

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.

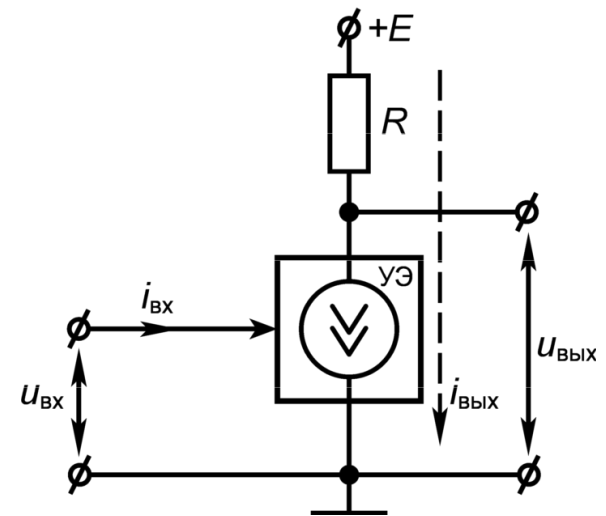
Для рассмотрения принципа построения УК на одном транзисторе воспользуемся функциональной схемой (см. рис.).

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

В качестве УЭ может использоваться биполярный или полевым транзистором.

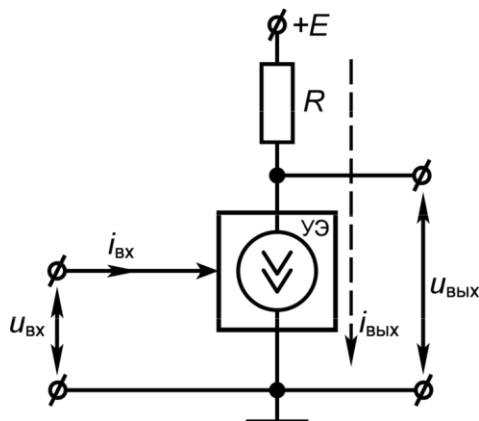
R – технологически необходимое сопротивление (задает динамический режим работы), при отсутствии которого (например, $R = 0$) выходное напряжение не меняется.

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

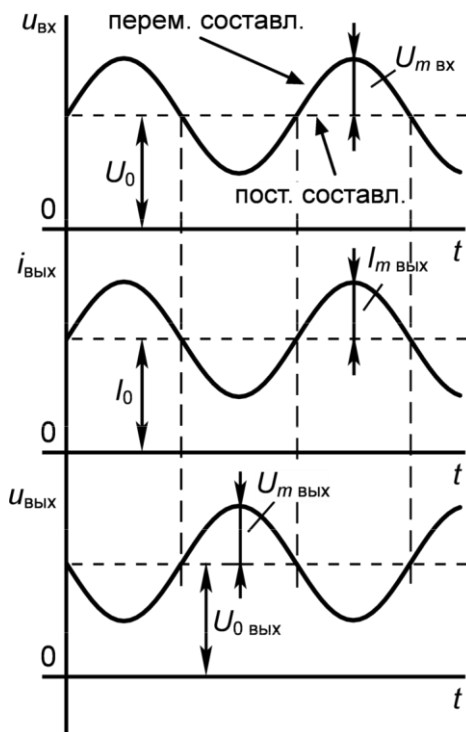


Функциональная схема усилительного каскада

Усилительный элемент представляет собой источник тока, управляемый током I_{BX} (для биполярного транзистора), либо источник тока, управляемый напряжением U_{BX} (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

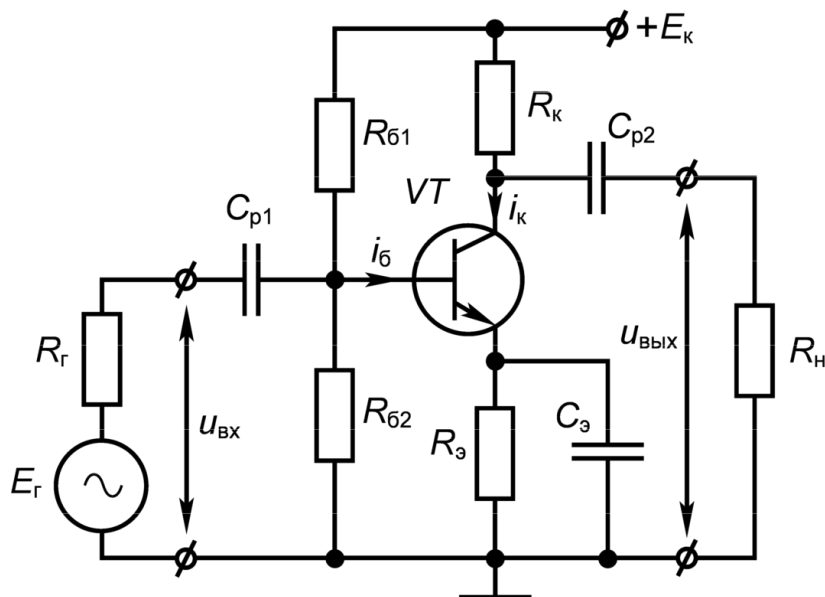


Схема усилительного каскада
по схеме ОЭ

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.

$R_{б1}$, $R_{б2}$ - резистивный делитель предназначен для задания рабочей точки транзистора методом фиксированного напряжения.

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

$C_э$ - шунтирует $R_э$ 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 - замкнут;
- 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 $U_{вх} \neq 0$).

$R_{H\sim} = R_k \parallel R_H$ - **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 $U_{ВХ} = 0$).

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: $+E_{см} \rightarrow БЭ \rightarrow U_{ВХ} = 0 \rightarrow (-)E_{см}$.

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

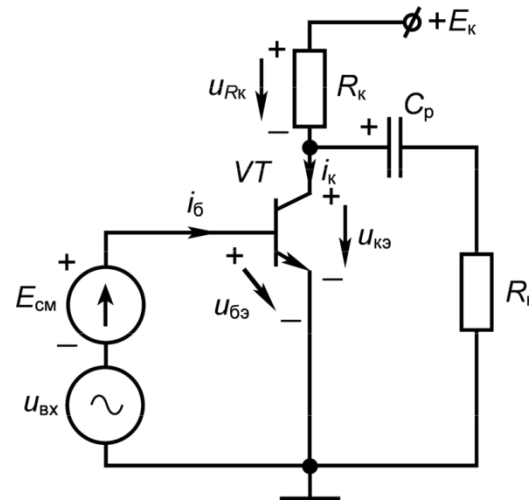
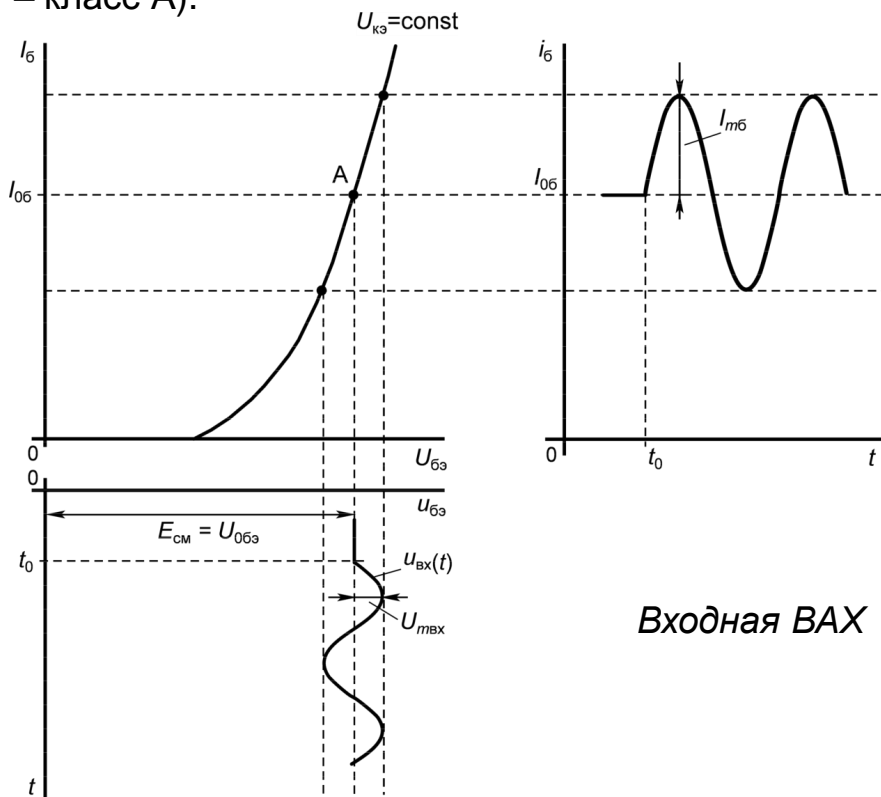


Схема УК по схеме ОЭ

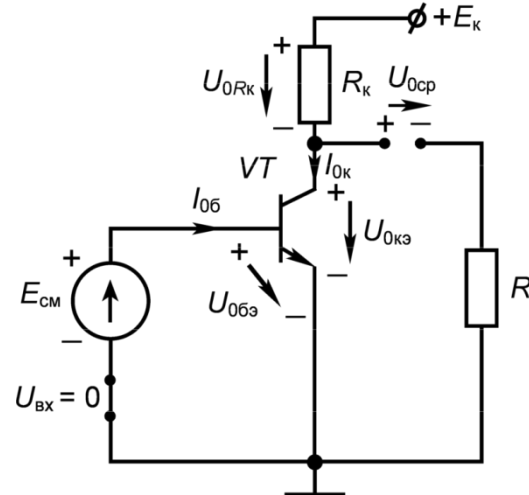


Схема УК в режиме покоя

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

$$I_{0к} = I_{об} \cdot \beta.$$

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

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:

$$U_{0Rk} = I_{0к} \cdot R_k;$$

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

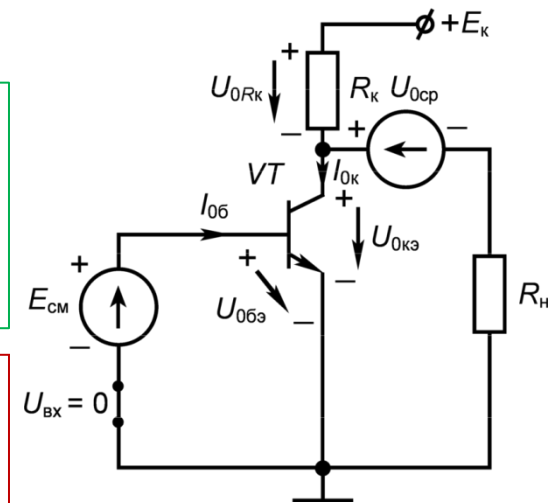
Коллекторное напряжение к приблизительно делится пополам между R_k и транзистором.

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

$U_{Cраб} = U_{0ср} = U_{0кэ}$ - это рабочее напряжение на конденсаторе.

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

Если емкость конденсатора C_p выбрана правильно, то напряжение $U_{0ср}$ практически не меняется в полосе пропускания усилителя. Поскольку C_p не пропускает постоянную составляющую ее можно представить источником напряжения величиной $U_{0ср} = U_{0кэ}$, 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 ($U_{ВХ} \neq 0$), меняющийся по гармоническому закону :

$$u_{ВХ}(t) = U_{mВХ} \sin \omega t.$$

По 2-му закону Кирхгофа справедливо :

$$u_{бэ}(t) = E_{СМ} + u_{ВХ}(t) = E_{СМ} + U_{mВХ} \sin \omega t.$$

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

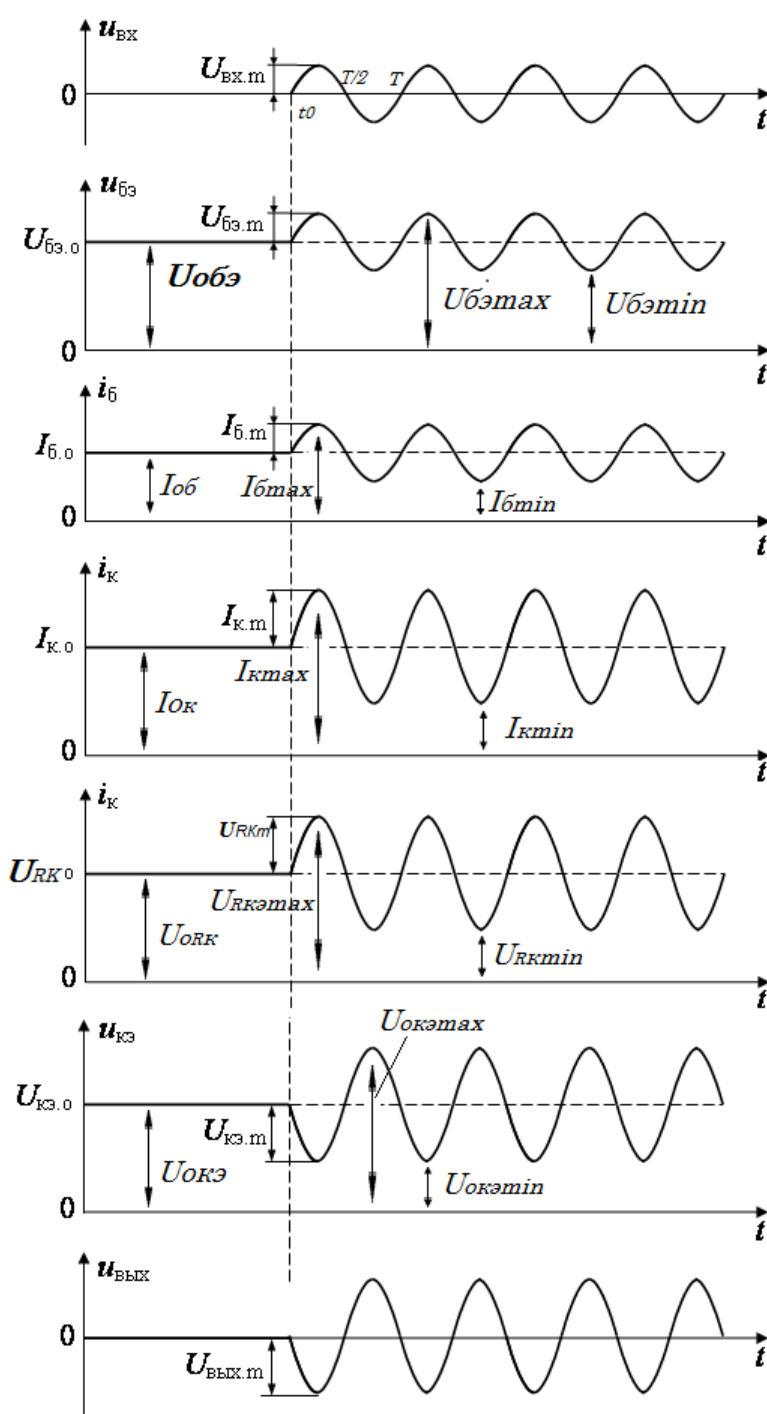
Под действием переменки $U_{бэ}$ базовый ток также приобретает переменную составляющую синфазную $U_{бэ}$ и синфазную входному сигналу:

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

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

$$I_{б \max} = I_{0б} + I_{mб};$$

$$U_{бэ \max} = U_{0бэ} + U_{mВХ}.$$



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

$$i_k(t) = i_b(t) \cdot \beta = I_{0b} \cdot \beta + I_{mb} \cdot \beta \cdot \sin \omega t = I_{0k} \cdot \beta + I_{mk} \sin \omega t.$$

Форма коллекторного тока идентична форме базового тока:

$$I_{k\max} = I_{0k} + I_{mk}.$$

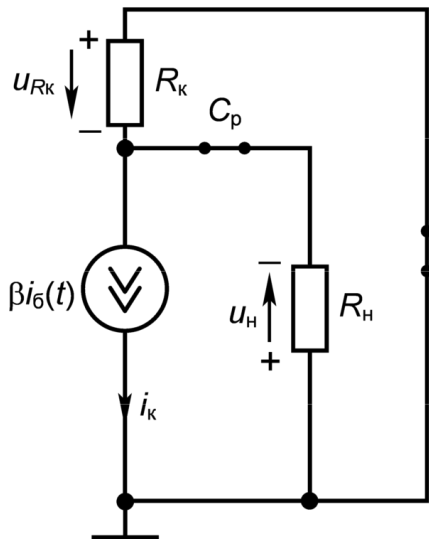


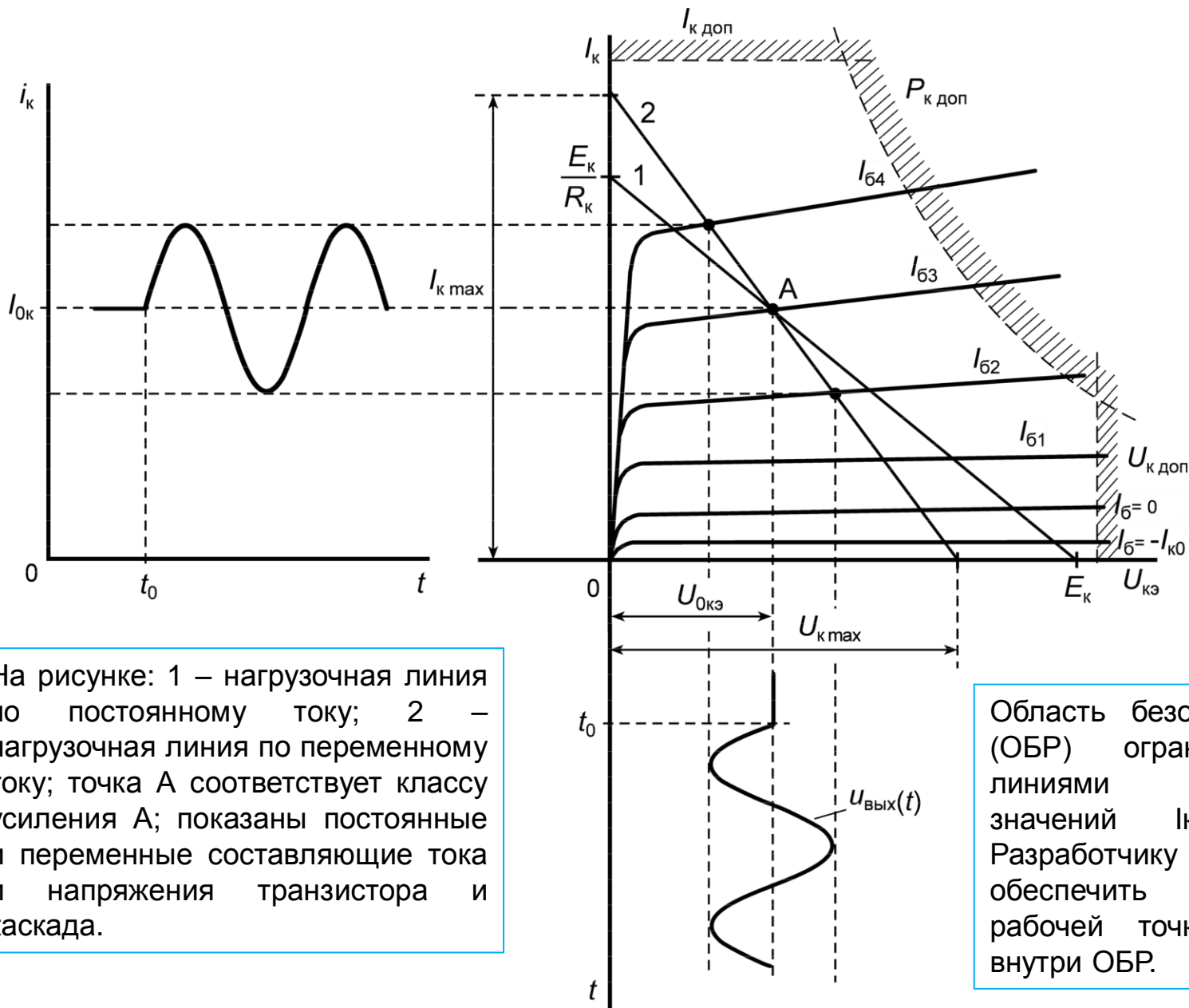
Схема УК в динамическом режиме (на переменном токе)

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 $U_{кэ} \downarrow$:

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

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 , $U_{кэ}$, P_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:

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

где $U_{\text{К НАС}}$ – напряжение насыщения коллектора;
 $I_{\text{К0(Э)МАХ}}$ – 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. $I_{\text{К МАХ}} = I_{0\text{К}} + I_{m\text{К}} < I_{\text{К ДОП}}$;
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:

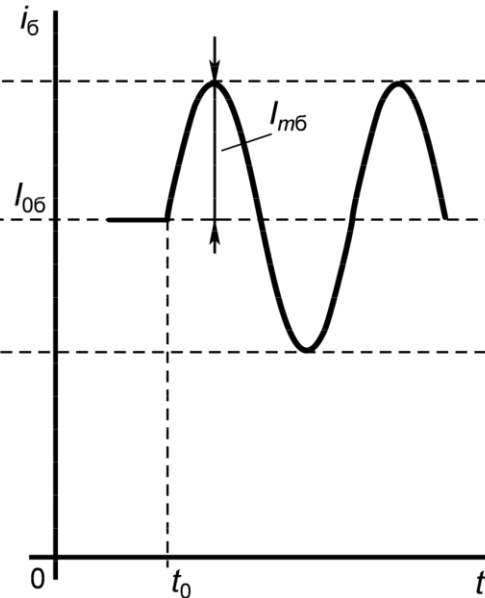
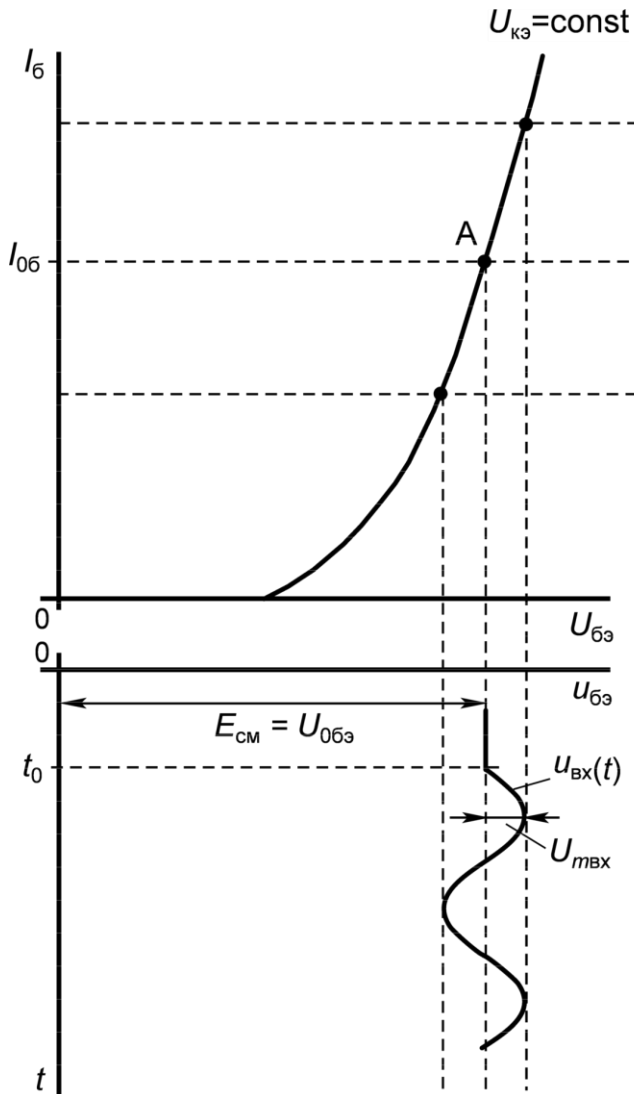
- режим покоя (или режим по постоянному току)
- режим по переменному току.

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

$$I_{0\text{к}} = I_{0\text{б}}.$$

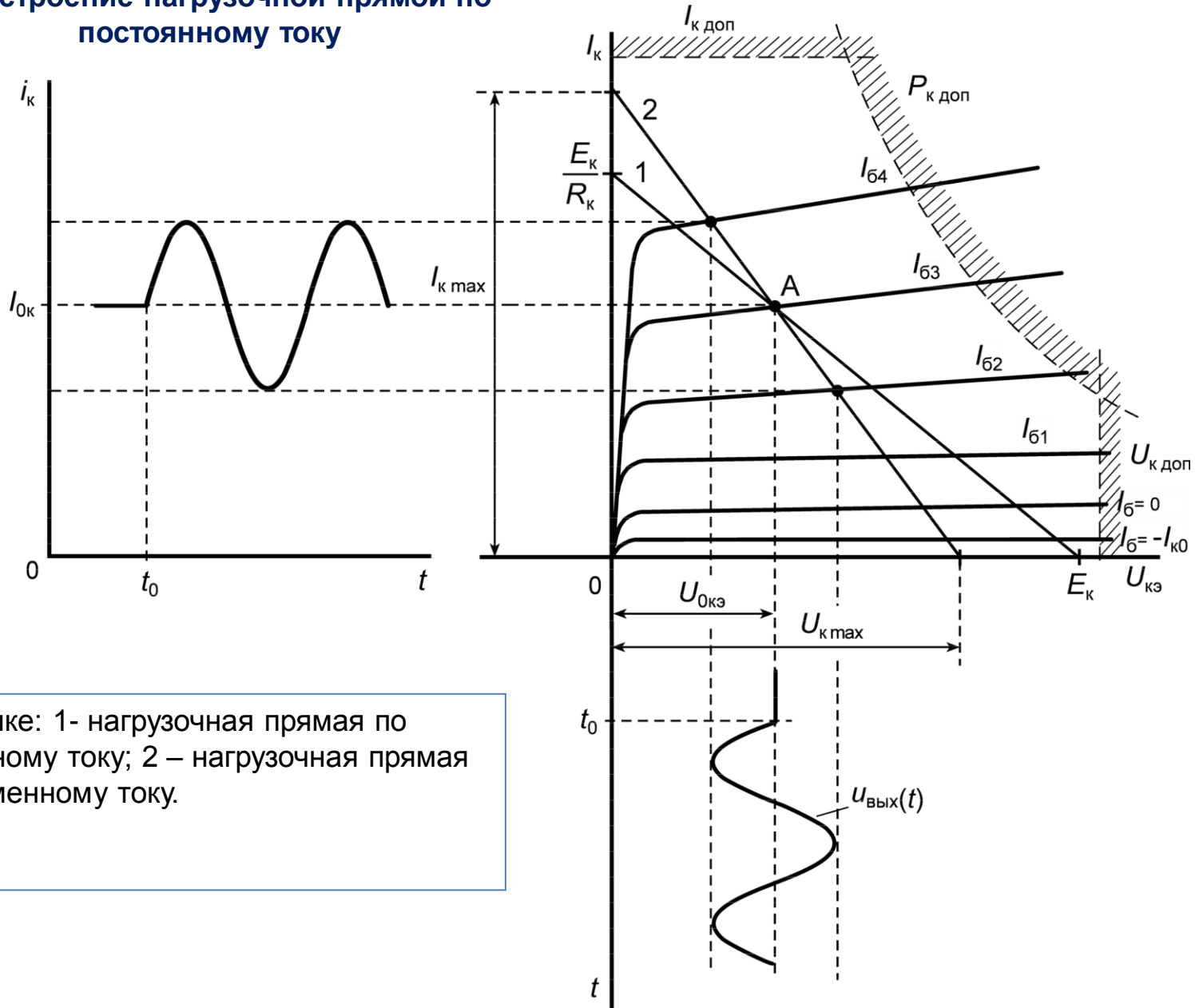
Поскольку транзистор работает в активном режиме, токи коллектора и базы связаны соотношением:

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

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:

$$E_{\text{к}} = u_{R_{\text{к}}}(t) + u_{\text{кЭ}}(t). \Rightarrow$$

$$u_{\text{кЭ}}(t) = E_{\text{к}} - u_{R_{\text{к}}}(t) = E_{\text{к}} - I_{0\text{к}}R_{\text{к}} - I_{\text{мк}}R_{\text{н}\sim} \sin \omega t = U_{0\text{к}} - \Delta i_{\text{к}}(t)R_{\text{н}\sim},$$

где $\Delta i_{\text{вЫХ}}(t) = \Delta i_{\text{к}}(t) = I_{\text{мк}}R_{\text{н}\sim} \sin \omega t$ – мгновенное значение тока в выходной цепи УЭ;
 $R_{\text{н}\sim} = R_{\text{к}} \parallel R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки по переменному току.

$$u_{\text{вЫХ}}(t) = u_{\text{кЭ}}(t) = U_{0\text{к}} - \Delta i_{\text{вЫХ}}(t)R_{\text{н}\sim} \quad (*)$$

- 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. $u_{кз}(t) = 0 \Rightarrow$

$$0 = U_{0к} - \Delta i_{\text{ВЫХ}}(t) R_{\text{Н}\sim} \Rightarrow \Delta i_{\text{ВЫХ}}(t) = \Delta i_{\text{К}}(t) = \frac{U_{0к}}{R_{\text{Н}\sim}}.$$

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

$$I_{\text{ВЫХ max}} = I_{\text{К max}} = I_{0к} + \frac{U_{0кз}}{R_{\text{Н}\sim}}.$$

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:

$$U_{\text{ВЫХ max}} = U_{0к} + I_{0к} \cdot R_{\text{Н}\sim}.$$

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.

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.