числа составляющих по числу критических полос слуха.

Критические полосы слуха оказалось удобно использовать в качестве единицы субъективной высоты тона, которую называли *барк*. В психоакустических моделях слуха, широко используемых в алгоритмах компрессии цифровых аудиоданных, обычно вместо частотных шкал используются шкалы высоты тона звука, выраженные в барках. Такие же шкалы используются также и при расчете коэффициентов маскировки.

График перехода от частотной шкалы высоты тона в октавах к шкале высоты тона в барках представлен на рис.

Z , барк

24

20

16

12

8

4

0

31

63

125

250

500

Гц

1

2

4

8

16

кГц

