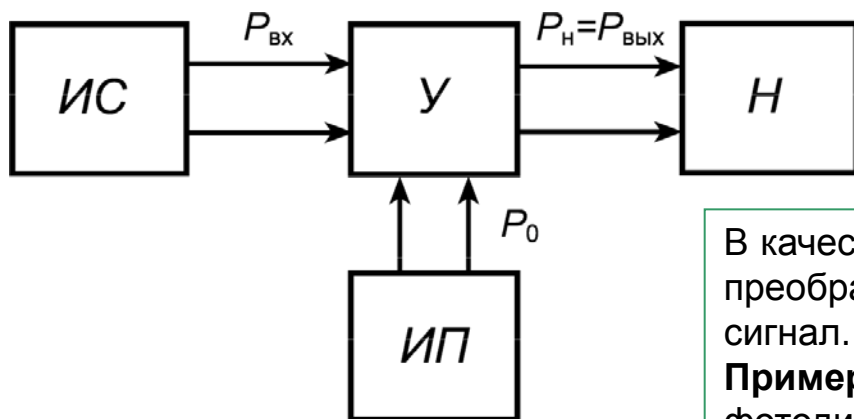


Усилители электрических сигналов

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

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

Структурная схема усилителя



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

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.

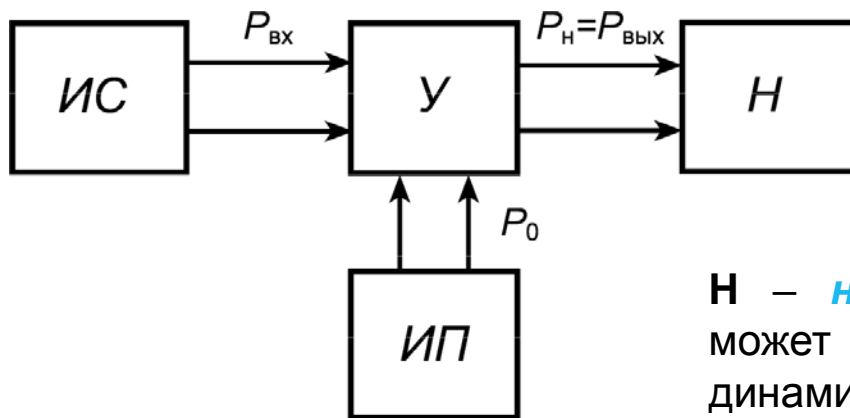
Сам **усилитель (У)** потребляет от источника питания мощность P_0 (**потребляемая мощность**) и передает в нагрузку выходную мощность $P_{\text{вых}}$ (или мощность нагрузки $P_{\text{н}}$).

В общем случае всегда выполняется неравенство:

$$P_0 > P_{\text{н}} > P_{\text{вх}},$$

то есть коэффициент полезного действия усилителя получается меньше единицы:

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



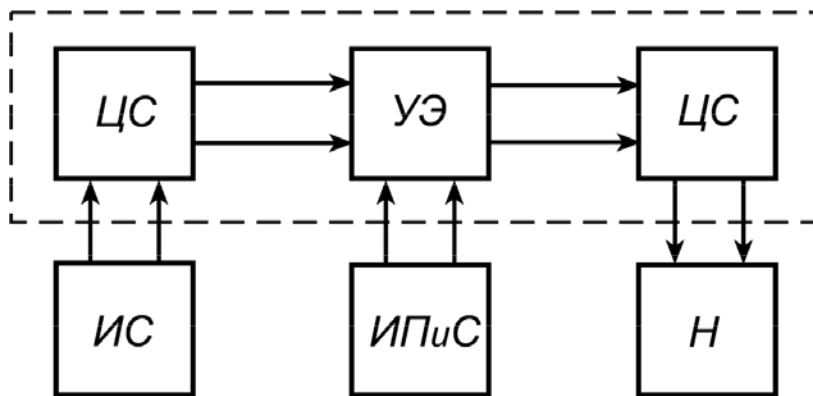
ИП – **источник питания**

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

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, помехоподавляющие функции

Для создания (смещения) рабочей точки УЭ применяются специальные источники смещения, в качестве которых применяется тот же самый ИПиС в комбинации со специальными делителями напряжения.

Классификация усилителей

В основе классификации лежит множество признаков:

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.

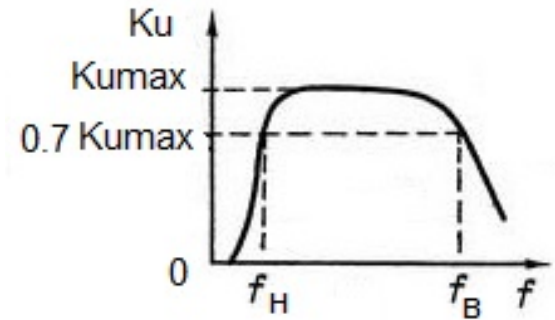
II. По диапазону усиливаемых частот:

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 $f_H = 20\text{Гц}$ до $f_B \approx 20\text{кГц}$;
4. **усилители высокой частоты (УВЧ)** - усиливают в диапазоне от десятков кГц до сотен МГц;
5. **широкополосные усилители** - все усилители у которых

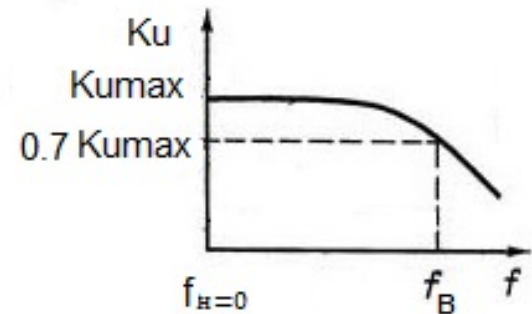
$$\frac{f_B}{f_H} \geq 1000;$$

6. **избирательные усилители** - усилители, у которых

$$\frac{f_B}{f_H} \leq 1,1.$$



АЧХ усилителя
переменного тока



АЧХ усилителя
постоянного тока

Классификация усилителей (продолжение)

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.

IV. По соотношению между внутренним сопротивлением источника сигнала R_{Γ} , сопротивлением нагрузки $R_{\text{Н}}$, входным сопротивлением $R_{\text{ВХ}}$ и выходным сопротивлением $R_{\text{ВЫХ}}$:

1. усилители напряжения ($R_{\Gamma} \ll R_{\text{ВХ}}$, $R_{\text{ВЫХ}} \ll R_{\text{Н}}$);
2. усилители тока ($R_{\Gamma} \gg R_{\text{ВХ}}$, $R_{\text{ВЫХ}} \gg R_{\text{Н}}$);
3. усилители мощности ($R_{\Gamma} \approx R_{\text{ВХ}}$, $R_{\text{ВЫХ}} \approx R_{\text{Н}}$).

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

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).



Усилитель мощности на полевых транзисторах



Усилитель мощности на полевых транзисторах

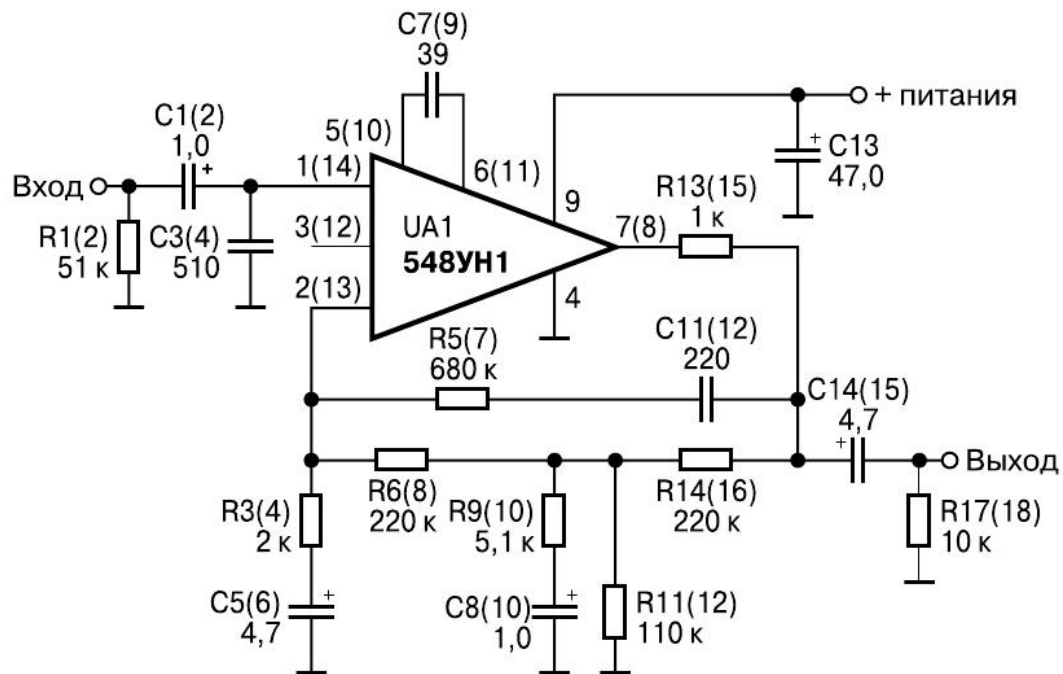
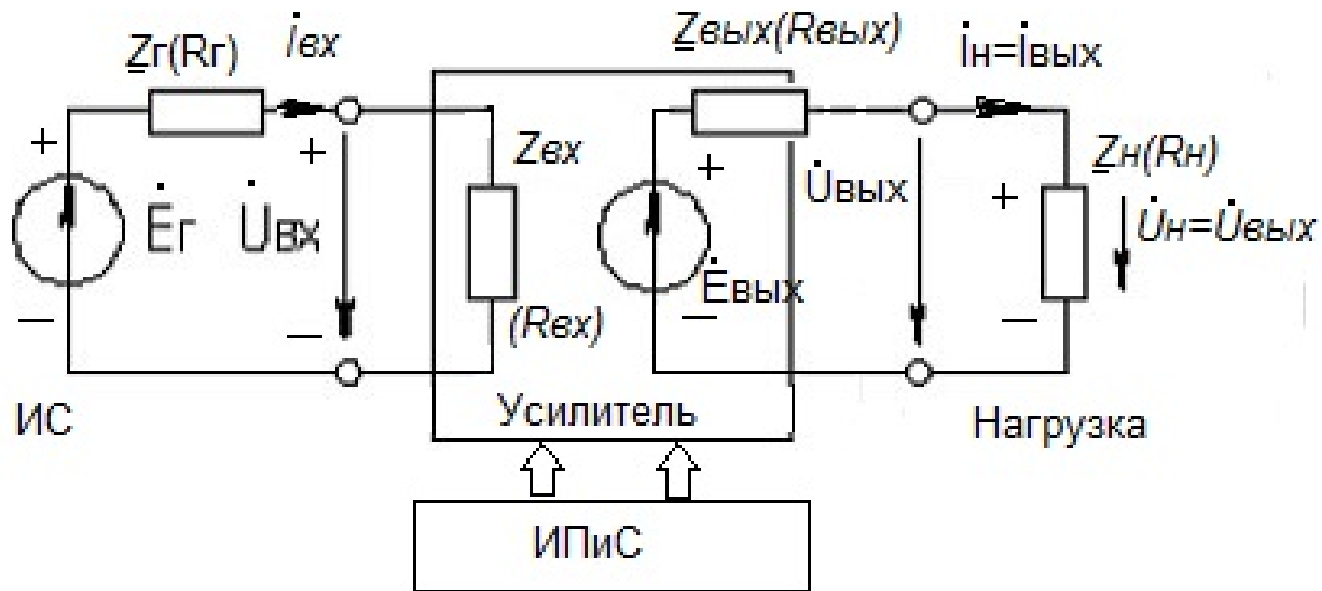


Схема усилителя на ИМС

Основные параметры и характеристики усилителей

Для рассмотрения параметров воспользуемся простейшей функциональной схемой усилителя.



Функциональная схема усилителя

1. Входные и выходные параметры усилителя

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:

$U_{\text{ВХ}}$, $I_{\text{ВХ}}$ – номинальное входное напряжение либо номинальный входной ток, при которых усилитель отдает в заданную нагрузку требуемые техническим заданием (ТЗ) мощность

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{Н}} \text{ (или } U_{\text{ВЫХ}} \text{ и } I_{\text{ВЫХ}});$$

$P_{\text{ВХ}}$ – входная мощность сигнала;

Входное сопротивление усилителя:

$$\underline{Z}_{\text{ВХ}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВХ}}}{\dot{I}_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}} e^{j(\varphi_{U_{\text{ВХ}}} - \varphi_{I_{\text{ВХ}}})} = Z_{\text{ВХ}} e^{j\varphi_{Z_{\text{ВХ}}}}$$

Часто в рабочей полосе частот комплексностью сопротивления пренебрегают, полагая, что входное сопротивление носит чисто активный характер – $R_{\text{ВХ}}$.

Это существенно облегчает анализ и расчеты.

К входным параметрам усилителя часто относят ЭДС источника сигнала и его внутреннее сопротивление. С учетом $R_{\text{Г}}$ и $R_{\text{ВХ}}$ входное напряжение определяется:

$$U_{\text{ВХ}} = E_{\text{Г}} \cdot \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{Г}} + R_{\text{ВХ}}} = E_{\text{Г}} \cdot K_{\text{Д}} \quad K_{\text{Д}} - \text{коэффициент деления делителя, образованного } R_{\text{Г}} \text{ и } R_{\text{Н}}$$

Пренебрегая комплексностью параметров, можно получить следующие соотношения:

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

Выходные параметры

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

К выходным параметрам усилителя относятся:

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

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

Выходное сопротивление усилителя:

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

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

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

Выходное сопротивление характеризует наклон нагрузочной прямой (характеристики).

Пренебрегая комплексностью параметров, можно получить следующие соотношения:

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



Внешняя (или нагрузочная) характеристика

2. 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.

а) **Коэффициент усиления по напряжению:**

$$\dot{K}_u = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} e^{j(\varphi_{U_{\text{ВЫХ}}} - \varphi_{U_{\text{ВХ}}})} = K_u e^{j\varphi_{K_u}}$$

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:

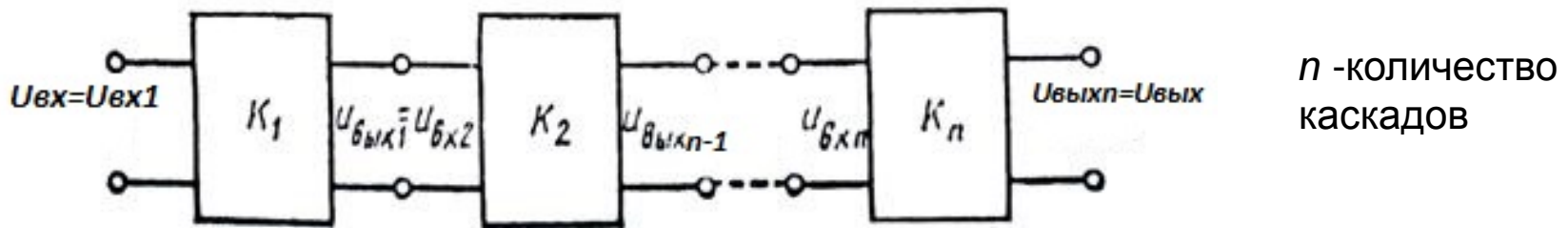
$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ } m}}{U_{\text{ВХ } m}}$$

Поскольку восприятие органов чувств подчиняется логарифмическому закону, на практике модуль коэффициента усиления часто выражают в логарифмических единицах – децибелах: $K_U, \text{Дб} = 20\lg K_U$.

Многокаскадные усилители

Коэффициент усиления одного каскада относительно невелик ≈ 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 многокаскадного усилителя

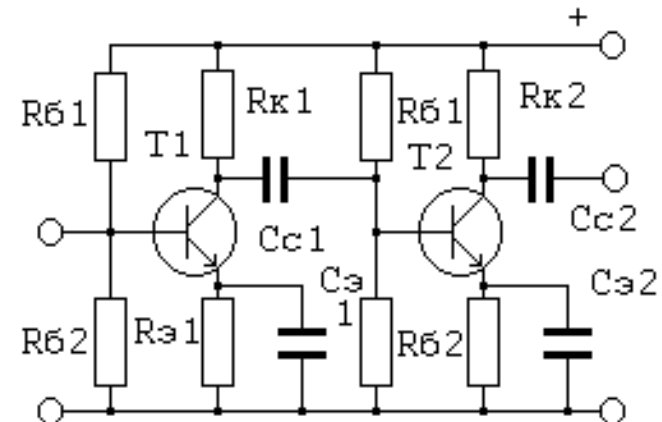


Коэффициент усиления по напряжению многокаскадного усилителя:

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

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

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



Двухкаскадный усилитель

Состав многокаскадного усилителя



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**.

б) Коэффициент усиления по току

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

В рабочем диапазоне частот рассматриваются только модули токов:

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

с) Коэффициент усиления по мощности

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

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

Это связано с тем, что любой усилитель в конце концов усиливает сигнал по мощности.

Например, трансформатор может усиливать либо по U либо по I в зависимости от коэффициента трансформации, но его $K_P < 1$ в отличие от усилителя.

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

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

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

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

д) 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 .

3. Коэффициент полезного действия (КПД) усилителя.

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:

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

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**.

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).

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

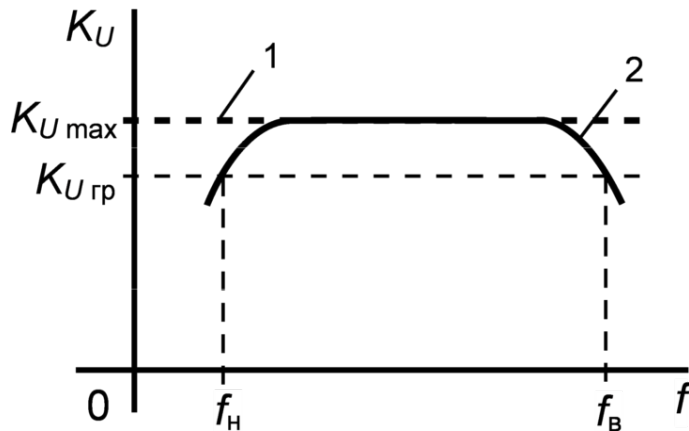
$$K_u = f(\omega).$$

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.

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



АЧХ усилителя переменного тока:
1 – идеального усилителя;
2 – реального усилителя.

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

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

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

$f_н$ - нижняя граничная частота,
 $f_в$ - верхняя граничная частота.

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

На рисунке рабочий диапазон частот - от $f_н$ до $f_в$.

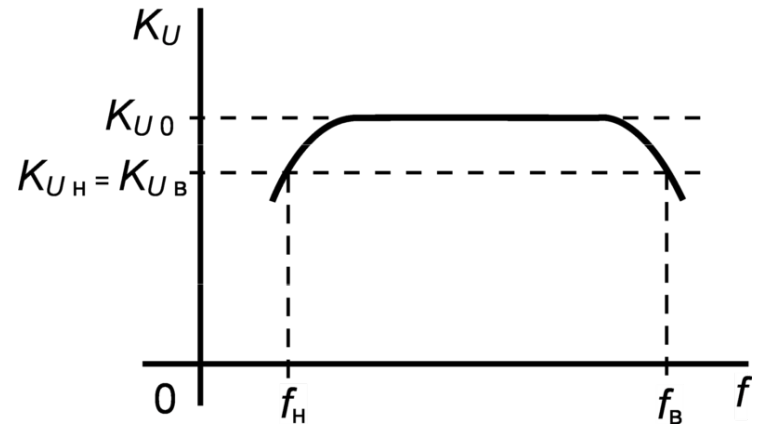
Диапазон частот, где $K_U < K_{U гр}$ называется **полосой подавления** в пределах которой усилитель не усиливает либо усиливает с малым K_U .

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

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 (или для специально оговоренных частот);

Частотные искажения выражаются в относительных единицах либо в децибелах:

$$M_H, \text{ Дб} = 20\lg M_H, \quad M_B, \text{ Дб} = 20\lg M_B.$$

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, значение коэффициентов частотных искажений могут составлять десятые и сотые доли дБ.

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ)

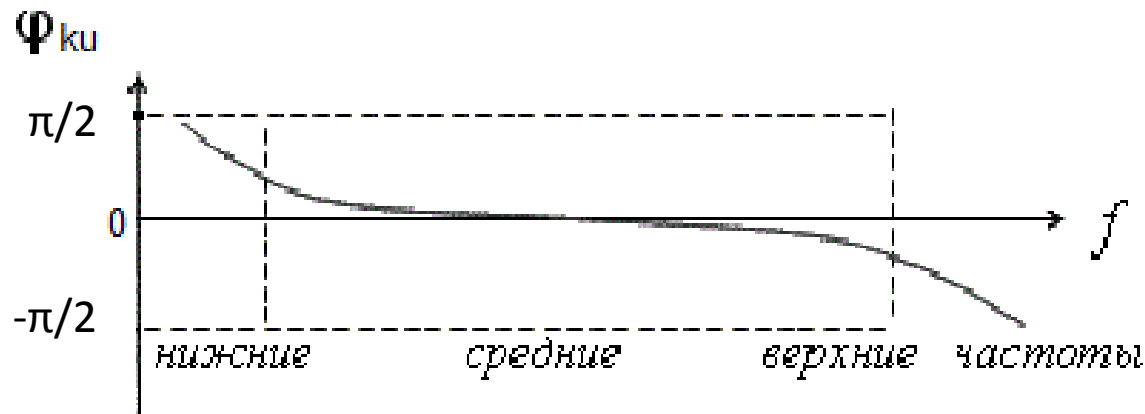
В усилительной технике ФЧХ могут называть **фазовой характеристикой**.

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

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

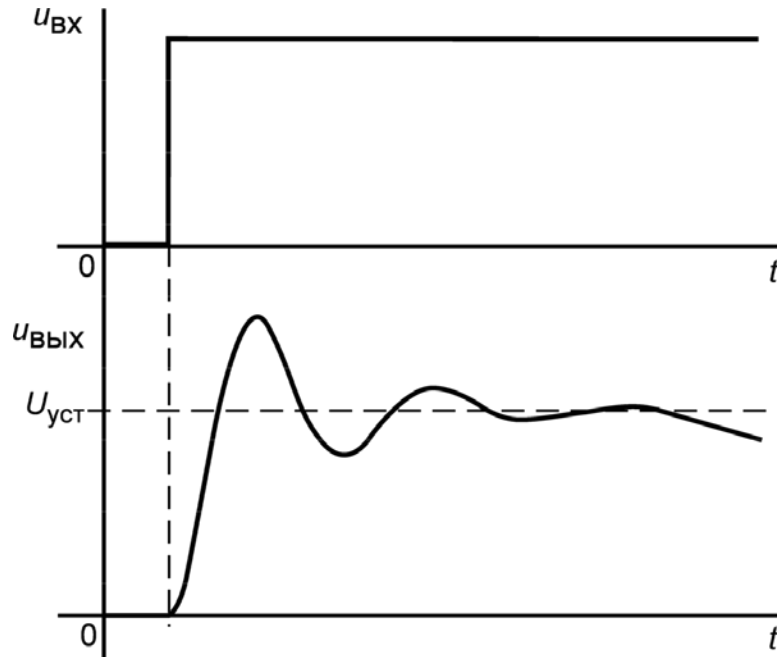
ФЧХ, как правило, строится в линейном масштабе в отличие от АЧХ.

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 - $U_{ВЫХ} = f(t)$.

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.

б) 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:

$$K_r = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1}.$$

$K_r, \% = 100 \cdot K_r$

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.

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

В лучшем случае $K_r = 0\%$.

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%.

5. Амплитудная характеристика

Амплитудная характеристика представляет собой зависимость установившегося значения выходного напряжения от входного:

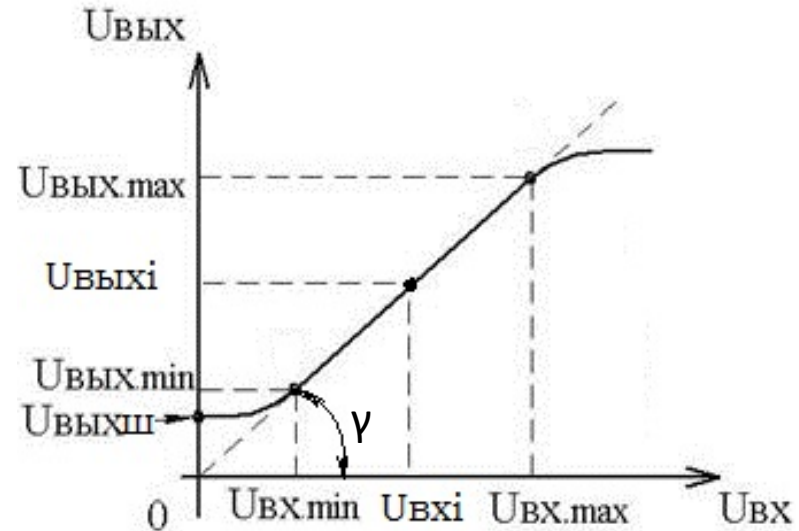
$$U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}}).$$

Могут использоваться либо действующее, либо амплитудные значения.

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

$$\gamma = \arctg K_U = \arctg \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}},$$

т.е. $U_{\text{ВЫХ}} = K_U \cdot U_{\text{ВХ}}$ каждому значению $U_{\text{ВХ}}$ соответствует вполне определенное значение $U_{\text{ВЫХ}}$.



Амплитудная характеристика

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 $U_{\text{ВХ}}$.

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

Данное выходное шумовое напряжение пересчитывают к входу каскада:

$$U_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{вых ш}}}{K_U}$$

Существуют вполне определенный диапазон значений входного и выходного напряжений, при которых усилитель нормально выполняет свои функции. Отношение $U_{\text{вх max}}$ к $U_{\text{вх min}}$ называется **динамическим диапазоном усилителя**:

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

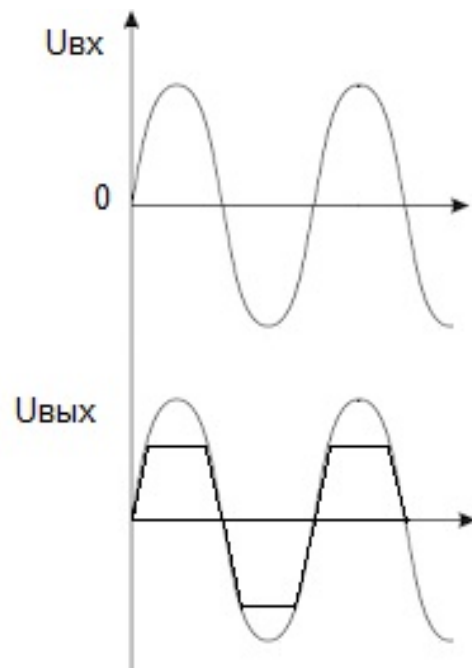
Для нормальной работы системы: источник сигнала – усилитель, динамический диапазон сигнала должен быть меньше, чем динамический диапазон усилителя, причем $U_{\text{с min}} \geq U_{\text{вх min}}$, $D_y > D_c$.

Динамические диапазоны могут быть заданы в Дб:

$$D_y, \text{Дб} = 20 \lg D_y; D_c, \text{Дб} = 20 \lg D_c.$$

Поскольку входной сигнал тоже меняется в некотором диапазоне от $U_{\text{с min}}$ до $U_{\text{с max}}$, поэтому есть смысл говорить о динамическом диапазоне сигнала:

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



*Пример возникновения
нелинейных искажений*

На рисунке выходное напряжение ограничивается при положительной и отрицательной полярности. Это связано с тем, что при усилении усилитель заходит в область насыщения и поэтому наступает ограничение.

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2008. – 798 с.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов — Москва: Альянс, 2013. — 496 с.
3. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: Учебное пособие. – Изд. 8-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 703 с.

Принцип действия усилительного каскада на биполярном транзисторе

Принцип построения усилительных каскадов

Базовым звеном любого усилителя является **усилительный каскад (УК)**.

Несмотря на разнообразие схем усилительных каскадов (число транзисторов, режимы работы транзисторов) для усиления переменного сигнала принцип построения главных цепей усилительных каскадов один и тот же.

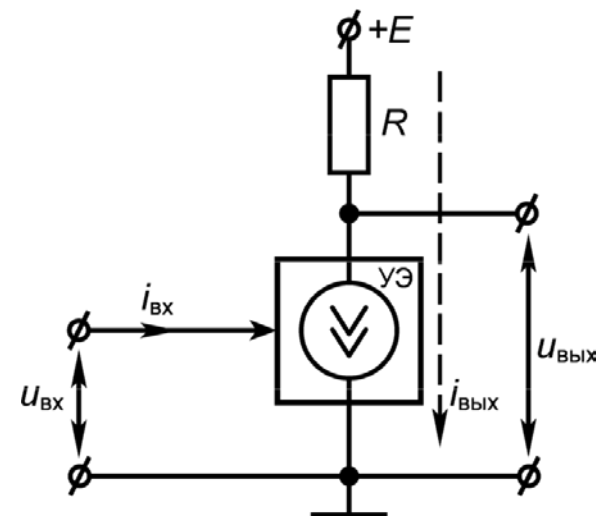
Для рассмотрения принципа построения УК на одном транзисторе воспользуемся функциональной схемой (см. рис.).

Главные элементы каскада - усилительный элемент (УЭ) и резистор R .

В качестве УЭ может использоваться биполярный или полевым транзистором.

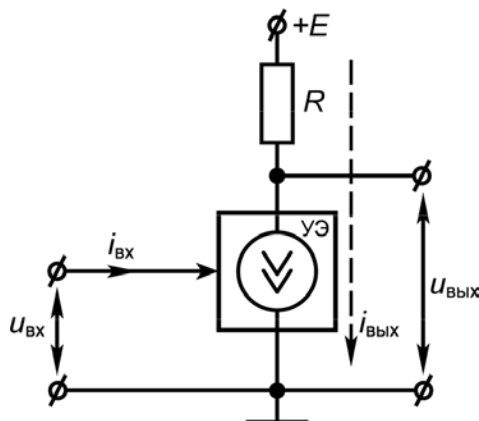
R – технологически необходимое сопротивление (задает динамический режим работы), при отсутствии которого (например, $R = 0$) выходное напряжение не меняется.

Эти элементы вместе с источником питания E образуют **выходную цепь каскада**.

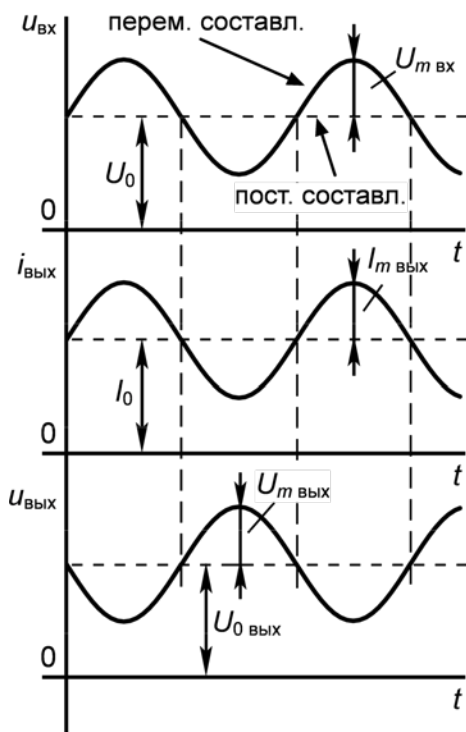


Функциональная схема
усилительного каскада

Усилительный элемент представляет собой источник тока, управляемый током $I_{\text{вх}}$ (для биполярного транзистора), либо источник тока, управляемый напряжением $U_{\text{вх}}$ (для полевого транзистора)



Функциональная схема
усилительного каскада



Диаграммы тока и
напряжений в УК

Процесс усиления основан на преобразовании энергии источника питания E (постоянного напряжения) в энергию переменного выходного сигнала за счет изменения тока $i_{\text{ВЫХ}}$ в выходной цепи по закону, задаваемому входным сигналом.

Выходной сигнал $U_{\text{ВЫХ}}$ может сниматься как с резистора R , так и с усилительного элемента. Если $U_{\text{ВЫХ}}$ снимается с R :

$$u_R \uparrow = u_{\text{ВЫХ}} \uparrow = i_{\text{ВЫХ}} \uparrow \cdot R \quad \text{- выходной сигнал синфазен выходному току}$$

Если $U_{\text{ВЫХ}}$ снимается с УЭ:

$$u_{\text{ВЫХ}} \downarrow = E - i_{\text{ВЫХ}} \uparrow \cdot R \quad \text{- выходной сигнал противофазен выходному току}$$

Следует отметить, что $i_{\text{ВЫХ}}$ - однонаправленный ток поэтому данный УК может усиливать только однополярный сигнал.

Как усилить двухполярный сигнал?

Необходимо преобразовать двухполярный сигнал в однополярный, добавив к входному сигналу постоянную составляющую. В этом случае все токи и напряжения приобретают постоянные составляющие (см. диаграммы).

Резистивно-емкостной каскад (RC -усилитель). Базовая схема. Назначение элементов

В RC -усилителе для связи УК с источником сигнала, нагрузкой и другими каскадами используются конденсаторы, поэтому такой усилитель может усиливать только переменную составляющую сигнала. Этот класс устройств весьма широко применяется для усиления звуковых сигналов в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц (УНЧ).

RC - усилители имеют ряд достоинств:

1. простота и надежность;
2. относительно малая стоимость;
3. простота в обслуживании и настройке;
4. достаточно высокая стабильность параметров усилителя, поскольку все неустойчивости, как правило, низкочастотные либо проявляется по постоянному току и не передаются со входа на выход.



Базовая схема. Назначение элементов

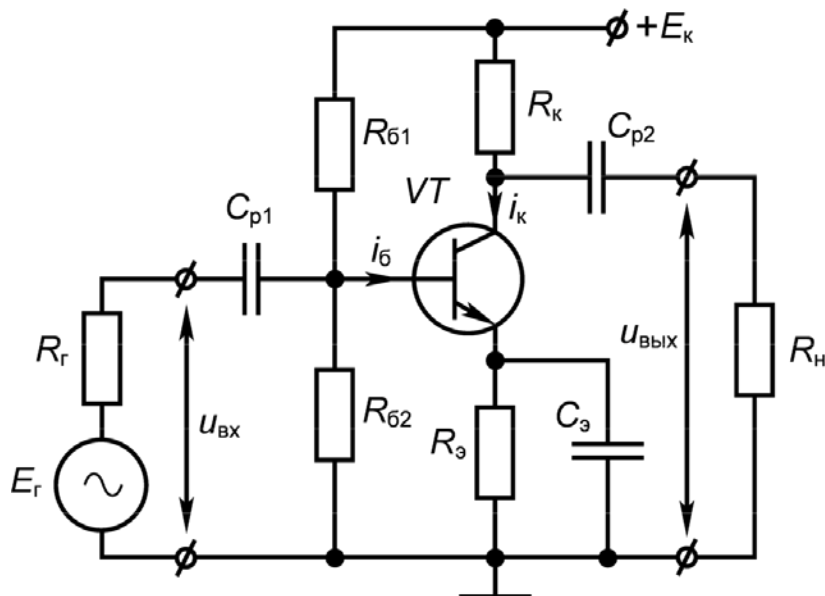


Схема усилительного каскада
по схеме ОЭ

VT - транзистор - УЭ или активный элемент;
 R_k - технологически необходимое сопротивление обеспечивает динамический режим, в котором при изменении одного параметра меняются другие параметры, например, если $R_k = 0$, то $U_{кэ} = E_k$ и на выходе нет сигнала как бы не менялся входной сигнал $U_{вх}$.
 C_{p1} , C_{p2} - разделительные конденсаторы предназначены для разделения по постоянному току каскад, нагрузки и источника сигнала.

R_{61} , R_{62} - резистивный делитель предназначен для задания рабочей точки транзистора методом фиксированного напряжения.

R_3 - сопротивление в эмиттерной цепи для создания последовательной отрицательной обратной связи (ООС) по току, служит для термостабилизации положения рабочей точки транзистора.

C_3 - шунтирует R_3 по переменному току с целью устранения ООС по переменной составляющей, поскольку ООС снижает коэффициент усиления каскада.

E_k - источник питания и смещения.

E_r , R_r - элементы последовательной схемы замещения источника сигнала: идеальный источник напряжения, сопротивление генератора.

В области средних частот (рабочий диапазон) сопротивления конденсаторов малы и поэтому их полагают короткими. В этом случае по переменной составляющей:

- 1) R_3 - короток;
- 2) входной сигнал поступает непосредственно на базу транзистора;
- 3) по переменной R_k и R_H включены параллельно через внутреннее сопротивление источника: $R_{гЕК} = 0$.

Через транзистор замыкается и переменная и постоянная составляющие, поэтому различают нагрузку по постоянному и переменному току.

$R_{H=} \cong R_k + R_3$ – **сопротивление нагрузки по постоянному току** - это значение внешнего сопротивления, соответствующее режиму, при котором через усилительный элемент протекает только постоянный ток (при $U_{вх} = 0$) - это **режим покоя** или **режим по постоянному току**.

Токи и напряжения в этом режиме являются постоянными составляющими, на которые накладываются в дальнейшем переменные составляющие при воздействии входного переменного сигнала (при $U_{вх} \neq 0$).

$R_{H\sim} = R_k || R_H$ - **сопротивление нагрузки для переменного тока** - сопротивление, по которому замыкается переменная составляющая выходного тока УЭ в рабочем диапазоне частот - это **режим по переменному току**. В полосе усиления $R_{H\sim}$ полагают постоянным.

В данном УК входная цепь - базовая, а выходная - коллекторная.

Транзистор работает в **активном режиме**, для которого эмиттерный переход (ЭП) смещен в прямом направлении и имеет малое сопротивление, а коллекторный переход (КП) - в обратном направлении и имеет высокое сопротивление.

Управляющим параметром для транзистора является базовый ток $i_b(t)$. В силу малого сопротивления ЭП базовый ток замыкается через него и в КП вообще не пойдет, то есть входная цепь практически не зависит от выходной цепи, эти две цепи получаются развязанными друг от друга через малое сопротивление ЭП. Главным признаком того, что транзистор находится в активном режиме является связь:

$$i_k(t) = \beta \cdot i_b(t), \text{ где } \beta = h_{21э} - \text{коэффициент передачи базового тока транзистора.}$$

Коллекторный ток повторяет базовый ток и можно говорить, что I_k это I_b , усиленный в β раз.

Задача разработчика - так спроектировать базовую цепь, чтобы коллекторный ток повторял форму входного сигнала.

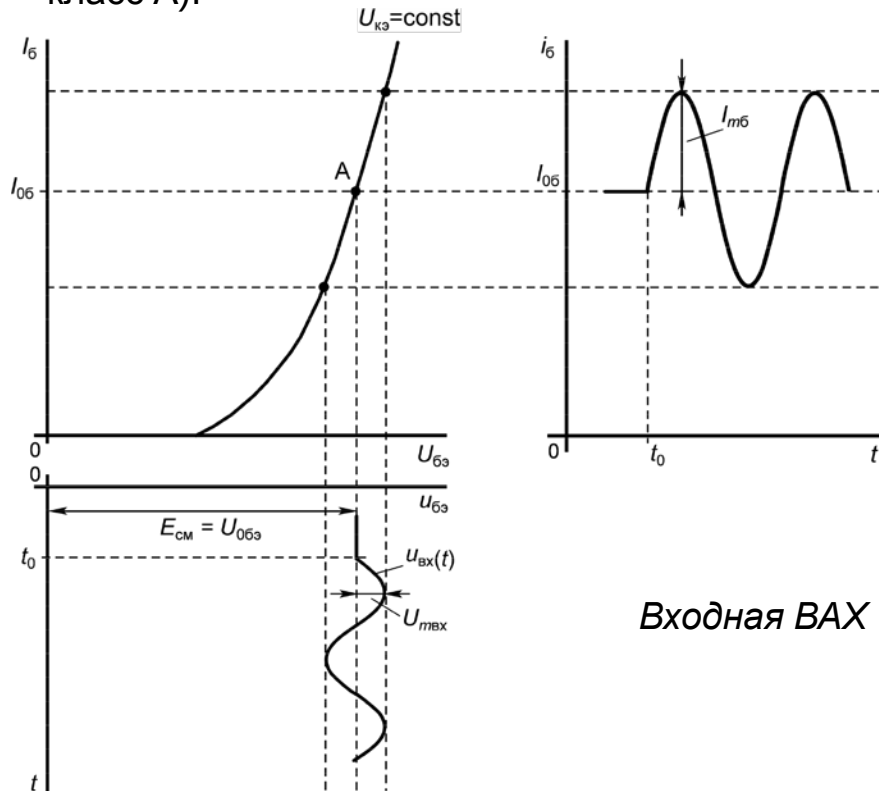
Принцип действия усилительного каскада по схеме ОЭ

1. Исходное состояние (режим покоя $U_{BX} = 0$).

В схеме протекают только постоянные токи. Источник сигнала – закорочен. Конденсатор – разрыв.

Под действием источника смещения, полярность которого является прямой для ЭП по базовой цепи протекает прямой ток покоя базы $I_{0б}$ в соответствии со входной ВАХ транзистора. Путь протекания тока базы: $+E_{CM} \rightarrow БЭ \rightarrow U_{BX} = 0 \rightarrow (-)E_{CM}$.

E_{CM} задается в зависимости от выбранной рабочей точки, т.е. в зависимости от выбранного класса усиления (в данном случае – класс А).



Входная ВАХ

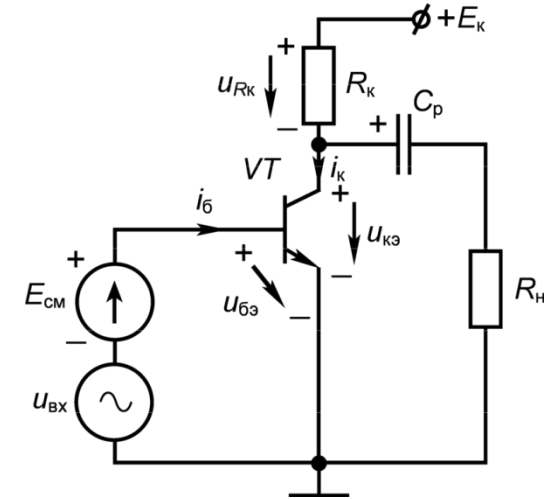


Схема УК по схеме ОЭ

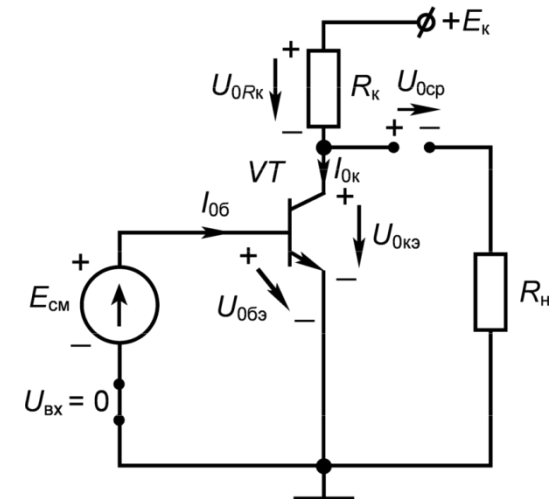


Схема УК в режиме покоя

Поскольку транзистор работает в активном режиме, по коллекторной цепи протекает ток покоя коллектора

$$I_{0к} = I_{об} \cdot \beta.$$

Данный ток замыкается по пути: $+E_k \rightarrow R_k \rightarrow KЭ \rightarrow (-) E_k$.

Поскольку конденсатор - разрыв по постоянному току, то через R_H данный ток не протекает $\Rightarrow U_H = 0$.

На коллекторном сопротивлении и на транзисторе выделяются напряжение покоя равные:

$$U_{0Rk} = I_{0к} \cdot R_k;$$

$$U_{0кэ} = E_k - U_{0Rk} = E_k - I_{0к} \cdot R_k.$$

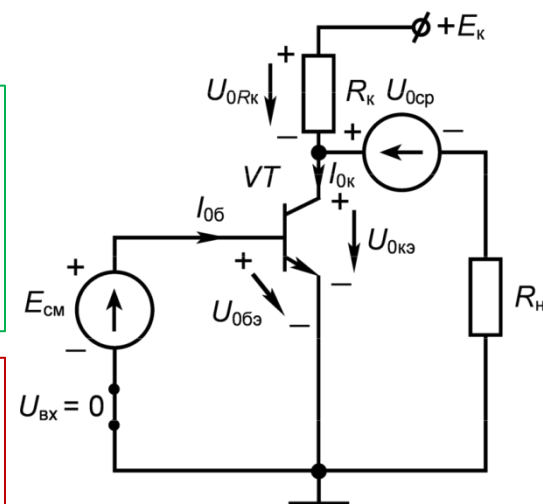
Коллекторное напряжение к приблизительно делится пополам между R_k и транзистором.

На разделительном конденсаторе по 2-му закону Кирхгофа выделяется напряжение с полярностью, показанной на рисунке.

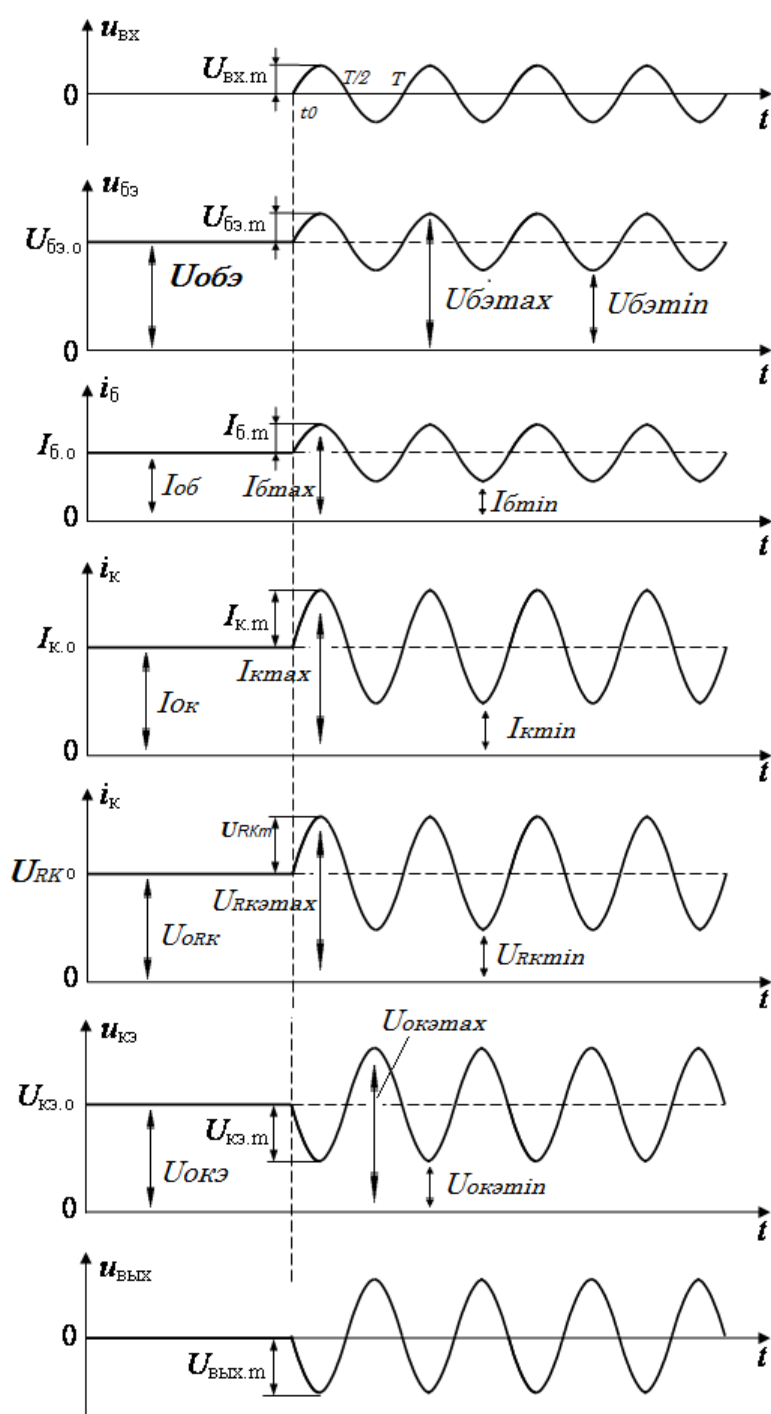
$U_{Cpaб} = U_{0cp} = U_{0кэ}$ – это рабочее напряжение на конденсаторе.

Правило. Все рабочие напряжения на конденсаторах определяются в установившемся режиме - в режиме покоя. Для нахождения $U_{Cpaб}$ нужно закоротить входной источник, и представить конденсаторы в виде разрывов.

Если емкость конденсатора C_p выбрана правильно, то напряжение U_{0cp} практически не меняется в полосе пропускания усилителя. Поскольку C_p не пропускает постоянную составляющую ее можно представить источником напряжения величиной $U_{0cp} = U_{0кэ}$, причем это напряжение появится на конденсаторе в результате переходного процесса сразу после подачи E_k .



Источник напряжения не пропускает постоянку и пропускает переменку



2. Динамический режим работы усилительного каскада

Рассмотрим динамику работы УК для случая когда $R_K \ll R_H$.

Пусть при $t = t_0$ появляется входной сигнал ($U_{BX} \neq 0$), меняющийся по гармоническому закону :

$$u_{BX}(t) = U_{mBX} \sin \omega t.$$

По 2-му закону Кирхгофа справедливо :

$$u_{бэ}(t) = E_{CM} + u_{BX}(t) = E_{CM} + U_{mBX} \sin \omega t.$$

Таким образом, $U_{бэ}$ приобретают переменную составляющую в точности равную входному сигналу. E_{CM} выбирается так, чтобы рабочая точка на входной ВАХ перемещалась под действием входного сигнала на линейном участке характеристики.

Под действием переменки $U_{бэ}$ базовый ток также приобретает переменную составляющую синфазную $U_{бэ}$ и синфазную входному сигналу:

$$i_b(t) = I_{0б} + I_{mб} \sin \omega t.$$

В момент когда синусоида входного сигнала переходит через положительный максимум U_{mBX} напряжение на базе транзистора и базовый ток проходят через максимум:

$$\begin{aligned} I_{б \max} &= I_{0б} + I_{mб}; \\ U_{бэ \max} &= U_{0бэ} + U_{m \text{ вх.}} \end{aligned}$$

Поскольку транзистор находится в активном режиме, коллекторный ток повторяет базовый:

$$i_k(t) = i_b(t) \cdot \beta = I_{0б} \cdot \beta + I_{мб} \cdot \beta \cdot \sin \omega t = I_{0к} \cdot \beta + I_{мк} \sin \omega t.$$

Форма коллекторного тока идентична форме базового тока:

$$I_{кmax} = I_{0к} + I_{мк}.$$

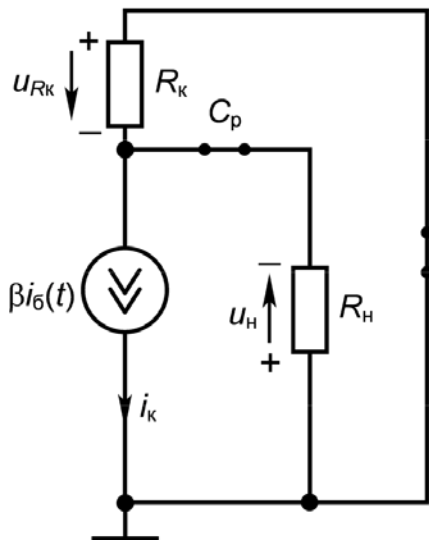


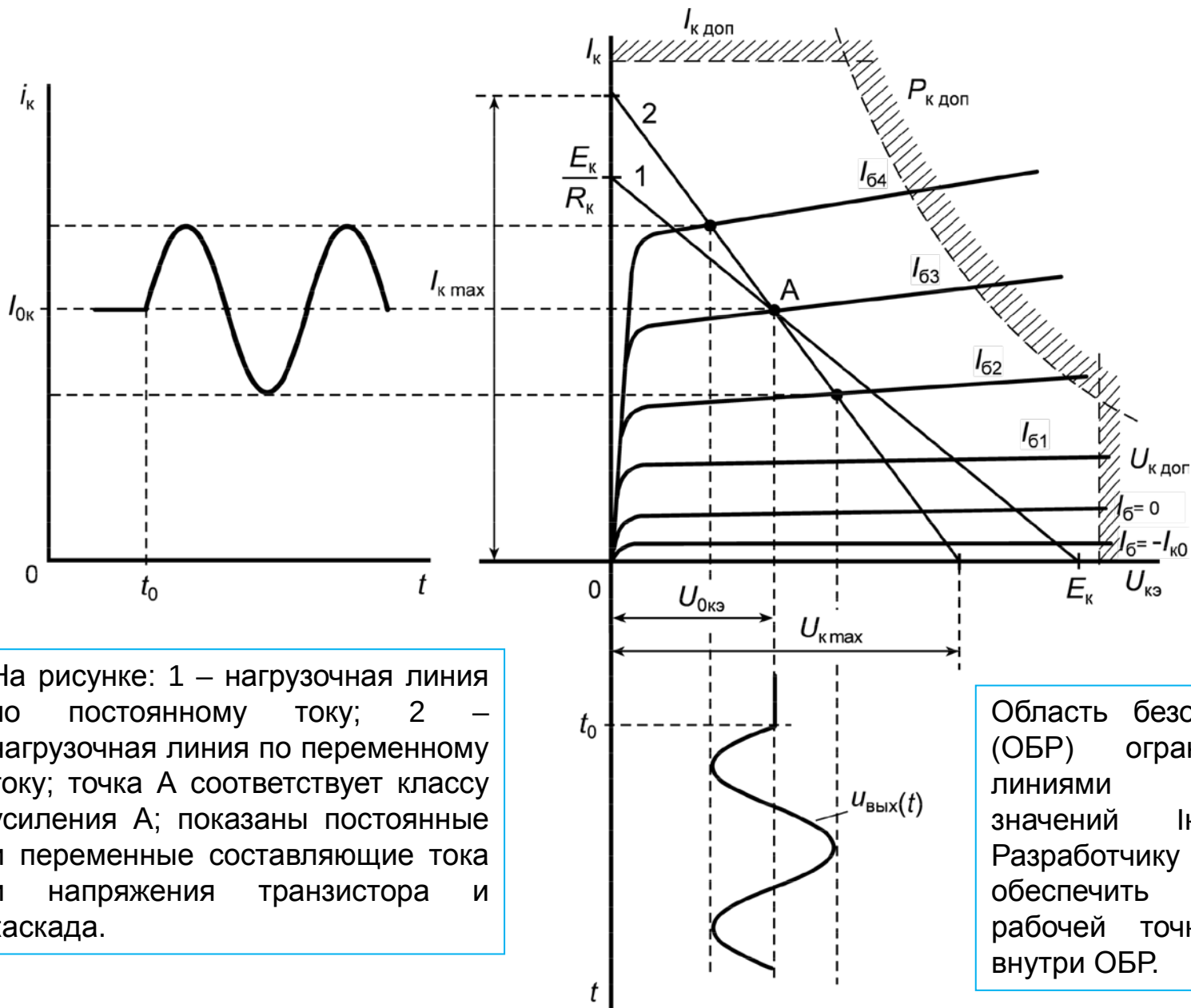
Схема УК в динамическом режиме (на переменном токе)

Переменная составляющая i_k замыкается по R_k и R_n , включенным параллельно для переменного тока. Для переменной составляющей разделительный конденсатор представляет собой короткую. Замыкаясь по R_n , переменная составляющая i_k вызывает переменную составляющую падения напряжения u_n . Поскольку $R_k \ll R_n$, то переменка коллекторного тока будет в основном замыкаться по R_k .

Очевидно, что с увеличением входного напряжения увеличивается ток i_k , что вызывает увеличение падения напряжения на R_k , а $U_{кэ} \downarrow$:

$$\begin{aligned} U_{кэ}(t) \downarrow &= u_n(t) \downarrow = E_k - u_{Rk}(t) \uparrow = \\ &= E_k - I_{0к} \cdot R_k - I_{мк} \cdot (R_k \parallel R_n) \cdot \sin \omega t \uparrow = \\ &= U_{0к} - U_{мкэ} \sin \omega t \uparrow. \end{aligned}$$

Видно, что $u_{кэ}(t) = u_n(t) = u_{вых}(t)$ меняется противофазно входному сигналу, поэтому переменная составляющая выходного напряжения имеет фазовый сдвиг 180° относительно входного сигнала.



На рисунке: 1 – нагрузочная линия по постоянному току; 2 – нагрузочная линия по переменному току; точка A соответствует классу усиления A; показаны постоянные и переменные составляющие тока и напряжения транзистора и каскада.

Область безопасной работы (ОБР) ограничена тремя линиями предельных значений I_k , $U_{кэ}$, R_k . Разработчику необходимо обеспечить нахождение рабочей точки транзистора внутри ОБР.

Амплитуда переменной составляющей выходного напряжения:

$$U_{m\text{ВЫХ}} = U_{m\text{Н}} = I_{m\text{К}} \cdot R_{\text{Н}\sim}$$

Для исключения возможных искажений при усилении положения рабочей точки предъявляют следующие требования:

$$U_{0\text{КЭ}} > U_{m\text{ВЫХ}} + U_{\text{К НАС}};$$
$$I_{0\text{К}} > I_{m\text{К}} + I_{\text{К0(Э)max}};$$

где $U_{\text{К НАС}}$ – напряжение насыщения коллектора;
 $I_{\text{К0(Э)max}}$ – начальный сквозной ток коллектора при максимальной температуре.

Следует выбирать $E_{\text{К}}$ минимум в два раза больше требуемой амплитуды выходного сигнала:

$$E_{\text{К}} = U_{0\text{КЭ}} + I_{0\text{К}} \cdot R_{\text{К}} > 2U_{m\text{ВЫХ}}.$$

О выборе транзистора

Транзистор для данного УК выбирают по следующим параметрам:

1. $I_{\text{К max}} = I_{0\text{К}} + I_{m\text{К}} < I_{\text{К доп}};$
2. $U_{\text{КЭ доп}} > E_{\text{К}};$
3. $P_{\text{К доп}} > P_{\text{К}}$ при максимальной температуре, $P_{\text{К}} = I_{0\text{К}} \cdot U_{0\text{К}}.$
4. $f_{\beta} \gg f_{\text{В}}.$

Построение нагрузочных прямых усилительного каскада

Различают два режима работы усилительного каскада:

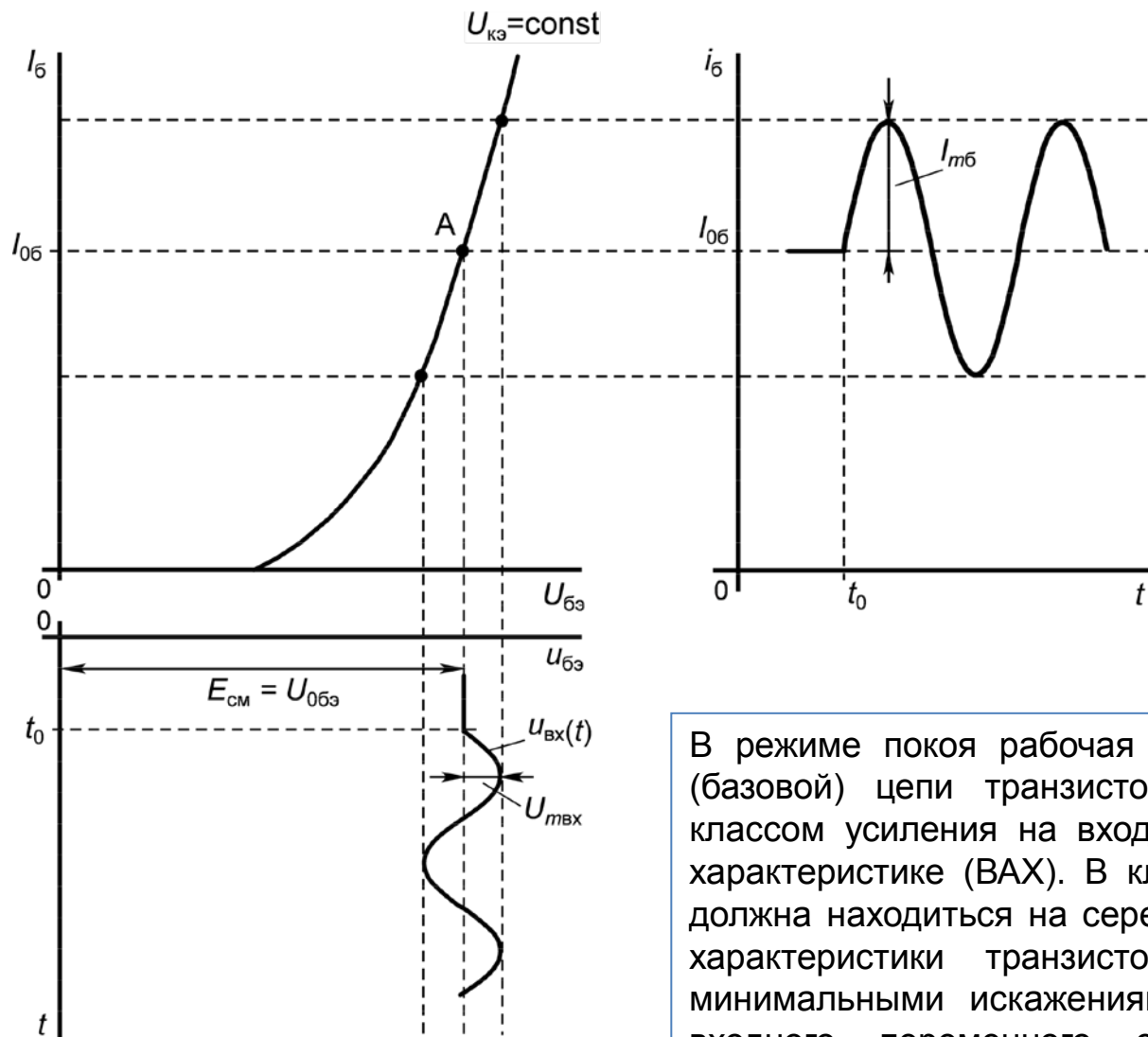
- режим покоя (или режим по постоянному току)
- режим по переменному току.

В режиме покоя входной сигнал отсутствует (источник входного сигнала закорочен), в цепях усилительного элемента протекают постоянные токи (постоянные составляющие). Величина постоянных составляющих определяется заданным классом усиления.

В режиме по переменному току под действием входного переменного сигнала токи и напряжения УЭ приобретают переменные составляющие, которые накладываются на постоянные составляющие.

Определение величин постоянных и переменных составляющих токов и напряжений в усилительном каскаде осуществляется графо-аналитическим методом с использованием статических вольт-амперных характеристик транзистора и нагрузочных прямых (линий) по переменному и постоянному току.

Нагрузочные прямые представляют собой траекторию движения рабочей точки УЭ в усилительном каскаде, однозначно связывая выходные ток и напряжение УЭ.



В режиме покоя рабочая точка (точка покоя) во входной (базовой) цепи транзистора задается в соответствии с классом усиления на входной статической вольт-амперной характеристике (ВАХ). В классе усиления А рабочая точка должна находиться на середине линейного участка входной характеристики транзистора для усиления сигнала с минимальными искажениями. В этом случае при подаче входного переменного сигнала, например синусоиды, формируется ток базы, практически повторяющий по форме входное напряжение (см. рис.). Координаты рабочей точки на входной ВАХ – $(U_{0БЭ}, I_{0Б})$.

1. Построение нагрузочной прямой по постоянному току

Для определения (задания) положения рабочей точки на выходных статических характеристиках строят нагрузочную прямую по постоянному току. Эта линия представляет собой траекторию движения рабочей точки в режиме покоя. Выражение для выходной цепи каскада, составленное по второму закону Кирхгофа является уравнением нагрузочной прямой по постоянному току:

$$E_{\text{к}} = I_{\text{к}} R_{\text{к}} + U_{\text{кэ}}.$$

Нагрузочная прямая строится по двум точкам:

$$1) U_{\text{кэ}} = 0; I_{\text{к}} = \frac{E_{\text{к}}}{R_{\text{к}}}.$$

$$2) I_{\text{к}} = 0; U_{\text{кэ}} = E_{\text{к}}.$$

Поскольку на входной характеристике координаты рабочей точки ($U_{0\text{бэ}}, I_{\text{б}}$) уже заданы, то координаты точки А определяются на пересечении нагрузочной прямой постоянного тока и соответствующей выходной характеристики (см. рис. на следующем слайде):

$$I_{\text{бз}} = I_{0\text{б}}.$$

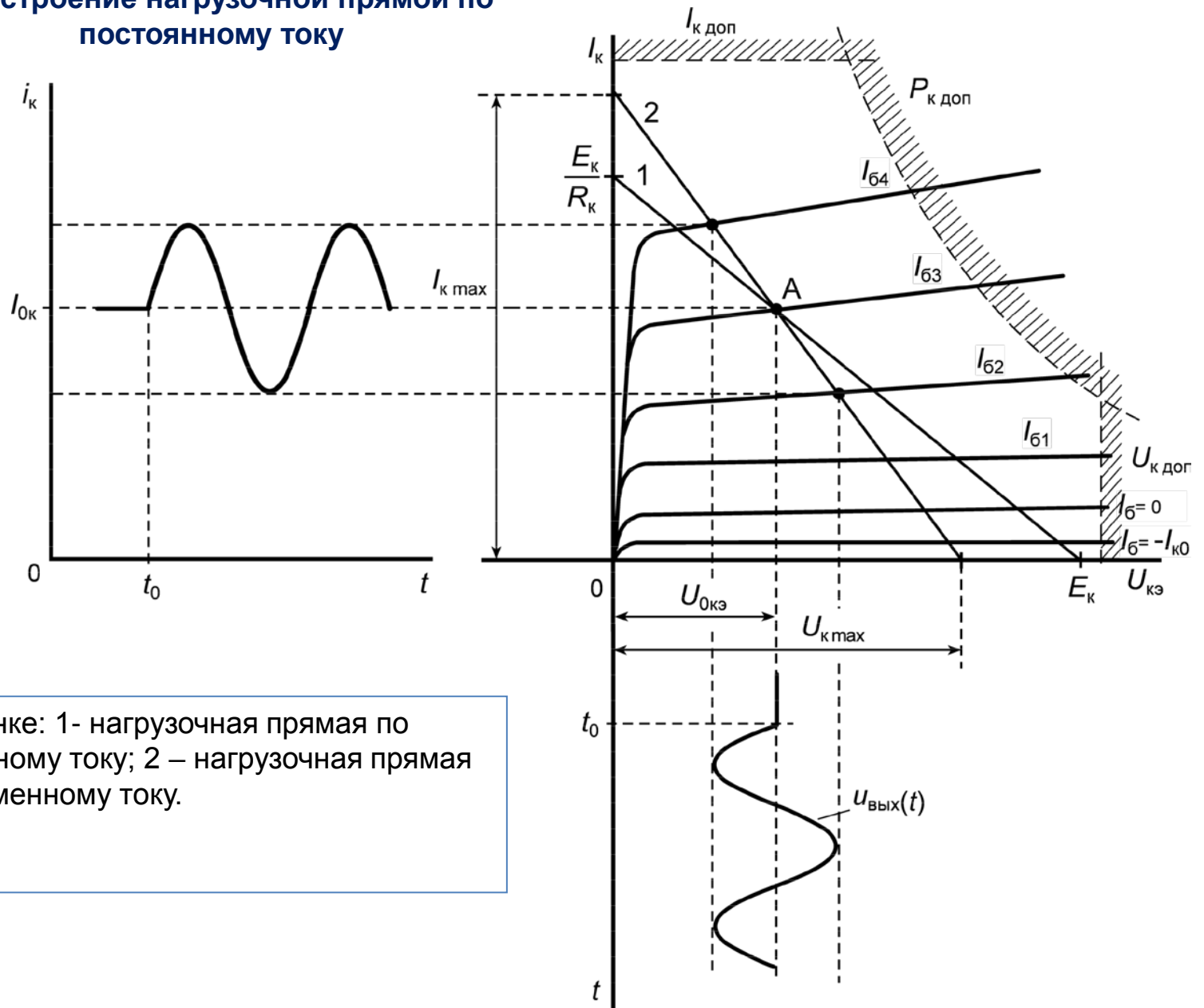
Поскольку транзистор работает в активном режиме, токи коллектора и базы связаны соотношением:

$$I_{0\text{к}} = I_{0\text{б}} \cdot \beta_0,$$

где β_0 – статический коэффициент передачи тока базы

Таким образом, координаты рабочей точки А на выходных характеристиках транзистора – $(U_{0\text{кэ}}, I_{0\text{к}})$.

1. Построение нагрузочной прямой по постоянному току



На рисунке: 1- нагрузочная прямая по постоянному току; 2 – нагрузочная прямая по переменному току.

2. Построение нагрузочной прямой по переменному току

Размах переменных составляющих коллекторного тока и выходного напряжения определяется с помощью нагрузочной прямой переменного тока. Данная прямая строится на выходных статических характеристиках (см. предыдущий слайд) и проходит через предварительно заданную точку покоя А. Для переменной составляющей также как для постоянной справедлив второй закон Кирхгофа:

$$E_k = u_{Rk}(t) + u_{кэ}(t). \Rightarrow$$

$$u_{кэ}(t) = E_k - u_{Rk}(t) = E_k - I_{0к} R_k - I_{mk} R_{H\Box} \sin \omega t = U_{0к} - \Delta i_k(t) R_{H\Box},$$

где $\Delta i_{\text{вых}}(t) = \Delta i_k(t) = I_{mk} R_{H\Box} \sin \omega t$ – мгновенное значение тока в выходной цепи УЭ;
 $R_{H\Box} = R_k \parallel R_H$ – сопротивление нагрузки по переменному току.

$$u_{\text{вых}}(t) = u_{кэ}(t) = U_{0к} - \Delta i_{\text{вых}}(t) R_{H\Box} \quad (*)$$

- уравнение нагрузочной прямой по переменному току.

Способы построения нагрузочной прямой переменного тока

Т.к. прямая проходит через рабочую точку А, то первой точкой для построения прямой является точка покоя с координатами $(U_{0кз}, I_{0к})$.

1 способ. Нагрузочная прямая переменного тока строится по двум точкам:

- 1) точка покоя А;
- 2) в уравнении (*) принимаем, что отсутствует переменная составляющая выходного напряжения, т.е. $u_{кз}(t) = 0 \Rightarrow$

$$0 = U_{0к} - \Delta i_{\text{вых}}(t) R_{\text{н}} \Rightarrow \Delta i_{\text{вых}}(t) = \Delta i_{\text{к}}(t) = \frac{U_{0к}}{R_{\text{н}}}.$$

Т.о. вторая точка для построения нагрузочной прямой переменного тока лежит на оси ординат:

$$I_{\text{вых max}} = I_{\text{к max}} = I_{0к} + \frac{U_{0кз}}{R_{\text{н}}}.$$

2 способ. Нагрузочная прямая переменного тока строится по двум токам:

- 1) точка покоя А;
- 2) задаем $i_{\text{вых}}(t) = i_{\text{к}}(t) = 0$ (отсутствует переменная составляющая выходного тока) $\Rightarrow$

$$i_{\text{вых}}(t) = i_{\text{к}}(t) = 0 = I_{0к} + \Delta i_{\text{вых}}(t) \Rightarrow \Delta i_{\text{вых}}(t) = -I_{0к}.$$

Подставляем в (*) и получаем вторую точку, лежащую на оси абсцисс:

$$U_{\text{вых max}} = U_{0к} + I_{0к} \cdot R_{\text{н}}.$$

Примечание. Нагрузочная прямая переменного тока «привязана» к точке покоя А, и при изменении ее положения прямая переносится в новую точку покоя параллельно самой себе. Максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку каскадом обеспечивается в положении, при котором точка покоя А располагается на середине нагрузочной прямой переменного тока.

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2008. – 798 с.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов — Москва: Альянс, 2013. — 496 с.
3. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: Учебное пособие. – Изд. 8-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 703 с.

Динамические характеристики. Классы усиления

Динамические характеристики

Для задания положения рабочей точки усилительного элемента (УЭ) целесообразно использовать **динамические характеристики**.

Динамические характеристики – это зависимости между мгновенными значениями напряжений и токов в цепях нагруженного УЭ, т.е. при наличии в его цепях внешних сопротивлений.

Динамические характеристики отличаются от статических, поскольку последние снимаются без внешних сопротивлений (статические характеристики приводятся в справочниках). При снятии статических характеристик меняется какой-то один из основных параметров, фиксируя значение другого. Например: $i_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}})$ при $U_{\text{кэ}} = \text{const}$ – статическая входная характеристика.

Наличие внешних сопротивлений в цепях УЭ приводит к тому, что при изменении какого-то одного параметра меняются все остальные, в частности, с ростом коллекторного тока напряжение на коллекторе транзистора уменьшается:

$$\downarrow u_{\text{кэ}}(t) = E_{\text{к}} - \uparrow i_{\text{к}}(t) \cdot R_{\text{к}}$$

Динамические характеристики являются **более полезными на практике**, т.к. соответствуют реальным режимам работы усилительных элементов.

Рабочая точка УЭ может быть задана на следующих характеристиках:

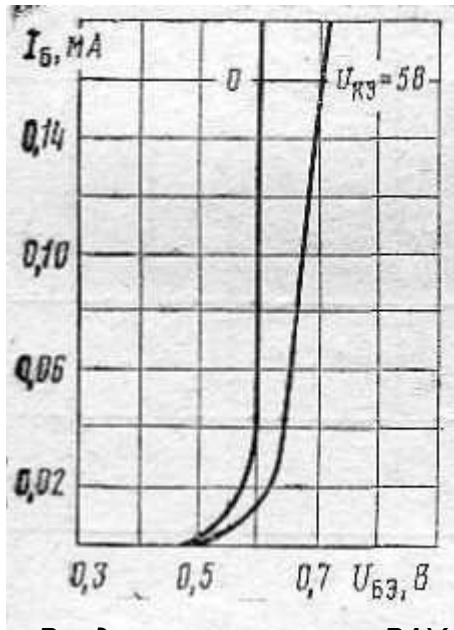
- входная динамическая характеристика $i_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})$;
- сквозная динамическая характеристика $i_{\text{вых}} = f(E_{\text{г}})$;
- проходная динамическая характеристика $i_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$.

Входная динамическая характеристика

$I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})|_{R_{\text{н}} \neq 0}$ - зависимость входного тока от входного напряжения.

Данную характеристику принято рассматривать только для биполярных транзисторов, т. к. входное сопротивление полевых транзисторов и электрических ламп велико, следовательно, их входным током можно пренебречь.

Статическая входная ВАХ транзистора в схеме с ОЭ имеет вид:



Входная статическая ВАХ
биполярного п-р-п транзистора

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}; \quad U_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}}; \quad \Rightarrow I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}})|_{U_{\text{кэ}} \neq 0}$$

Известно, что величина коллекторного напряжения мало влияет на ход входной характеристики транзистора, поэтому во всех справочниках приводятся, как правило, две характеристики для $U_{\text{кэ}} = 0$ и $U_{\text{кэ}} = 5\text{В}$.

Поскольку динамическая характеристика подразумевает изменение $U_{\text{кэ}}$ с изменением $i_{\text{б}}$ и $U_{\text{бэ}}$, в общем случае входная динамическая характеристика будет показывать достаточно сложную зависимость между током и напряжением базы. На практике данными нюансами пренебрегают и в качестве входной динамической характеристики используют характеристику, снятую для $U_{\text{кэ}} = 5\text{В}$, при этом получают вполне достаточную точность для инженерных расчетов.

Входные динамические (статические) характеристики используются для задания рабочей точки транзистора в радиолюбительской практике и в не очень ответственных случаях, поскольку данный способ задания рабочей точки учитывает нелинейность только одной (входной) характеристики.

Сквозная и проходная динамические характеристики

В отличие от предыдущей данные характеристики учитывают нелинейность как входных, так и выходных характеристик усилительного элемента и применяются для выбора рабочей точки и для расчета нелинейных искажений в усилительном каскаде.

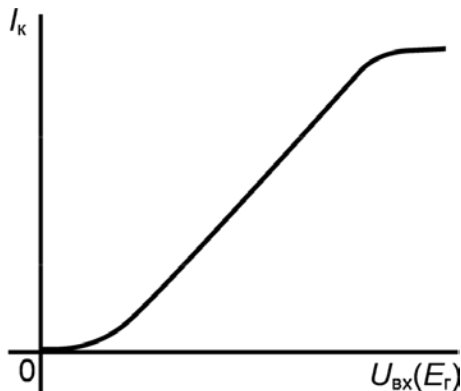
Сквозная динамическая характеристика представляет собой зависимость входного тока усилительного элемента от :

$$I_{\text{ВЫХ}} = f(E_{\Gamma})|_{R_{\text{НП}} \neq 0}.$$

Учитывает нелинейность входных и выходных статических характеристик биполярного транзистора.

$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{К}}; \Rightarrow I_{\text{К}} = f(E_{\Gamma})|_{R_{\text{НП}} \neq 0}$$

Для построения сквозной динамической характеристики используют выходные статические характеристики транзистора, где проводят нагрузочную прямую переменного тока. Кроме того, используется входная статическая характеристика транзистора при $U_{\text{КЭ}} \neq 0$, применяемая в качестве динамической.



Сквозная и проходная динамические характеристики

Данная характеристика используется при рассмотрении биполярных транзисторов. У полевых транзисторов – высокое входное сопротивление и поэтому $E_{\Gamma} = U_{\text{ВХ}}$.

Зависимость
$$i_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})|_{R_{\text{НП}} \neq 0}$$

соответствует проходной динамической характеристике, которая строится аналогично сквозной характеристике, только без расчета E_{Γ} . Для биполярного транзистора

$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{К}}; U_{\text{ВХ}} = U_{\text{БЭ}}; \Rightarrow I_{\text{К}} = f(U_{\text{БЭ}})|_{R_{\text{НП}} \neq 0}$$

Вид проходной динамической характеристики практически такой же, как у сквозной.

Классы усиления

В зависимости от положения рабочей точки усилительного элемента на проходной (сквозной) динамической характеристике, различают следующие классы (режимы) усиления:

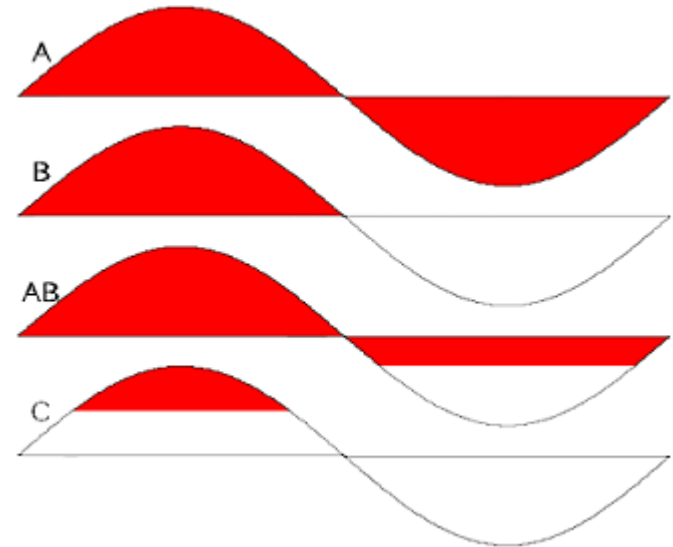
A, B, C, D + промежуточные.

Классы усиления принято характеризовать **углом отсечки** – Θ («theta»).

Угол отсечки равен половине интервала проводимости за период усилительного элемента и измеряется в угловых единицах (градусы, радианы).

Для задания класса усиления используются рассмотренные ранее динамические характеристики.

Далее будем упоминать проходную характеристику, подразумевая, что для задания класса усиления можно использовать любую из динамических характеристик (входная, сквозная, проходная).



Диаграммы выходного тока УЭ для различных классов усиления

Класс усиления А

Характеризуется тем, что рабочая точка выбирается на середине линейного участка проходной динамической характеристики.



Данный класс применяется в каскадах предварительного усиления, а также выходных каскадах при мощности **единицы Вт**.

Особенности:

1. Переменная составляющая существует в течение всего периода $\Rightarrow \Theta = 180^\circ$.
2. Нелинейные искажения минимальны (рабочая точка перемещается в пределах линейного участка проходной характеристики), т.е. форма выходного сигнала практически идентична форме входного.
3. Постоянная составляющая (выходного тока) существует все время даже в исходном состоянии (до момента t_0), когда, что приводит к бесполезным потерям мощности и $\Rightarrow$ к снижению КПД.

Теоретический максимум для RC -усилителя составляет $\approx 8\%$.

Если в качестве нагрузки используется только коллекторное сопротивление R_k , то теоретический максимум – $\approx 25\%$.

У трансформаторного усилителя теоретический максимум – $\approx 50\%$, а реальный КПД – еще меньше!

Класс усиления В

В данном режиме теоретически усиливается лишь одна полуволна входного синусоидального сигнала, т.е. угол отсечки должен быть $\Theta = 90^\circ$.

Для задания класса В, в идеальном случае, используют спрямленную проходную динамические характеристики. В классе В рабочая точка выбирается в точке пересечения спрямленной характеристики с осью абсцисс. Транзистор работает с заходом в режим отсечки (при усилении отрицательной полуволны синусоиды).



В реальном случае наблюдается промежуточный режим АВ, который характеризуется тем, что при отсутствии входного сигнала через усилительный элемент протекает маленький постоянный ток $I_{\text{ВЫХ0}}$, реальный угол отсечки будет больше, чем 90° .

Особенности:

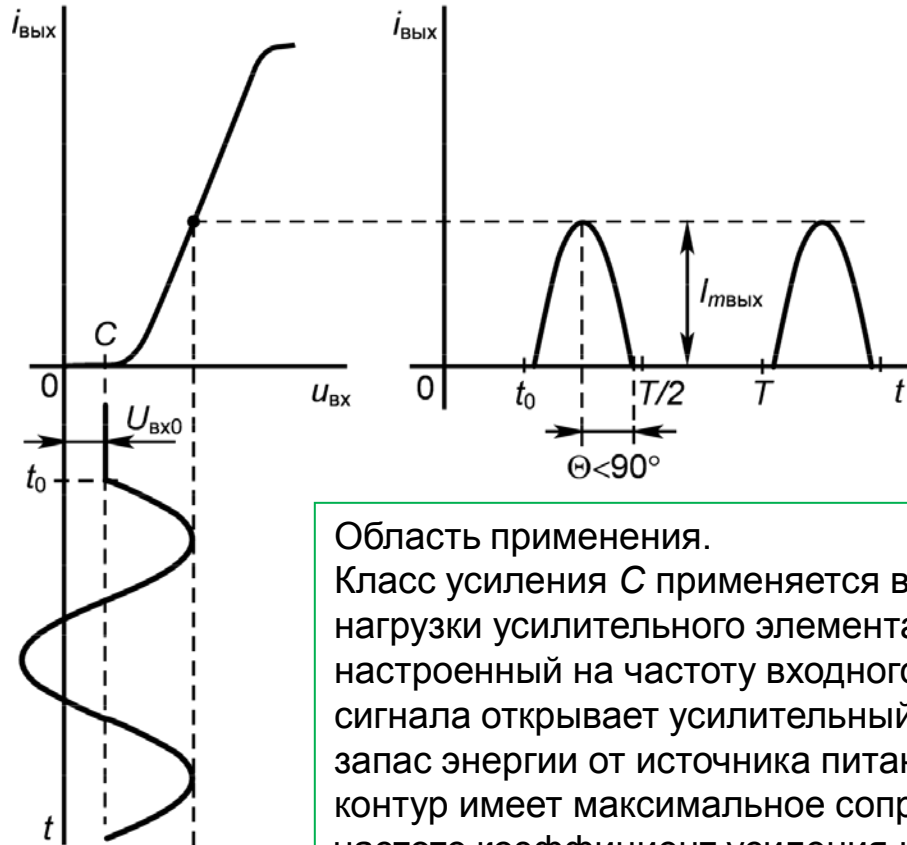
1. КПД существенно выше, чем в классе А, теоретический максимум достигает 78,5%.
2. Недостаток схемы - повышенный уровень нелинейных искажений.

Область применения

В двухтактных усилителях мощности, в которых каждая полуволна входного сигнала усиливается своим усилительным элементом, работающим на общую нагрузку. Тем самым в нагрузке получается достаточно «чистая» (без искажений) синусоида при высоком КПД всего каскада.

Класс усиления С

Характеризуется тем, что рабочая точка выбирается левее точки пересечения проходной динамической характеристики с осью абсцисс, т.е. за точкой отпирания усилительного элемента.



Особенности:

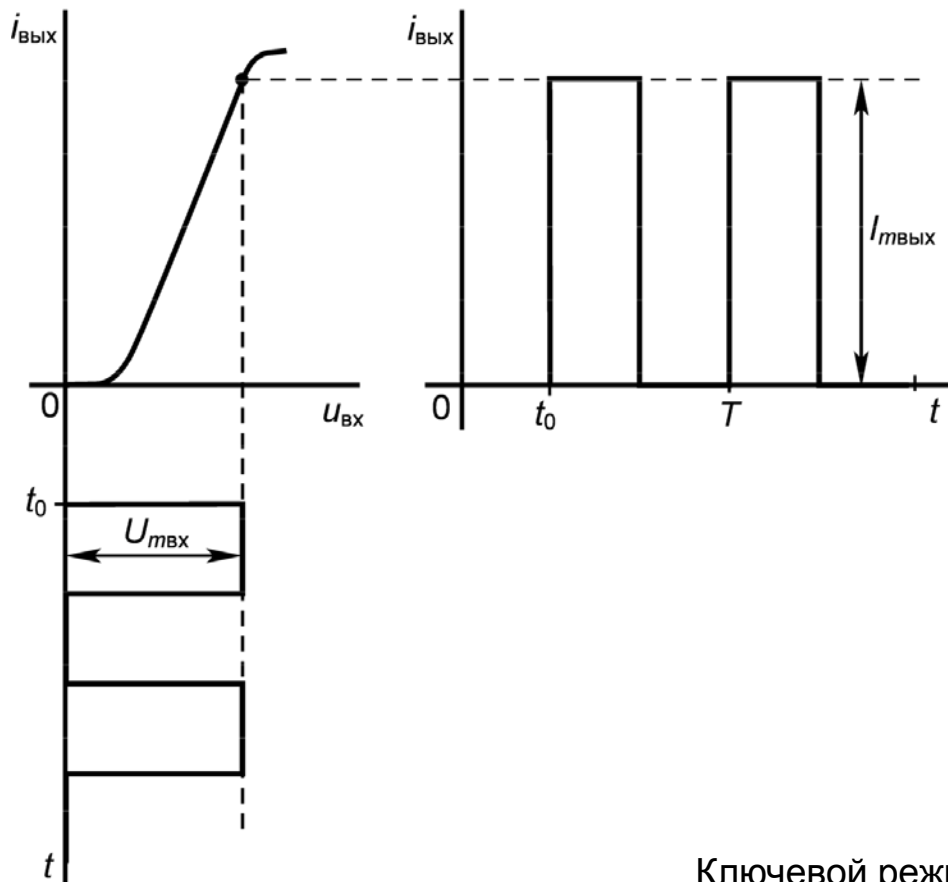
1. Угол отсечки $\Theta < 90^\circ$.
2. Усиливается только часть одной полуволны входного сигнала $\Rightarrow$ коэффициент гармоник будет еще больше, чем в классе В.
3. В исходном состоянии, при $U_{\text{ВХ}} = 0$, ток в УЭ не протекает $I_{\text{ВЫХ}0} = 0 \Rightarrow$ КПД будет высоким.

Область применения.

Класс усиления С применяется в резонансных каскадах, где в качестве нагрузки усилительного элемента используется колебательный контур, настроенный на частоту входного сигнала. Часть одной полуволны входного сигнала открывает усилительный элемент, подкидывая в колебательный контур запас энергии от источника питания. Поскольку параллельный колебательный контур имеет максимальное сопротивление на резонансной частоте, то на этой частоте коэффициент усиления каскада будет максимальным, поэтому параллельный колебательный контур сам формирует выходное синусоидальное напряжение, несмотря на то, что получает энергию лишь в малую часть периода. Таким образом, получается достаточно высокий КПД при малых нелинейных искажениях.

Класс усиления D

В данном режиме усилительный элемент работает в качестве **электронного ключа**, т.е. транзистор (в частности, биполярный) либо открыт и насыщен весь интервал проводимости, либо заперт и находится в режиме глубокой отсечки – весь интервал – пауза. В результате получается максимально возможный КПД при малой мощности, требуемой для управления ключом.



Ключевой режим будет рассмотрен подробно далее.

Ссылки

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2008. – 798 с.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов — Москва: Альянс, 2013. — 496 с.
3. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: Учебное пособие. – Изд. 8-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 703 с.
4. Миловзоров О.В., Панков И.Г. Электроника [Электронный ресурс] : учебник для бакалавров / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. — 5-е изд. — Москва: Юрайт, 2013. — Доступ из корпоративной сети ТПУ. Схема доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2014/FN/fn-37.pdf>
5. Фомичев Ю.М., Сергеев В.М. Электроника. Элементная база, аналоговые и цифровые функциональные устройства [Электронный ресурс] : учебное пособие; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Доступ из корпоративной сети ТПУ. Схема доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2012/m59.pdf>

Способы задания рабочей точки усилительного элемента

Существует 3 способа задания (смещения) рабочей точки:

- от отдельного источника смещения;
- фиксированным током;
- фиксированным напряжением.

Рабочая точка задается в режиме покоя (т.е в режиме по постоянному току). В данном режиме источник входного сигнала закорачивается. В схеме протекают постоянные токи, поэтому конденсаторы представляются разрывами.

В этом же режиме определяется рабочее напряжение на конденсаторах каскада.

I. Смещение от отдельного источника

В данном способе используется дополнительный специальный источник напряжения $E_{см}$.

Схема ОЭ

В зависимости от способа подачи постоянной составляющей по отношению к входному сигналу различают последовательную и параллельную подачу постоянной составляющей.

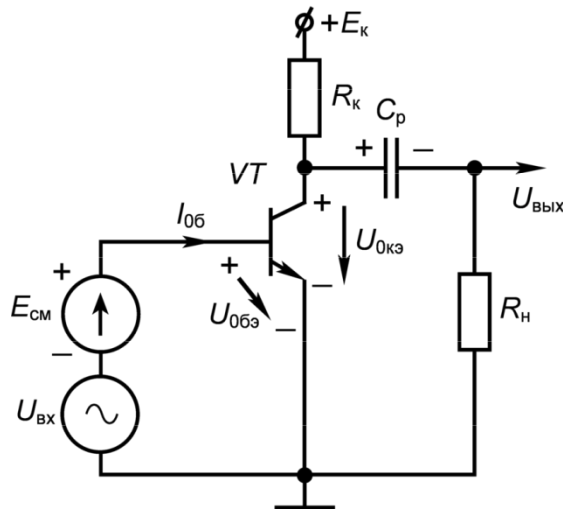


Схема 1. Последовательная подача постоянной составляющей

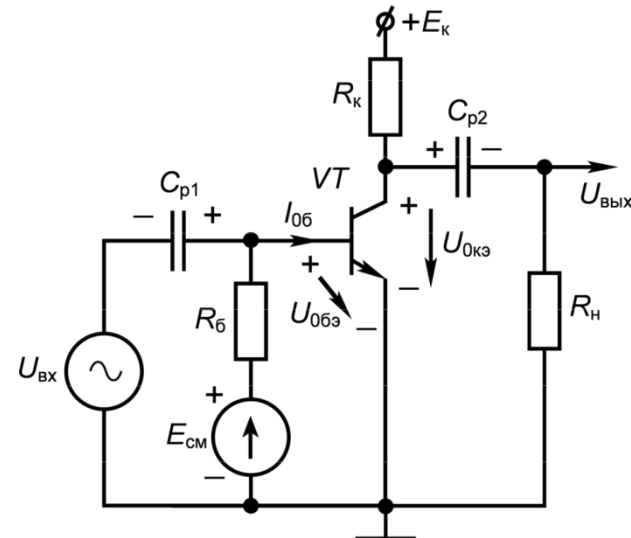


Схема 2. Параллельная подача постоянной составляющей

Достоинство: простота.

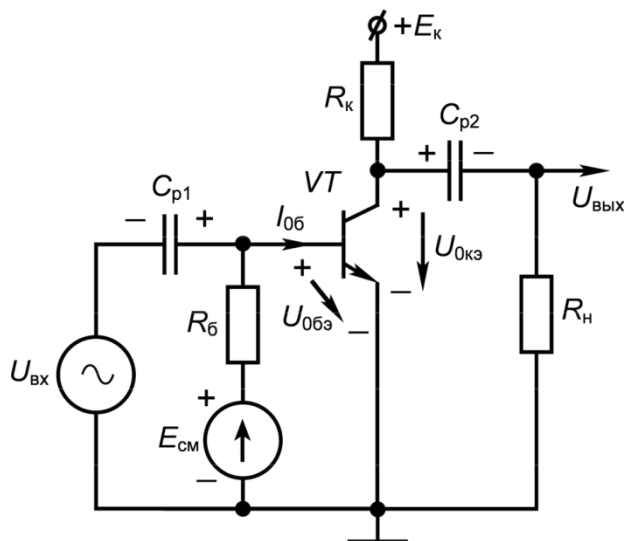
Недостатки:

1. Необходимость специального источника смещения.
2. В схеме 1 источник $E_{см}$ не имеет общей точки с «землей».
3. Протекание постоянного тока $I_{0б}$ через источник сигнала (сх.2). Данный недостаток отсутствует в сх. 2 с разделительным конденсатором C_{p1} .

Принцип действия

Полярность $E_{см}$ является отпирающей для транзистора. По цепи смещения протекает ток покоя базы $I_{0б}$.

Путь тока $I_{0б}$: $+E_{см} \rightarrow R_б \rightarrow \text{Б-Э} \rightarrow -E_{см}$.



Смещение от отдельного источника. Схема ОЭ

По закону Кирхгофа:

$$E_{см} = I_{0б} \cdot R_б + U_{0бэ}.$$

Отсюда

$$R_б = \frac{E_{см} - U_{0бэ}}{I_{0б}}.$$

$U_{0бэ}$, $I_{0б}$ –
координаты
рабочей точки на
входной ВАХ

При расчете задают:

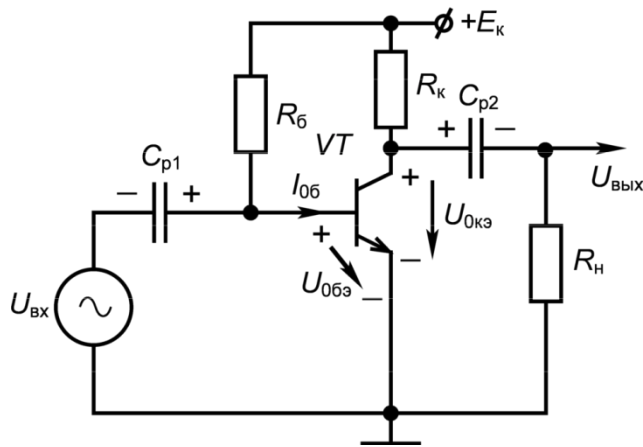
$$E_{см} = (1,5 \div 5)\text{В}$$

Тенденция: чем больше $E_{см}$, тем стабильнее положение рабочей точки, но при этом потери на $R_б$ больше $\Rightarrow$ КПД меньше и масса-габариты больше.

Применяется данный способ в случае, когда имеется большое число однотипных каскадов.

II. Метод фиксированного тока

Особенность метода – в качестве источника смещения используется источник питания E_k .



Параллельная подача постоянной составляющей

Достоинства: 1. Простота схемы; 2. Нет специального источника смещения.

Недостатки:

1. Невысокая стабильность рабочей точки, т.е. под влиянием дестабилизирующих факторов (температура, старение транзистора и т.д.) рабочая точка меняет своё положение, что вызывает дополнительные нелинейные искажения и может привести даже к потере работоспособности каскада.
2. Требуется индивидуальная подстройка положения рабочей точки в каждом конкретном случае.

Схема и метод широко применяется в радиолюбительской практике при изменении температуры на $\Delta t = (10 \div 20)^\circ\text{C}$, т.е. когда усилительные каскады работают в лабораторных условиях.

Схема ОЭ

Принцип действия

К эмиттерному переходу через $R_б$ приложена отпирающая полярность источника E_k .

Путь протекания тока покоя базы $I_{0б}$:

$$+E_k \rightarrow R_б \rightarrow \text{Б-Э} \rightarrow -E_k.$$

По 2-му закону Кирхгофа справедливо:

$$E_k = I_{0б} \cdot R_б + U_{0бэ}.$$

Отсюда

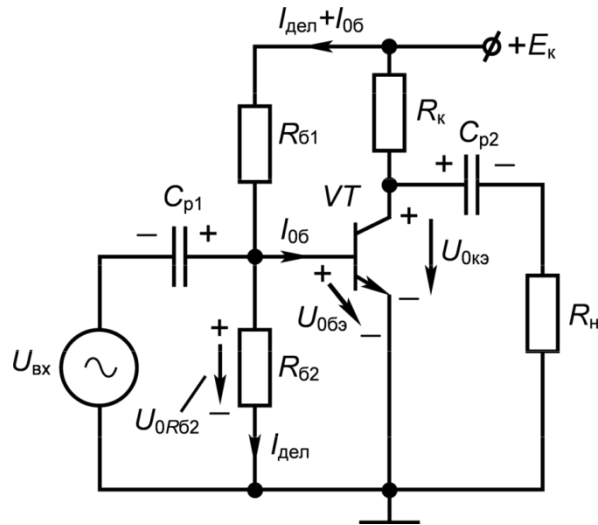
$$R_б = \frac{E_k - U_{0бэ}}{I_{0б}} = \left| E_k \square U_{0бэ} \right| \cong \frac{E_k}{I_{0б}}.$$

Тогда ток покоя базы:
$$I_{0б} \cong \frac{E_k}{R_б} = \text{const.}$$

Видно, что ток базы задается практически внешней цепью: источником E_k и резистором $R_б$, а $\Rightarrow$ практически не зависит от $U_{0бэ}$ (и соответственно t°), т.е. **ток зафиксирован!!!**

III. Метод фиксированного напряжения (метод фиксированного потенциала базы)

Напряжение $U_{0бэ}$ задается специальным резистивным делителем из резисторов $R_{б1}$ и $R_{б2}$.



$$R_{б1} = \frac{U_{0R_{б1}}}{I_{дел} + I_{об}} = \frac{E_к - U_{0бэ}}{I_{дел} + I_{об}}$$

$$R_{б2} = \frac{U_{0R_{б2}}}{I_{дел}} = \frac{U_{0бэ}}{I_{дел}}$$

Большая цифра превышения $I_{дел}$ над $I_{об}$ обеспечивает большую стабильность рабочей точки, но при этом возрастает мощность выделяемая на резисторах делителя, а $\Rightarrow$ возрастают масса и габариты делителя и снижается КПД. Кроме того, уменьшается входное сопротивление каскада по переменному току, т.к. $R_{вх} = R_{б1} || R_{б2} || r_{вх}$. Поэтому большие цифры применяются для маломощных каскадов, а меньшие цифры – в каскадах с относительно большой выходной мощностью.

Схема ОЭ

Принцип действия

$U_{0R_{б2}} = U_{0бэ}$ задается делителем.

Путь протекания тока покоя базы $I_{об}$:

$$+E_к \rightarrow R_{б1} \rightarrow \text{Б-Э} \rightarrow -E_к.$$

Путь протекания тока делителя $I_{дел}$:

$$+E_к \rightarrow R_{б1} \rightarrow R_{б2} \rightarrow -E_к.$$

Для того, чтобы $U_{0R_{б2}}$ определяло $U_{0бэ}$, а не наоборот, ток делителя выбирается намного больше тока покоя базы:

$$I_{дел} = (2 \div 5) I_{об}.$$

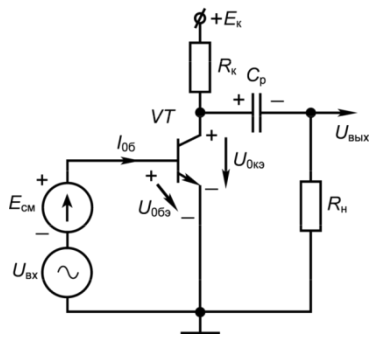
В этом случае изменения маленького базового тока под действием дестабилизирующих факторов на фоне большого тока делителя будут практически незаметны, а $\Rightarrow$ напряжения на резисторах будут зафиксированы (неизменны). Т.о. потенциал базы зафиксирован относительно «земли».

Схема и метод широко применяется на практике в лабораторных условиях при изменении температуры на $\Delta t = (20 \div 30)^\circ\text{C}$.

Способы задания рабочей точки усилительного элемента

I. От отдельного источника

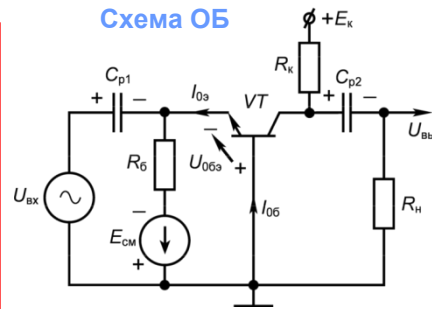
Схема ОЭ



$$U_{0бэ} = E_{cm} \quad E_{cm} = (1,5 \div 5)B$$

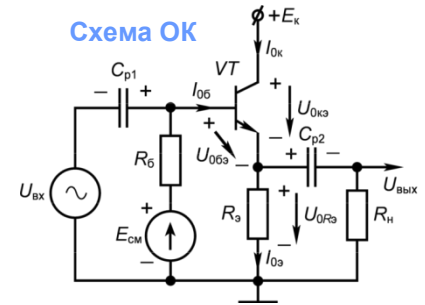
$$R_{á} = \frac{E_{ññ} - U_{0áý}}{I_{0á}}$$

Схема ОБ



$$R_{ý} = \frac{E_{ññ} - U_{0áý}}{I_{0ý}}$$

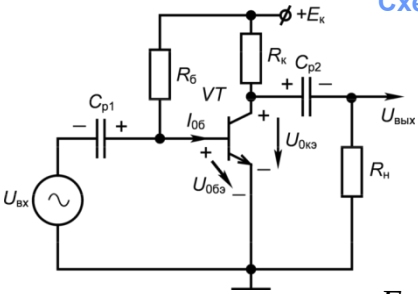
Схема ОК



$$R_{á} = \frac{E_{ññ} - U_{0áý} - I_{0ý} \cdot R_{ý}}{I_{0á}}$$

$$U_{0Rý} = E_{ê} - U_{0êý}$$

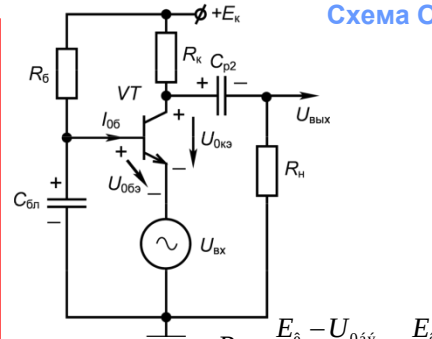
Схема ОЭ



$$R_{á} = \frac{E_{ê} - U_{0áý}}{I_{0á}} \cong \frac{E_{ê}}{I_{0á}}$$

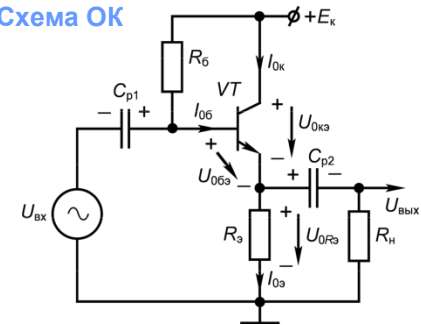
II. Фиксированным током

Схема ОБ



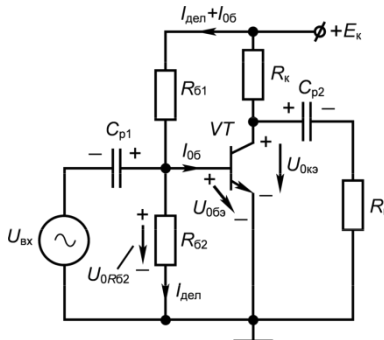
$$R_{á} = \frac{E_{ê} - U_{0áý}}{I_{0á}} \cong \frac{E_{ê}}{I_{0á}}$$

Схема ОК



$$R_{á} = \frac{E_{ññ} - U_{0áý} - I_{0ý} \cdot R_{ý}}{I_{0á}}$$

Схема ОЭ



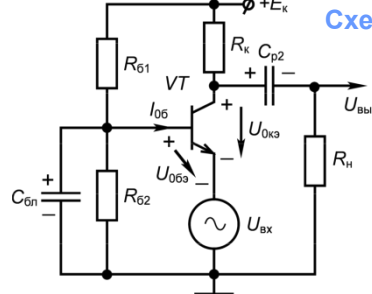
$$I_{дел} = (2 \div 5) I_{0б}$$

$$R_{á1} = \frac{E_{ê} - U_{0áý}}{I_{ááê} + I_{0á}}$$

$$R_{á2} = \frac{U_{0áý}}{I_{ááê}}$$

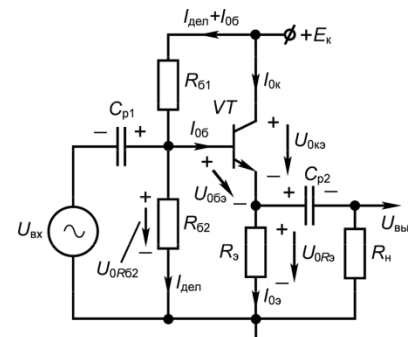
III. Фиксированным напряжением

Схема ОБ



по постоянному току схема аналогична сх. ОЭ

Схема ОК



$$R_{á1} = \frac{E_{ê} - U_{0Rá2}}{I_{ááê} + I_{0á}}$$

$$R_{á2} = \frac{U_{0áý} + U_{0Rý}}{I_{ááê}}$$

$$U_{0Rý} = \hat{A}_{ê} - U_{0êý}$$

Ссылки

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2008. – 798 с.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов — Москва: Альянс, 2013. — 496 с.
3. Лачин В.И., Савёлов Н.С. Электроника: Учебное пособие. – Изд. 8-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 703 с.
4. Миловзоров О.В., Панков И.Г. Электроника [Электронный ресурс] : учебник для бакалавров / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. — 5-е изд. — Москва: Юрайт, 2013. — Доступ из корпоративной сети ТПУ. Схема доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2014/FN/fn-37.pdf>
5. Фомичев Ю.М., Сергеев В.М. Электроника. Элементная база, аналоговые и цифровые функциональные устройства [Электронный ресурс] : учебное пособие; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Доступ из корпоративной сети ТПУ. Схема доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2012/m59.pdf>