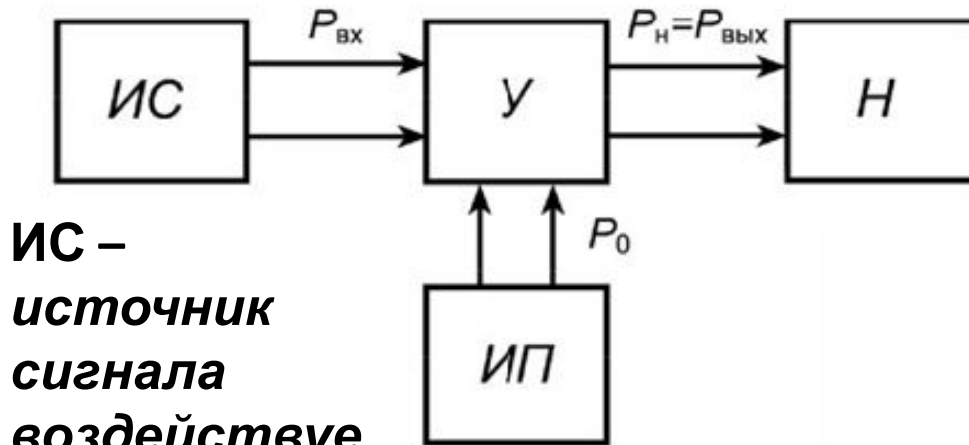


Усилители электрических сигналов

Усилитель - устройство, предназначенное для увеличения мощности входного сигнала при сохранении его частоты и формы.



ИС – источник сигнала воздействует на вход усилителя, подавая сигнал с входной мощностью $P_{вх}$.

В основе любого усилителя лежит использование усилительного элемента (УЭ), с помощью которого производится преобразование энергии источника питания в энергию выходного сигнала.

В качестве источника сигнала может использоваться любой преобразователь какого-либо вида энергии в электрический сигнал. Примеры: микрофон, магнитная головка (жесткого диска), фотодиод, терморезистор, приемная антенна и т.д.

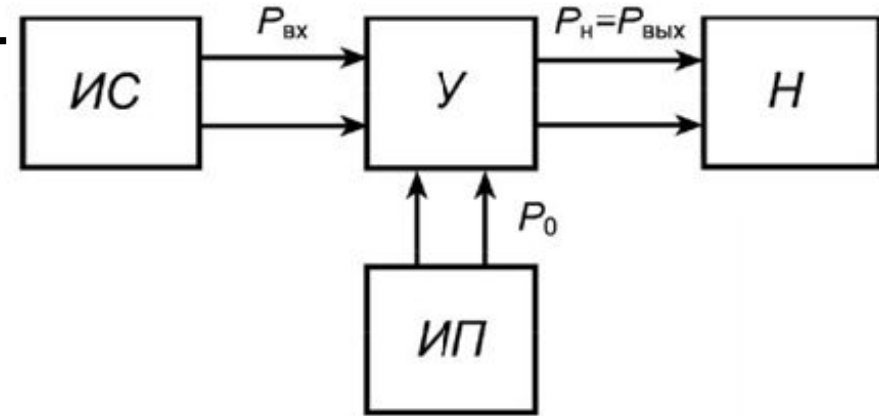
Усилители электрических

СИГНАЛОВ

Сам усилитель (У) потребляет от источника питания мощность P_0 (потребляемая мощность) и передает в нагрузку выходную мощность $P_{\text{вых}}$ (или мощность нагрузки $P_{\text{н}}$). В общем случае всегда вып $P_0 > P_{\text{н}} > P_{\text{вх}}$ равенство:

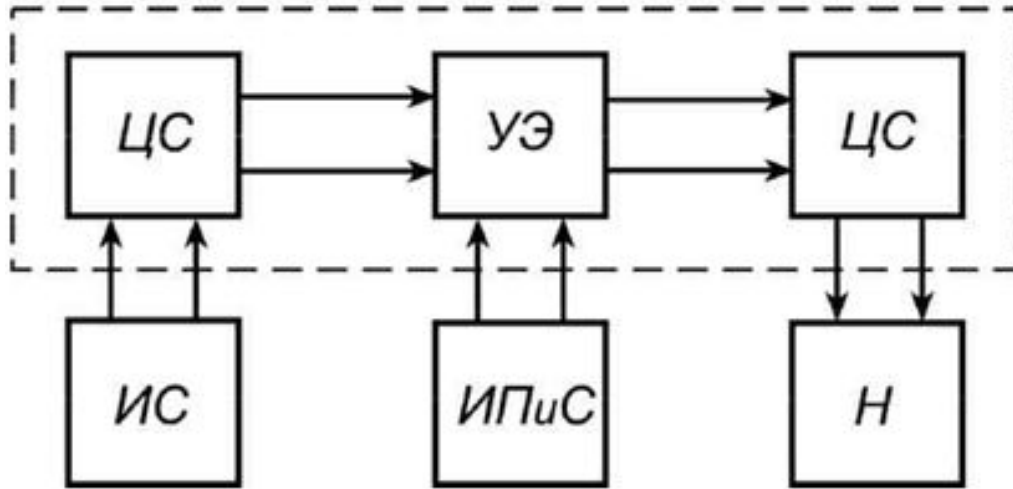
то есть коэффициент полезного действия усилителя получается меньше единицы:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_0} < 1$$



ИП – источник питания вырабатывает необходимые напряжения для всех блоков усилителя. Н – нагрузка усилителя. В качестве нагрузки может использоваться любой потребитель: динамик, другой усилитель и т.д.

Усилительный каскад



*Структурная схема
усилительного каскада.*

ЦС – цепь связи;

УЭ – усилительный элемент;

*ИПиС – источник питания и
смещения;*

ИС – источник сигнала;

Н – нагрузка.

Базовым звеном любого усилителя является **усилительный каскад**.

УЭ предназначен для преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала.

ЦС предназначены для подсоединения источника сигнала и нагрузки к усилителю. Кроме того, ЦС выполняют дополнительные функции: задержка постоянной составляющей входного сигнала,

для создания (смещения) рабочей точки

применяются специальные источники

смещения, в качестве которых применяется

тот же самый ИПиС в комбинации со

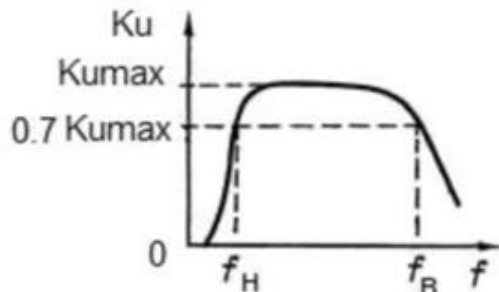
специальными делителями напряжения.

Классификация усилителей

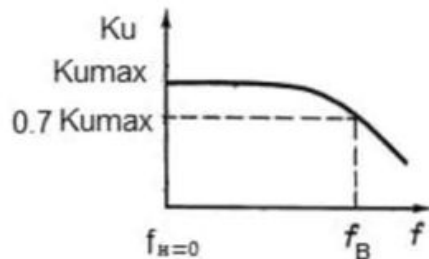
I. По роду усиливаемых сигналов:

1. усилители непрерывных сигналов - устройства, в которых время изменения сигнала много больше времени переходных процессов в самом устройстве;
2. усилители импульсных сигналов - устройства, в которых время изменения сигнала сопоставимо со временем переходного процесса в самом устройстве.

АЧХ усилителя переменного тока



АЧХ усилителя постоянного тока



II. По диапазону усиливаемых частот:

1. усилители переменного тока - усиливают сигналы из диапазона и от $f_H > 0$ до f_B , постоянная составляющая не усиливается;
2. усилители постоянного тока (УПТ) - усиливают сигналы в полосе пропускания от $f_H = 0$ до f_B , постоянная составляющая $f_H = 0$ усиливается;
3. усилители низкой (звуковой) частоты (УНЧ) - усиливают в диапазоне от $f_H = 20$ Гц до $f_B \approx 20$ кГц;
4. усилители высокой частоты (УВЧ) - усиливают в диапазоне от десятков кГц до сотен МГц;
5. широкополосные усилители - все усилители у которых $\frac{f_B}{f_H} \geq 1000$;
6. избирательные усилители - усилители, у которых $\frac{f_B}{f_H} \leq 1,1$.

Классификация усилителей

III. По виду связи между каскадами, усилителем и нагрузкой:

а) *RC – усилители (резистивно-емкостные). В качестве элементов связи применяются резисторы и конденсаторы, т.е. RC – цепочки;*

б) *трансформаторные;*

в) *с непосредственными связями - без конкретного элемента связи, либо с использованием в качестве элементов связи резисторов или идеальных источников*

~~Напряжения.~~ соотношению между внутренним сопротивлением источника сигнала R_g , сопротивлением нагрузки R_n , входным сопротивлением $R_{вх}$ и выходным сопротивлением $R_{вых}$:

1. *усилители напряжения ($R_g \ll R_{вх}$, $R_{вых} \ll R_n$);*

2. *усилители тока ($R_g \gg R_{вх}$, $R_{вых} \gg R_n$);*

3. *усилители мощности ($R_g \approx R_{вх}$, $R_{вых} \approx R_n$).*

Классификация по данному признаку весьма условная, поскольку один и тот же усилитель по входу может быть одного типа, а по выходу – совсем другого.

Классификация усилителей

V. По наличию в усилительном каскаде промежуточного преобразования частоты:

1. ***Усилители прямого усиления (без промежуточного преобразования частоты).***

2. ***Усилители с преобразованием частоты.***

Усилители с промежуточным преобразованием частоты применяются в случаях, когда усиление без промежуточного преобразования приводит к большим погрешностям.

VI. По типу усилительного элемента:

1. на биполярных транзисторах;

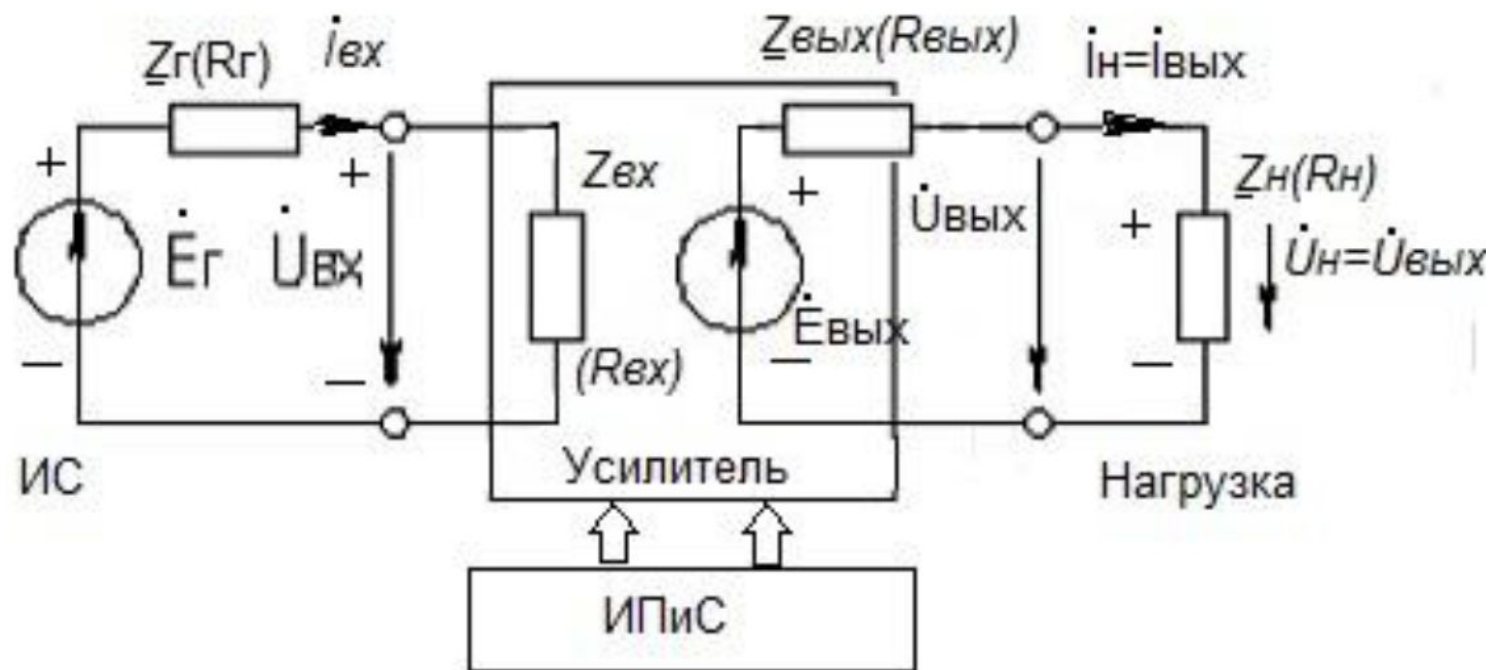
2. на полевых транзисторах;

3. на электронных лампах;

4. на интегральных микросхемах (ИМС).

Основные параметры и характеристики усилителей

Функциональная схема усилителя



Основные параметры и характеристики усилителей

1. Входные и выходные параметры

усилителя

1.2. Входные параметры

Входные параметры характеризуют цепь (усилитель), как нагрузку для источника сигнала (генератора), т.е. усилитель представляет собой

нагрузку для источника сигнала.
К входным параметрам усилителя относятся:

$U_{вх}$, $I_{вх}$ – номинальное входное напряжение либо номинальный входной ток, при которых усилитель отдает в заданную нагрузку требуемые техническим заданием (ТЗ) мощность $P_{вых} = P_n$ (или $U_{вых}$ и $I_{вых}$);

$P_{вх}$ – входная мощность сигнала;

Входное сопротивление усилителя в общем случае носит комплексный характер, но в рабочей полосе частот комплексностью сопротивления пренебрегают, полагая, что входное сопротивление носит чисто активный характер – $R_{вх}$.

Это существенно облегчает анализ и расчеты.

Основные параметры и характеристики усилителей

1. Входные и выходные параметры усилителя

1.1. Входные параметры

К входным параметрам усилителя часто относят ЭДС источника сигнала и его внутреннее сопротивление .

С учетом R_2 и $R_{вх}$ входное напряжение определяется:

$$U_{вх} = E_{\Gamma} \cdot \frac{R_{вх}}{R_{\Gamma} + R_{вх}} = E_{\Gamma} \cdot K_{д}$$

$K_{д}$ – коэффициент деления делителя, образованного R_2 и $R_{вх}$

Пренебрегая комплексностью параметров, можно получить следующие соотношения:

$$U_{вх} = I_{вх} R_{вх}, \quad P_{вх} = U_{вх} I_{вх} = I_{вх}^2 R_{вх} = \frac{U_{вх}^2}{R_{вх}}$$

Основные параметры и характеристики усилителей

1. Входные и выходные параметры

усилителя

1.2. Выходные параметры

Выходные параметры характеризуют цепь (усилитель) как источник сигнала (генератор) для нагрузки.

К выходным параметрам усилителя относятся:

$U_{\text{вых}}$, $I_{\text{вых}}$ – номинальное выходное напряжение сигнала или номинальный входной ток сигнала в нагрузке, отдаваемые усилителем при работе на заданную нагрузку;

$P_{\text{вых}} = P_{\text{H}}$ – номинальная выходная мощность, отдаваемая усилителем в нагрузку;

Основные параметры и характеристики усилителей

1. Входные и выходные параметры

усилителя

1.2. Выходные параметры

Выходное сопротивление усилителя:

$$\underline{Z}_{\text{ВЫХ}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ XX}}}{\dot{I}_{\text{ВЫХ КЗ}}}$$

В общем случае выходное сопротивление нагрузки комплексно, но в рабочем диапазоне частот его полагают чисто активным, однако данное допущение более грубое, чем для $R_{\text{вх}}$. В этом случае

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВЫХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ XX}}}{I_{\text{ВЫХ КЗ}}}$$

Основные параметры и характеристики усилителей

1. Входные и выходные параметры

усилителя

1.2. Выходные параметры

Выходное сопротивление характеризует наклон нагрузочной прямой (характеристики).



Пренебрегая комплексностью параметров, можно получить следующие соотношения:

$$U_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВЫХ}} R_{\text{ВХ}}$$

$$P_{\text{Н}} = U_{\text{ВЫХ}} I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВЫХ}}^2 R_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^2}{R_{\text{Н}}}$$

Основные параметры и характеристики усилителей

2. 1. Коэффициенты усиления (передачи)

Коэффициенты усиления (передачи) характеризуют цепь (усилитель) как средство (звено) передачи сигнала

Коэффициентом усиления называется отношение установившегося значения какого-либо параметра сигнала на выходе к установившемуся значению на входе.

Как правило, коэффициенты усиления находятся для гармонического сигнала

Основные параметры и характеристики усилителей

2. 1. Коэффициенты усиления (передачи)

а) Коэффициент усиления по напряжению носит комплексный характер

На практике в большинстве случаев коэффициент передачи рассматривается только в рабочем диапазоне частот и в этом случае речь идет о **модуле коэффициента передачи**. Если нет расшифровки о каком коэффициенте идет речь, то подразумевается, что речь идет о коэффициенте усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ } m}}{U_{\text{ВХ } m}}$$

Поскольку восприятие органов чувств подчиняется логарифмическому закону, на практике модуль коэффициента усиления часто выражают в логарифмических единицах – децибелах:

Основные параметры и характеристики усилителей

2. 1. Коэффициенты усиления (передачи)

Многокаскадные усилители

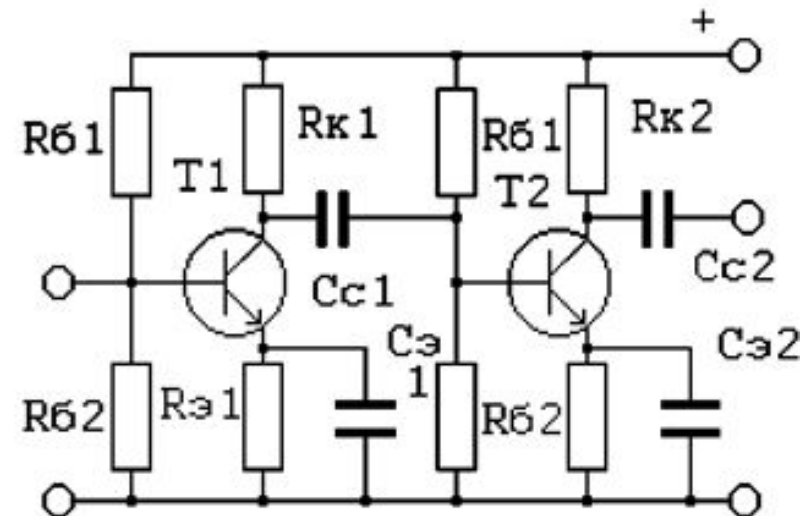
Коэффициент усиления одного каскада относительно невысок. Для получения требуемого коэффициента усиления ($KU > 100$) на практике очень часто используют последовательное соединение нескольких каскадов, в этом случае усилитель называется **многокаскадным**

Коэффициент усиления по напряжению многокаскадного усилителя

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}n}} \cdot \frac{U_{\text{ВХ}n}}{U_{\text{ВХ}n-1}} = K_n \cdot K_{n-1} \dots K_1$$

$= U_{\text{ВЫХ}n}$
 $= U_{\text{ВЫХ}n-1}$

Таким образом, результирующий коэффициент усиления многокаскадного усилителя определяется произведением усиления всех каскадов, входящих в усилитель.



Основные параметры и характеристики усилителей

2. 1. Коэффициенты усиления (передачи)



Структурная схема многокаскадного усилителя:

ВхКУ – входной каскад усиления; ПОКУ – предоконечный каскад усиления;

УМ – усилитель мощности

Последний каскад вырабатывает мощность в нагрузку, является **усилителем мощности и называется оконечным каскадом**. Задача предоконечного каскада – “раскачать” последний каскад для получения заданного значения конечной мощности в нагрузке. Все остальные каскады называются каскадами предварительного усиления и работают, как правило, в режиме усиления напряжения.

Первый каскад также называют **входным каскадом**.

Основные параметры и характеристики усилителей

2. 1. Коэффициенты усиления (передачи)

б) Коэффициент усиления по току

В рабочем диапазоне частот рассматриваются только модули ТОКОВ:

$$K_i = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{ВЫХ } m}}{I_{\text{ВХ } m}}; \quad \text{в децибелах: } K_i, \text{ Дб} = 20 \lg K_i$$

с) Коэффициент усиления по

МОЩНОСТИ

В отличие от предыдущих коэффициентов усиления данный коэффициент усиления всегда больше единицы

$$K_P = \frac{P_H}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} > 1$$

$$K_P = K_I \cdot K_u = K_I^2 \frac{R_H}{R_{\text{ВХ}}} = K_U^2 \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_H}$$

$$\text{В децибелах: } K_P, \text{ Дб} = 10 \lg K_P$$

Основные параметры и характеристики усилителей

2. 1. Коэффициенты усиления (передачи)

d) Сквозной коэффициент

усиления

Учитывает влияние внутреннего сопротивления источника сигнала R_{Γ} на коэффициент усиления

$$\dot{K}_U^* = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{E}_{\Gamma}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} \cdot \frac{\dot{U}_{\text{ВХ}}}{\dot{E}_{\Gamma}} = \dot{K}_U \frac{\dot{I}_{\text{ВХ}} \underline{Z}_{\text{ВХ}}}{\dot{I}_{\text{ВХ}} (\underline{Z}_{\text{ВХ}} + \underline{Z}_{\Gamma})} = \dot{K}_U \frac{\underline{Z}_{\text{ВХ}}}{\underline{Z}_{\text{ВХ}} + \underline{Z}_{\Gamma}} \cong K_U \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}} + R_{\Gamma}}$$

Чем меньше R_{Γ} , тем ближе K_U^* к простому K_U

Основные параметры и характеристики усилителей

3. Коэффициент полезного действия (КПД) усилителя.

КПД есть отношение выходной мощности, переданной в нагрузку, к сумме всех мощностей, потребляемых от всех источников питания и смещения.

Данный параметр весьма важен для выходных и предоконечных каскадов:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_0} < 1$$

4. Линейные и нелинейные

искажения

Одним из требований, предъявляемых к усилителю является усиление сигналов без искажений.

Однако усилитель при усилении несколько изменяет форму усиливаемых сигналов.

Отклонения формы выходного сигнала от формы входного называют ***искажениями***.

Различают два типа искажений: ***линейные и нелинейные***.

4. Линейные и нелинейные

искажения а) **линейные** искажения

Наличие в усилительных каскадах реактивных элементов (разделительные конденсаторы, конденсаторы связи, разделительные трансформаторы, дроссели, конденсаторы в цепях термостабилизации рабочей точки, а также паразитные индуктивности и емкости) приводит к тому, что различные гармоники, входящие в спектр входного сигнала, усиливаются по-разному – с разным коэффициентом усиления и фазовым сдвигом. Это приводит к тому, что входной сигнал, проходя через усилитель, искажается, т.е. форма сложного по спектральному составу сигнала на выходе будет отличаться от формы входного сигнала.

Таким образом, усилитель вносит искажения, несмотря на то, что все элементы работают в линейном режиме.

Поэтому такие искажения называются **линейными искажениями** (т.к. их возникновение связано с линейными элементами электрической цепи).

4. Линейные и нелинейные

искажения а) **линейные** искажения

Линейные искажения оценивают с помощью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) или просто частотной характеристики, которая представляет собой зависимость модуля

$$\text{коэф} \frac{\dots}{\dots} \text{частоты:} \\ K_u = f(\omega)$$

Искажения формы выходного сигнала, вызываемые неодинаковым усилением гармоник различных частот, называют **частотными искажениями**.

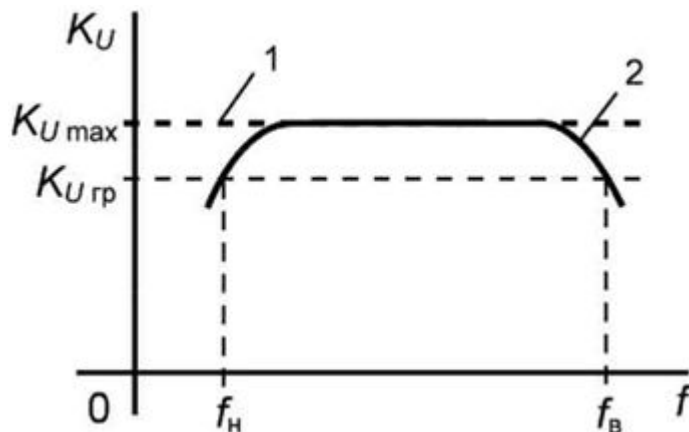
Искажения формы выходного сигнала, вызываемые разными фазовыми сдвигами гармоник усиливаемого сигнала, называют **фазовыми искажениями**.

Частотные и фазовые искажения - линейными искажениями.

4. Линейные и нелинейные

искажения а) линейные искажения

Типовая АЧХ усилителя переменного тока (RC-усилителя),
на вход которого подается гармонический сигнал.



АЧХ усилителя переменного
тока:

1 – идеального усилителя;

2 – реального усилителя

Диапазон частот, в пределах которого $K_U \geq K_{U \text{ гр}}$ называется **полосой усиления (пропускания) или рабочим диапазоном частот**.

На рисунке рабочий диапазон частот - от f_n до f_v .

Значение $K_{U \text{ гр}}$ называется **граничным коэффициентом усиления (передачи)**, который **опред**

$$K_{U \text{ гр}} = \frac{K_{U \max}}{\sqrt{2}} \cong 0,707 K_{U \max}$$

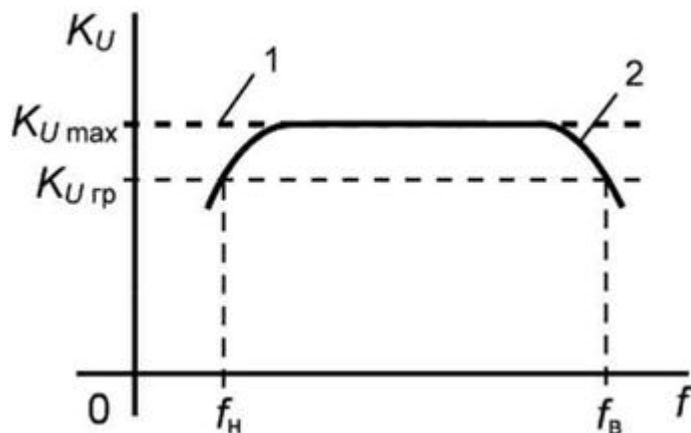
Частота, на которой $K_U = K_{U \text{ гр}}$ называется **граничной частотой**.

f_n - нижняя граничная частота,

f_v - верхняя граничная частота.

4. Линейные и нелинейные

искажения а) линейные искажения



АЧХ усилителя переменного тока:

- 1 – идеального усилителя;
- 2 – реального усилителя.

Диапазон частот, где $K_U < K_{U гр}$ называется **полосой подавления в пределах которой усилитель не усиливает либо усиливает с малым K_U .**

Видно, что АЧХ реального усилителя неравномерная, т.е. коэффициент усиления для разных частот неодинаков.

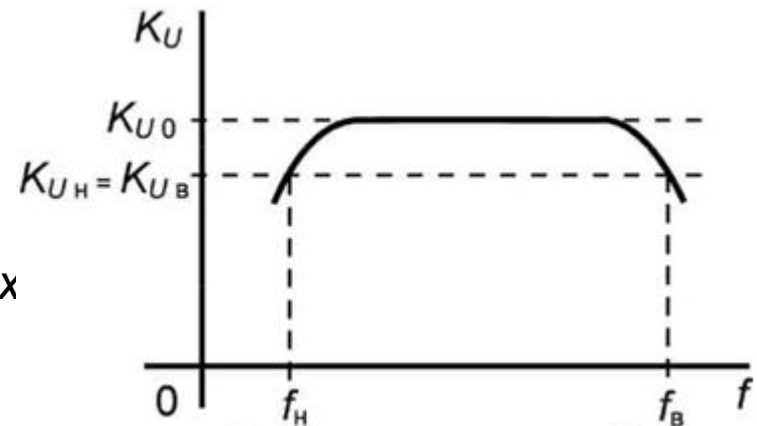
4. Линейные и нелинейные

искажения а) линейные искажения

Неравномерность АЧХ усилителя оценивают с помощью **коэффициента частотных искажений**.

$$M_H = \frac{K_{U0}}{K_{UH}}; \quad M_B = \frac{K_{U0}}{K_{UB}}$$

где K_{U0} – коэффициент усиления на средних частотах (в данном случае $K_{U0} = K_{Umax}$);



K_{UH} , K_{UB} – значение коэффициентов усиления на граничных частотах f_H и f_B , соответственно; (K_U может быть задан на любых других частотах и тогда это специально оговаривается); M_H и M_B – задаются для граничных частот f_H и f_B (или для специально оговоренных частот); Частотные искажения выражаются в относительных единицах либо в децибелах:

$$M_H \text{ Лб} = 20 \lg M_H \quad M_B \text{ Лб} = 20 \lg M_B$$

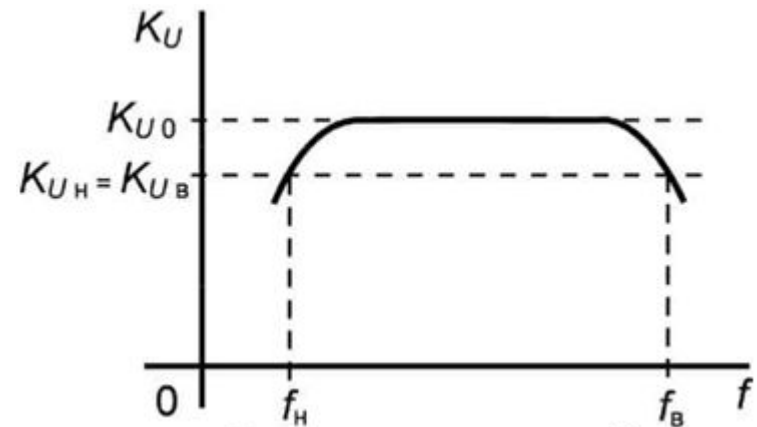
4. Линейные и нелинейные

искажения а) линейные искажения

Неравномерность АЧХ усилителя оценивают с помощью **коэффициента частотных искажений**.

Если нет специальных оговорок, то значения коэффициента частотных искажений принимают:

$$M_H = M_B = \sqrt{2} \cong 1,41 \equiv 3\text{Дб}$$



Для УНЧ в зависимости от качества прибора коэффициент частотных искажений может лежать в диапазоне 1.6 дБ. Если усилитель применяется в измерительных устройствах, значения коэффициентов частотных искажений могут составлять десятые и сотые доли Дб.

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ)

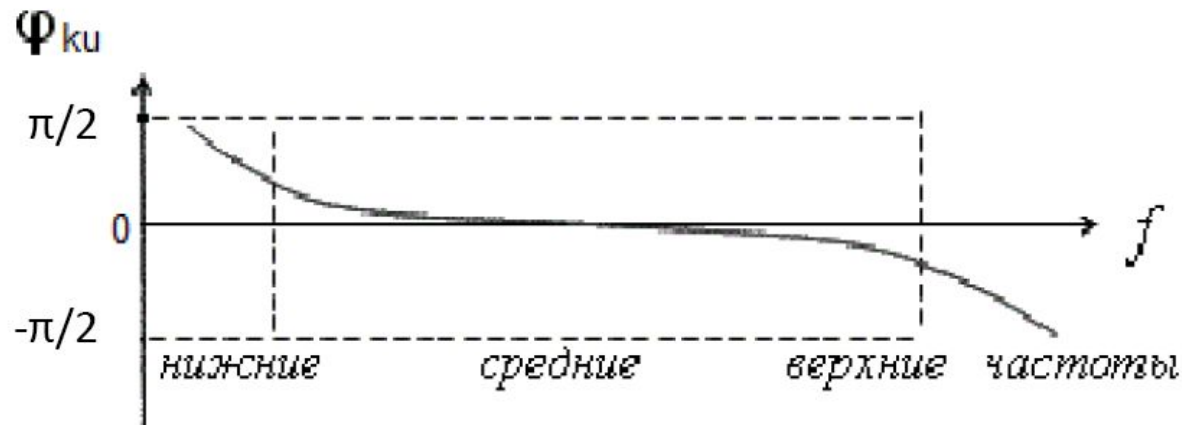
В усилительной технике ФЧХ могут называть *фазовой характеристикой*.

ФЧХ – зависимость фазового сдвига между входным и выходным сигналами от частоты:

$$\varphi_{KU} = f(\omega); \quad \varphi_{KU} = \varphi_{U_{\text{ВЫХ}}} - \varphi_{U_{\text{ВХ}}}.$$

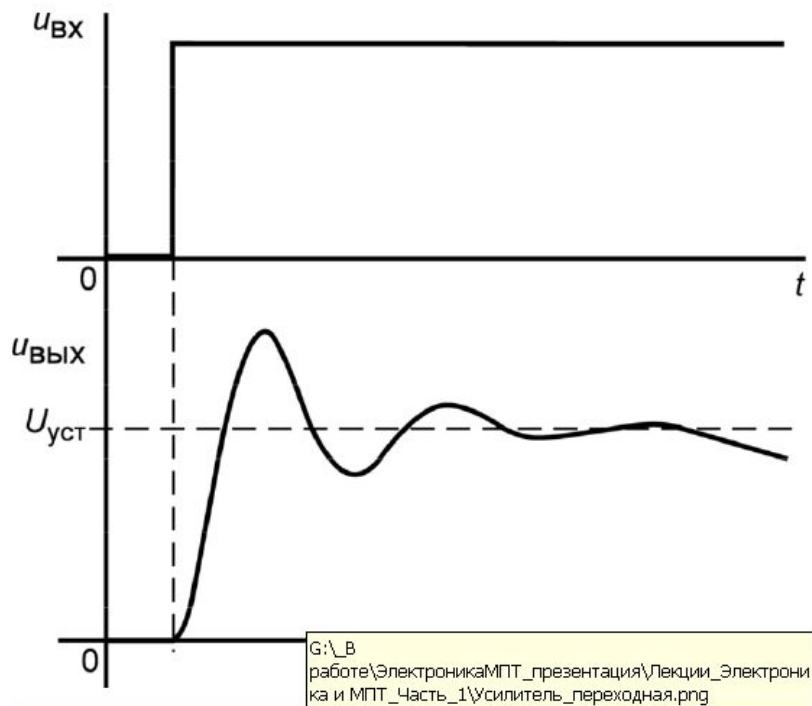
ФЧХ, как правило, строится в линейном масштабе в отличие от АЧХ.

ФЧХ отражает влияние реактивных элементов усилителя на фазовый сдвиг φ_{KU} при изменении частоты усиливаемого сигнала.



Из рисунка видно, что фазовые сдвиги проявляются на низких и верхних частотах, на средних частотах фазовый сдвиг практически отсутствует. Наличие фазового сдвига является искажением.

Переходная характеристика (ПХ)



Представляет собой зависимость мгновенного значения выходного напряжения усилителя от времени при подаче на вход усилителя скачка напряжения - $U_{\text{ВЫХ}} = f(t)$.

Переходной характеристикой обычно пользуются при исследовании частотных свойств импульсных усилителей и по ней определяют искажения формы импульсных сигналов, которые могут возникнуть в результате усиления.

Данная характеристика является диаграммой переходного процесса, происходящего в самом усилителе при усилении импульсных сигналов.

Видно, что выходной сигнал претерпевает изменения (искажения), которые называются **переходными** и обусловлены наличием линейных реактивных элементов в усилителе, а потому являются линейными искажениями.

АЧХ, ФЧХ и переходная характеристика однозначно связаны друг с другом, т.к. обусловлены влиянием реактивных элементов.

в) нелинейные искажения

Нелинейными искажениями называют искажения формы выходного сигнала, обусловленные нелинейностью входных и выходных характеристик усилительных элементов (транзисторов). Кроме того, нелинейность может появляться из-за нелинейности кривых намагничивания магнитопроводов трансформаторов и дросселей, применяемых в усилителях в качестве элементов связи.

Нелинейные искажения оценивают с помощью коэффициента гармоник

Коэффициент гармоник всегда находится при подаче на вход усилителя чистого гармонического сигнала и активном сопротивлении нагрузки.

Допустимая величина коэффициента гармоник зависит от назначения усилителя. Так, в усилителях для высококачественного усиления речи и музыки допустимый коэффициент гармоник порядка 1-2%; в таких же усилителях среднего качества –5-8%

5. Амплитудная характеристика

Амплитудная характеристика

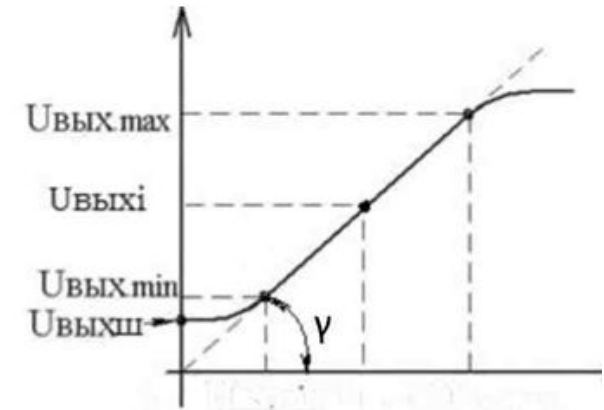
представляет собой зависимость установившегося значения выходного напряжения от входного:

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}).$$

Могут использоваться либо действующее, либо амплитудные значения.

В идеальном случае амплитудная характеристика представляет собой прямую линию, проходящую через начало

координат. Амплитудная характеристика совпадает с идеальной только на некотором рабочем участке от $U_{\text{вх min}}$ до $U_{\text{вх max}}$. Если $U_{\text{вх}} > U_{\text{вх max}}$ линейность характеристики нарушается и наступает режим насыщения, когда увеличение $U_{\text{вх}}$ не приводит к увеличению $U_{\text{вых}}$. В это время усилительный элемент начинает работать на нелинейном участке ВАХ, форма выходного сигнала сильно искажается и возрастание $U_{\text{вых}}$ прекращается, несмотря на рост $U_{\text{вх}}$.



5. Амплитудная характеристика

характеристика

При малых значениях $U_{вх}$, когда $U_{вх} < U_{вх\ min}$ линейность характеристики нарушается, что связано с наличием собственных шумов усилительного каскада. Даже при закороченных входных зажимах, когда $U_{вх} = 0$, на выходе присутствует паразитное напряжение, которое называется шумовым, в этом случае говорят, что каскад шумит.

Существуют вполне определенный диапазон значений входного и выходного напряжений, при которых усилитель нормально выполняет свои функции.

Отношение $U_{вх\ max}$ к $U_{вх\ min}$ называется динамическим диапазоном усилителя

Для нормальной работы системы: источник сигнала – усилитель, динамический диапазон сигнала должен быть меньше, чем динамический диапазон усилителя, причем $U_{с\ min} \geq U_{вх\ min}$, $D_y > D_c$.

Контрольные вопросы

1. Что такое усилитель
2. Для каких целей применяются усилители электрических сигналов
3. Перечислите основные параметры усилителей
4. Линейные искажения (что это?)
5. Нелинейные искажения (что это?)
6. Что такое амплитудная характеристика и зачем она требуется