

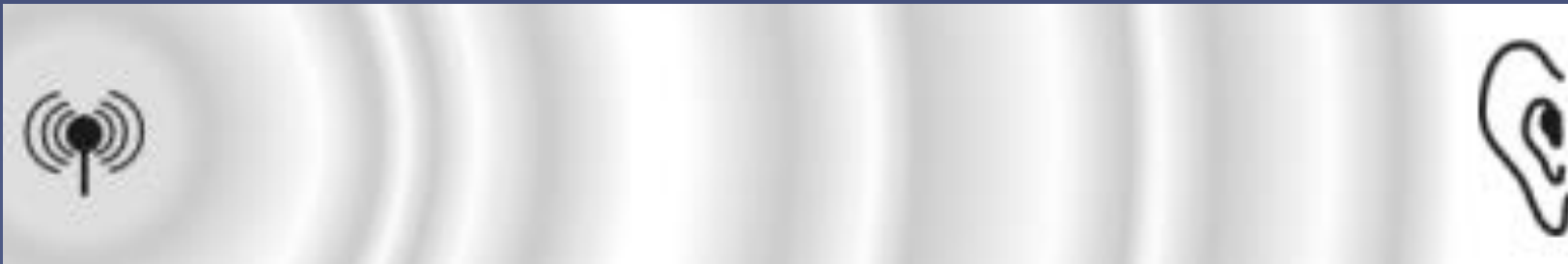
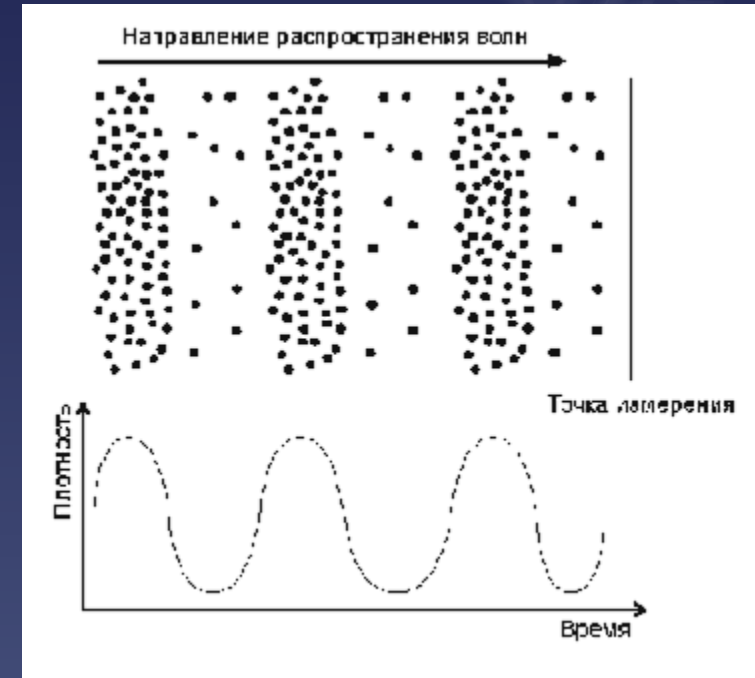
Цифровой звук



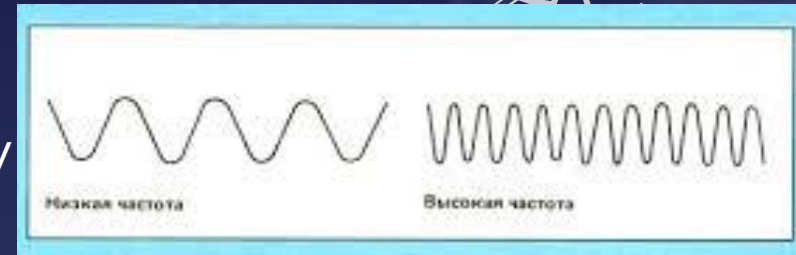
Звук



- Звук - физическое явление, представляющее собой распространение в виде упругих **волн** механических колебаний в твёрдой, жидкой или газообразной среде.
- Звук - субъективное восприятие этих колебаний специальными органами чувств животных или человека.
- В обычной ситуации те или иные объекты (мембраны, деки, струны и т.п.), совершая механические колебания в воздушной среде, создают области повышенного и пониженного давления, что приводит к формированию распространяющихся в пространстве звуковых волн.



Частота звука



- Количество колебаний воздуха в секунду называется **частотой звука**.
- Волны с разной частотой воспринимаются нами как звук разной **высоты**: волны с малой частотой воспринимаются как низкие, басовые звуки, а волны с большой частотой - как высокие.
- Частота измеряется в **Герцах** (Гц): $1 \text{ Гц} = 1 \text{ колебание в секунду}$; или килogerцах (кГц): $1 \text{ кГц} = 1000 \text{ Гц}$.
Большинство людей от 18 до 25 лет способны слышать колебания воздуха с частотой от 15 до 20000 Герц. Этот диапазон волн называется **звуковым диапазоном**.
- Частота волны обратно пропорциональна **длине волны** - отрезку на оси распространения волны, в котором уместится полный цикл (период) изменения плотности воздуха. Чем больше частота звука, тем меньше длина волны и наоборот.
- $\lambda = C/f$, где λ - длина волны, C - скорость звука (340 м/с), а f - частота звуковых колебаний. Например, волна, имеющая частоту 100 Гц, имеет длину $340/100=3.4 \text{ м}$.

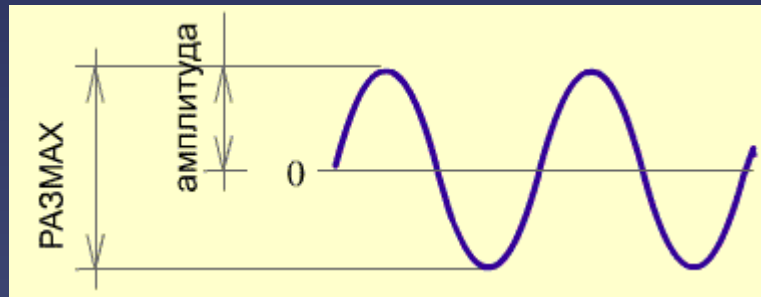
Ультразвук и инфразвук

- **инфразвуком** называется звук с частотами, лежащими ниже области слышимых человеком частот, до 15 Гц;
- **ультразвуком** называется звук с частотами от 20 кГц до 1 ГГц;
- **гиперзвуком** называется звук с частотами от 1 ГГц.



Амплитуда звуковых волн

- **Амплитуда** — максимальное значение смещения или изменения переменной величины от среднего значения при колебательном или волновом движении.



- **Амплитуда звуковой волны** - это наибольшая величина звукового давления при сгущениях и разрежениях. Она характеризует величину уровня звукового давления и интенсивность звука.
- **Громкость звука** определяется амплитудой звуковых колебаний.

Измерение громкости

- Единицей абсолютной шкалы громкости является **сон**. Громкость в 1 сон — это громкость непрерывного чистого синусоидального тона частотой 1 кГц, создающего звуковое давление 2 мПа.

- ДЕЦИБЕЛ** (обозначение дБ), логарифмическая единица, одна десятая **бела**, служащая для сопоставления двух уровней энергии.

$$A_{dB} = 10 \lg \frac{A}{A_0}$$

- где A_{dB} — величина в децибелах, A — измеренная физическая величина (интенсивность звука), A_0 — величина, принятая за базис (минимальная интенсивность звука).
- Децибелами часто пользуются для выражения громкости звука относительно конкретного эталонного уровня. Самый слабый из слышимых звуков (который соответствует избыточному давлению воздуха $2 \cdot 10^{-5}$ паскаль), условно принимается равным 0 дБ. Порог, после которого звук становится болезненным для человека, составляет 120 дБ. Громкость обычного разговора обычно составляет около 50-60 дБ.

Шкала шумов

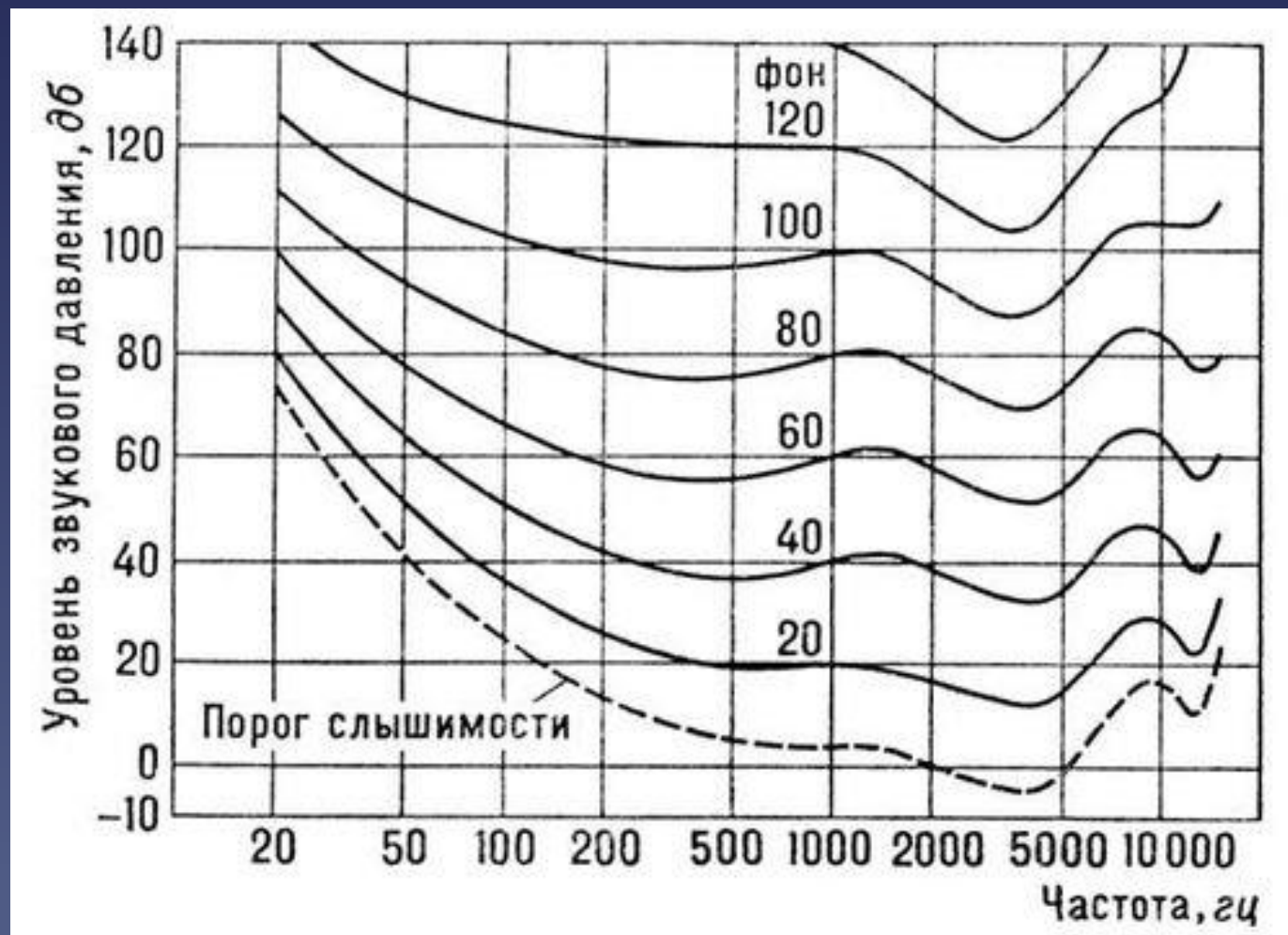


Децибел	Характеристика	Источники звука
0	Ничего не слышно	
15	Едва слышно	шелест листвы
30	Тихо	шепот, тиканье настенных часов
45	Довольно слышно	обычный разговор
50	Отчётливо слышно	разговор, пишущая машинка
75	Шумно	крик, смех (1м)
90	Очень шумно	громкие крики, грузовой железнодорожный вагон (в семи метрах)
110	Крайне шумно	вертолёт
120	Почти невыносимо	отбойный молоток (1м)
145	Контузия	старт ракеты
160	Шок, травмы	ударная волна от сверхзвукового самолёта

При уровнях звука свыше 160 децибел - возможен разрыв барабанных перепонок и лёгких, больше 200 - смерть (шумовое оружие)

Субъективное восприятие громкости

- Ощущение громкости зависит от уровня звукового давления (измеряется в Дб.) и от частоты звука;



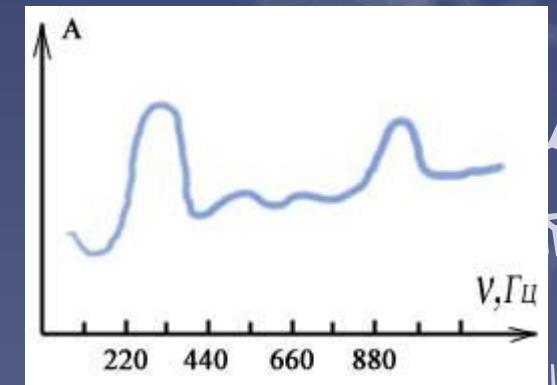
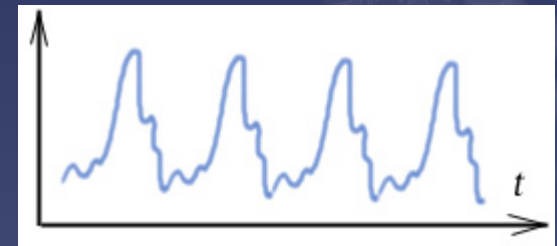
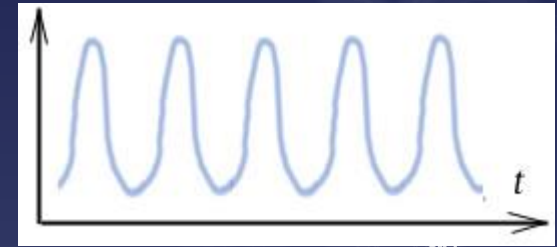
Фаза звуковой волны

- Для описания относительных временных свойств двух звуковых волн (или разных частей одной волны) вводится понятие **фазы** звуковой волны.
- В звуке фазой называется стадия волны относительно нулевой оси в заданный момент времени.
- Фаза, при которой восходящее движение сменяется нисходящим или наоборот – называется **пиком**.
- Смещение двух сигналов, находящихся в противофазе, приводит к уменьшению громкости или искажению звука.



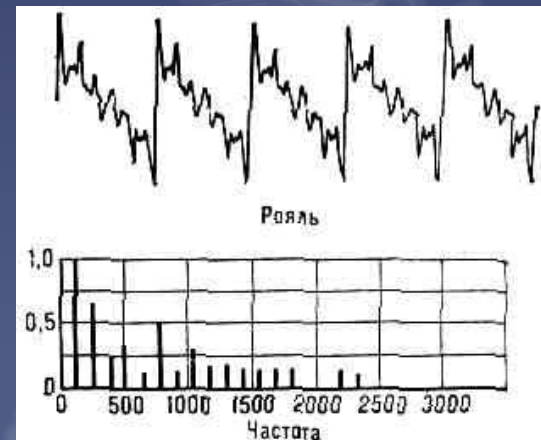
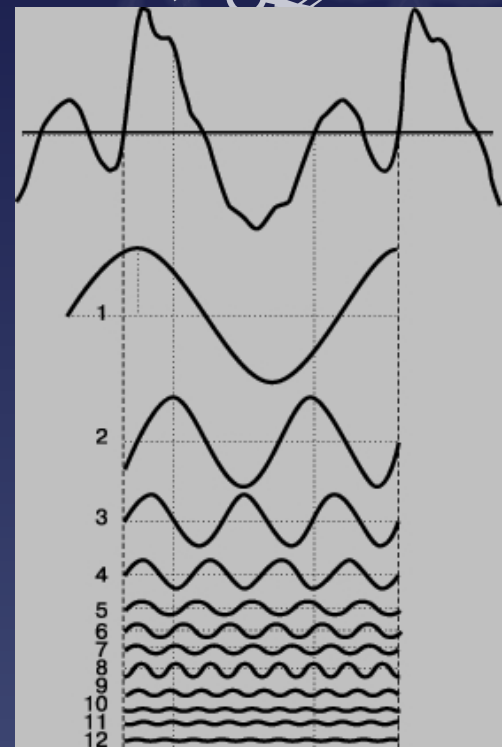
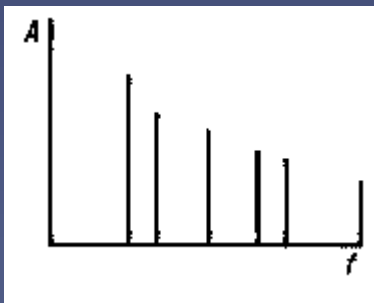
Музыкальный звук и шум

- Музыкальные звуки или **тоны** обусловлены периодическими колебательными процессами. Если такой процесс гармонический, то тон называют **чистым** или **простым**. Простой тон издает, например, камертон.
- Периодическому, но не гармоническому колебанию соответствует **сложный тон**. Сложные тона издают музыкальные инструменты. В сложном тоне присутствует некоторый набор частот, который налагаясь друг на друга образует периодическую звуковую волну.
- Шумы** - это звуки, которые отличаются сложной и неповторяющейся временной зависимостью. К шумам относятся звуки от вибрации машин, аплодисменты, шорохи, скрипы, согласные звуки человеческой речи и проч.



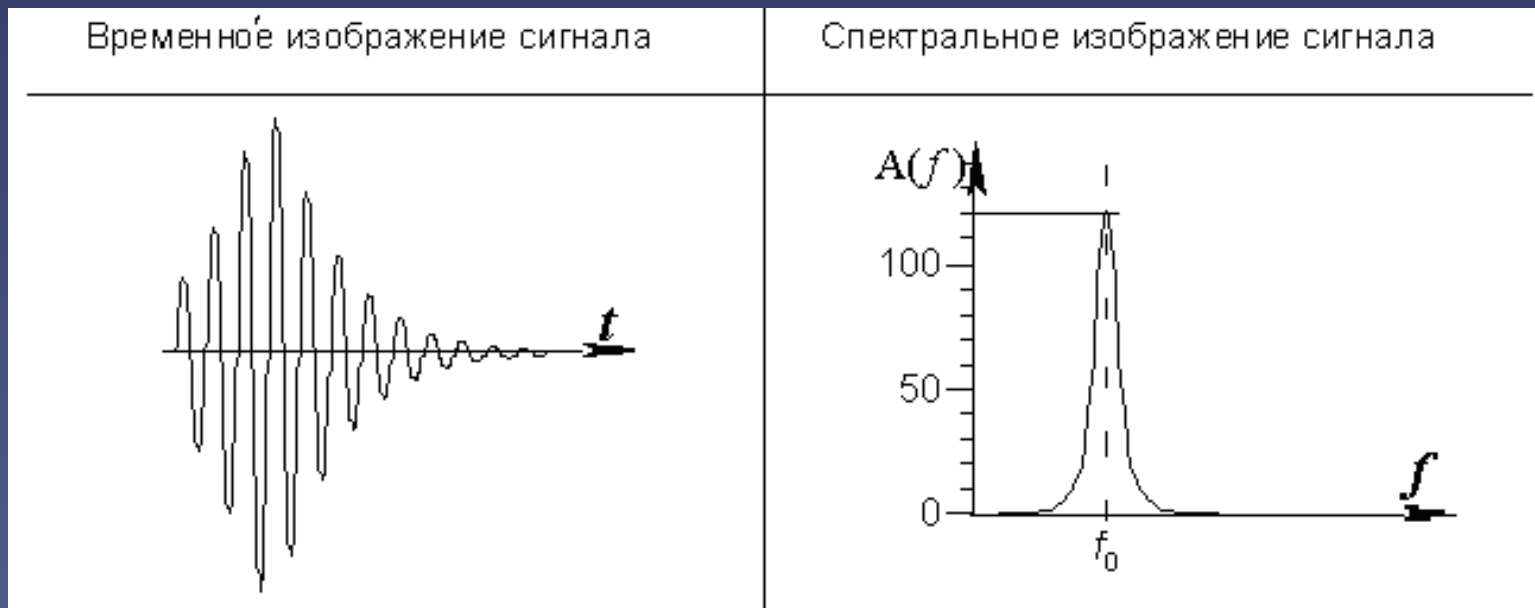
Спектр звука

- **Спектр звука** - совокупность простых гармонических волн, на которые можно разложить звуковую волну.
- С. з. выражает его частотный (спектральный) состав и получается в результате анализа звука.
- С. з. представляют обычно на координатной плоскости, где по оси абсцисс отложена частота f , а по оси ординат — амплитуда A или интенсивность гармонической составляющей звука с данной частотой.
- Чистые тона, звуки с периодической формой волны, а также полученные при сложении нескольких периодических волн, обладают линейчатыми (дискретными) спектрами:



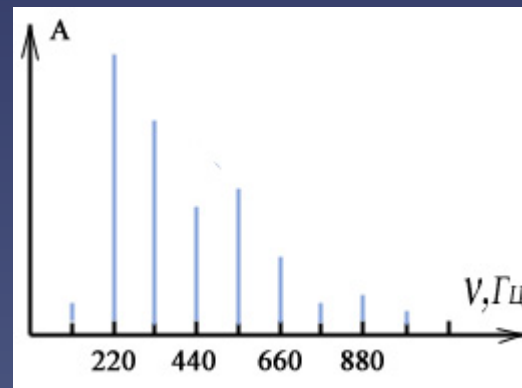
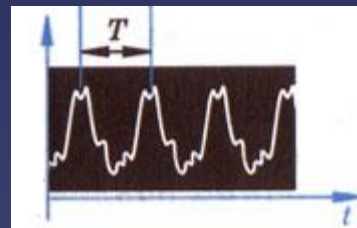
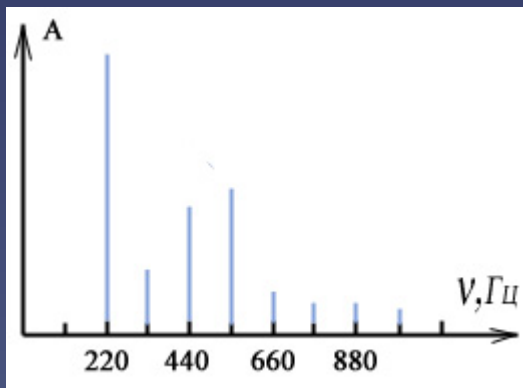
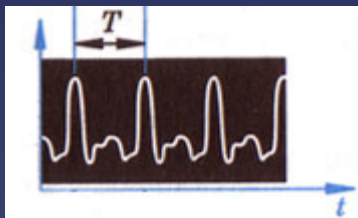
Дискретные и непрерывные спектры

- ❖ Существуют два основных типа спектров звука: **дискретный** и **непрерывный**. Дискретный спектр состоит из отдельных линий для частот, разделенных пустыми промежутками. В непрерывном спектре в пределах его полосы присутствуют все частоты.
- ❖ Спектр затухающего сигнала как пример непрерывного спектра:



Тембр

- Одна и та же нота, исполненная на различных музыкальных инструментах, звучит по разному, несмотря на то, что основной тон один и тот же. Это зависит от тембра. **Тембр определяется спектральным составом сложного тона.** На рисунках показаны форма колебаний при исполнении ноты "ля" малой октавы на трубе и на скрипке. Ниже представлены их акустические спектры.



Ноте "ля" малой октавы соответствует частота 220 Гц, на спектрах - это **основной тон** или основная **мода**, амплитуда этой частоты наибольшая. Другие частоты, присутствующие в спектре - это **обертоны**, их амплитуды меньше.

Науки изучающие звук

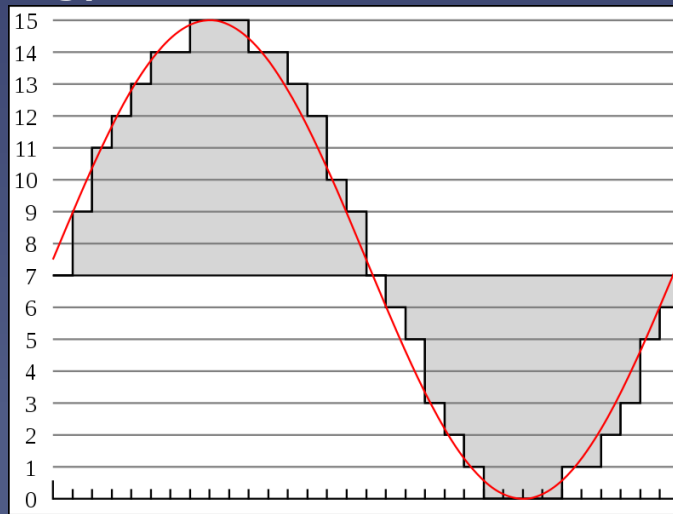
- **Акустика** (от греч — слышу) — наука о звуке, изучающая физическую природу звука и проблемы, связанные с его возникновением, распространением, восприятием и воздействием.
- **Геометрическая акустика** — раздел акустики, предметом изучения которого являются законы распространения звука.
- **Биоакустика** — теория восприятия и излучения звука биологическими объектами, изучение слуховой системы различных видов животных и др.
- **Электроакустика** — раздел прикладной акустики, занимающийся теорией, методами расчёта и созданием электроакустических преобразователей
- **Гидроакустика** — распространение, поглощение, затухание звука в воде, теория гидроакустических преобразователей, теория антенн и гидроакустических эхолотов, распознавание движущихся объектов и др.

Психоакустическая модель

- Статья в википедии. Рассмотреть потому что потом в mp3 согласно этой модели некоторые частоты могут усекаться.
- <http://www.n-audio.com/articles/format-2.htm>

Цифровой звук

- **Цифровая звукозапись** — представление звука в виде набора бит, который последовательно описывает значение уровня амплитуды звуковой волны в каждый момент времени звучания звукозаписи, для обработки этого значения устройством воспроизведения.
- При преобразовании звука в цифровую звукозапись применяется **импульсно-кодовая модуляция** (*Pulse Code Modulation, PCM*).
- Импульсно-кодовая модуляция заключается в периодическом измерении амплитуды аналогового сигнала (*Sampling*), ее масштабировании (*Quantization*) и сохранении (*Coding*).



Дискретизация (Sampling)

- **Дискретизация (Sampling)** — преобразование непрерывной функции в дискретную.
- **Частота дискретизации** - это количество замеров уровня сигнала в секунду при импульсно-кодовой модуляции.
- При дискретизации изменяющаяся во времени величина (сигнал) замеряется с заданной частотой (частотой дискретизации), таким образом, дискретизация разбивает сигнал по временной составляющей (на графике — по вертикали).
- 8 000 Гц — телефон, достаточно для речи;
- 22 050 Гц — радио;
- 44 100 Гц — используется в Audio CD;
- 48 000 Гц — DVD, DAT;
- 96 000 Гц — DVD-Audio (MLP 5.1);
- 192 000 Гц — DVD-Audio (MLP 2.0).

Теорема Найквиста-Котельникова (the sampling theorem)

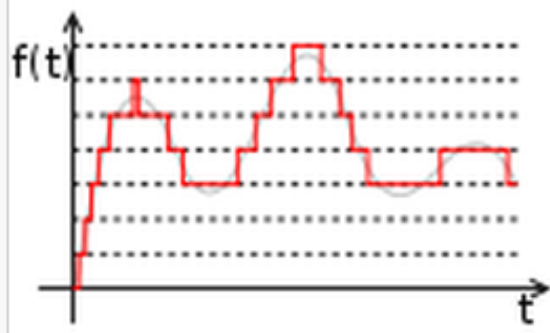
- Теорема Котельникова гласит, что, если аналоговый сигнал $x(t)$; имеет конечный (ограниченный по ширине) спектр, то он может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим отсчётам, взятым с частотой, строго большей или равной удвоенной верхней частоты f_c аналогового сигнала:

$$f > 2 f_c$$

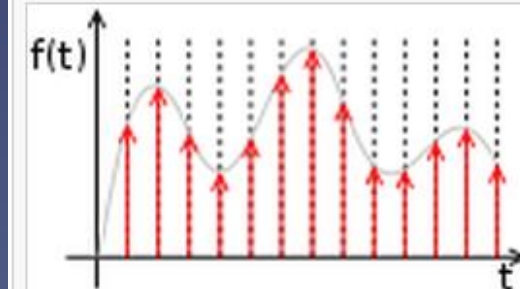
- Например, имеется речевой сигнал, который содержит частоты от 300 Герц до 3 кГц. Для его передачи по цифровому каналу связи частота дискретизации должна быть 6 кГц. То есть в два раза превышать самую высокочастотную компоненту сигнала.
- *Ни один реально существующий сигнал не удовлетворяет условиям теоремы Котельникова*
- *Нет способа идеально восстановить реальный сигнал по дискретным отсчетам*

Квантование (Quantization)

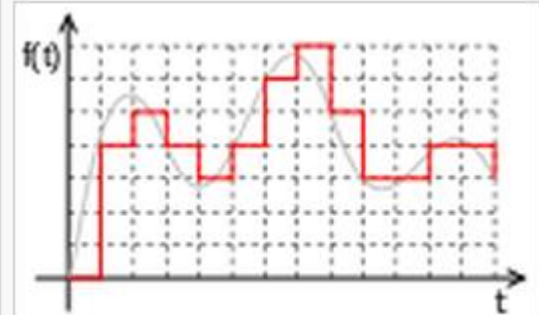
- **Квантование** — разбиение диапазона значений непрерывной или дискретной величины на конечное число интервалов.
- Квантование приводит сигнал к заданным значениям, то есть, разбивает по уровню сигнала (на графике — по горизонтали).
- Расстояние между двумя ближайшими уровнями квантования называется **шагом квантования**.
- Если амплитудная шкала разбита на уровни линейно, квантование называют **линейным (однородным)**.
- Сигнал, к которому применены дискретизация и квантование, называется **цифровым**.



Квантованный сигнал



Неквантованный сигнал
с дискретным временем



Цифровой сигнал

Глубина кодирования звука

- **Глубина кодирования звука** (разрешение дискретизации, разрядность квантования)— это количество информации, которое необходимо для кодирования дискретных уровней громкости цифрового звука.

Если известна глубина кодирования, то количество уровней громкости цифрового звука можно рассчитывать по общей формуле **$N = 2^I$** .

Например, пусть глубина кодирования звука составляет 16 битов, в таком случае количество уровней громкости звука равно:

$$N = 2^I = 2^{16} = 65\,536.$$

- Стандартный аудио компакт-диск (CD-DA), применяющийся с начала 80-х годов 20-го столетия, хранит информацию в формате PCM с частотой дискретизации 44.1 кГц и разрядностью квантования 16 бит.

Качество оцифрованного звука

- Чем больше частота дискретизации и глубина кодирования звука, тем более качественным будет звучание оцифрованного звука.
- **Оценка объема стереозвукового файла:**
- Длительность звучания 1 секунда
- Среднем качестве звука (16 битов, 24 000 измерений в секунду).
- Для оценки объема файла глубину кодирования необходимо умножить на количество измерений в 1 секунду и умножить на 2 канала (стереозвук):

$16 \text{ бит} \times 24\,000 \times 2 = 768\,000 \text{ бит} = 96\,000 \text{ байт} = 93,75 \text{ Кбайт}.$

Сравнение некоторых звуковых форматов по частоте дискретизации и глубине кодирования

Название формата	Квантование, бит	Частота дискретизации, кГц	Число каналов
CD	16	44,1	2
Dolby Digital (AC3)	16-24	48	6
DTS	20-24	48; 96	до 8
DVD-Audio	16; 20; 24	44,1; 48; 88,2; 96	6
DVD-Audio	16; 20; 24	176,4; 192	2
MP3	16-24	до 48	2
AAC	16-24	до 96	до 48
AAC+ (SBR)	16-24	до 48	2
Ogg Vorbis	до 32	до 192	до 255
WMA	до 24	до 96	до 8

Альтернативные способы модуляции

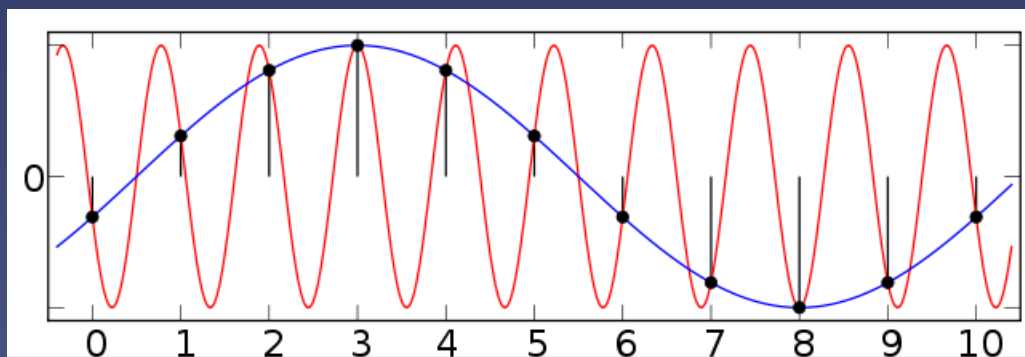
- **Неоднородная импульсно-кодовая модуляция (Nonuniform PCM):**
- Способ **неоднородного квантования** предусматривает разбиение амплитудной шкалы на уровни по логарифмическому закону. Такой способ квантования называют **логарифмическим квантованием**. При использовании логарифмической амплитудной шкалы, в области слабой амплитуды оказывается большее число уровней квантования, чем в области сильной амплитуды (при этом, общее число уровней квантования остается таким же, как и в случае однородного квантования).
- **Разностная импульсно-кодовая модуляция (Differential PCM):** квантованию подвергают не саму амплитуду, а относительные значения величины амплитуды.

АЦП и ЦАП

- Аналого-цифровой преобразователь (АЦП, англ. Analog-to-digital converter, ADC) — устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал).
- Обратное преобразование осуществляется при помощи ЦАП (цифро-аналогового преобразователя, DAC).
- Этапы работы АЦП:
 - Ограничение полосы частот** производится при помощи фильтра нижних частот для подавления спектральных компонент, частота которых превышает половину частоты дискретизации.
 - Дискретизацию во времени**, то есть замену непрерывного аналогового сигнала последовательностью его значений в дискретные моменты времени — отсчетов.
 - Квантование по уровню** представляет собой замену величины отсчета сигнала ближайшим значением из набора фиксированных величин — уровней квантования.
 - Кодирование или оцифровку**, в результате которого значение каждого квантованного отсчета представляется в виде числа, соответствующего порядковому номеру уровня квантования.

Алиасинг

- Алиасинг — одна из главных проблем при аналого-цифровом преобразовании видео- и аудиосигналов. Неправильная дискретизация аналогового сигнала приводит к тому, что высокочастотные его составляющие накладываются на низкочастотные, в результате чего восстановление сигнала во времени приводит к его искажениям.
- Два разных синусоидальных сигнала, которые неотличимы при оцифровке:



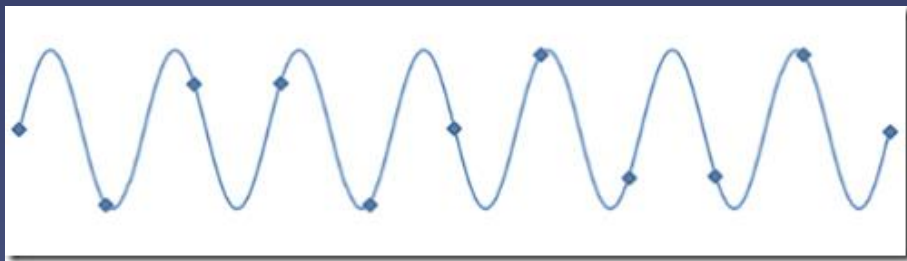
- Для предотвращения этого эффекта частота дискретизации должна быть достаточно высокой и сигнал должен быть надлежащим образом отфильтрован (*anti-aliasing* фильтр) перед оцифровкой.

Иллюстрация алиасинга

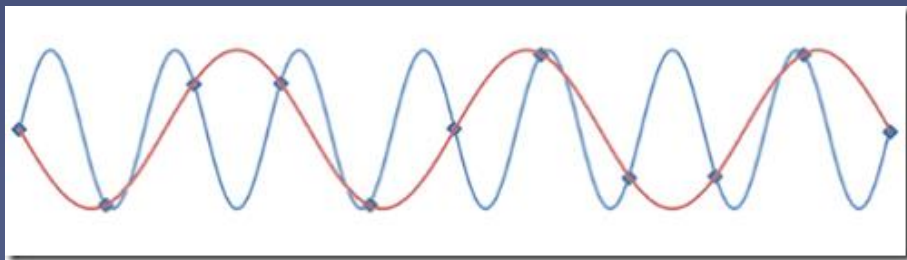
- Алиасинг появляется, когда частоты сигнала оказываются больше половины шага дискретизации.
- Исходный аналоговый сигнал частотой 7кГц на интервале 1 мс:



- Замеры получаемые при частоте дискретизации 11 кГц:

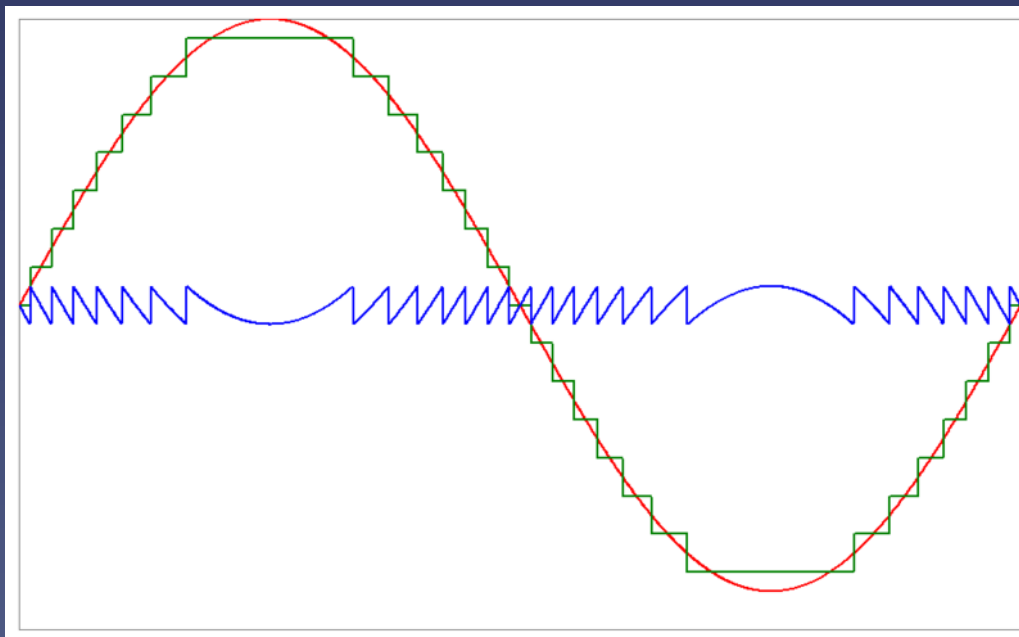


- Сигнал восстановленный по замерам (красная линия) 3 кГц:



Шум квантования

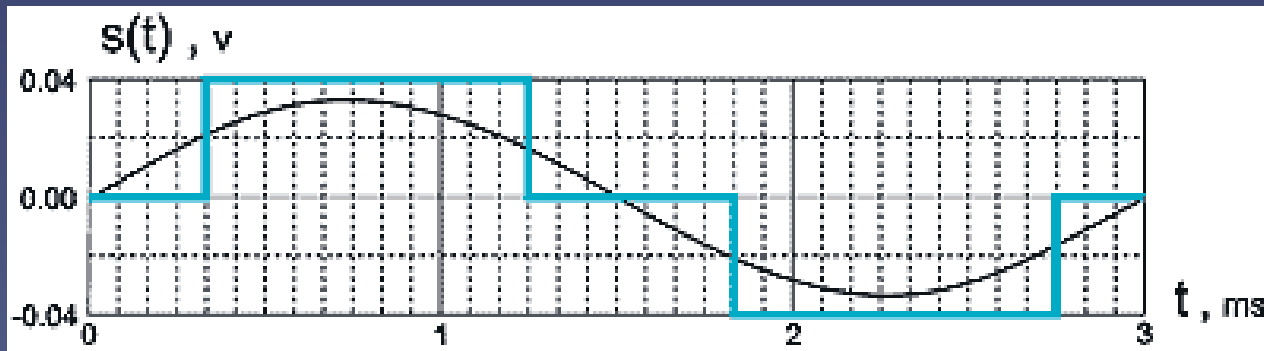
- **Шум квантования** — ошибки, возникающие при оцифровке аналогового сигнала. В зависимости от типа аналого-цифрового преобразования могут возникать из-за округления (до определённого разряда) сигнала или усечения (отбрасывания младших разрядов) сигнала.
- Ошибка квантования (синяя линия) синусоидального сигнала (красная линия). Квантованный сигнал - зелёная линия:



- Изменение глубины кодирования в АЦП на один бит изменяет шум квантования на 6 дБ.

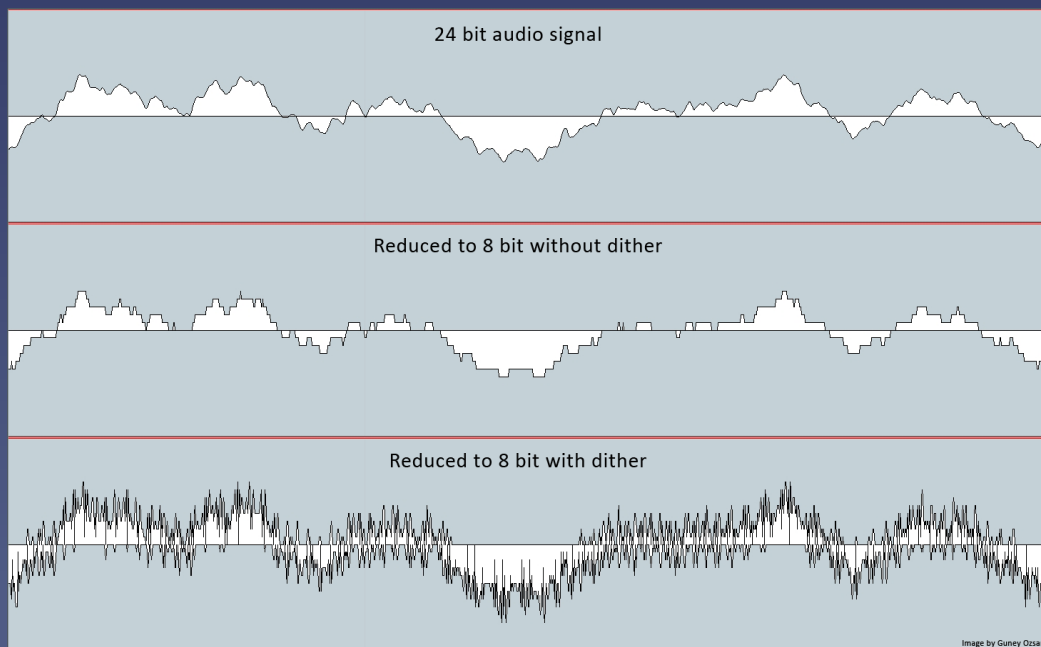
Искажения сигналов малого уровня

- В цифровых системах если сигнал, поступающий на вход АЦП, имеет малую амплитуду (сопоставимую с шагом квантования), то ошибки квантования соответствуют искажениям сложного вида (не похожи на шум), а приводят к искажению сигнала.
- Чем меньше амплитуда входного сигнала, тем сильнее искажения.

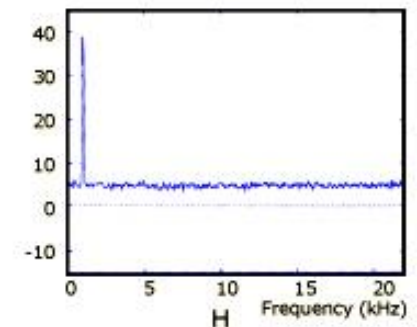
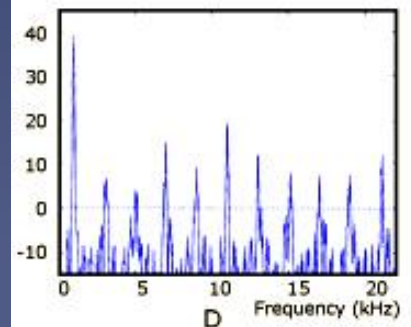
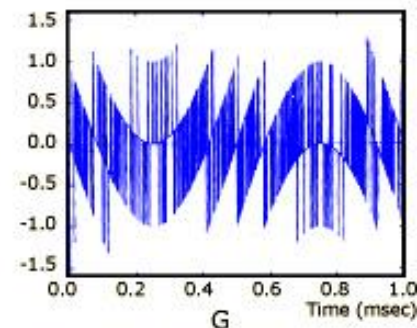
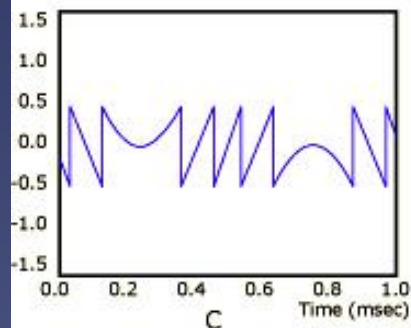
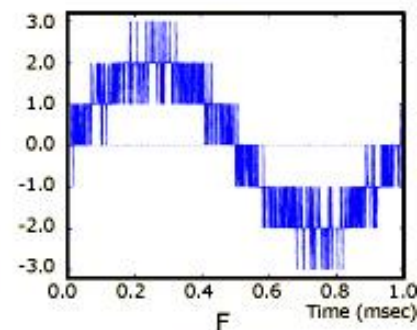
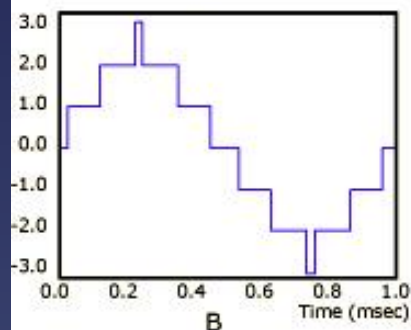
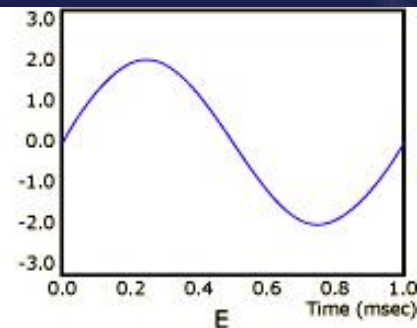
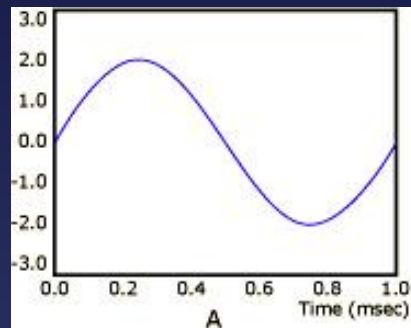


Дизеринг

- Дизеринг (англ. dither — дрожать) — при обработке цифровых сигналов представляет собой подмешивание в первичный сигнал псевдослучайного шума со специально подобранным спектром. Применяется при обработке цифрового звука:
- для уменьшения негативного эффекта от шума квантования;
- для улучшения звучания сигналов малого уровня.



Дизеринг и спектр



Формовка шума (noise shaping)

- Идея приема заключается в преднамеренном изменении формы исходного аналогового сигнала специальным образом, чтобы последующее квантование привело к появлению шума квантования, основная энергия которого расположилась бы в наименее заметных на слух частотных областях.
- Формирование шума с таким спектром достигают путем использования фильтра, моделирующего кривую равной громкости.

Гранулярный шум (granular noise)

- Гранулярным шумом называют эффект неустойчивости округления в процессе квантования. Если величина сигнала незначительно меняется около некоторой величины, являющейся границей между двумя соседними уровнями квантования, даже самые маленькие колебания величины сигнала вокруг этой границы могут вызывать заметные изменения результатов округления при квантовании значений амплитуды.
- Это связано с тем, что квантователь в этом случае округляет измеренное значение сигнала то до величины одного, то до величины второго из соседствующих уровней квантования.

