

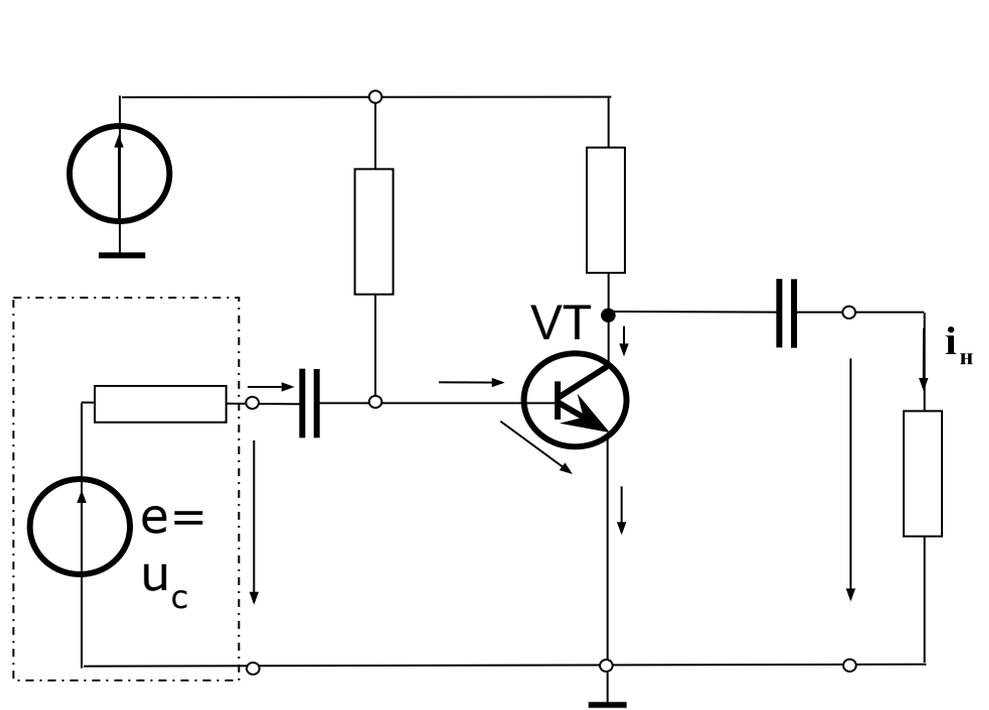
Лекция 16

Тема: Усилители.
Многокаскадные усилители

Пример задачи на однокаскадный усилитель

Пример 2

- Дано:



- Входное сопротивление усилительного каскада
- Выходное сопротивление усилителя

- Коэффициент усиления по напряжению
- Коэффициент усиления по току

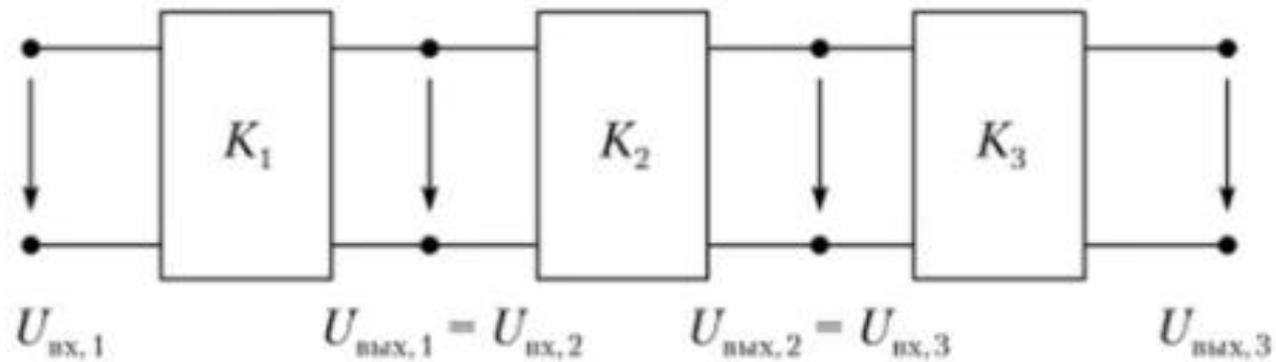
- Коэффициент усиления по мощности
- Выходное напряжение

Многокаскадные усилители

Определение

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

Структурная схема МКУ



Коэффициенты усиления (передачи)

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

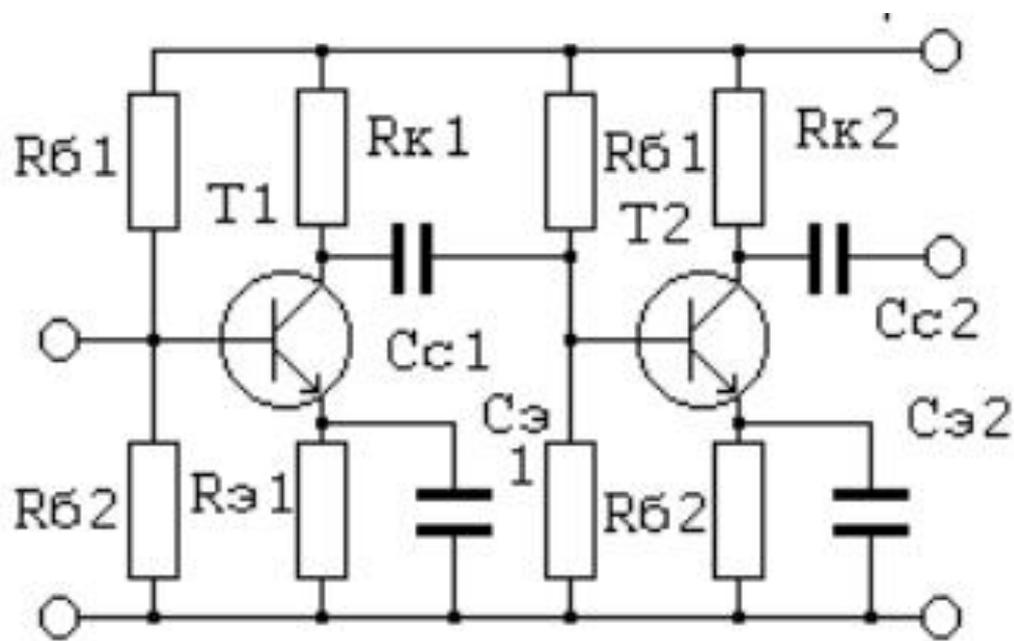
Коэффициентом усиления называется отношение установившегося значения какого-либо параметра сигнала на выходе к установившемуся значению на входе. Как правило, коэффициенты усиления находятся для гармонического сигнала.

- **Коэффициент усиления по напряжению МКУ:**

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3} \dots K_{un}$$

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

Схема двухкаскадного усилителя



Состав МКУ



Структурная схема многокаскадного усилителя:

- ВхКУ – входной каскад усиления;
- ПОКУ – предоконечный каскад усиления;
- УМ – усилитель мощности

Последний каскад вырабатывает мощность в нагрузку, является **услителем 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**.

- Коэффициент усиления по току МКУ:

$$\dot{K}_i = \frac{\dot{I}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{I}_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} e^{j(\varphi_{I_{\text{ВЫХ}}} - \varphi_{I_{\text{ВХ}}})} = K_i e^{j\varphi_{K_i}}$$

- В рабочем диапазоне частот рассматриваются только модули токов:

$$K_i = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{ВЫХ } m}}{I_{\text{ВХ } m}}$$

в децибелах: $K_i, \text{Дб} = 20 \lg K_i$

- Коэффициент усиления по мощности МКУ:

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

- В отличие от предыдущих коэффициентов усиления данный КУ всегда **больше единицы**.

$$K_P = \frac{P_H}{P_{BX}} = \frac{I_{ВЫХ}}{I_{BX}} \cdot \frac{U_{ВЫХ}}{U_{BX}} = K_I \cdot K_U$$

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{BX}} = \frac{I_{ВЫХ} \cdot R_H}{I_{BX} \cdot R_{BX}} = K_I \frac{R_H}{R_{BX}}$$

$$K_P = K_I \cdot K_U = K_I^2 \frac{R_H}{R_{BX}} = K_U^2 \frac{R_{BX}}{R_H}$$

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

- Сквозной коэффициент усиления МКУ:

- 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 .

- КПД МКУ:

- Для усиления экономичности работы усилителей используют коэффициент полезного действия 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:

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

Линейные и нелинейные искажения

- Одним из требований, предъявляемых к усилителю является усиление сигналов без искажений. Однако усилитель при усилении несколько изменяет форму усиливаемых сигналов.

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

Различают 2 типа искажений:

- ЛИНЕЙНЫЕ
- НЕЛИНЕЙНЫЕ

Линейные искажения

- Наличие в усилительных каскадах реактивных элементов 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)

Линейные искажения

- оценивают с помощью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) или просто частотной характеристики, которая представляет собой зависимость модуля коэффициента от частоты:

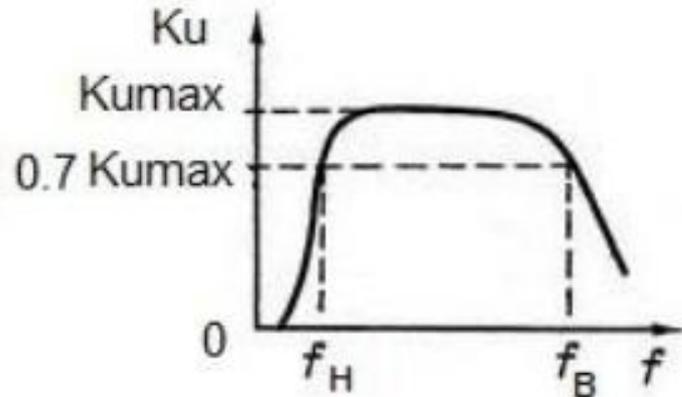
$$K_u = f(\omega)$$

- 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**.

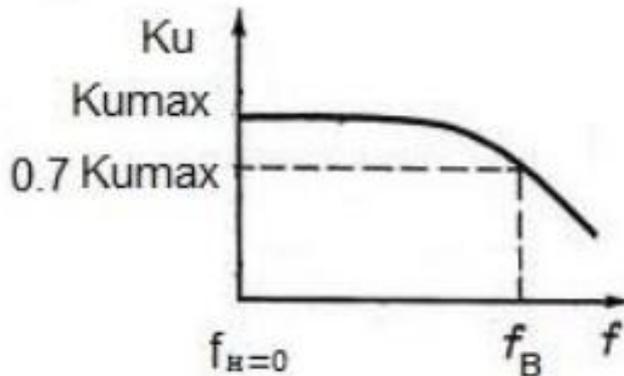
АЧХ

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

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



АЧХ усилителя переменного тока



АЧХ усилителя постоянного тока

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

f_H - нижняя граничная частота,
 f_B - верхняя граничная частота.

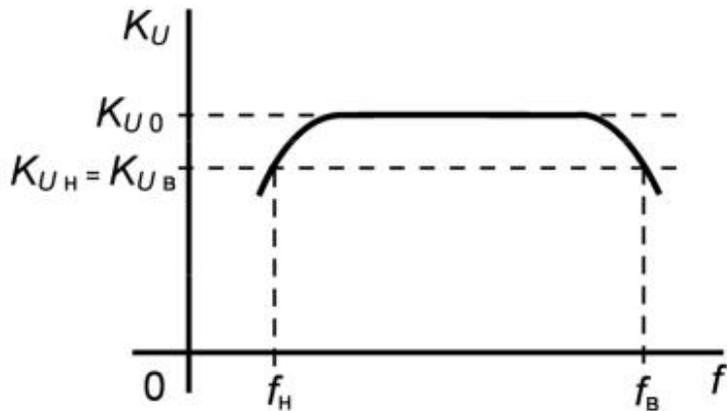
Диапазон частот, в пределах которого $K_U \geq K_{U\text{ гр}}$ называется **полосой усиления** (пропускания) или **рабочим диапазоном частот**.

На рисунке рабочий диапазон частот - от f_H до f_B

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

АЧХ

- 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 $K_{U0} = K_{U \max}$)

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 .

Частотные искажения выражаются в относительных единицах либо в децибелах: M_H , Дб = $20 \lg M_H$, M_B , Дб = $20 \lg M_B$.

Если нет специальных оговорок, то частотных искажений принимаем $M_H = M_B = \sqrt{2} \cong 1,41 \cong 3 \text{ Дб}$.

ФЧХ

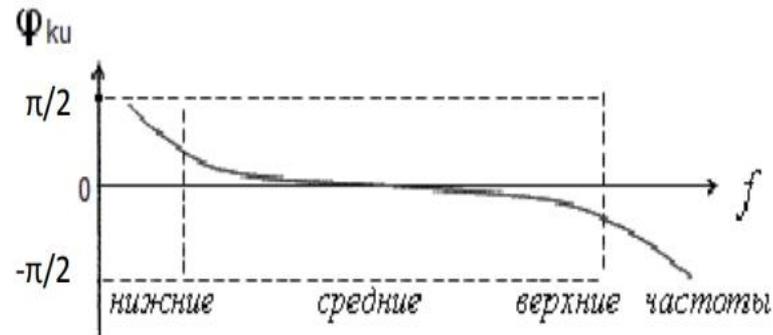
В усилительной технике ФЧХ могут называть **фазовой характеристикой**.

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

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

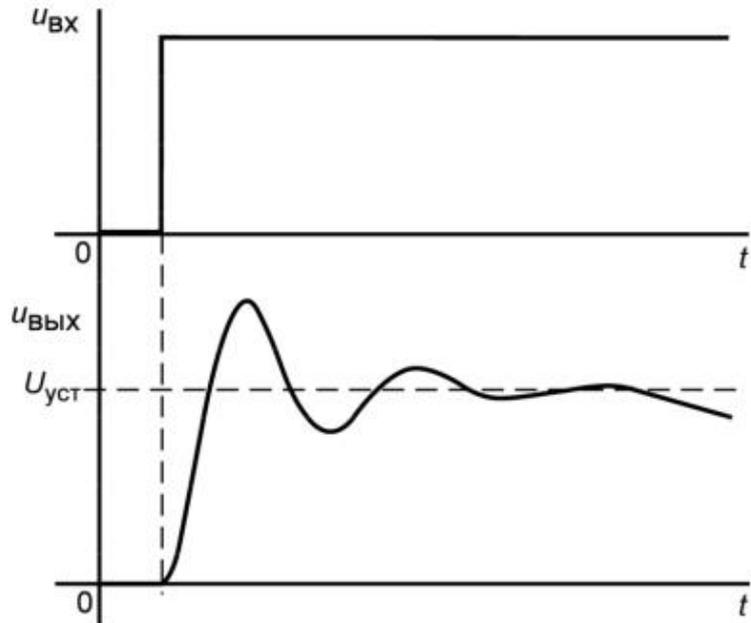
ФЧХ, как правило, строится в линейном масштабе в отличие от АЧХ.

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.

Нелинейные искажения

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:

$$K_r = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \quad K_r, \% = 100 \cdot K_r$$

где I_i , U_i – действующее, либо максимальное значение высших гармоник, входящих в спектр рассматриваемого сигнала;

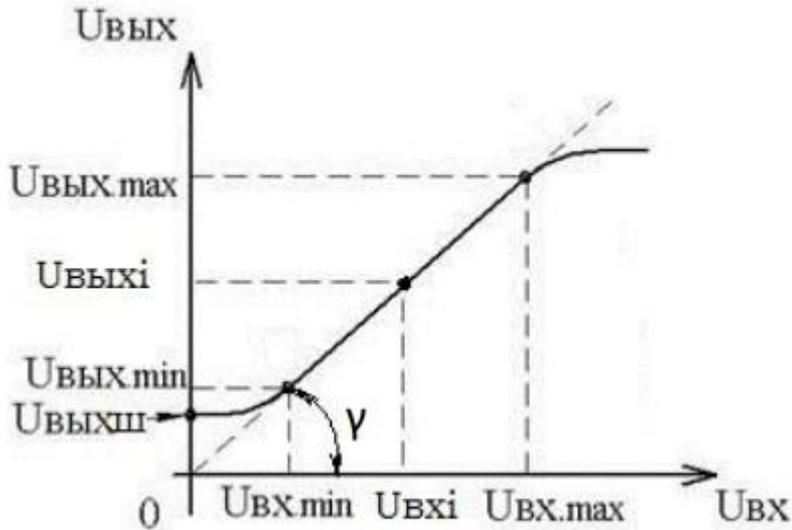
I_1 , U_1 – действующее, либо максимальное значение первой (основной) гармоники рассматриваемого сигнала.

Нелинейные искажения

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

- В лучшем случае $K_g = 0\%$.
- 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%.

Амплитудная характеристика



представляет собой зависимость установившегося значения выходного напряжения от входного:

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

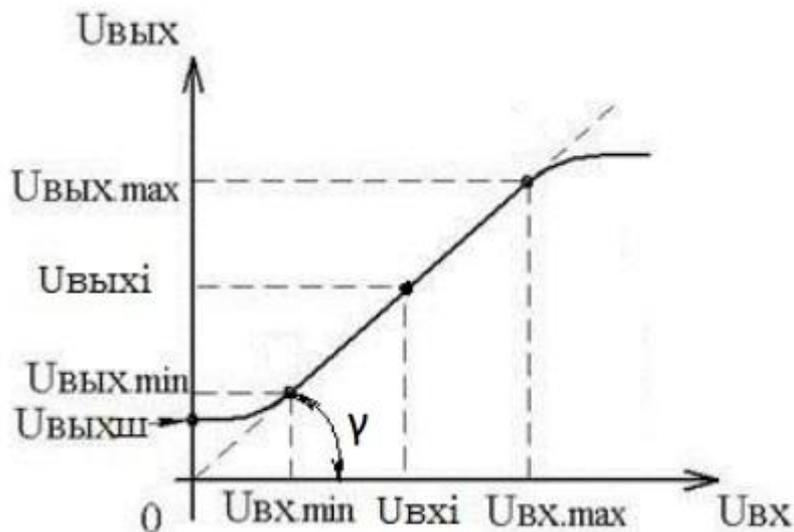
Могут использоваться либо действующее, либо амплитудные значения.

В идеальном случае амплитудная характеристика представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат под углом:

$$\gamma = \arctg K_U = \arctg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$$

Реальная 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 $U_{\text{вх}}$.

Амплитудная 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.

Данное выходное шумовое напряжение пересчитывают к входу каскада:

$$U_{Ш} = \frac{U_{ВЫХ\ Ш}}{K_U}$$

Динамический диапазон усилителя

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

Отношение $U_{\text{вх max}}$ к $U_{\text{вх min}}$

$$D_y = \frac{U_{\text{вх max}}}{U_{\text{вх min}}} = \frac{U_{\text{вых max}}}{U_{\text{вых min}}}$$

Входной сигнал меняется в некотором диапазоне, который называется динамическим диапазоном сигнала

$$D_c = \frac{U_{\text{с max}}}{U_{\text{с min}}}$$