

Лекция 3. Основные количественные характеристики звуковых сигналов

План лекции

- 1 - Уровень звукового сигнала и его динамический диапазон
- 2 - Частотный диапазон звуковых сигналов
- 3 - Вторичные звуковые сигналы

1. Уровень звукового сигнала и его динамический диапазон

- В акустике величины звукового давления не превышают по амплитуде 10 Па. Если учесть, что нормальное атмосферное давление составляет $1,01 \times 10^5$ Па, то ясно, насколько малы значения звукового давления по сравнению с атмосферным.
- Ухо человека способно воспринимать определенный диапазон звуковых давлений, например, на средних звуковых частотах от 10^{-5} до 10^2 Па. Поэтому для удобства измерений и вычислений принято оценивать звуковое давление, или соответственно интенсивность звука не в абсолютных, а в относительных единицах – белах, децибелах.

- Измеренные таким образом величины называются уровнями. Так, уровень звукового давления

$$L = \frac{p}{p_0}$$

где p – текущее звуковое давление;

p_0 – условный порог давления, равный $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

- Уровень интенсивности (силы) звука

$$L_I = \frac{I}{I_0}$$

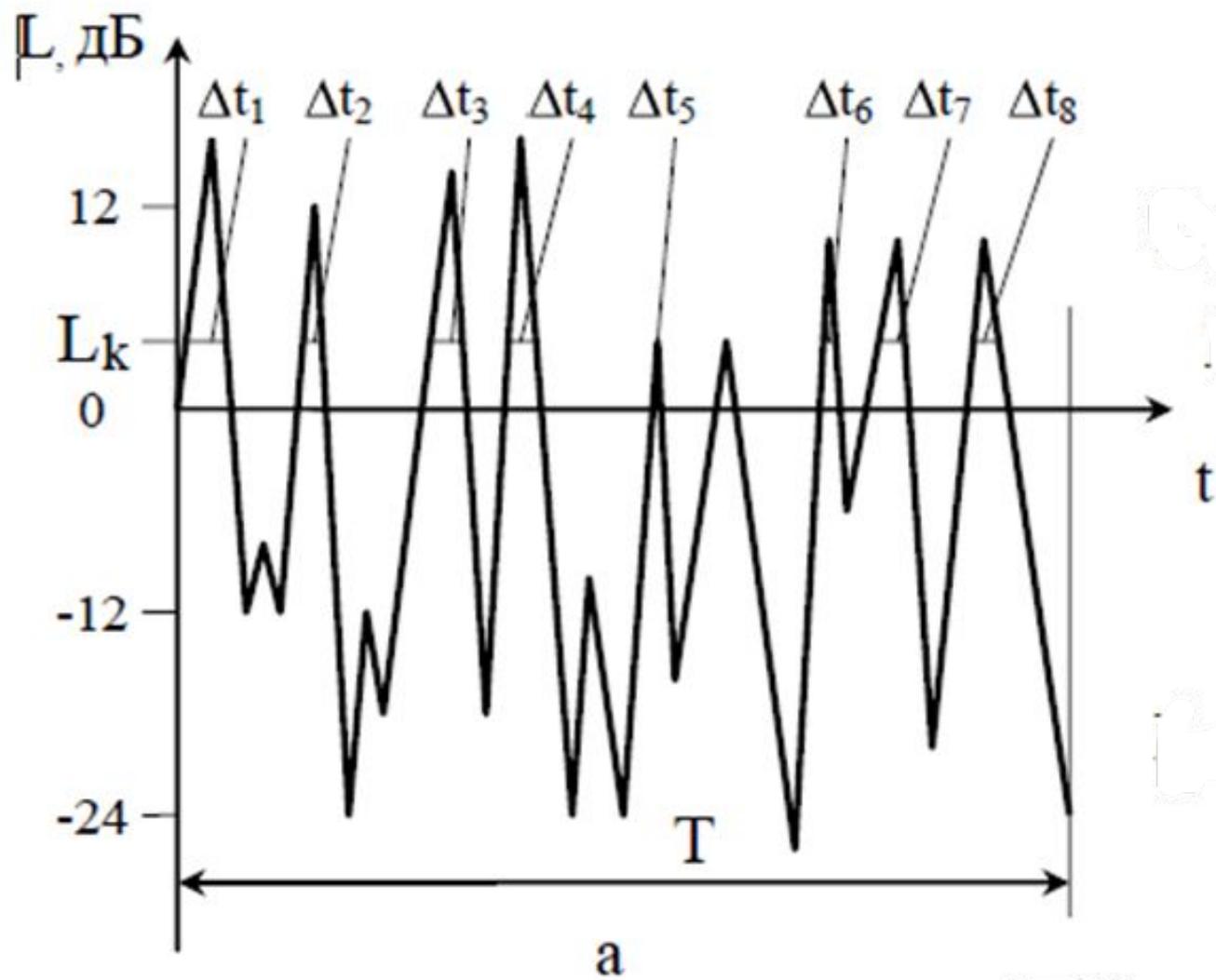
где I – интенсивность звука в Вт/м²;

I_0 – интенсивность звука, принимаемая за нулевой уровень, равный 10^{-12} Вт/м².

- Например, понятие уровня используется не только в акустике, но и в электротехнике и связи. Так, под электрическим уровнем понимается величина

$$N = \frac{U}{U_0}$$

- Нулевые уровни электрических величин выбираются при этом так, чтобы мощность, выделяемая при напряжении U_0 на сопротивлении $R = 600$ Ом, составляла 1 мВт. Отсюда легко найти, что $U_0 = 0,775$ В.
- В процессе любой передачи уровень акустического сигнала непрерывно изменяется, причем, диапазон его изменения может быть широким. На рисунке а показана зависимость уровня сигнала от времени, называемая **уровнеграммой**. Обычно ее приводят для уровня, определенного при постоянной времени измерителя, равной или 150...200 мс (субъективная уровнеграмма), или 20...30 мс (объективная уровнеграмма).
- Так как звуковой сигнал изменяется случайным образом, его интегральное распределение и среднее значение можно определить следующим образом. Возьмем какой-либо уровень, например, L_k (рисунок а).



- Время, в течение которого уровень сигнала будет не ниже L_k , определится суммой

$$\tau = \sum_{k=1}^n \Delta t_k = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8$$

где Δt_n – временные интервалы действия сигнала.

Следовательно, относительное время пребывания уровня сигнала над заданным равно $g_k = \tau/T$, где T – длительность времени анализа сигнала (она должна быть достаточно большой: не менее 15 с для речи и 1 мин для музыки). Если таким образом определить величину g_k для разных уровней, то можно построить кривую интегрального распределения уровней для данного сигнала. Такое распределение для рассматриваемой уровнеграммы показано на рисунке б.

- Распределения, полученные для натуральных музыкальных и речевых сигналов, по форме близки к нормальному закону распределения. Для анализа звуковых сигналов вводятся понятия квазимаксимального и квазимиимального уровней сигнала L_{\max} и L_{\min} , определяемые по относительному времени пребывания уровня сигнала над соответствующим уровнем. Для квазимаксимального уровня это время принято брать равным 2% для музыкального сигнала и 1% – для речевого, а для квазимиимального – соответственно 98 и 99% (рисунок б). Выбор именно таких значений для L_{\max} и L_{\min} основан на том, что более краткие пики и резкие минимумы сигнала практически не воспринимаются слухом (для речевого сигнала процент взят меньше, чем для музыкального, так как очень краткие звуки в речи все же несут некоторую информацию).
- Разность между квазимаксимальным и квазимиимальным уровнями называют **динамическим диапазоном**:

$$D = L_{\max} - L_{\min}$$

Динамический диапазон некоторых видов звуковых сигналов приведён в таблице 1.

Таблица 1.

Вид сигнала	Динамический диапазон, дБ
Речь диктора	25...35
Художественное чтение	35...45
Телефонные разговоры	35...45
Небольшие ансамбли	45...55
Симфонический оркестр	65...75
Рок-музыка	до 120

Разность между квазипиковым и средним уровнями называют **пикфактором**. Пикфактор показывает, насколько ниже надо взять усредненный уровень передачи по сравнению с уровнем ограничения в канале, чтобы не перегружать канал. В таблице 2 приведены величины среднего звукового давления и пикфактора для ряда натуральных звучаний. Для музыкальных сигналов пикфактор достигает до 25 дБ и более, а для речевого сигнала в среднем он составляет 12 дБ.

Таблица 2.

Инструмент	Среднее звуковое давление, Па	Пикфактор, дБ	Область наивысших пиковых значений, Гц
Большой барабан	9,9	10	250...500
Контрабас	0,42	10,8	125...250
Бас-саксофон	0,41	16,6	250...500
Бас-труба	0,54	9,7	250...500
Тромбон	0,65	17,5	600...700 2000...2800
Труба	0,86	12	250... 700
Английский рожок	0,38	11,2	250...500
Кларнет	0,35	11,5	250...500
Рояль	0,26	9,8	250...500
Орган	0,21	13,2	250...500
Орган фортиссимо	2,0	8,7	20...62,5
Разговор	0,05	10	250...500
Оратор	0,1	12	250...500

- Динамический диапазон сигнала всегда необходимо сопоставлять с динамическим диапазоном канала звукопередачи D_k :

$$D_k = \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{Ш}}} - \Delta N_1 + \Delta N_2$$

где $U_{\text{Ш}}$ – уровень шума в канале; $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение; N_1 – уровень перекрытия помех и шумов, дБ (обычно не менее 10 дБ); N_2 – допуск на перегрузку (3...6) дБ.

- Кстати, из таблицы 1 видно, для передачи натурального динамического диапазона требуется высококачественная аппаратура (с большим запасом линейной части амплитудной характеристики). В большинстве случаев динамический диапазон натуральных звуковых сигналов превышает возможности аналоговых средств связи и вещания. Поэтому при их использовании приходится предварительно сжимать динамический диапазон или же мириться с появлением искажений в тракте передачи.

2. Частотный диапазон звуковых сигналов

- Натуральный звуковой сигнал имеет непрерывно изменяющуюся форму и состав спектра. Спектры могут быть высоко- и низкочастотными, дискретными и сплошными. У каждого источника звука спектры имеют индивидуальные особенности, что придает звучанию характерную окраску (тембр).
- В первую очередь, представляют интерес: средний спектр для источников звука каждого типа, а для оценки искажений сигнала – спектр, усредненный за длительный интервал времени (15 с для информационных сигналов и 1 мин для художественных). Усредненный спектр является, как правило, сплошным и достаточно сглаженным по форме.
- Частотный диапазон акустического сигнала определяют из частотной зависимости.

В таблице 3 приведены для примера частотные диапазоны некоторых натуральных источников звука:

Таблица 3.

Источник сигнала	Диапазон частот, Гц
Мужской голос	100...7000
Женский голос	200...9000
Рояль	100...5000
Скрипка	200...15000
Флейта	250...14000
Литавры	65...3000
Бас-труба	50...6000
Орган	20...15000
Шум шагов	100...10000
Аплодисменты	150...15000

3. Вторичные звуковые сигналы

- Вторичные звуковые сигналы - это сигналы, воспроизводимые электроакустическими устройствами, т.е. натуральные (первичные) сигналы, прошедшие по электроакустическим трактам и изменившие свои параметры.
- В идеале вторичный сигнал должен точно воспроизводить первичный, но это не всегда требуется, так как слух человека может не заметить их несоответствие. К тому же на практике их точное соответствие часто невозможно или трудно осуществить. При художественном вещании это необходимо, чтобы у слушателя было ощущение, близкое к тому, которое он получает, находясь в месте исполнения данной программы. Для информационных программ вещания и телефонной связи этого соответствия добиваются в первую очередь для получения полной понятности речи, а затем для достаточно высокого качества звучания.

Нарушение точности звукопередачи, замечаемое слухом, бывает самого разнообразного вида. Рассмотрим основные из них: потерю акустической перспективы, смещение уровней, ограничение динамического и частотного диапазона сигнала, помехи, искажения.

- **Потеря акустической перспективы.** При передаче звукового сигнала по одноканальной системе получается ощущение слушания одним ухом, даже при наличии нескольких микрофонов в помещении, откуда ведется передача, и при разнесенных вторичных источниках звука. При этом временной сдвиг и разность уровней для обеих ушей слушателя не зависят от местонахождения первичного источника звука. Этот дефект может быть до некоторой степени устранен с помощью многоканальных звуковых систем.

- **Смещение уровней.** Поскольку по тракту передачи сигналов не передается информация об абсолютных уровнях звучания первичного сигнала, то слушатель по своему усмотрению устанавливает уровень вторичного сигнала.

При этом не всегда можно восстановить нужный уровень первичного сигнала из-за недостаточной мощности аппаратуры на приемном конце, а также из-за условий слушания (например, в квартирах с плохой звукоизоляцией).

Смещение уровней приводит к изменению соотношения между громкостями низкочастотных и среднечастотных составляющих первичного и вторичного сигналов, так как смещение среднего уровня вторичного сигнала вверх по отношению к среднему уровню первичного приводит к субъективному повышению громкости низкочастотных составляющих, смещение вниз – к их ослаблению.

Ограничение динамического диапазона. Поскольку динамический диапазон канала ограничен снизу шумами, а сверху – перегрузкой и нелинейностью отдельных звеньев канала передачи, то во избежание искажений его сжимают в начале тракта. Этот дефект может быть частично исправлен путем расширения динамического диапазона сигнала на конце тракта, что не всегда возможно, так как на приемном конце может быть неизвестно, насколько был сжат этот диапазон. Использование цифровой обработки звуковых сигналов практически устраняет проблему передачи натурального динамического диапазона. Воспроизведение звуковых сигналов всегда выполняется аналоговыми устройствами, имеющими ограниченный динамический диапазон неискаженного звучания.

- **Линейные искажения.** К линейным искажениям звукового сигнала относятся нежелательные изменения соотношений между амплитудами частотных составляющих сигнала при передаче его по тракту. Эти искажения называют амплитудно-частотными или просто частотными.

Частотная зависимость коэффициента передачи, называемая частотной характеристикой тракта передачи, приводит к изменению соотношений между амплитудами частотных составляющих, входящих в первичный сигнал. Субъективно эти искажения ощущаются как изменение тембра первичного сигнала.

Например, если подавлены низкочастотные составляющие, то звучание будет звенящим. При подавлении высокочастотных составляющих звук становится глухим. При резком подчеркивании низкочастотных составляющих звучание получается бубнящим, а при резком подчеркивании высокочастотных – свистящим.

- Линейные искажения оценивают по величине неравномерности частотной характеристики

$$M = K_{\text{макс}}/K_{\text{мин}}$$

где $K_{\text{макс}}$ и $K_{\text{мин}}$ – максимальный и минимальный коэффициенты передачи в заданном диапазоне частот.

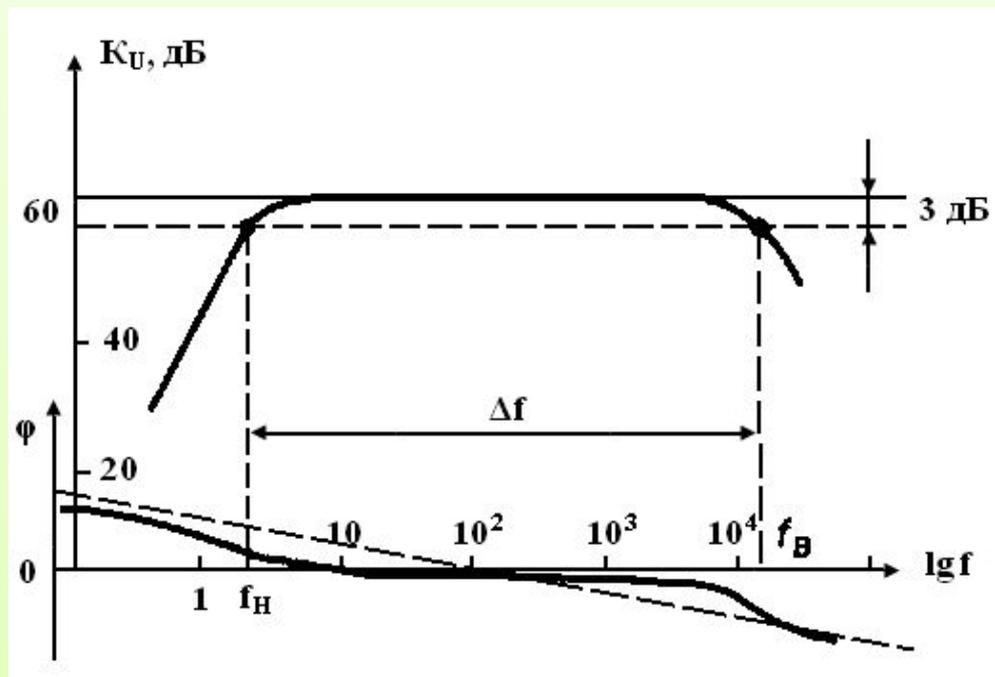
Неравномерность часто измеряют в логарифмических единицах, в таком случае:

$$\Delta = \log_{10}(L_{\text{макс}}/L_{\text{мин}})$$

где $L_{\text{макс}}$ и $L_{\text{мин}}$ – максимальный и минимальный уровни вторичного сигнала при одном и том же уровне первичного.

Частотная характеристика наиболее неравномерна в областях самых низких и самых высоких частот диапазона, то есть вблизи его границ, поэтому для широкополосных трактов передачи сигнала, например вещательных, неравномерность частотной характеристики часто задают в двух диапазонах: номинальном и в основном (200...5000 Гц). Установлено, что на низких частотах искажения более заметны, чем на высоких. В тех случаях, когда аппаратура не может быть изготовлена с заданной неравномерностью, в требуемом частотном диапазоне, оговаривают частотный диапазон, в котором неравномерность не превышает заданную норму.

- На рисунке приведены АЧХ и ФЧХ усилительного тракта УЗЧ



Зависимость коэффициента усиления от частоты входного сигнала $K = F(f)$ принято называть **амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)**.

По АЧХ можно определить граничные частоты $f_{гр}$ (f_H и f_B), среднюю частоту f_0 и полосу пропускания (полосу усиливаемых частот Δf):

По АЧХ можно определить граничные частоты $f_{гр}$ (f_n и f_v), среднюю частоту f_0 и полосу пропускания (полосу усиливаемых частот Δf):

$$\Delta f = f_v - f_n; \quad f_0 = \sqrt{f_n f_v}$$

Граничными частотами называют частоты, на которых коэффициент усиления снижается до уровня $0,7K_0$ ($K_0/\sqrt{2}$) по напряжению.

Идеальная АЧХ параллельна оси частот. Реально же гармонические составляющие входного сигнала усиливаются неодинаково, поскольку реактивные сопротивления элементов схемы по-разному зависят от частоты. Типичным для АЧХ является наличие так называемой области средних частот в которой K почти не зависит от частоты и обозначается K_0 . В диапазоне низких и высоких частот амплитудно-частотная характеристика изменяется, имея неравномерность усиления.

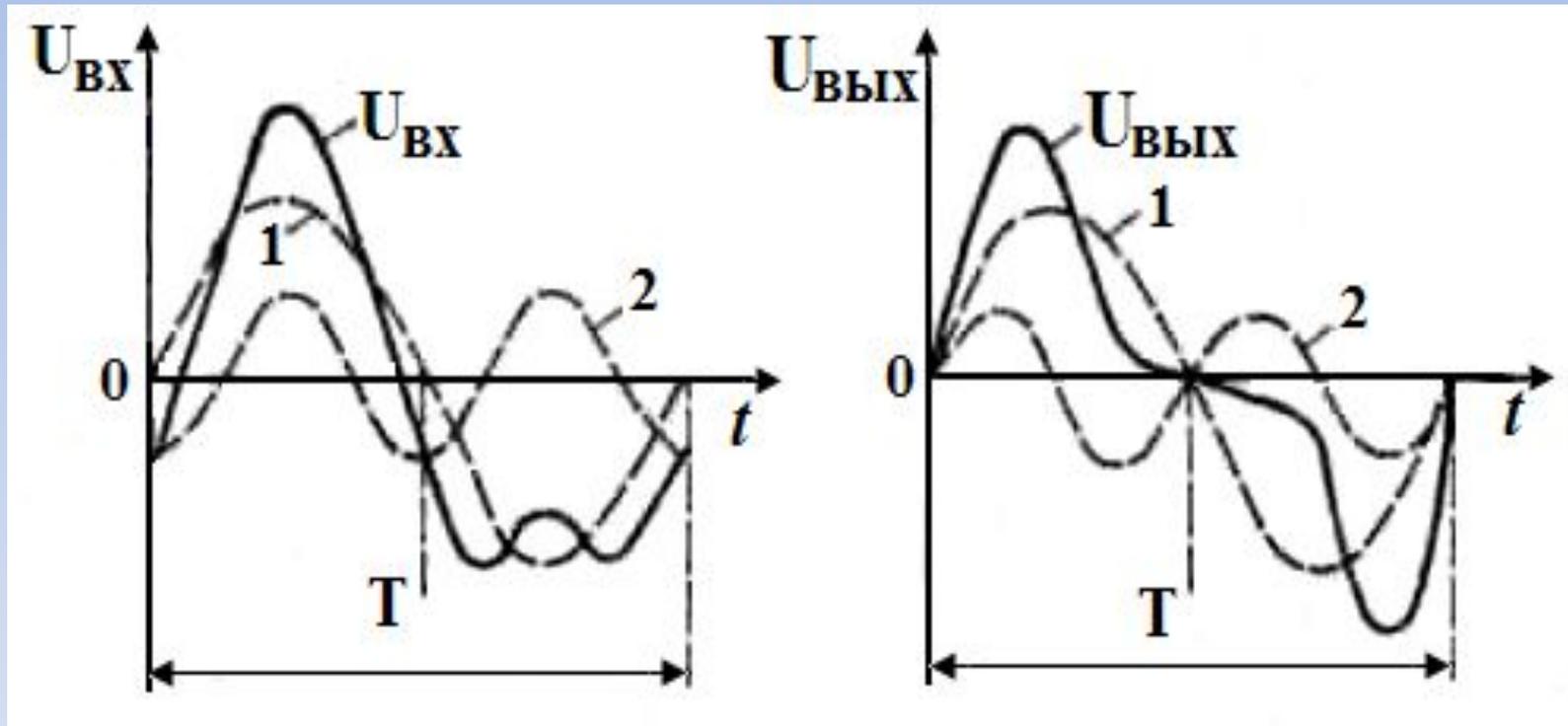
Коэффициент частотных искажений многокаскадного усилителя определяется как

$$M = M_1 M_2 \dots M_n; \quad M \text{ [ДБ]} = M_1 + M_2 + \dots + M_n \text{ [ДБ]}$$

Частотные искажения, возникающие в одном каскаде усилителя, могут быть скомпенсированы в другом таким образом, чтобы общий коэффициент частотных искажений не выходил за пределы заданного. Допустимая величина частотных искажений зависит от назначения усилителя.

Частотные искажения в усилителе всегда сопровождаются сдвигом фаз между входным и выходными сигналами, что вызывает появление фазовых искажений.

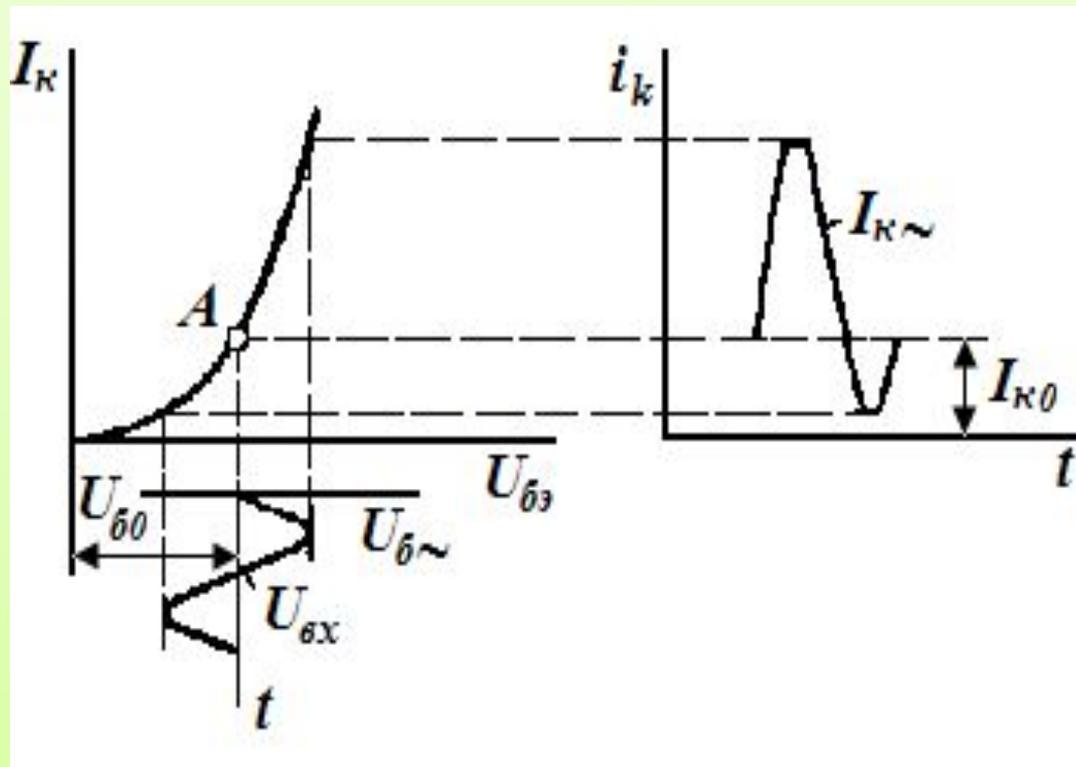
Фазовые искажения возникают из-за различного сдвига фаз различных гармоник входного сигнала, вызванных реактивными элементами усилителя



- Фазовые искажения усилительного тракта оцениваются его фазочастотной характеристикой $\varphi = F(f)$ (ФЧХ). График ФЧХ представляет собой зависимость угла сдвига фазы между входным и выходным напряжениями усилителя от частоты. Фазовые искажения в усилителе отсутствуют, когда фазовый сдвиг линейно зависит от частоты. Идеальной фазочастотной характеристикой является прямая линия, начинающаяся в начале координат (пунктирная линия на верхнем рисунке).
- Считается, что при монофоническом звуковоспроизведении слух не реагирует на изменение фазы сигнала. Однако, при организации многоканальных звуковых систем (в том числе и стереофонических), фазовые искажения обязательно необходимо учитывать, поскольку фаза несет информацию о местоположении источника звука.

- **Нелинейные искажения.** Нелинейными искажения - это искажения сигнала, обусловленные нелинейностью зависимости между вторичным и первичным сигналами. Нелинейные искажения приводят к появлению в воспроизводимом сигнале новых частотных составляющих, которых не было в спектре естественного источника звука.
- Нелинейные искажения формы выходного сигнала вызываются нелинейностью входных и выходных характеристик усилительных элементов, а также характеристик намагничивания сердечников трансформаторов (*нелинейность характеристики*)

Предположим, что на вход усилителя подан гармонический сигнал $U_{вх}$, а на выходе за счет нелинейности характеристики транзистора форма тока изменилась так, как показано на рисунке:



Такой ток, как и любой негармонический, можно представить состоящим из суммы гармонических составляющих. Таким образом, за счет нелинейных искажений на выходе усилителя появляются дополнительные частоты, отсутствующие во входном сигнале. Чем больше нелинейность усилителя, тем сильнее искажается синусоидальный сигнал, поданный на вход усилителя, и тем больше относительная амплитуда появившихся в выходном сигнале высших гармоник. Поэтому **нелинейные искажения в усилителях гармонических сигналов оцениваются величиной коэффициента гармоник K_r** , представляющего собой отношение значений тока или напряжения высших гармоник, появившихся в выходном сигнале, к току или напряжению основной частоты (первой гармоники):

$$K_r = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_1} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{U_1},$$

$$K_r \% = K_r \cdot 100,$$

где I_2 , I_3 и U_2 , U_3 – действующие или амплитудные значения тока или напряжения второй, третьей и т.д. гармоник выходного сигнала; I_1 и U_1 ток и напряжение основной частоты.

Практически значения имеют только вторая и третья гармоники, так как с увеличением номера гармоник резко падает амплитуда напряжения или тока этих гармоник и их можно не учитывать.

Для многокаскадного усилителя общий коэффициент нелинейных искажений принимается равным сумме коэффициентов отдельных каскадов

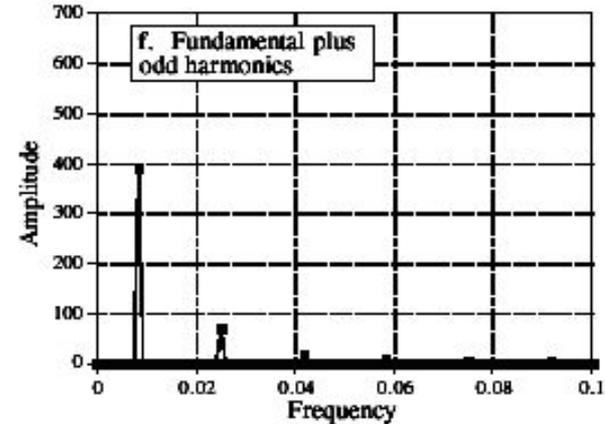
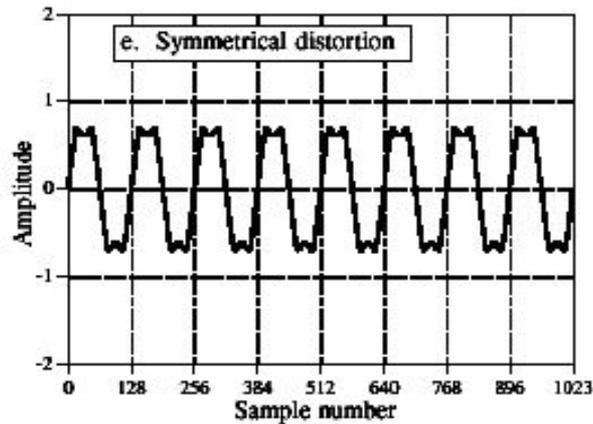
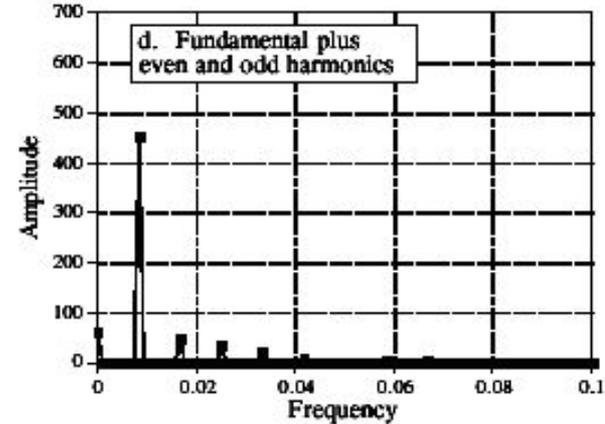
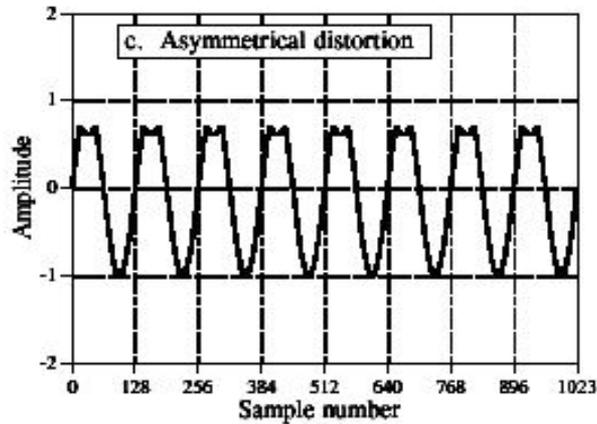
$$K_{\Gamma\Sigma} = K_{\Gamma1} + K_{\Gamma2} + \dots + K_{\Gamma n}$$

- Нелинейные искажения зависят от амплитуды входного сигнала и не связаны с его частотой. Для уменьшения искажения формы выходного сигнала входной сигнал должен иметь малую амплитуду. В связи с этим в многокаскадных усилителях нелинейные искажения в основном возникают в предоконечных и выходных каскадах, на входе которых действуют сигналы большой амплитуды.
- В усилителях звуковой частоты нелинейные искажения воспринимаются как хрип или дребезжание. При $K_{\Gamma} < 2 \div 3\%$ они почти не заметны на слух. В высококачественных усилителях звуковой частоты $K_{\Gamma} < 0,2\%$, а в усилителях многоканальной связи – сотые и тысячные доли процента, что исключает взаимные помехи каналов.

- Метод коэффициента гармоник является наиболее распространенным методом оценки нелинейных искажений, однако, он имеет существенные недостатки. Так, с его помощью трудно измерить нелинейные искажения в высокочастотной части звукового диапазона, так как гармонические составляющие выходят за пределы воспроизводимого устройством диапазона частот.
- Кроме того, при некоторых видах нелинейности преобладают не паразитные гармонические составляющие, а комбинационные частоты.

- Намного лучшие результаты для оценки нелинейных искажений дает использование метода разностного тона. При измерении на вход испытуемого устройства подается сумма двух синусоидальных сигналов с одинаковыми и некратными частотами f_1 и f_2 . Разность частот $(f_1 - f_2) > 80$ Гц. На выходе устройства измеряют напряжения на частотах f_1 и f_2 .
- Исследования показали, что слушатель меньше замечает несимметричные искажения, когда наибольшей по амплитуде оказывается вторая гармоника, так как она находится в октаве с основной частотой. Симметричные искажения более заметны, и по этой причине до настоящего времени высококачественные усилители изготавливаются на лампах, а не на транзисторах. При сужении полосы частот заметность искажения уменьшается. Это объясняется тем, что ряд гармоник и комбинационных составляющих оказывается за пределами передаваемого диапазона частот.

Комментарий по поводу несимметричных и симметричных искажений:



- **Параметрические искажения.**

К параметрическим искажениям относятся автопараметрический резонанс и детонация. Первый вид искажений наблюдается в громкоговорителях, второй – в системах записи звука.

Автопараметрический резонанс выражается в появлении субгармоник, т. е. колебаний с частотами, кратными дробной величине частоты основного колебания. Характер этих искажений сходен со звучанием нелинейных искажений на низких частотах.

Детонация сигнала выражается в изменении частоты вторичного сигнала по отношению к частоте первичного. Эти искажения прослушиваются и в виде «плавания» частоты сигнала, а при быстрых изменениях – в виде хрипов и дребезжания.

- **Шумы и помехи.** Влияние шумов и помех сводится к маскировке вторичного акустического сигнала независимо от их происхождения (акустического или электрического). Шумы сдвигают порог слышимости, если шум имеет пикфактор, не превышающий 6 дБ (гладкие шумы). К этим шумам относятся различные флуктуационные шумы, например шумы дробового эффекта, речевые шумы от нескольких голосов, звучащих одновременно.
- Импульсные шумы создают порог слышимости, изменяющийся во времени в зависимости длительности импульсов. Из-за инерционности слуха ощущение кратковременных импульсов получается сглаженным: происходит выравнивание временной зависимости порога слышимости. Импульсные шумы не только маскируют полезный сигнал, но и искажают его, создавая комбинационные частоты шума и сигнала.

- Спектр шумов электрического происхождения, как правило, близкий к равномерному, а акустического происхождения – ближе к речевому. Поэтому частотная зависимость порога слышимости для первых имеет тенденцию роста к высоким частотам, так как ширина критических полосок растет с увеличением частоты. Для речевых шумов порог слышимости почти не зависит от частоты.
- Индустриальные и атмосферные помехи, кроме тональных, могут быть отнесены и к импульсным, и к гладким, с равномерным или низкочастотным спектром. Кроме этих помех, приходится иногда считаться с помехами от самомаскировки речи, то есть с маскировкой слабых звуков, следующих за громкими. Борьба с акустическими шумами ведется путем устранения (или ослабления) действия источников шума, а также путем повышения звукоизоляции помещений. Учет их действия на прием речевого сигнала делается при расчете и измерении разборчивости речи.