

# ГАПОУ СО «ТЭТ»

## дисциплина Электронная техника

- Усилители
- Построение многокаскадных усилителей
- Основные требования к усилительным каскадам
- Преподаватель Е.М. Кузив

## Лекция 4-5

# **УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ**

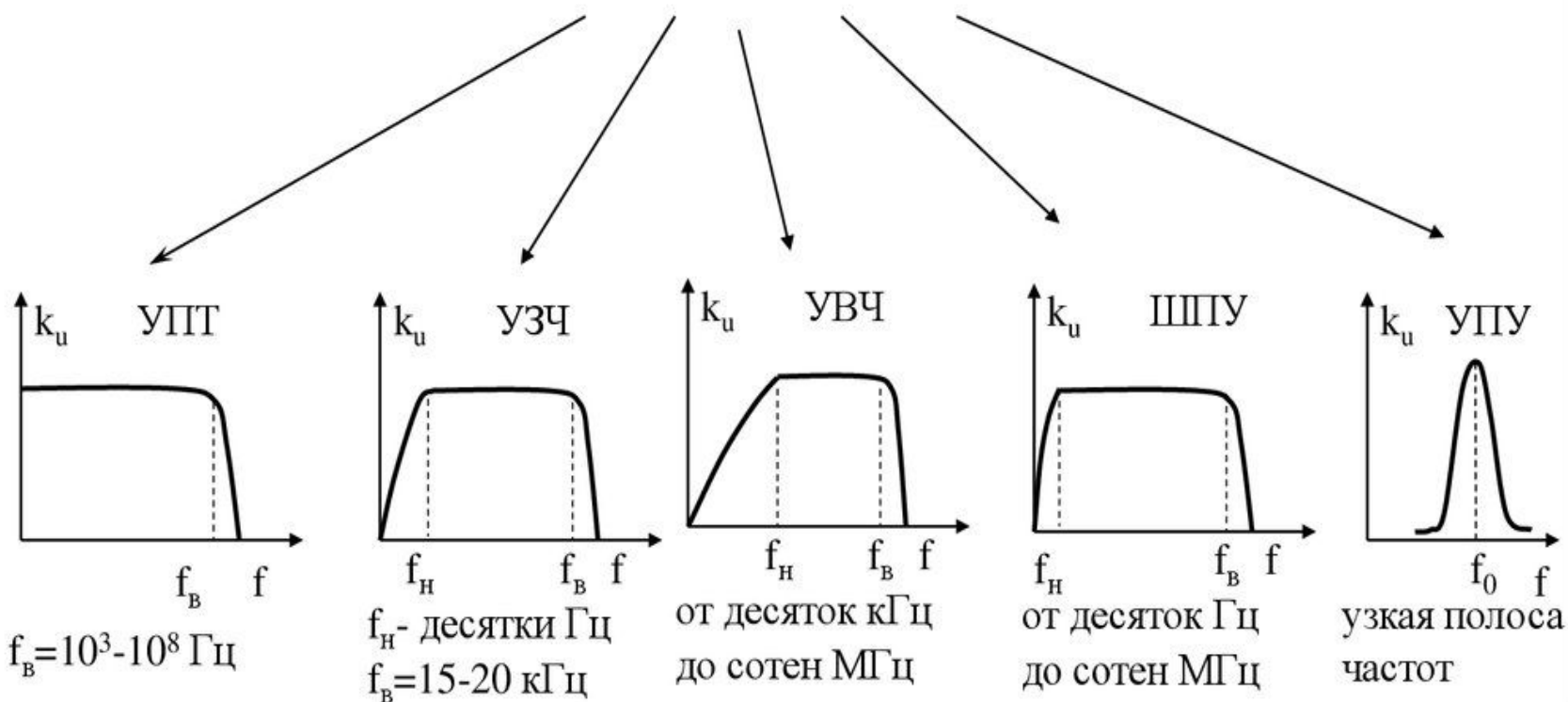
- **Усилитель** – это устройство, увеличивающее мощность входного сигнала *за счет энергии источника питания*, т.е. усилитель всегда лишь управляет передачей энергии к нагрузке.
- Многие усилители состоят из нескольких ступеней, осуществляющих последовательное усиление сигнала, которые называются *каскадами*

# Классификация усилителей

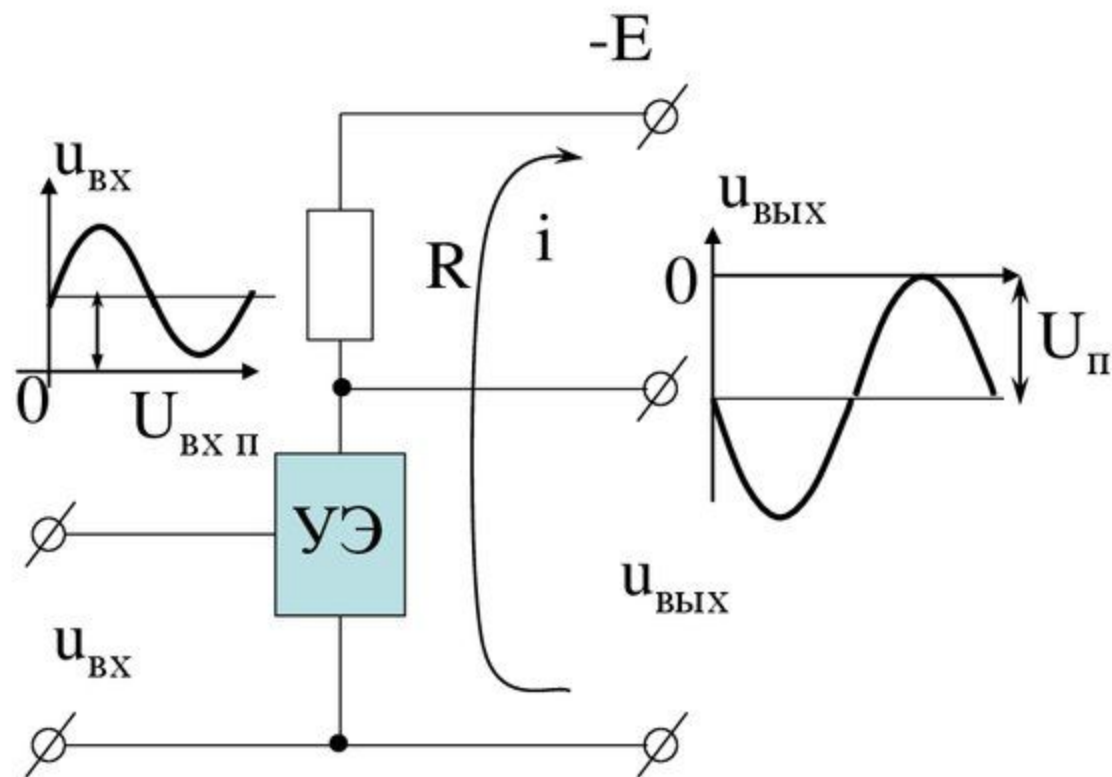
- **по виду сигнала:**
  - усилители периодических сигналов;
  - усилители постоянного тока (УПТ);
  - импульсные усилители;
  - специальные.
- **по роду усиливаемой величины:**
  - усилители тока ( $k_i > 1$ );
  - усилители напряжения ( $k_u > 1$ );
  - усилители мощности ( $k_p > 1$ )

- Важнейшим показателем усилителей является **амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)**: зависимость модуля коэффициента усиления  $k_u$  для синусоидального входного сигнала от частоты.

## УСИЛИТЕЛИ



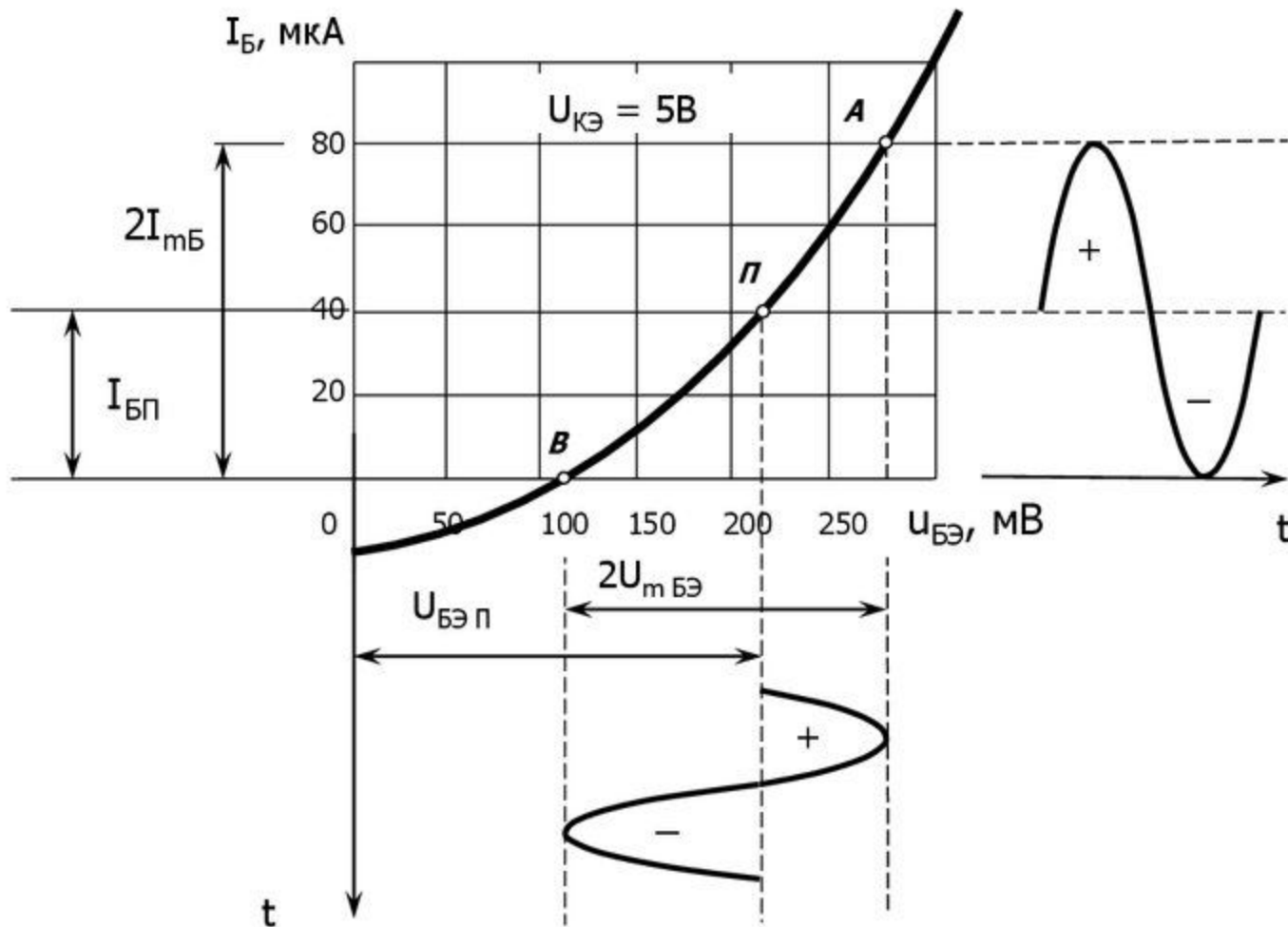
# Основные элементы каскада: управляемый элемент (БТ) и резистор R



Для обеспечения работы каскада при  $\sim$  входном сигнале в его входной и выходной цепи должны быть созданы постоянные составляющие тока  $I_r$  и напряжения  $U_{п}$ . Для этого во входную цепь подают постоянное напряжение  $U_{ВХ П}$ .

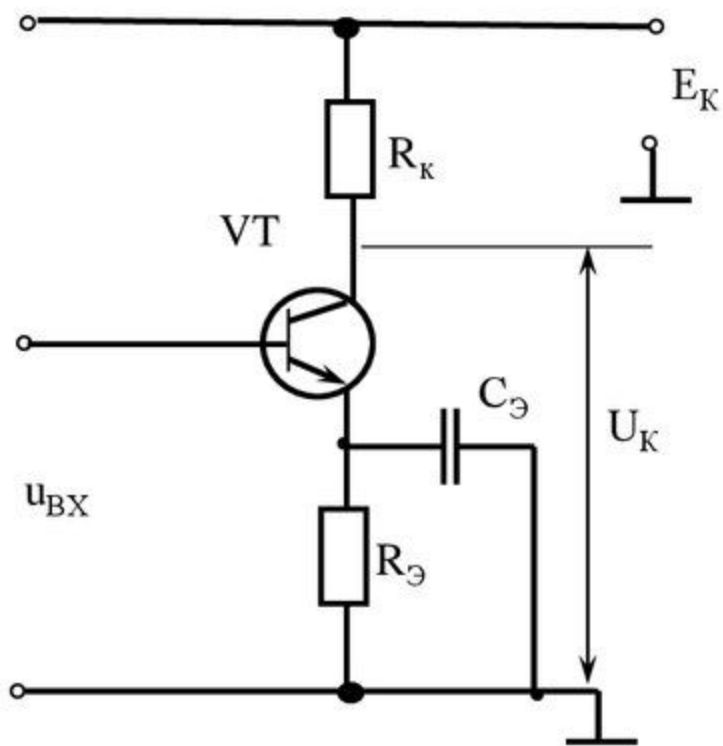
$$I_r \geq I_m \quad U_{п} \geq U_m$$

# Графоаналитический метод расчета усилительного каскада с ОЭ



# Линия нагрузки

$$U_{K\Pi} = E_K - I_K R_K$$

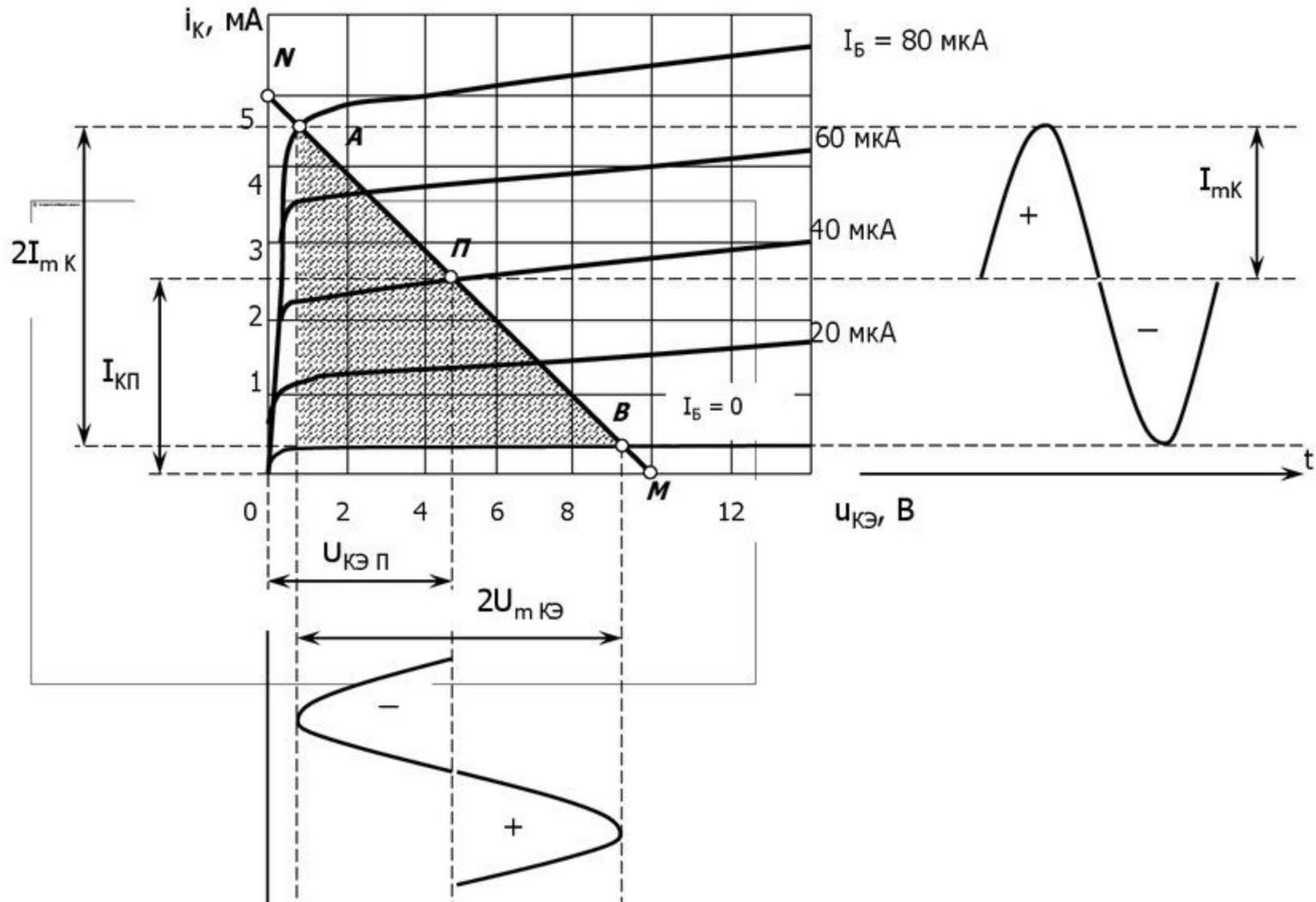


1)  $I_K = 0$ ;  $U_{K\Pi} = E_K$

2)  $U_{K\Pi} = 0$ ;  $I_K = E_K/R_K$



# Графоаналитический метод расчета усилительного каскада с ОЭ



# Порядок расчета

- На выходных характеристиках строится линия нагрузки каскада, которая представляет собой геометрические места точек, координаты которых соответствуют возможным значениям точки покоя каскада.
- На входной характеристике выбирается необходимое значение тока базы покоя, и тем самым определяются координаты точки покоя  $P$ , путем пересечения соответствующей выходной характеристики с линией нагрузки.
- Для исключения искажений выходного сигнала необходимо, чтобы рабочая точка при перемещении вверх по линии нагрузки не заходила в область нелинейных начальных участков выходных характеристик, а при перемещении вниз – в область

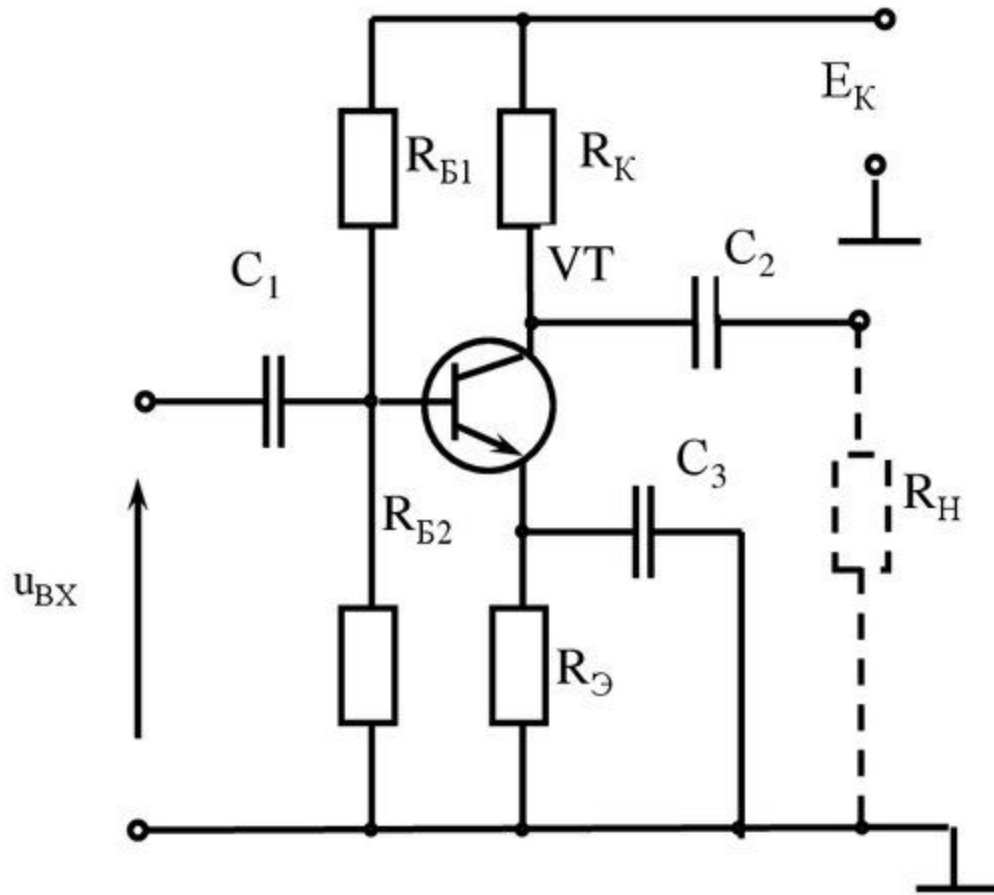
# Широкополосный (апериодический) усилитель

- Основное требование к усилителю:

отсутствие искажений закона изменения входного сигнала в процессе усиления.

- Для обеспечения этого требования для режима покоя необходимо выбрать прямолинейный участок входной характеристики и подать постоянное напряжение, смещающее эмиттерный переход в прямом направлении.

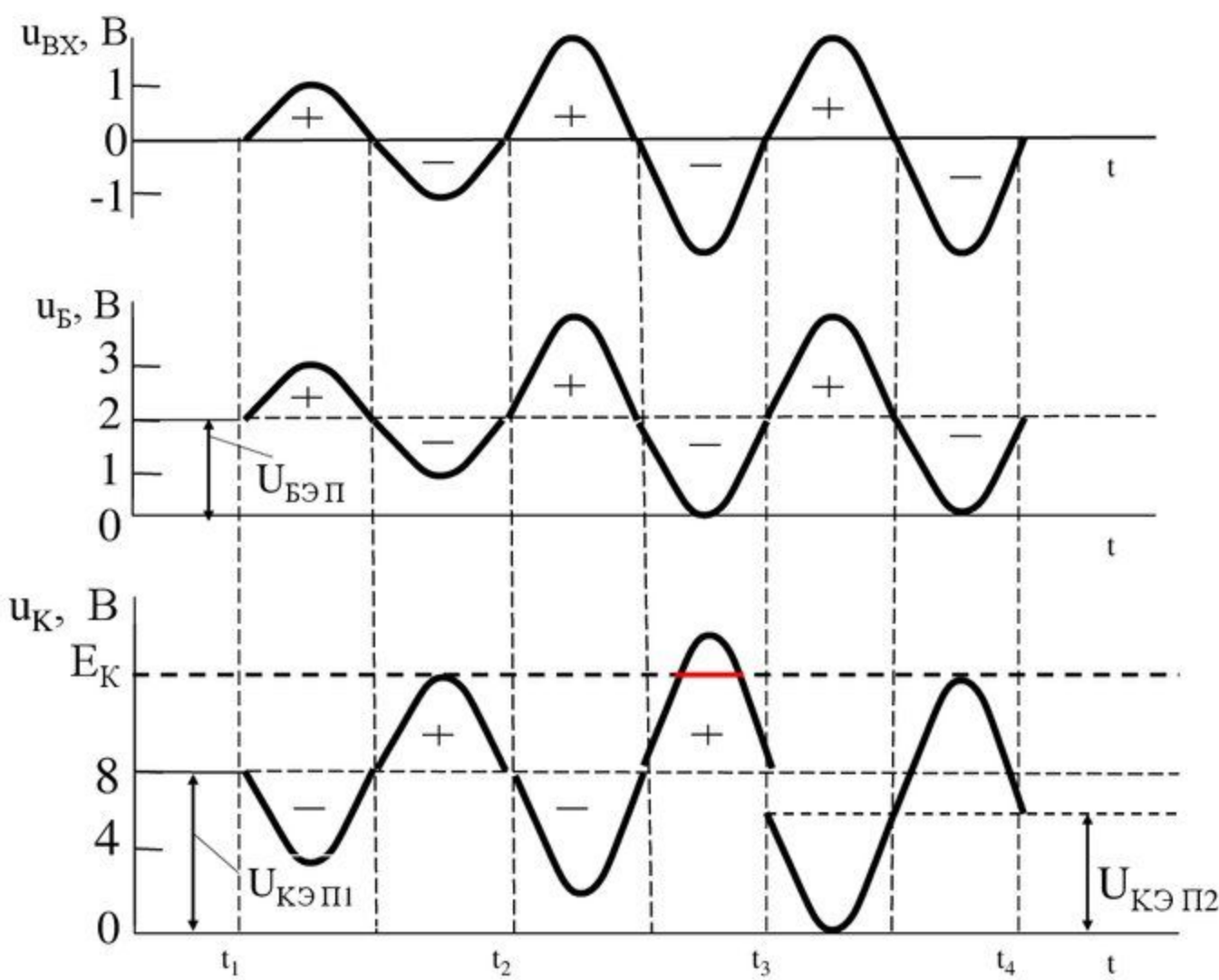
# ШПУ



$C_1$  и  $C_2$  – разделительные емкости (отделяют переменную составляющую от постоянной составляющей);

$C_3$  – блокирующий конденсатор (устраняет ООС по переменному току)

$R_{Б1}$ ,  $R_{Б2}$  – делитель напряжения (для смещения эмиттерного перехода в прямом направлении и выхода на линейный участ



Временные диаграммы усилительного каскада

**0 – t<sub>1</sub>:**

$u_{BX} = 0$  (постоянное напряжение);  $u_B = 2$  В;  $u_{\Theta} = 2 - 0,6 = 1,4$  В;  $u_K$  (режим зависит от  $R_K$ )

**t<sub>1</sub> – t<sub>2</sub>:**

малый входной сигнал.  $u_B = 2 + u_{BX}$ ,  $u_{\Theta} = \text{const}$ , т.е. есть  $C_3$  (фильтрация переменной составляющей);

**t<sub>2</sub> – t<sub>3</sub>:**

Большой входной сигнал. Возможны искажения «ограничение». Нежелательно искажение  $u_K$ ;

**t<sub>3</sub> – t<sub>4</sub>:**

Другой режим, при увеличении  $R_K$  (аналогично  $t_1 - t_2$ ). Искажений нет, режим

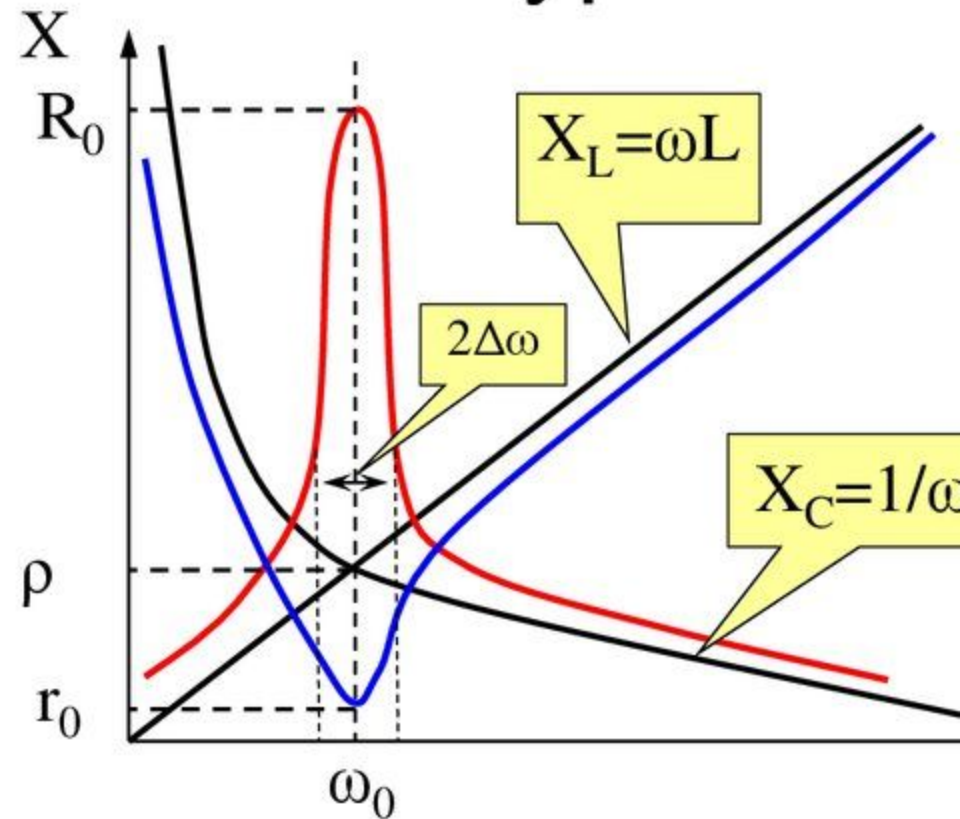
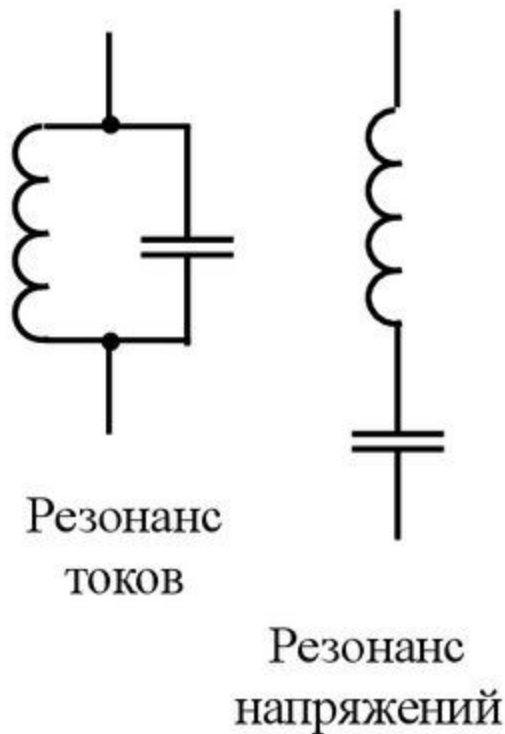
# Избирательные усилители

- это усилители, работающие в определенной полосе частот.

## Типы усилителей:

- 1) Резонансный усилитель;
- 2) Усилитель с полосовыми фильтрами;
- 3) Усилитель с избирательными РС цепями.

# Частотные свойства одиночного колебательного контура



$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

- Условие резонанса

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

- $\rho$  – характеристическое сопротивление, т.е. сопротивление каждого элемента на резонансной частоте;
- $R_0, r_0$  – эквивалентное резонансное сопротивление (теоретически  $R_0 = \infty, r_0 = 0$  – для контура без потерь);
- Потери в контуре – активное сопротивление провода катушки, потери в сердечнике, гистерезис,



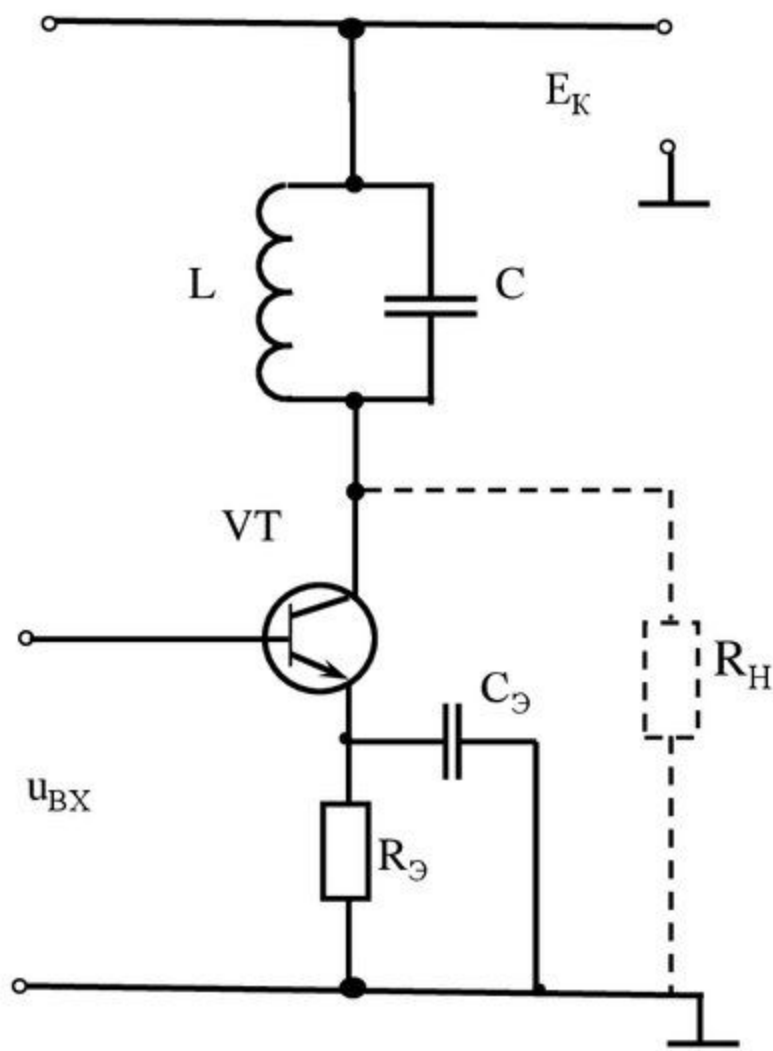
- Селективность усилительных свойств оценивается добротностью:

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f}; \quad Q = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega}$$

$2\Delta\omega$  – полоса пропускания

Обычно  $Q = 5 - 100$  (у специальных усилителей – до 1000)

# Резонансный усилитель с ОЭ



L, C – параллельный контур коллекторной цепи (вместо резистора в широкополосном усилителе).

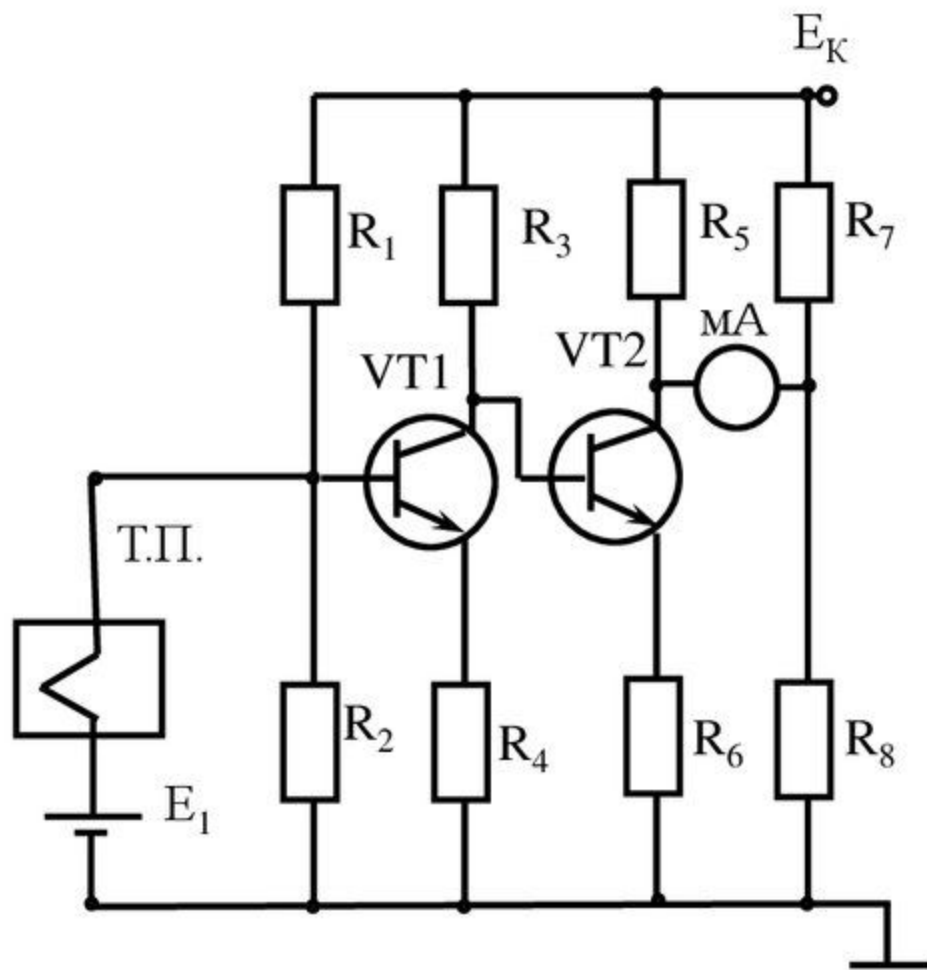
$$k_U = \frac{I_K}{I_B} \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{в}}}$$

$R_{\text{ВЫХ}}$  складывается из  $R_0$ ,  $R_{\text{ВЫХ}}$  транзистора и  $R_{\text{Н}}$ .

Если пренебречь  $R_{\text{ВЫХ}}$  транзистора и  $R_{\text{Н}}$ , то  $k_U \sim R_0$ , а на резонансной частоте сопротивление контура велико и  $k_U$  - максимален

# Усилитель постоянного тока (УПТ)

- УПТ предназначены для усиления сигналов, медленно изменяющихся во времени, т.е. сигналов, частота которых приближается к нулю.
- **Дрейфом усилителя** называется самопроизвольное изменение выходного напряжения УПТ при неизменном напряжении входного сигнала.
- **Причины дрейфа:** нестабильность напряжения питания схемы, температурная нестабильность параметров транзисторов и резисторов.
- Напряжение дрейфа определяют при замкнутом входе усилителя по отношению к выходному напряжению.



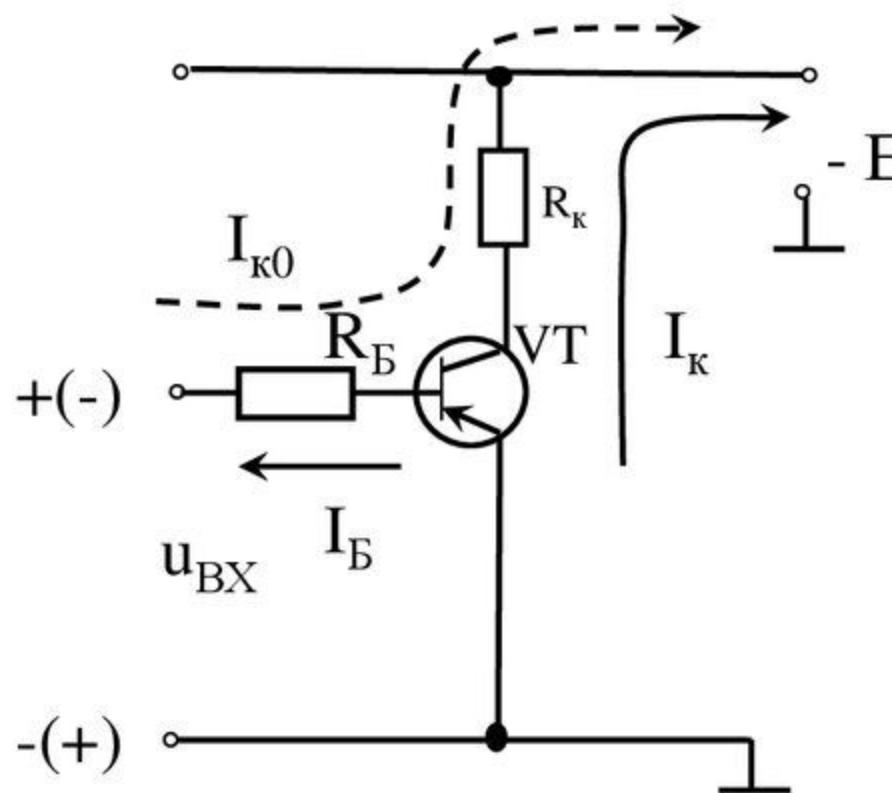
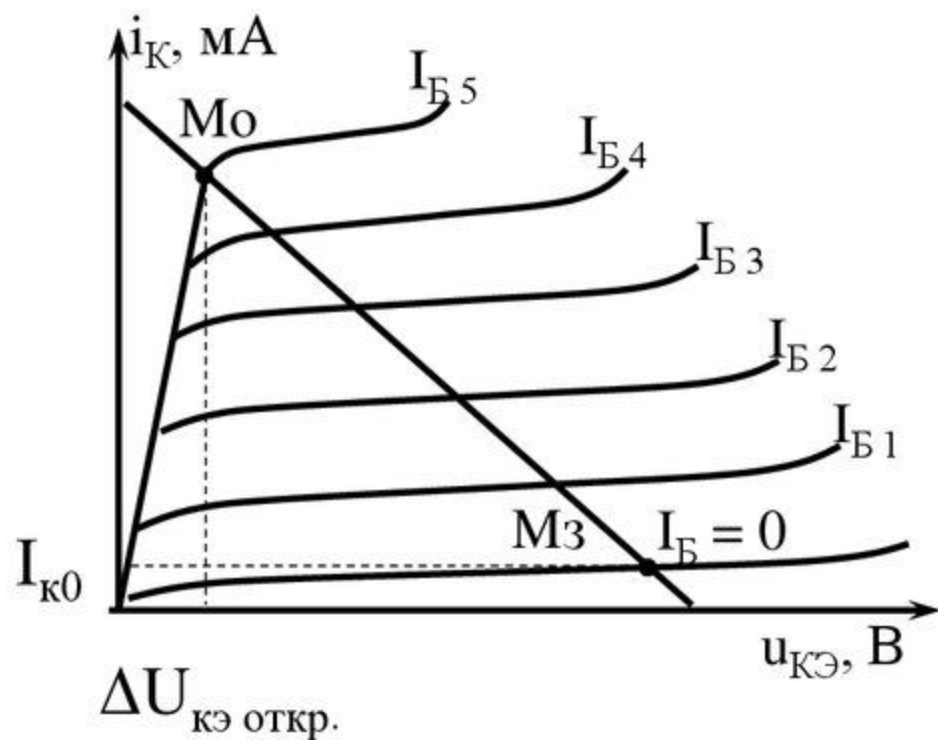
$R_1, R_2$  – делитель напряжения  
 $E_1$  – компенсирующая ЭДС  
 $R_4$  – термостабилизация режима  
 $R_3, VT1$  и  $R_4$  – делитель напряжения

Т.П. – термопара – электрический термометр (служит для преобразования текущего значения температуры в электрический сигнал.

Термопара состоит из 2-х различных металлических пластин, одни концы которых соединены сваркой или пайкой. При нагреве места соединения пластин на их концах образуется постоянное напряжение, которое пропорционально значению температуры

# Ключевой режим работы БТ

Импульсная и цифровая техника базируется на работе транзистора в качестве ключа (замыкание и размыкание цепи нагрузки)



- Качество транзисторного ключа определяется в первую очередь падением напряжения на транзисторе в открытом состоянии (остаточное напряжение) и остаточным током транзистора в закрытом состоянии.

- Строится линия нагрузки по уравнению:

$$U_{кэ} = - (E_K - I_K \cdot R_K)$$

- Режим **отсечки** транзистора осуществляется подачей на его вход напряжения положительной полярности ( $U_{вх} > 0$ ). Эмиттерный переход запирается и  $I_{э} = 0$ . Вместе с тем через резистор  $R_B$  протекает обратный (тепловой) ток коллекторного перехода  $I_{к0}$  (точка  $M_3$ ).

• Протекание  $I_{К0}$  связано с тем, что транзистор в закрытом состоянии не обеспечивает полное отключение  $R_K$  от источника питания. Малое значение  $I_{К0}$  является одним из критериев выбора транзистора для ключевого режима работы.

• Значение входного запирающего напряжения выбирают из расчета:

$$U_{БЭ} = U_{вх.зап} - I_{К0} \cdot R_B > 0$$

Для германиевых транзисторов  $U_{БЭ} = 0,5 - 2$  В

- Режим открытого состояния транзистора достигается изменением полярности входного напряжения ( $U_{ВХ} < 0$ ), точка  $M_0$ .

$$I_K = \frac{E_K - \Delta U_{КЭ\text{ откр}}}{R_K}$$

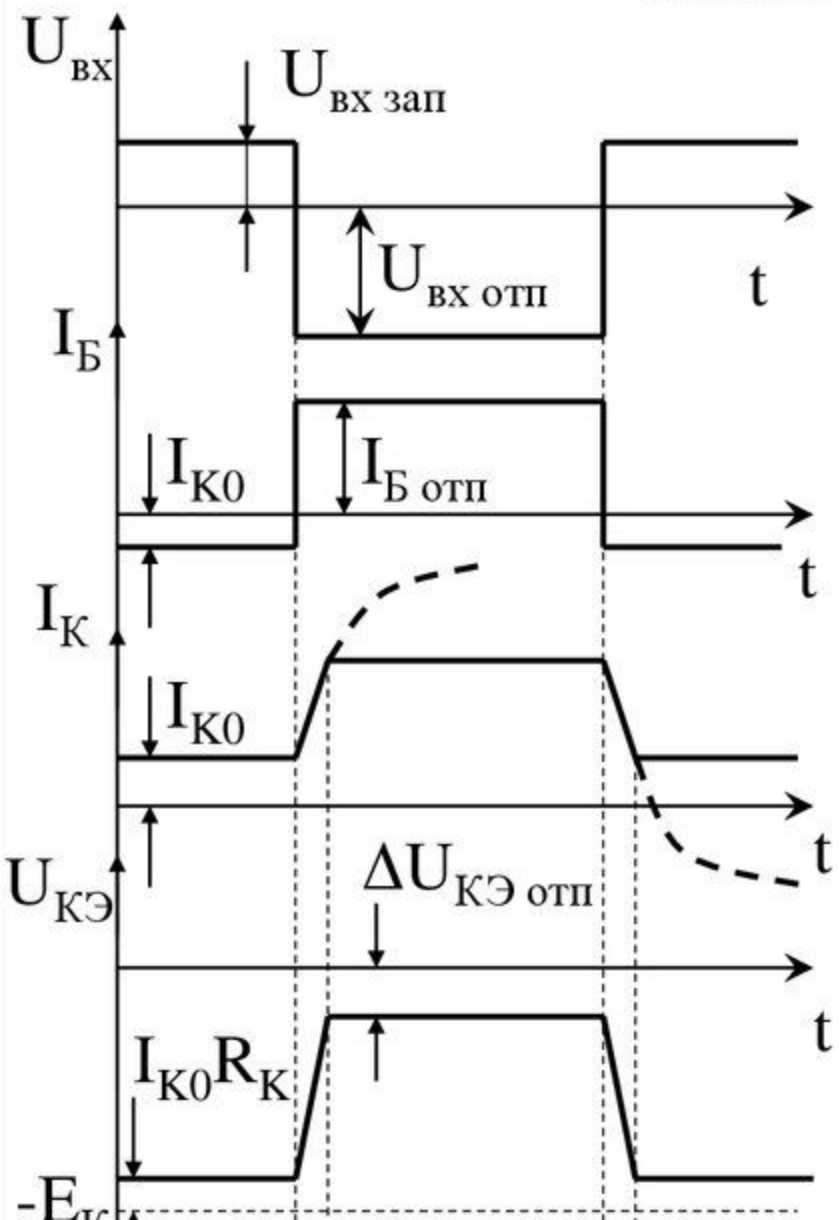
$\Delta U_{КЭ\text{ откр}}$  – остаточное напряжение на транзисторе в открытом состоянии;

В зависимости от типа транзистора

$$\Delta U_{КЭ\text{ откр}} = 0,05 - 1 \text{ В и } I_K = E_K / R_K.$$



# Диаграммы напряжений и токов ключевой схемы



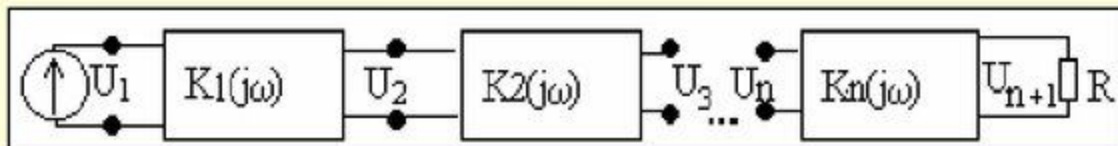
$t_0-t_1$  – транзистор заперт, токи  $I_{Б}$  и  $I_{К}$  определяются тепловым током транзистора  $I_{К0}$ ,

$$U_{КЭ} = - (E_{К} - I_{К} \cdot R_{К});$$

$t_1-t_2$  – отпирание транзистора, из-за инерционности транзистора  $I_{К}$  и  $U_{КЭ}$  изменяются по экспоненте;

$t_3$  – к схеме прикладывается запирающее напряжение, возникает задержка в запирании транзистора.

# Многокаскадные усилители



• Одиночный усилительный каскад имеет невысокий коэффициент усиления (10-50). Для получения больших коэффициентов усиления применяют многокаскадные усилители, в которых каскады соединяют последовательно.

• Считаем, что: 1) частотная характеристика коэффициента усиления i-ого каскада равны  $K_i(j\omega) = K_i(\omega)e^{j\varphi}$ ; 2) каскады согласованы по напряжению т.е. выходное сопротивление предыдущего и входное сопротивление последующего связаны соотношением  $R_{ВЫХ}^{(j-1)} \ll R_{ВХ}^j$ . Это означает, что каскады можно рассматривать независимые.

• Отсюда следует, что

$$K_{(общ)}(j\omega) = \frac{U_{n+1}}{U_1} = \frac{U_{n+1}(U_n \dots U_2)}{(U_n U_{n+1} \dots U_2) U_1} = K_n(j\omega) K_{n-1}(j\omega) \dots K_1(j\omega) = \prod_{i=1}^n K_i(j\omega)$$

Отсюда АЧХ коэффициента усиления есть  $K_{ОБЩ} = \prod_{i=1}^n K_i(\omega)$ , а его ФЧХ –  $\varphi_{ОБЩ} = \sum_{i=1}^n \varphi_i$

• С увеличением числа каскадов коэффициент усиления возрастает, а полосу пропускания многокаскадного усиления уменьшаются. Так, если все каскады одинаковы и имеют граничную частоту  $\omega_B$ , то общая граничная частота многокаскадного усилителя равна  $\omega_{B, ОБЩ} = \omega_B / \sqrt{n}$ , где n - число каскадов.

$$\omega_{B, ОБЩ} = \omega_B / \sqrt{n}$$

# Классификация усилителей

1. По абсолютному значению усиления

2) По характеру входного сигнала:

1. Усилители непрерывных сигналов;
2. Усилители импульсных сигналов;

3) По назначению:

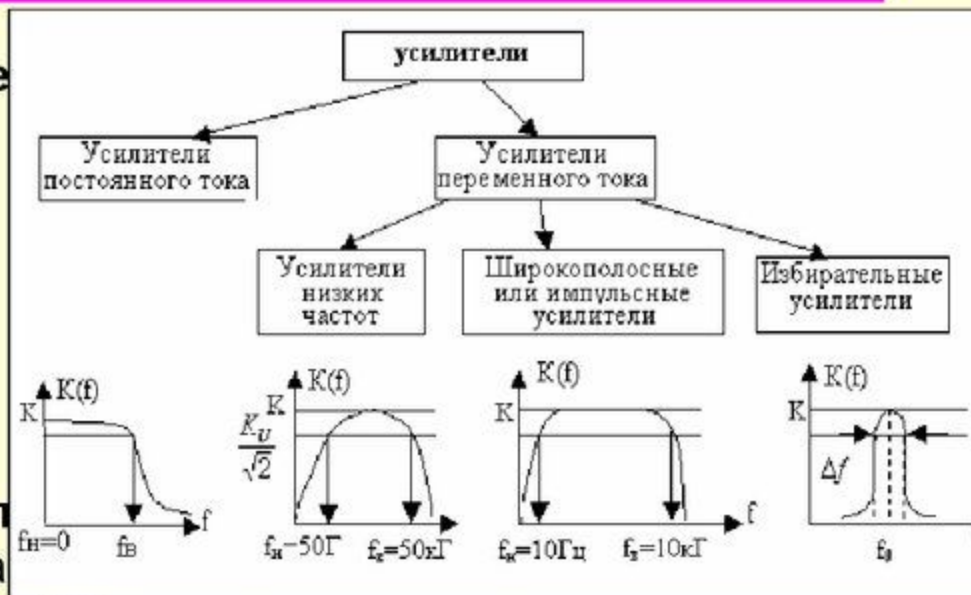
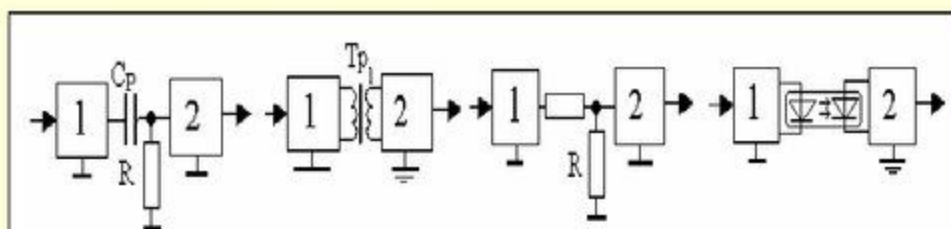
1. Усилители напряжения;
2. Усилители тока;
3. Усилители мощности;

4). По виду используемых активных элементов:

1. Усилители на электронно-вакуумных лампах;
2. Усилители на биполярных транзисторах (БТ);
3. Усилители на полевых транзисторах (ПТ);
4. Усилители на туннельных диодах (ТД);
5. Параметрические усилители.
6. Усилители на интегральных схемах;

5). По числу усилительных каскадов:

1. Однокаскадные;
2. Многокаскадные;



6). По виду связи между каскадами:

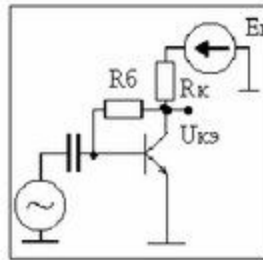
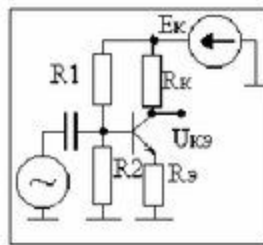
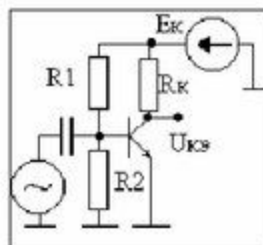
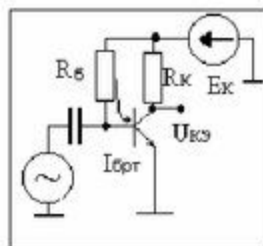
1. Усилители с RC-связью или с реостатно-емкостными связями (рис.8. ). Каскады 1 и 2 должны иметь общую точку нулевого потенциала. Такая связь возможна только в усилителях переменного тока.

2. Трансформаторная связь (рис.8. ). При трансформаторной связи передача сигнала от одного каскада к другому осуществляется с помощью трансформатора. Каскады могут не иметь общей точки нулевого потенциала. Такая связь возможна только в усилителях переменного тока.

3. Непосредственная или гальвантческая связь между каскадами (рис. ). Связь между каскадами осуществляется непосредственно или через резисторы. При такой связи каскады обязательно должны иметь общую точку нулевого потенциала и такая связь применима только в УПТ.

4. Оптронная связь (рис. ). При такой связи каскады

# Методы задания рабочего режима (рабочей точки) активного элемента и его стабилизация



В предыдущей схеме рабочая точка БТ задавалась двумя источниками ЭДС. Применять два источника напряжения не целесообразно т.к. это отдельные устройства и требуют дополнительных затрат. Для создания рабочей точки транзистора обычно используют источник  $E_k$ , а рабочую точку на базе задают с помощью резисторов путем задания необходимого тока базы или напряжения база-эмиттер. Рассмотрим основные схемы.

1.) Схема с фиксированным током базы  $I_{б.пт.}$ . В этой схеме рабочая точка задается током базы  $I_{б.пт.}$ .

Его величина задается сопротивлением резистора  $R_б$ . Его величина выбирается из соотношения  $R_б = (E_k - U_{бэ\ pt}) / I_{б\ pt}$ , а величина резистора  $R_к$  выбирается из соотношения  $I_k\ pt = \beta I_{б\ pt}$  отсюда,  $U_{кэ\ pt} = E_k - R_к I_k\ pt$ .

Преимущество схемы: простота схемы. Недостаток: рабочая точка, т.е.  $U_{кэ\ pt}$  сильно зависит от температуры окружающей среды и параметров конкретного транзистора.

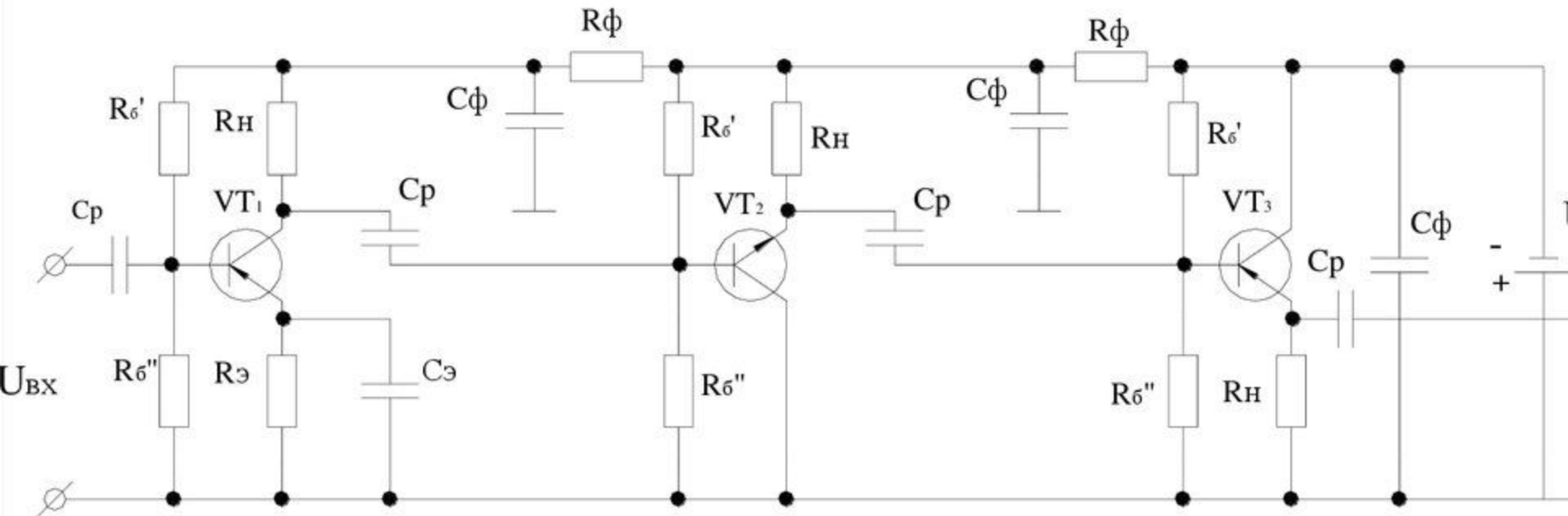
2.) Схема с резистивным делителем в цепи базы.

В этой схеме -  $R_1, R_2$  - резистивный делитель цепи базы, с его помощью задается необходимая величина  $U_{бэ\ pt}$ . (Он делит напряжение  $E_k$  и получает необходимое напряжение на базе).

3.) Схема с эмиттерной стабилизацией рабочей точки.  $R_э$  - сопротивление эмиттерной цепи, с его помощью создается отрицательная обратная связь, которая стабилизирует положение рабочей точки. Схема работает так. С возрастанием температуры окружающей среды  $I_{к.пт}$  возрастает, это приводит к тому, что  $U_{кэ.пт}$  уменьшается. Так происходило бы, если бы не было  $R_э$ , а с  $R_э$  происходит так. С возрастанием температуры  $I_{к.пт}$  возрастает ( $U_{к.пт}$  должно бы уменьшаться, но)  $I_э.пт \approx I_{к.пт}$ , при этом  $U_{R_э}$  возрастает, а  $U_{бэ.пт} = (U_{б1} - U_{R_э})$  уменьшается, уменьшение этого напряжения эквивалентно уменьшению  $I_{б.пт}$ , что приводит к тому, что  $I_{к0}$  уменьшается, а  $U_{кэ}$  остается постоянным, т.е.  $U_{кэ.пт} = const$ .

4.) Схема с коллекторной стабилизацией рабочей точки. В этой схеме рабочая точка задается током в цепи базы который возникает за счет обратной связи. Благодаря ему происходит стабилизация выходного напряжения при изменении температуры окружающей среды.

Определить схему включения транзисторов  
VT1, VT2, VT3 в схеме многокаскадного  
усилителя НЧ.



# Обратная связь в усилителях

**Под обратной связью** понимают передачу части выходного сигнала на вход усилителя. В усилителях возникают три вида обратной связи:

1. **Внутренняя** - имеет место во всех активных элементах и определяется их конструкцией и физическими процессами в них происходящими. Например, параметр  $h_{12}$  в биполярном транзисторе характеризует обратную связь, которая возникает за счет модуляции ширины базы.

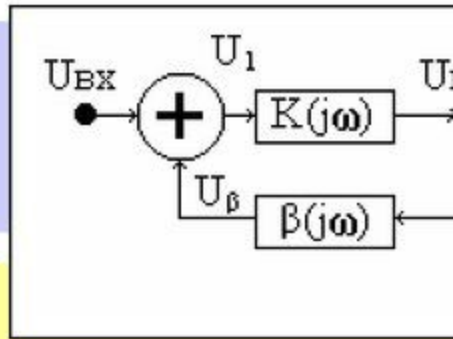
2. **Паразитная** - обусловлена наличием паразитных индуктивных емкостных ( $L, C$ ) связей путей, которые создают пути для передачи части выходного сигнала на вход.

3. **Внешняя** - создается введением в схему специальных элементов.

Все виды обратной связи существенно влияют на параметры и характеристики усилителя. При этом от внутренней и паразитной стараются избавиться за счет рационального выбора элементов конструкции усилителя, а внешнюю вводят специально. Она позволяет:

1. Увеличить стабильность коэффициента усиления;
2. Расширить диапазон усиливаемых частот;
3. Уменьшить искажение, создаваемое усилителем;
4. Управлять входным и выходным сопротивлением в нужном направлении.

# Структурная схема усилителя с обратной связью



Структурная схема приведена на рис.8.

$U_{\text{вх}}$  – сигнал на входе усилителя с обратной ;

$U_{\text{вых}}$  – сигнал на выходе усилителя;  $U_{\beta}$  – сигнал на выходе цепи обратной связи.  $U_1 = U_{\text{вх}} - U_{\beta}$   
 $U_1$  – комплексная амплитуда сигнала на входе усилителя без обратной связи.

$K(j\omega) =$  – комплексная функция коэффициента передачи усилителя без обратной связи.

$\beta(j\omega)$  – комплексная функция коэффициента передачи цепи обратной связи.

$\frac{U_{\text{вых}}}{U_1}$  – комплексная функция коэффициента передачи усилителя с обратной связью.

Найдем его выражение:

$$K_{oc(j\omega)} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \quad K_{oc(j\omega)} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_1} = \frac{K(j\omega)}{1 - \beta(j\omega)K(j\omega)} \quad U_1 = U_{\text{вх}} + \beta U_{\text{вых}}$$

получим

$$U_{\text{вых}} = K(j\omega)U_1 = K(j\omega)(U_{\text{вх}} + \beta U_{\text{вых}})$$

Произведение  $H(j\omega) = \beta(j\omega)K(j\omega)$  – называют – петлевое усиление.

В рабочем диапазоне частот  $K$  и  $\beta$  – действительные числа. Обычно величина  $\beta > 0$ , а  $K < 0$ .

В зависимости от знака  $K$  различают следующие виды обратной связи:

1). Если  $K > 0$  – то возникает положительная обратная связь (ПОС).

При положительной обратной связи входной сигнал совпадает по фазе с сигналом на выходе обратной связи.  
 $K > K_{oc} > 0$ ;  $0 < \beta K < 1$ , т.е. положительная обратная связь увеличивает

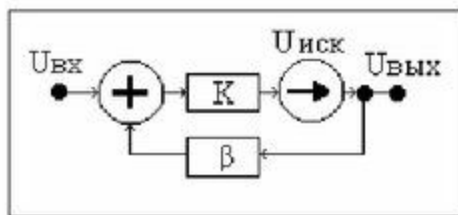
$$K_{oc}^+ = \frac{K}{1 - \beta K}$$

коэффициент усиления. При  $\beta K = 1$ ,  $K_{oc} = \infty$ , в этом случае усилитель превращается в генератор.

2) Если  $K < 0$  – в усилителе возникает отрицательная обратная связь. При этом входной сигнал находится в противофазе с сигналом на выходе обратной связи.  $K_{oc}^- = -\frac{K}{1 + \beta K} < K$  – отрицательная

обратная связь уменьшает коэффициент усиления усилителя с обратной связью.

# Влияние отрицательной обратной связи на параметры



1). Влияние на стабильность коэффициента усиления.

Идеальный усилитель должен иметь коэффициент, который бы не зависел от дестабилизирующих факторов. В реальных усилителях он не остается постоянным, вследствие зависимости параметров активных элементов от температуры и величины питающих напряжений. Покажем, что отрицательная обратная связь улучшает стабильность коэффициента  $K$ :

$$\Delta K = K - K_0; \delta K = \Delta K / K_0 \text{ – нестабильный усилитель. } K_{oc}^- = \frac{K}{1 + \beta K} \cong \frac{1}{\beta}$$

Обычно  $\beta K \gg 1$ ,  $\beta$ - коэффициент передачи цепи обратной связи, состоящей из пассивных элементов, которые практически не зависят от дестабилизирующих факторов, следовательно  $K_{oc}$  выше  $K$ .

2). Влияние отрицательной обратной связи на полосу пропускания усилителя с обратной связью. Известно, что  $K\Delta f = Q$  – добротность ( $\Delta f$  диапазон рабочих частот) При введении отрицательной обратной связи коэффициент усиления  $K_{oc} = K / (1 + \beta K)$  уменьшается в  $(1 + \beta K)$  раз, а следовательно диапазон рабочих частот увеличивается в  $(1 + \beta K)$  раз, т.е.  $\rightarrow \Delta f_{oc} = (1 + \beta K)\Delta f$

3). Влияние на искажения, создаваемые усилителем.

Считаем что усилитель идеальный, искажения не создает, а все они создаются отдельным источником напряжения –  $U_{иск}$ .

1). Если  $\beta = 0$ , цепь обратной связи отсутствует, а  $U_{вх} = 0$ , то выходной сигнал  $U_{вых} = EП$

2). При отрицательной обратной связи  $1 > \beta > 0$ ;  $U_{вых.ос} = EП - \beta K U_{вых.ос}$

$$U_{вых.ос} = -\frac{U_{иск}}{1 + K\beta}$$

При отрицательной обратной связи искажения, создаваемые усилителем уменьшаются в  $(1 + \beta K)$  раз.

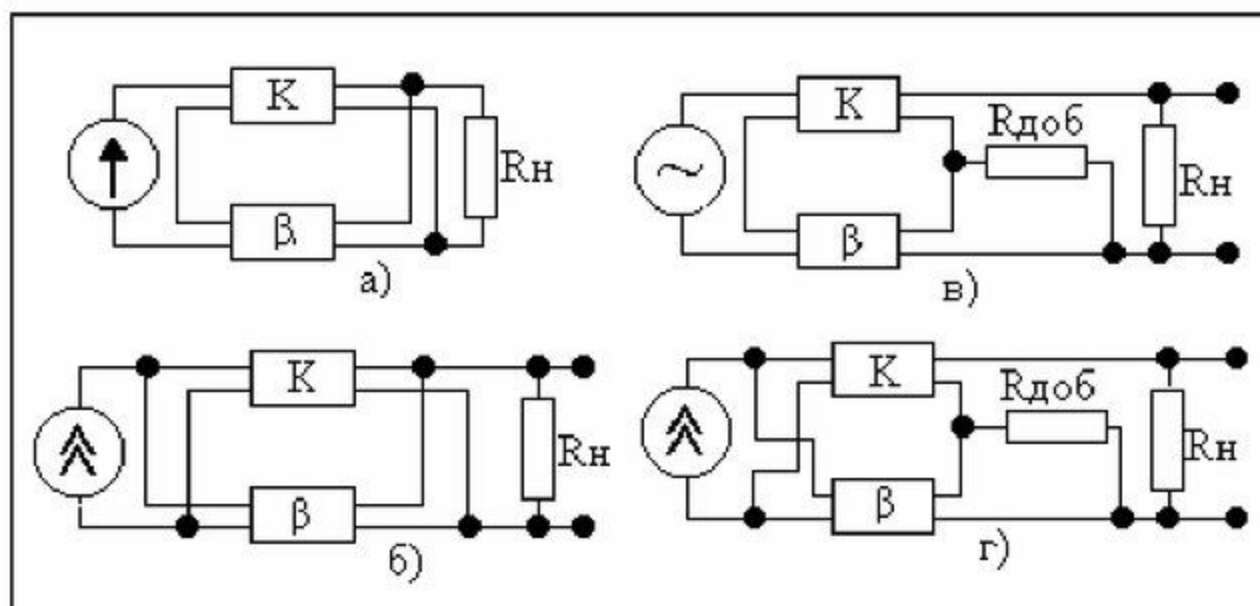


# Типы обратной связи

В зависимости от способа снятия сигнала обратной связи с выхода и подачи на вход различают четыре типа обратной связи. Их название состоит из двух слов. Первое говорит как сигнал подается на вход, второе – как снимается с выхода:

1. Последовательно – параллельная обратная связь.
2. Параллельно – параллельная обратная связь:
3. Последовательно – последовательная обратная связь.
4. Параллельно – последовательная обратная связь.

Всякая последовательная обратная связь (по входу или по выходу) увеличивает соответствующее сопротивление в  $(1 + \beta K^\circ)$  раз. Всякая параллельная обратная связь уменьшает соответствующее сопротивление в  $(1 + \beta K^\circ)$  раз.



# Устойчивость усилителей с обратной связью

Устойчивость усилителя – его способность возвращаться в исходное состояние после снятия сигнала с его входа.

Усилители с отрицательной обратной связью возбуждаться не должны, но на высоких и низких частотах могут появляться дополнительные фазовые сдвиги, которые превращают отрицательную обратную связь в положительную, при которой возможно самовозбуждение. Это приводит к необходимости исследовать усилитель на устойчивость.

Наиболее удобным критерием устойчивости является критерий Найквиста, он позволяет судить об устойчивости усилителя с отрицательной обратной связью по частотным характеристикам его петлевого усиления, т.е. усилителя без обратной связи.

$H(j\omega)$  - петлевое усиление

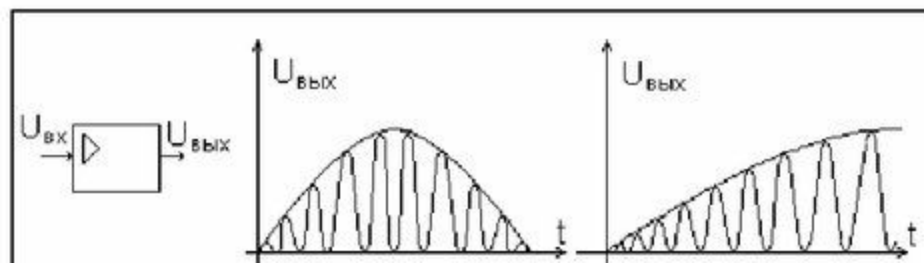
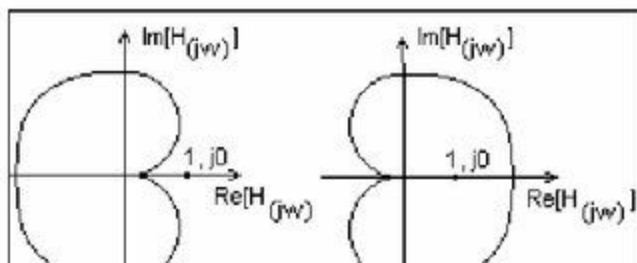
$$H(j\omega) = K(j\omega)\beta(j\omega) = \text{Re}[H(j\omega)] + j\text{Im}[H(j\omega)]$$

Для исследования усилителя на устойчивость строят годограф.

Критерий Найквиста:

Усилитель устойчив, если годограф его петлевого усиления не охватывает точку  $[1, j0]$ .

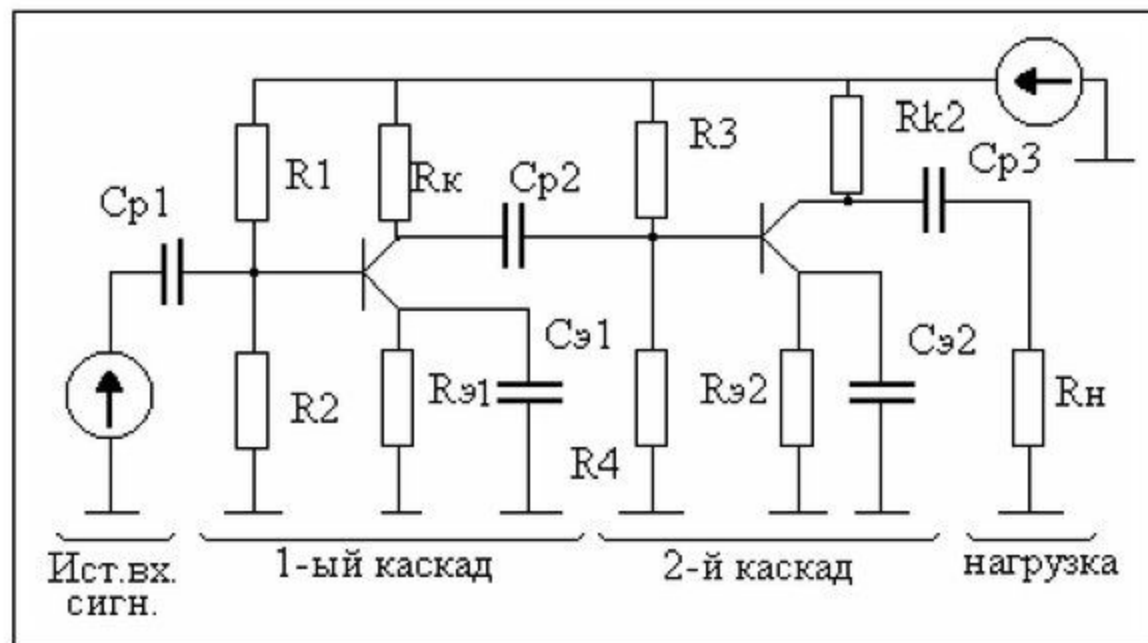
Исследование на устойчивость можно проводить по логарифмическим амплитудно-фазовым частотным характеристикам петлевого усиления. Усилитель устойчив, если на частоте  $\omega$ , на которой  $\varphi = -\pi$ , ордината логарифмической амплитудно-частотной характеристики петлевого усиления отрицательна.



# Усилитель с RC связью

Принципиальная схема усилителя с RC связью имеет вид :

$R_1, R_2$  – резистивный делитель цепи Б, задает  $U_{Т}$ .  $R_3$  – эмиттерное сопротивление служит для температурной стабилизации  $U_{Т}$ .  $R_k$  – сопротивление коллекторной цепи на нем выдается усиленный переменный сигнал.  $R_n$  – сопротивление нагрузки  $C_p$  – разделительная ёмкость,  $C_э$  – конденсатор эмиттерной цепи, устраняет отрицательную обратную связь, создаваемую  $R_э$ , в рабочем диапазоне частот  $C_ф$  – конденсатор фильтра ЧП,



# Коррекция в области НЧ за счет введения частотно-зависимых сопротивлений в коллекторную цепь

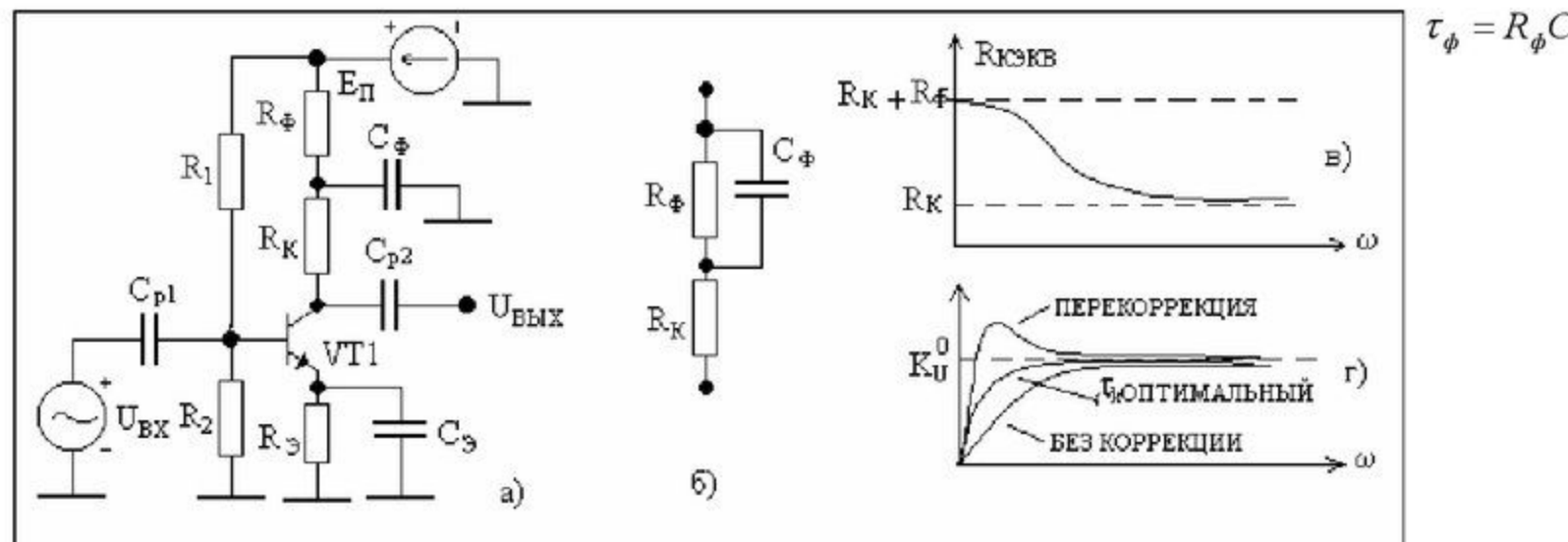
Элементами частотной коррекции являются  $R_\phi$ ,  $C_\phi$  (фильтра), благодаря им на низких частотах возрастает эквивалентные сопротивления коллекторной цепи, что компенсирует уменьшение коэффициента связанное с влиянием разделительных конденсаторов.

Эквивалентное сопротивление коллекторной цепи имеет вид:

$$R_{кэкв} = R_к + \frac{R_\phi}{1 + j\omega C_\phi R_\phi}$$

При оптимальной коррекции наблюдается равномерное расширение диапазона усиливаемых частот без образования всяких выбросов.

Оптимальная коррекция имеет место когда выполняется условие  $\tau_{фонт} = \tau_n =$  , где

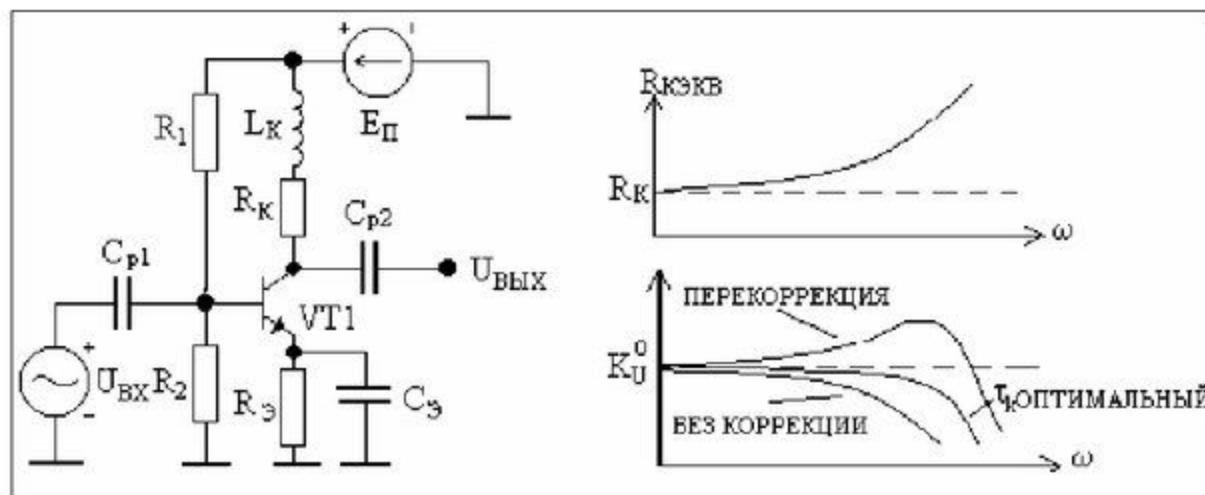


# Коррекция в области ВЧ за счет введения частотно-зависимых элементов в коллекторную цепь

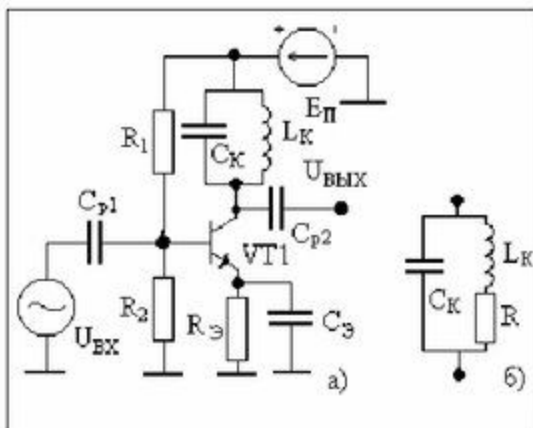
Элементами частотной коррекции является катушка индуктивности  $L_k$ . Благодаря ей на высоких частотах наблюдается увеличение эквивалентного сопротивления коллекторной цепи, что компенсирует уменьшение коэффициента усиления связанного с зависимостью  $\beta$  транзистора от частоты.

Схема усилительного каскада, зависимость сопротивления коллекторной цепи от частоты и зависимости коэффициента усиления от частоты приведены на рис.

$$R_{KЭКВ} = R_K + j\omega L_K \quad R'_{н.вых} = \sqrt{R_k^2 + (\omega L_R)^2} \quad L_{к.опт} = 0,414 R_k \tau_B$$



# Избирательные усилители с частотно-зависимой нагрузкой



В таких усилителях в качестве нагрузки обычно применяют параллельный колебательный контур. Благодаря его резонансным свойствам, характеристика усилителя приобретает избирательный характер, а поэтому так усилители иногда называют резонансными.

Схема резонансного усилителя имеет вид:

Частотная характеристика избирательного усилителя определяется выражением  $K(j\omega) = -\frac{h_{11}Z_{KK}(j\omega)}{h_{11} + R_r}$

$Z_{KK}$  - сопротивление параллельного колебательного контура.

Эквивалентная схема параллельного колебательного контура имеет вид:

В нее введен резистор с сопротивлением  $R$ , он учитывает резистивные потери реактивных элементов колебательного контура.

Частотная характеристика сопротивления параллельного контура имеет вид

$$Z_{KK}(j\omega) = \frac{\rho^2}{R + j\left(\omega L_K - \frac{1}{\omega C_K}\right)} = \frac{\rho Q}{1 + ja}$$

Частота, на которой сопротивление контура становится резистивным называется резонансной. Она определяется так:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_K C_K}}$$

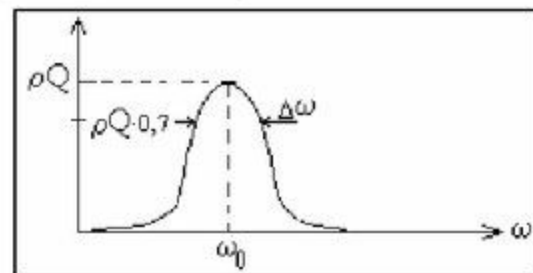
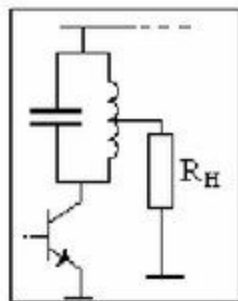
$\rho = \omega_0 L_K = \frac{1}{\omega_0 C_K}$  - характеристическое сопротивление контура.

$Q = \frac{\rho}{R}$  - добротность,  $a = \frac{\omega L_K - \frac{1}{\omega C_K}}{R}$  - обобщенная расстройка.

Она обращается в нуль, когда частота действующего сигнала на контур равна  $\omega_0$

$Z_{KK}(\omega) = \frac{\rho Q}{\sqrt{1 + a^2}}$  ;  $\Delta\omega$  - полоса пропускания колебательного контура.

Поскольку ЧХ усилителя определяется ЧХ колебательного контура, то она имеет аналогичный вид, следовательно усилитель обладает избирательными свойствами. Подключение нагрузки к выходу усилителя ухудшает избирательные свойства, уменьшая добротность контура, для исключения этого явления резонансных усилителей обычно применяют частичное включение колебательного контура.



# Усилители мощности

Обычно это выходные каскады многокаскадных усилителей. Они служат для повышения нагрузочной способности и создают на нагрузке сигнал заданной мощности. Такие усилители работают в режиме большого сигнала, а потому их основными параметрами являются следующие:

1) Выходная мощность:

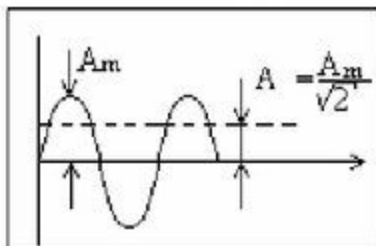
$$P_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} P_{\text{ВЫХmax}} = U_{2m} \cdot I_{2m} - \text{максимальная мощность} \\ P_{\text{ВЫХдейств}} = U_{2\delta} \cdot I_{2\delta} = \frac{U_{2m} \cdot I_{2m}}{2} - \text{действующая мощность} \end{cases}$$

2) Коэффициент полезного действия: (КПД) =  $\frac{P_{\text{ВЫХдейств}}}{P_0} \cdot 100\%$

$P_0$  - мощность потребляемая источником питания.

$P_0 - P_{\text{ВЫХдейств}} = P_K$ , где  $P_K$  - мощность выдаваемая на коллекторных переходах транзистора усилителя мощности.

3) КНИ - коэффициент нелинейного искажения. Под искажениями понимают - отклонение формы сигнала на выходе от формы сигнала на входе.



# Классификация усилителей мощности

- 1) В зависимости от рабочей точки активных элементов, это усилители класса А, АВ, В, С, Д.
- 2) По связи с нагрузкой, это: усилители с трансформаторной связью; без трансформаторной усилителя мощности.
- 3) По схемотехническому решению: одноконтурные усилители; двухконтурные усилители.
- 4) По виду усиливаемого сигнала: апериодические усилители – они предназначены для усиления широкополосных непрерывных сигналов; резонансные усилители мощности – они предназначены для усиления сигналов в узком диапазоне частот.



# Влияние выбора рабочей точки на КПД и нелинейное искажение

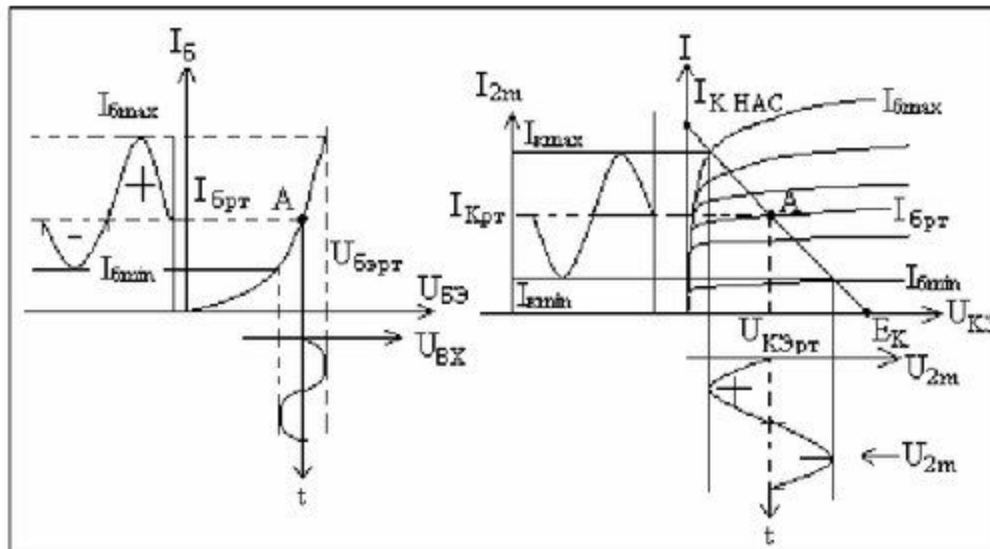
Режим класса А.

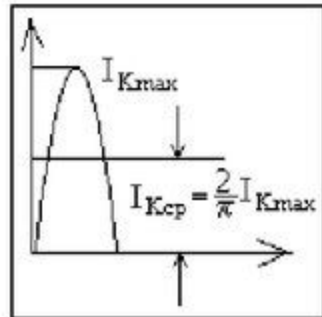
Рабочая точка выбирается на середине линейного участка. Проведем графоаналитический расчет КПД и оценим качественно КНИ (рис.8. )

Основным недостатком режима класса А является малое значение КПД < 25%. Их ;  
преимущество

является малые нелинейные искажения, поскольку рабочая точка выбрана на середине нелинейного участка.

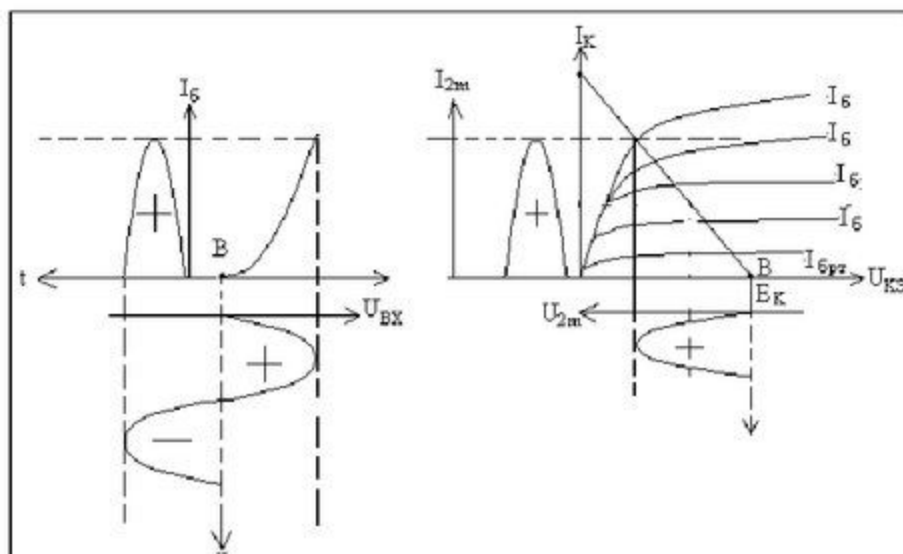
$$\text{КПД} = \frac{\frac{1}{2} U_{2m} I_{2m}}{P_0} = \frac{\frac{1}{2} \frac{E_K}{2} I_{Kpm}}{E_K I_{Kpm}} = 0,25 \rightarrow_{0,25\%} P_{CP}^{(T)}$$





Режим класса В. Оценим его КПД и нелинейные искажения. В режиме класса В, рабочая точка выбирается при напряжении отсечки. В этом случае  $U_{ВХ}$  создает в цепи базы тока полуволну тока. Для режима класса В КПД рассчитывают для одного полу периода. Достоинством режима класса В является высокое КПД, а недостатком существенное нелинейное искажение, отрицательная полуволна входного сигнала отсутствует. Поэтому режим класса В в одноктных усилителях не применяются, он применяется лишь в двухтактных схемах усилителя.

$$КПД = \frac{\frac{1}{2} U_{2m} I_{2m}}{P_0} = \frac{\frac{1}{2} E_K I_{Kmax}}{E_K I_{cp}} = \frac{\frac{1}{2} E_K I_{Kmax}}{E_K \frac{2}{\pi} I_{Kmax}} = \frac{\pi}{4} = 0,78 \rightarrow 78\%$$



# Усилители мощности с трансформаторной СВЯЗЬЮ

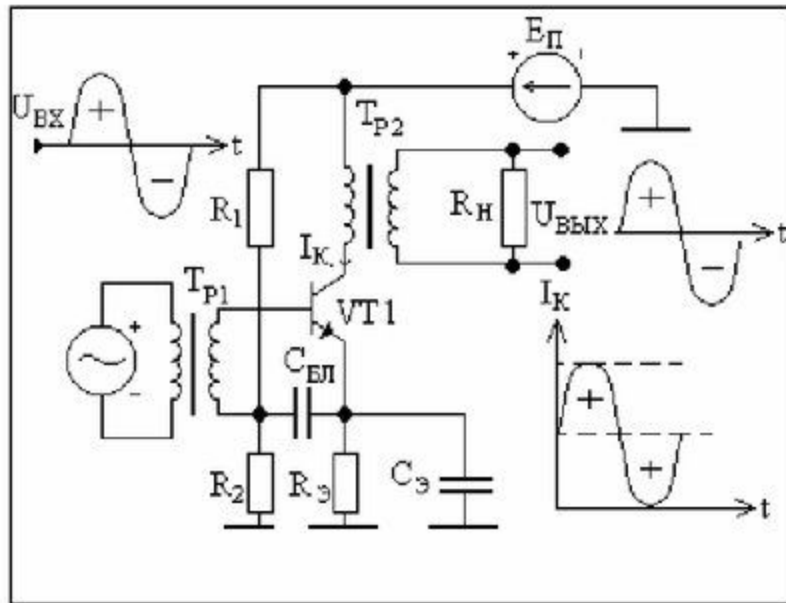
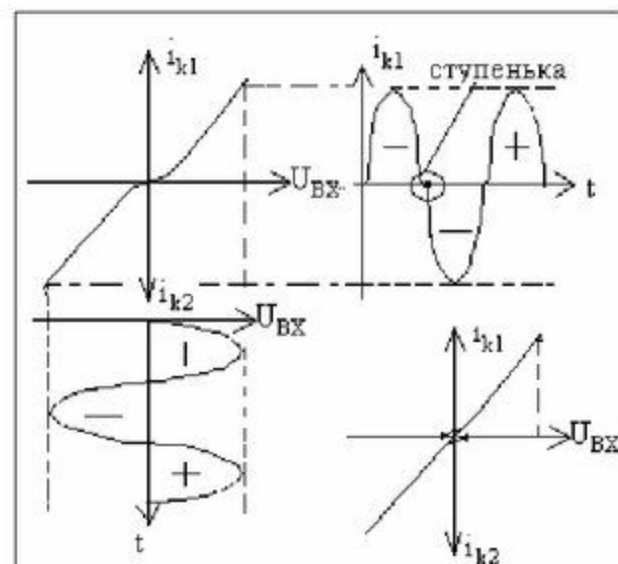
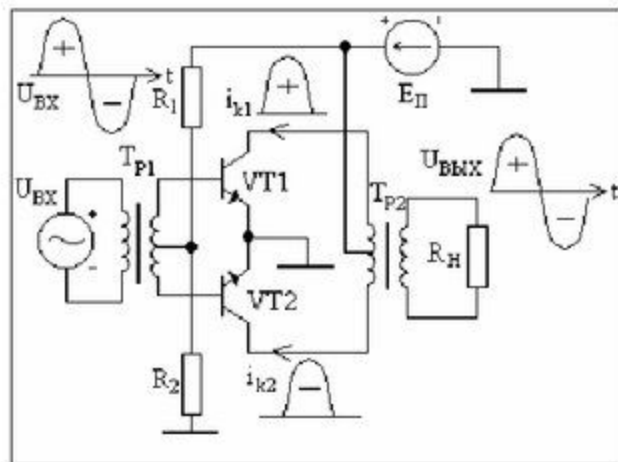


Схема однотокового усилителя мощности. Транзистор VT1 работает в режиме класса А, его рабочая точка задается резисторами R1, R2. Трансформатор Tr1 служит для передачи сигнала от источника сигнала на входе усилителя и их согласования, а поэтому называется согласующим. Трансформатор Tr2 служит для передачи сигнала в нагрузку, через него протекают большие токи и поэтому он называется силовым или выходным трансформатором. Входной гармонический сигнал создает в выходной цепи трансформатора ток изменяющийся по гармоническому закону, при этом и положительная и отрицательная полуволна усиливается одним активным элементом как бы за один такт, поэтому эта схема называется однотоковой. С помощью трансформатора Tr2 ток IК преобразуется в выходное напряжение, который по форме совпадает с входным сигналом.

# Схема двухтактного усилителя мощности.



Транзисторы  $VT_1$ ,  $VT_2$  образуют двухтактный выходной каскад. Они работают в режиме класса В. При нулевом входном сигнале оба они находятся в состоянии отсечки:  $i_{K1}=i_{K2}=0$ . При положительной полуволне в активном режиме А,  $VT_2$  остается в состоянии отсечки.  $i_{K1}$  повторяет по форме входное напряжение. Во второй полу период  $VT_1$  в состоянии отсечки а  $VT_2$  в активном режиме.  $i_{K2}$  повторяет форму входного напряжения (2-ой полу период). Токи  $i_{K1}$ ,  $i_{K2}$  в первичной обмотке трансформатора  $Tr_2$  протекают встречно друг другу, а потому на вторичной обмотке создают напряжение противоположного знака. В результате на выходе схемы возникает практически не искаженный входной сигнал, в то время как активные элементы работают в режиме класса В.

Достоинство схемы высокое КПД и малое нелинейное искажение. В двухтактном усилителе мощности режима класса В возникают специфические искажения типа «ступенька». Они связаны с особенностями входной ВАХ биполярного транзистора. Передаточная характеристика двухтактной схемы режима класса В имеет вид

Для устранения «ступеньки» транзисторы двухтактной схемы должны работать в режиме класса АВ, это достигается подбором резистора  $R_2$  в предыдущей схеме.

# Бестранзисторные усилители мощности

Они применяются наиболее широко, т.к. отсутствие трансформатора позволяет изготавливать их в виде интегральной схемы. Бестранзисторные усилители должны иметь:

- 1) Малое выходное сопротивление, что необходимо для согласования с низкой нагрузкой.
- 2) Выходное напряжение равно нулю, когда входное равно нулю, т.е. усилитель должен быть сбалансированным.

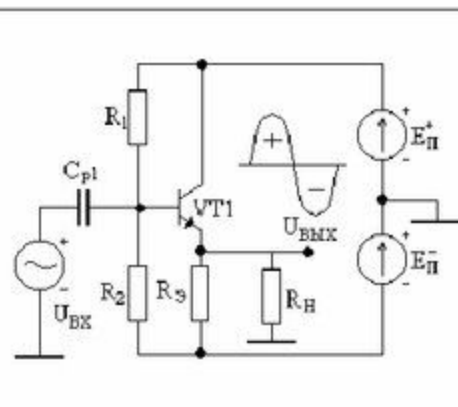
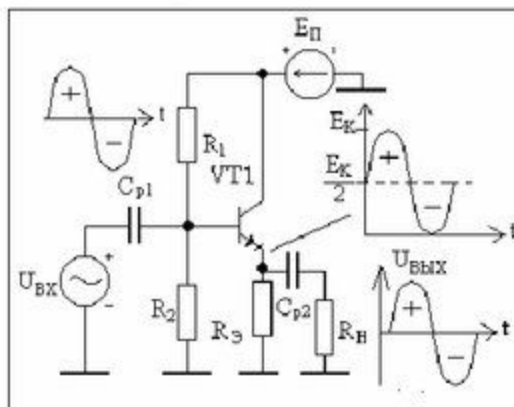
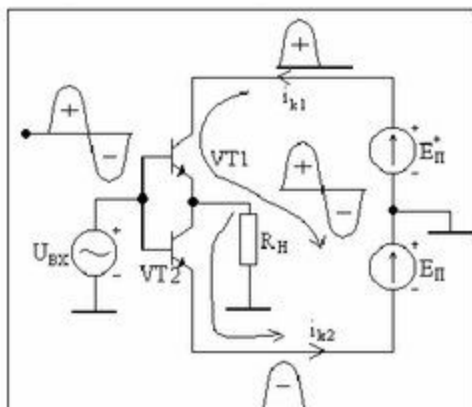
Схема однотактного бестранзисторного усилителя режима класса А. В обоих случаях это усилительный каскад. В первой схеме  $U_{ВЫХ}$  получается после  $CP2$ , с помощью его мы изменяем постоянную составляющую  $\frac{E_K}{2}$

недостаток: сопротивление нагрузки бывает искаженным. Во второй схеме за счет двухполярного питающего напряжения устраняется разделительный конденсатор  $CP2$ .

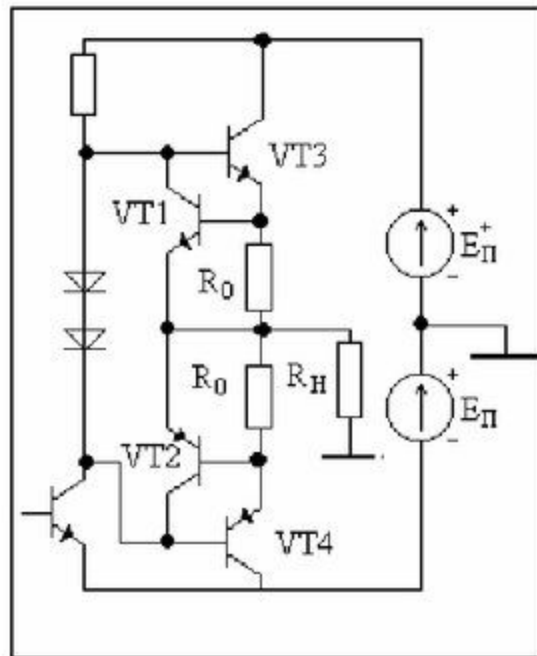
Схема двухтактного бестранзисторного усилителя на комплементарных транзисторах.

Транзисторы имеют одинаковые параметры, но разный тип проводимости называются комплементарными. В этой схеме транзистор  $VT1$  n-p-n типа,  $VT2$  p-n-p типа по отношению к нагрузке, каждый из них включен по схеме с общим коллектором. Транзисторы работают в режиме класса В.

Первый полу период входной сигнал создает ток через транзистор  $VT1$ , который на нагрузке создает напряжение. Второй полу период входной сигнал создает ток через транзистор  $VT2$  и второй полу период выходного напряжения. Поскольку токи через нагрузку протекают в разных направлениях, то напряжение получается закономерным - гармоническим.



# Схема защиты выходного каскада от короткого замыкания



Транзисторы выходят из строя при превышении током коллектора максимально-допустимого тока:  $I_K \geq I_{K \max}$ .

Также может случиться при коротком замыкании на входе. Для защиты транзисторов от больших токов применяют различные схемы.

1) В простейшем случае применяют резистор включенный последовательно с нагрузкой, однако это существенно уменьшает энергетические показатели усилителя.

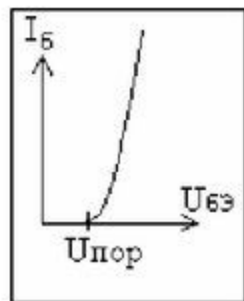
2) Совершеннее являются схема на транзисторах. VT1, VT2 – транзисторы схемы защиты. VT3, VT4 – транзисторы усилителя мощности.

Схема работает следующим образом:

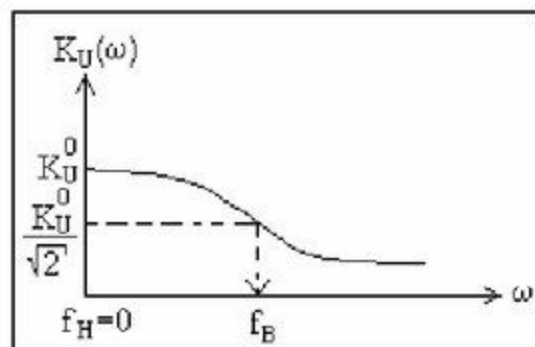
Если  $I_K < I_{K \max}$ , то  $U_{R_0} = I_K R_0 < U_{\text{пор}}$

Транзисторы VT1, VT2 закрыты.

Если  $U_{R_0} > U_{\text{пор}}$ , то  $I_K \geq I_{K \max}$  и транзистор входит в состояние насыщения, при этом VT3, VT4- закрываются,  $I_K$  - уменьшается примерно до нуля. Как только короткое замыкание на выходе будет устранено схема автоматически будет возвращаться в нормальный режим работы.



# Усилители постоянного тока (УПТ)



Это усилители, которые предназначены для усиления, как переменных так и постоянных или изменяющихся во времени сигналов. АЧХ коэффициента усиления В УПТ обычно используется непосредственная (гальваническая) связь между каскадами. Только она обеспечивает передачу от каскада к каскаду постоянного во времени сигнала. Такая связь приводит к двум особенностям таких усилителей.

1) Необходимость согласования каскадов по постоянной составляющей между собой.

2) В таких усилителях существенную роль играет «дрейф нуля». Под дрейфом нуля понимают изменение выходного напряжения, при постоянстве его на входе.

Причины дрейфа:

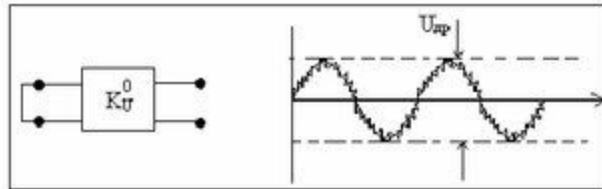
3) Температурная зависимость параметров элементов схемы. Она создает температурный дрейф. Он имеет наибольший вклад в общий дрейф усилителя.

4) Это зависимость параметров элементов от величин питающих напряжений.

5) Временная нестабильность параметров элементов, она создает временной дрейф, он связан со старением элементов.

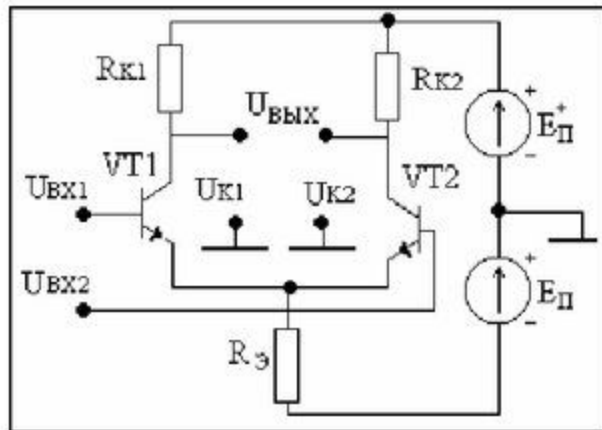
6) Шумы элементов схемы.

Все эти причины приводящие к дрейфу являются медленно изменяющимися во времени, а потому в усилителях переменного тока не создают дрейфа. Поскольку у них на низких частотах коэффициент усиления стремится к нулю  $K_U(\omega \approx 0) \rightarrow 0$



Количественно дрейф нуля оценивают:

- 1) Абсолютным дрейфом  $U_{др}$  - это размах изменения выходного напряжения.
- 2) Дрейфом приводящего ко входу  $U_{др} = \frac{U_{др}}{K_U^0}$



На рисунке абсолютный дрейф.

По принципу действия усилители УПТ бывают следующие: прямого усиления и балансные усилители.

Для уменьшения дрейфа нуля применяют следующие меры:

- 1) Используют стабилизирующее питающее напряжение.
- 2) Применяют отрицательные обратные связи.
- 3) Применяют термокомпенсацию параметров активных элементов.
- 4) Применяют термостабилизацию устройства в целом или наиболее ответственных его частей.
- 5) Применяют специальные схемотехнические решения. К ним относят: так называемый усилительный дифференцирующий каскад; усилитель с преобразованием частоты входного сигнала.

1) Дифференцирующий усилительный каскад.

Для нормальной работы эта схема должна быть симметрична относительно средней оси, т.е.  $R_{K1} = R_{K2}; VT1 = VT2$

Схема имеет два входа:  $U_{ВХ1}, U_{ВХ2}$ , на которые можно подать два сигнала  $U_{ВХ1} - U_{ВХ2} = U_{ВХ\Delta}$  дифференцирующий входной сигнал или дифференцирующая составляющая входных сигналов.

- синфазный входной сигнал или синфазная составляющая входных сигналов  $\frac{U_{ВХ1} + U_{ВХ2}}{2} = U_{ВХС}$

Выходным сигналом усилителя может являться:

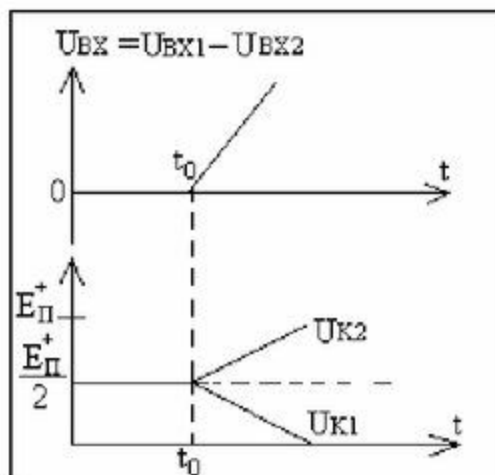
- 1)  $U_{K1}$  или  $U_{K2}$ , такой сигнал называется несимметрично выходным. Напряжение отсчитывается относительно общей точки схем.
- 2) Такой сигнал используется наиболее часто  $U_{K1} - U_{K2} = U_{ВЫХ}$  такой



Подсчитаем выходное напряжение  $U_{ВЫХ} = (E_{П}^+ - I_{K1}R_{K1}) \cdot (E_{П}^+ - I_{K2}R_{K2}) = I_{K2}R_{K2} - I_{K1}R_{K1}$ .  
 Учитывая, что схема симметрична относительно средней оси  $R_{K1} = R_{K2} = R_K$ , при нулевом входном сигнале  $U_{ВХ1} = U_{ВХ2} = 0, I_{K1} = I_{K2}$ , получаем  $U_{ВЫХ} = 0$ .

Если входные напряжения изменяются одинаково, то из-за симметрии схемы  $I_{K1} = I_{K2}$  получаем, что  $U_{ВЫХ} = 0$ . Это означает, что такой усилитель не усиливает синфазный сигнал. Поскольку температура одинаково воздействует на обе половины схемы, то ее влияние можно считать синфазным сигналом, а на синфазный сигнал схема не реагирует  $U_{ВЫХ} = 0$ .

Если входные сигналы изменяются в противоположных направлениях, то также будут изменяться в противоположных направлениях, что приведет к появлению выходного сигнала неравным нулю.



# Основные параметры дифференциального каскада

1)  $K_{U_{диф}} = \frac{U_{ВЫК}}{U_{ВХОДиф}} = \frac{R_K}{2r_{ЭП}}$ , где  $r_{ЭП}$  - сопротивление эмиттерного перехода биполярного транзистора .

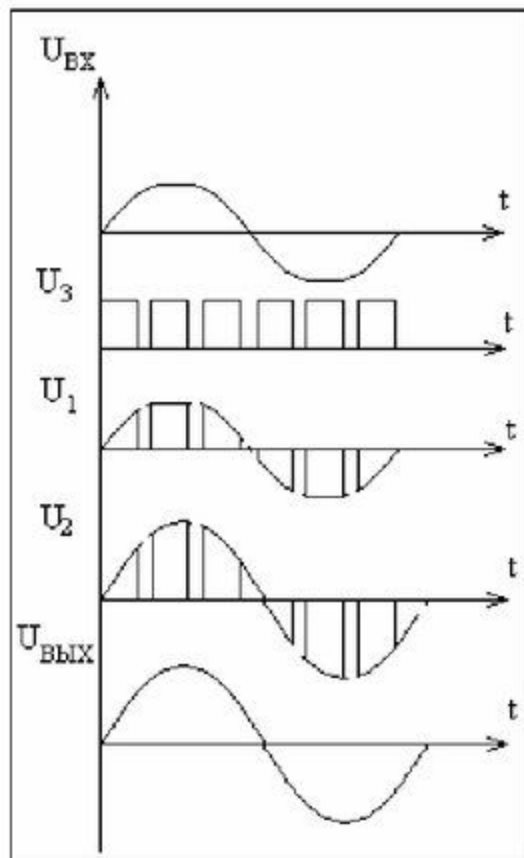
2)  $K_{UCC} = \frac{U_{ВЫК}}{U_{ВХСС}} = \frac{R_K}{R_Э}$ , где  $R_Э$  - сопротивление эмиттерной цепи.

Обычно стремятся чтобы  $K_{UCC} \rightarrow 0$ , это достигается  $R_Э \rightarrow \infty$ , но увеличение  $R_Э$  означает уменьшение тока  $I_Э$ . На практике вместо  $R_Э$  ставят источник тока.

3) Коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС).

$$K_{OCC} = \frac{K_{U_{диф}}}{K_{UCC}}$$

# УПТ с преобразованием частоты входного сигнала

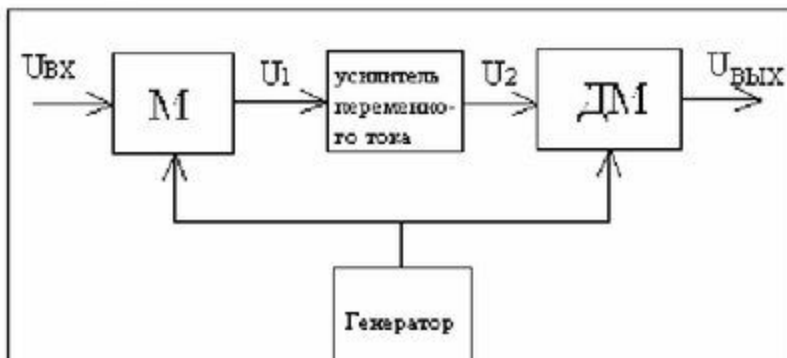


В таких усилителях основное усиление происходит с помощью усилителя переменного тока, а потому дрейф нуля практически отсутствует.

$M$  – модулятор,  
ДМ- демодулятор.

Генератор управляет работой модулятора и демодулятора. Модулятор и демодулятор – это ключи, которые включаются при поступлении на них управляющего напряжения. Принцип работы.

Входной аналоговый сигнал с помощью модулятора превращается в последовательность импульсов, амплитуды которых соответствуют напряжению входного сигнала. Эти импульсы усиливаются с помощью усилителя переменного тока необходимое число раз. С помощью демодулятора восстанавливается огибающая усиливаемой последовательности импульсов.



**СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ**