



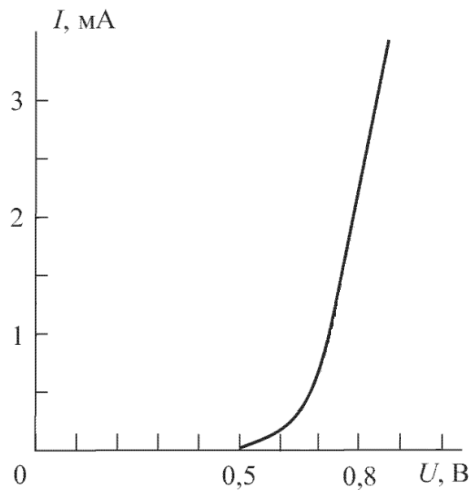
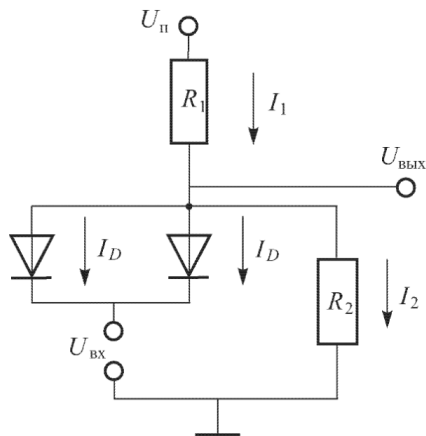
# ІІТМО

## Полупроводниковые приборы – биполярные транзисторы

Николаев Николай Анатольевич

2023

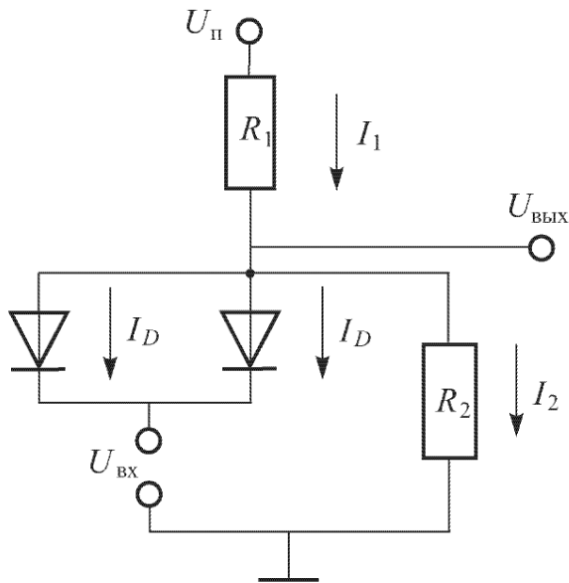
## Задача



$U_{\text{пит}}=5 \text{ В}$ ;  $R_1=R_2=1 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{вх}}=1 \text{ В}$

Определить токи через диоды, напряжения на диодах, напряжение на выходах.

# Полупроводниковые приборы - Диоды

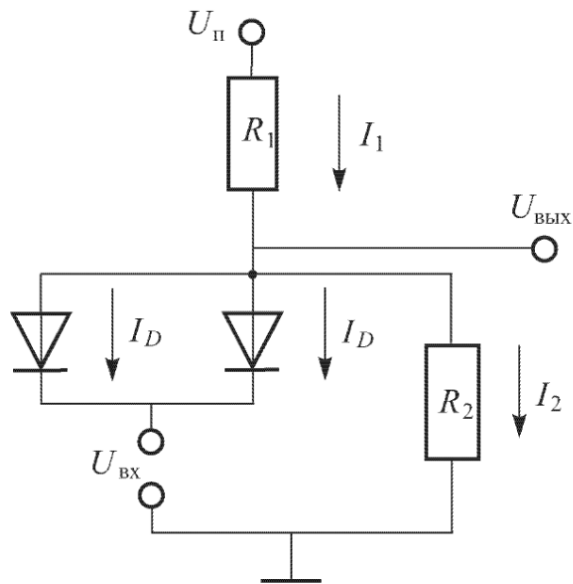


$$U_{\Pi} = U_{R_1} + U_{VD} + U_{\text{ВХ}} \quad (1)$$

$$I_1 = 2I_{VD} + I_2 \quad (2)$$

$$U_{R_1} = I_1 R_1 \quad (3)$$





$$U_{\Pi} = U_{R_1} + U_{VD} + U_{BX} \quad (1)$$

$$I_1 = 2I_{VD} + I_2 \quad (2)$$

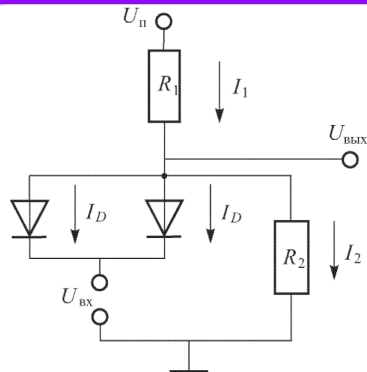
$$U_{R_1} = I_1 R_1 \quad (3)$$

Подставляем (2) и (3) в (1)

$$U_{\Pi} = (2I_{VD} + I_2)R_1 + U_{VD} + U_{BX} \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{U_{VD} + U_{BX}}{R_2} \quad (5)$$

$$U_{\Pi} = (2I_{VD} + \frac{U_{VD} + U_{BX}}{R_2})R_1 + U_{VD} + U_{BX} = 2I_{VD}R_1 + 2U_{VD} + 2U_{BX} \quad (6)$$



Из (6) имеем

$$U_{VD} = \frac{1}{2} (U_{\Pi} - 2I_{VD}R_1 - 2U_{BX})$$

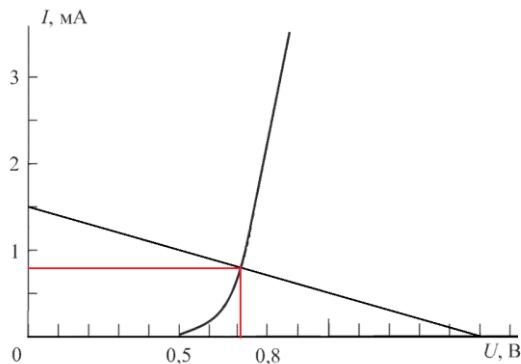
$$I_{VD} = \frac{1}{2R_1} (U_{\Pi} - 2U_{VD} - 2U_{BX})$$

Откуда для режимов к.з. и х.х. имеем

$$U_{VD_{xx}} = \frac{1}{2} (U_{\Pi} - 2U_{BX}) = \frac{1}{2} (5 - 2 * 1) = 1,5 \text{ В}$$

$$I_{VD_{кз}} = \frac{1}{2R_1} (U_{\Pi} - 2U_{BX}) = \frac{1}{2R_1} (U_{\Pi} - 2U_{BX})$$

$$I_{VD_{кз}} = \frac{1}{2000} (5 - 2 * 1) = 1,5 \text{ мА}$$



## *Темы, освещенные в презентации*

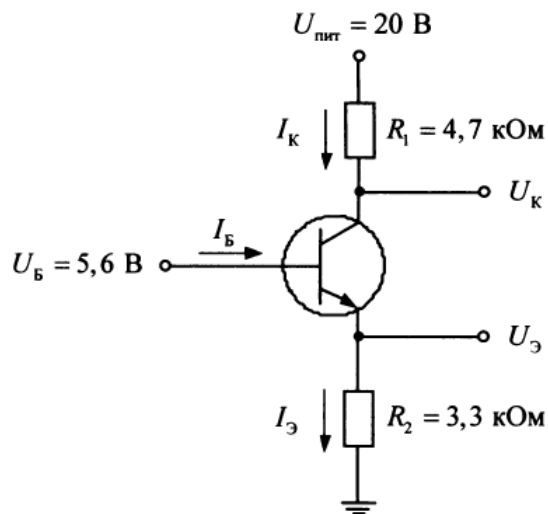


1. Проектирование схем на БТ.
2. Типовые режимы работы и схемы включения БТ. Достоинства и недостатки
3. Биполярный транзистор как четырехполюсник
4. Частотные свойства
5. Температурные свойства

## Задача



В схеме на рис.  $U_{\text{пит}} = +20 \text{ В}$ ,  $U_{\text{Б}} = 5,6 \text{ В}$ ,  $R_1 = 4,7 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 3,3 \text{ кОм}$  и  $h_{\text{Ф}} = 100$ . Определить  $U_{\text{Э}}$ ,  $I_{\text{Э}}$ ,  $I_{\text{Б}}$ ,  $I_{\text{К}}$  и  $U_{\text{К}}$ .



## Задача

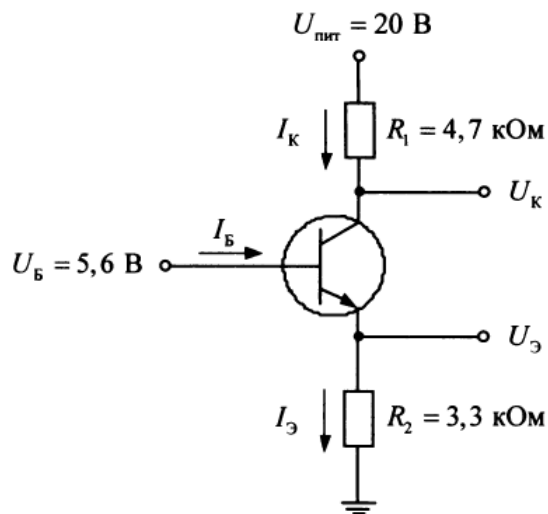


В схеме на рис.  $U_{\text{пит}} = +20 \text{ В}$ ,  $U_{\text{Б}} = 5,6 \text{ В}$ ,  $R_1 = 4,7 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 3,3 \text{ кОм}$  и  $h_{\text{Ф}} = 100$ . Определить  $U_{\text{Э}}$ ,  $I_{\text{Э}}$ ,  $I_{\text{Б}}$ ,  $I_{\text{К}}$  и  $U_{\text{К}}$ .

Решение.

$$U_{\text{Э}} = U_{\text{Б}} - 0,6 \text{ В};$$

$$U_{\text{Э}} = 5,6 \text{ В} - 0,6 \text{ В} = 5,0 \text{ В};$$





## Задача



В схеме на рис.  $U_{\text{пит}} = +20 \text{ В}$ ,  $U_{\text{Б}} = 5,6 \text{ В}$ ,  $R_1 = 4,7 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 3,3 \text{ кОм}$  и  $h_{\text{FE}} = 100$ . Определить  $U_{\text{Э}}$ ,  $I_{\text{Э}}$ ,  $I_{\text{Б}}$ ,  $I_{\text{К}}$  и  $U_{\text{К}}$ .

Решение.

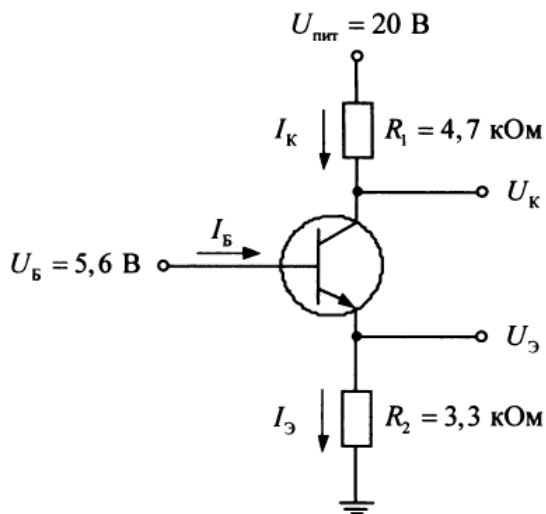
$$U_{\text{Э}} = U_{\text{Б}} - 0,6 \text{ В};$$

$$U_{\text{Э}} = 5,6 \text{ В} - 0,6 \text{ В} = 5,0 \text{ В};$$

$$I_{\text{Э}} = \frac{U_{\text{Э}} - 0 \text{ В}}{R_2} = \frac{5,0 \text{ В}}{3300 \text{ Ом}} = 1,5 \text{ мА};$$

$$I_{\text{Б}} = \frac{I_{\text{Э}}}{1 + h_{\text{FE}}} = \frac{1,5 \text{ мА}}{1 + 100} = 0,015 \text{ мА};$$

$$I_{\text{К}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{Б}} \approx I_{\text{Э}} = 1,5 \text{ мА};$$

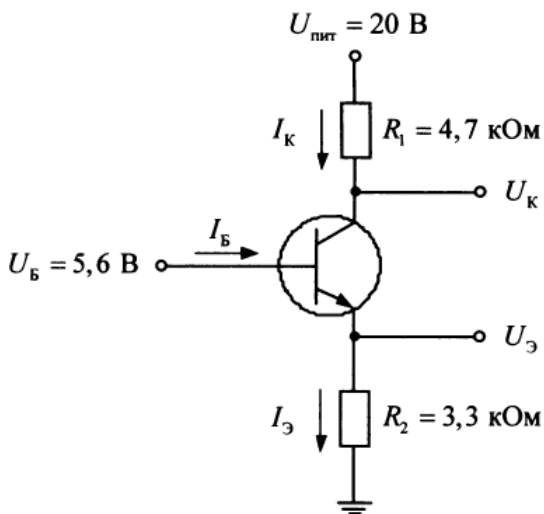


## Задача



В схеме на рис.  $U_{\text{пит}} = +20 \text{ В}$ ,  $U_{\text{Б}} = 5,6 \text{ В}$ ,  $R_1 = 4,7 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 3,3 \text{ кОм}$  и  $h_{\text{FE}} = 100$ . Определить  $U_{\text{Э}}$ ,  $I_{\text{Э}}$ ,  $I_{\text{Б}}$ ,  $I_{\text{К}}$  и  $U_{\text{К}}$ .

Решение.



$$U_{\text{Э}} = U_{\text{Б}} - 0,6 \text{ В};$$

$$U_{\text{Э}} = 5,6 \text{ В} - 0,6 \text{ В} = 5,0 \text{ В};$$

$$I_{\text{Э}} = \frac{U_{\text{Э}} - 0 \text{ В}}{R_2} = \frac{5,0 \text{ В}}{3300 \text{ Ом}} = 1,5 \text{ мА};$$

$$I_{\text{Б}} = \frac{I_{\text{Э}}}{1 + h_{\text{FE}}} = \frac{1,5 \text{ мА}}{1 + 100} = 0,015 \text{ мА};$$

$$I_{\text{К}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{Б}} \approx I_{\text{Э}} = 1,5 \text{ мА};$$

$$U_{\text{К}} = U_{\text{пит}} - I_{\text{К}} R_1;$$

$$U_{\text{К}} = 20 \text{ В} - (1,5 \text{ мА})(4700 \text{ Ом});$$

$$U_{\text{К}} = 13 \text{ В}.$$

## Основные понятия

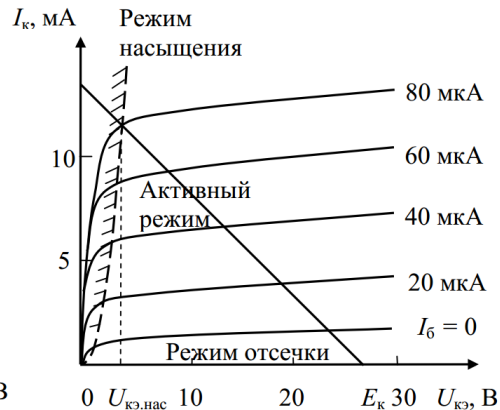
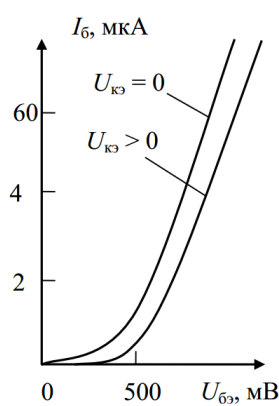
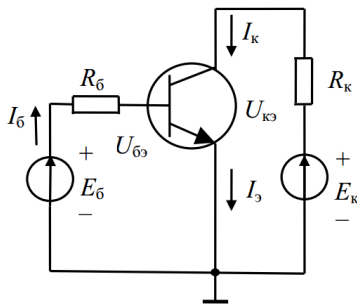


Для описания работы транзистора используются следующие термины:

- **Область насыщения** (рабочая область транзистора, в которой протекает максимальный ток коллектора, транзистор функционирует подобно замкнутому переключателю);
- **Область отсечки** (рабочая область транзистора возле оси напряжений характеристической кривой коллектора, где транзистор функционирует подобно разомкнутому переключателю);
- **Активный режим/Активная область** – область работы транзистора между областями насыщения и отсечки, где токи транзистора связаны между собой практически линейными соотношениями;
- **Смещение** – конкретное значение напряжение постоянного тока и ток на выводах транзистора, требуемые для установления нужной точки активного режима работы транзистора, называемого **рабочей точкой**;
- **Рабочая точка**.

## Режимы работы БТ

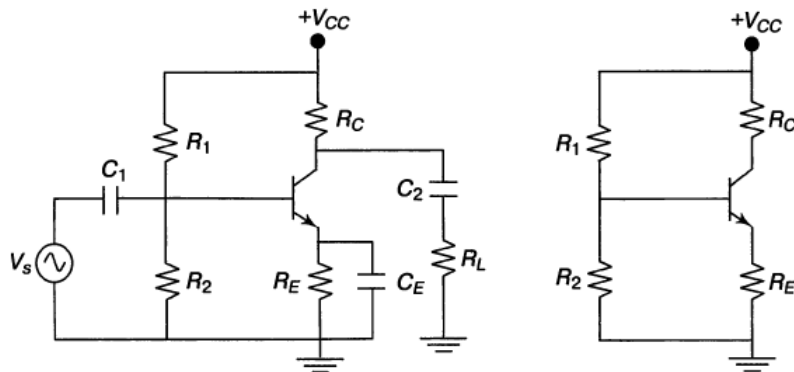
1. Основной (активный, усилительный) режим работы – переход КБ-заперт, переход БЭ-открыт;
2. Режим насыщения – переход КБ-открыт, переход БЭ-открыт;
3. Режим отсечки – переход КБ-заперт, переход БЭ-заперт;
4. Инверсный активный режим - переход КБ-открыт, переход БЭ-заперт;



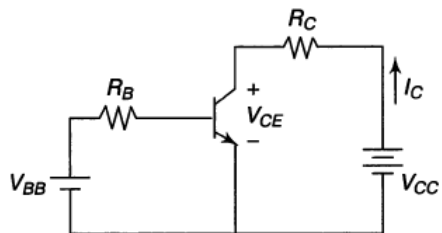
## Режим работы БТ



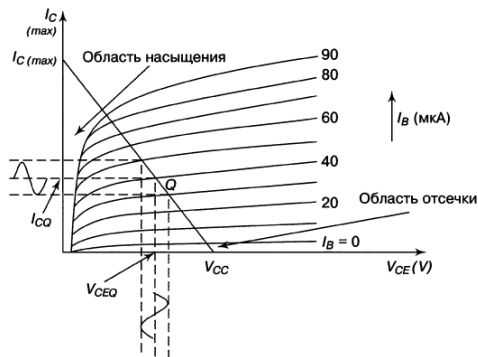
Основное правило - при анализе схем на постоянном токе все фильтрующие и разделительные конденсаторы рассматриваются как обрыв цепи, т.к. оказывают постоянному току бесконечно большое сопротивление.



Для работы транзистора в режиме усилителя с минимальными искажениями необходимо правильно задать рабочую точку (точка покоя, режим работы по постоянному току)



Усилитель, схема с ОЭ

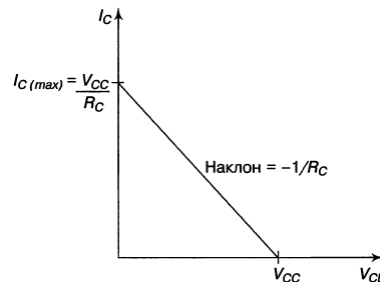


$V_{CEQ}$  - напряжение покоя

$I_{CQ}$  - ток покоя

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}.$$

$$I_C = \frac{-V_{CE}}{R_C} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$



Нагрузочная прямая

В процессе работы рабочая точка может сместиться при изменении  $\beta$  (например при замене транзистора, старении прибора) или  $I_{CBO}$ .

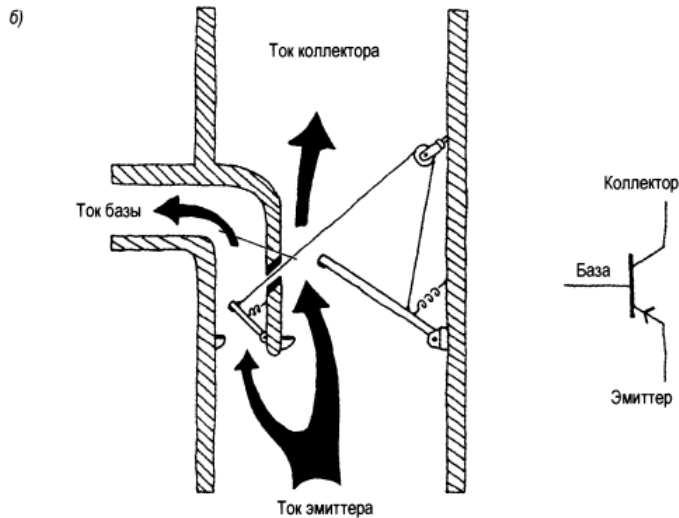
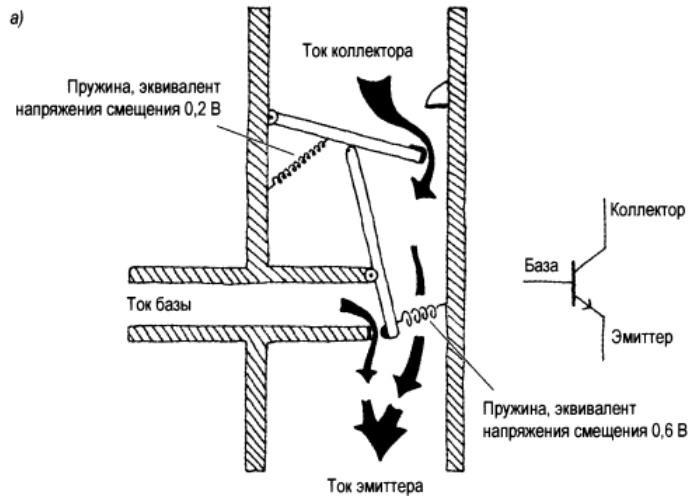
$$I_C = \beta I_B + \beta I_{CBO}$$

Для нормальной работы усилителя требуется стабилизация рабочей точки.

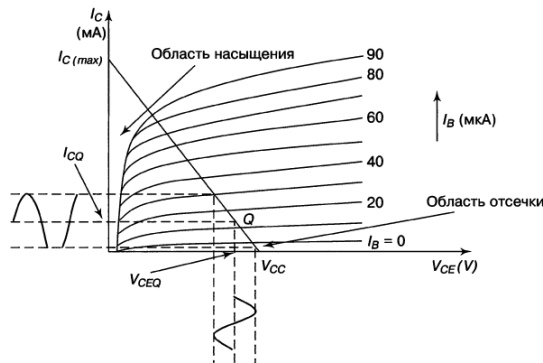
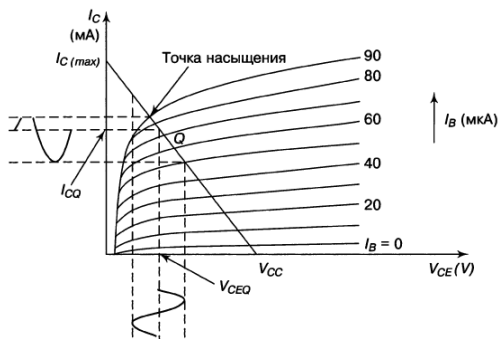
## Рабочая точка транзистора



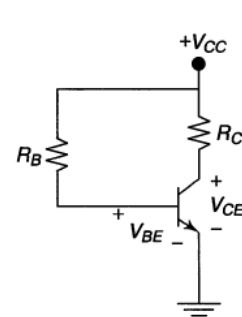
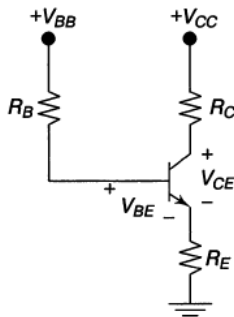
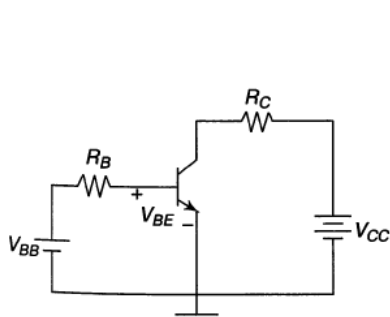
### Водяная аналогия биполярного транзистора [2]



## Рабочая точка

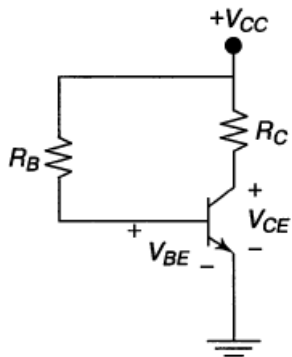


Задание рабочей точки фиксированным смещением





## Рабочая точка



По закону Кирхгофа для входной части цепи имеем

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE}$$

или

$$I_B = (V_{CC} - V_{BE}) / R_B \approx V_{CC} / R_B.$$

Уравнение показывает, что ток базы постоянен и не зависит от тока коллектора.

Данная схема смещения имеет плохую стабильность при любом изменении коэффициента усиления  $\beta$  и обратного тока.

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C.$$

Так как напряжение питания постоянно, если меняется ток коллектора, то напряжение между коллектором и эмиттером также меняется, следовательно смещается рабочая точка.

Схемы с фиксированным смещением не дают удовлетворительных характеристик и поэтому практически не используются.



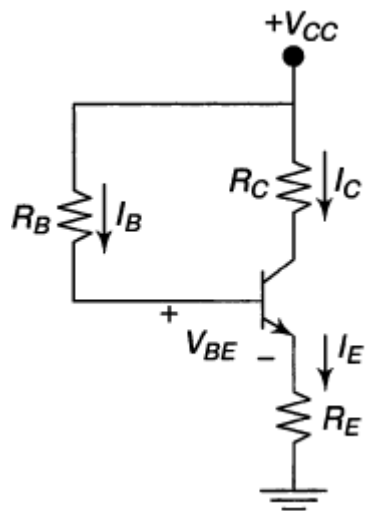
## *Типы схем смещения*



На практике используются три типа схем смещения:

1. Базовое смещение. Наиболее популярно, так как высокостабильное.
2. Эмиттерное смещение. Имеет стабильность как базовое, но требует дополнительного источника питания.
3. Автоматическое смещение (с коллекторной обратной связью). Менее стабильное, привлекательно с точки зрения простоты схемы.

## Базовое смещение



По закону Кирхгофа для входной цепи имеем

$$I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E = V_{CC}.$$

Так как токи эмиттера и коллектора практически равны, а ток коллектора и ток базы связаны через коэффициент усиления по току

$$(I_E / \beta) \cdot R_B + V_{BE} + I_E R_E = V_{CC}$$

или

$$I_E (\approx I_C) = \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{(R_E + R_B / \beta)}$$

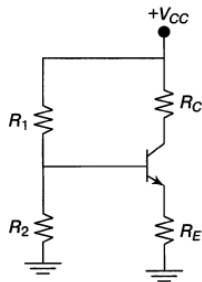
Из последнего видно, что если  $R_E \gg R_B / \beta$ , то ток эмиттера практически не зависит от коэффициента усиления по току.

$$I_E (\approx I_C) = \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{R_E}.$$

Наиболее широкое распространение получила **схема базового смещения** («делителем напряжения», «напряжением база-эмиттер»).



Для анализа схема преобразуется используя теорему Тевенина-Гельмгольца (любой источник может быть эквивалентно заменен на последовательно соединенные идеальный источник напряжения и внутреннее сопротивление).



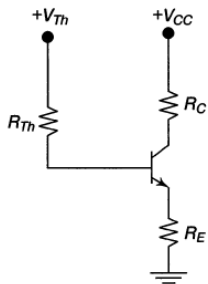
$$V_{Th} = \left[ \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \right] V_{CC}$$

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)}$$

$$I_E = \frac{(V_{Th} - 0,7)}{(R_E + R_{Th}/\beta)}$$

при  $R_E \gg R_{Th}/\beta$   $I_E = \frac{(V_{Th} - 0,7)}{R_E}$

Наиболее широкое распространение получила **схема базового смещения** («делителем напряжения», «напряжением база-эмиттер»).



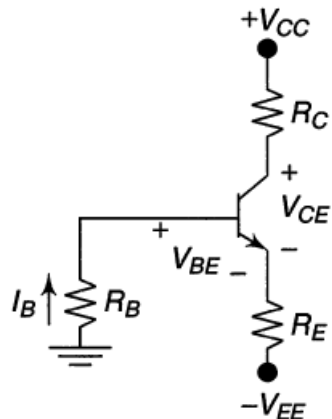
Достоинства:

1. Лучше выполняется условие стабильности  $R_E \gg R_{Th}/\beta$ , т.к.  $R_{Th} = R_B = R_1 || R_2$ .
2. Сопротивление источнику питания  $V_{CC}$  равно  $R_1 + R_2$  больше  $R_B$ , уменьшается нагрузка на источник питания.

## Эмиттерное смещение



Эмиттерная схема смещения применяется при наличии двух отдельных источников постоянного тока, обеспечивающих положительное и отрицательное напряжения по отношению к земле.



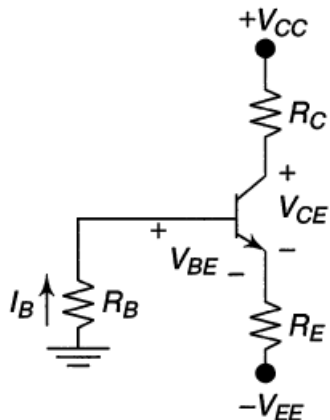
Такая схема смещения активно применяется с операционных усилителя. По характеристикам не уступает схеме смещения делителем напряжения.

Для входной цепи имеем 
$$I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E = V_{EE}.$$

Т.к.  $I_B = I_C / \beta \approx I_E / \beta$  и  $V_{BE} = 0,7 \text{ В}$  выражение для тока эмиттера принимает вид

$$I_E = \frac{(V_{EE} - 0,7)}{(R_E + R_B / \beta)}$$

## Эмиттерное смещение



Для стабильности ток эмиттера и ток коллектора должны оставаться постоянными, следовательно требуется чтобы

$$R_E \gg R_B / \beta$$

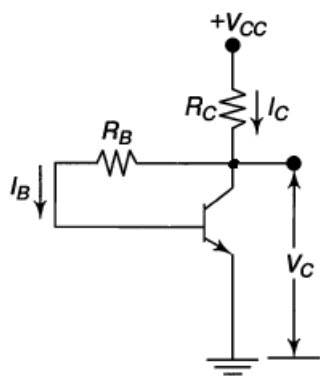
Практическое правило

$$R_E \approx \left( \frac{20}{\beta} \right) \cdot R_B$$

## Схема смещения с коллекторной обратной связью



Схема с коллекторным смещением не так устойчива, как схемы с базовым и эмиттерным смещением, однако обеспечивает приемлемую стабильность. Основное достоинство – простота реализации. Широко применяется в логических схемах.



Такое подключение реализует обратную связь, помогающую снизить влияние изменения коэффициента передачи тока на рабочую точку.

Сумма напряжений коллекторной цепи

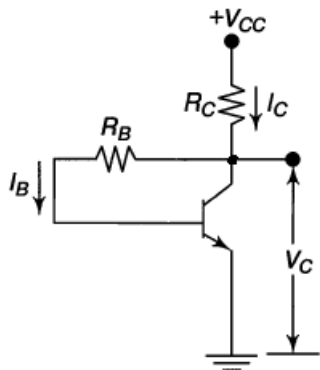
$$V_{CC} = I_C R_C + V_C \quad \text{и} \quad V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

Т.о. при увеличении тока коллектора напряжение коллектора уменьшается, снижение напряжения коллектора ведет к снижению тока базы, что останавливает рост тока коллектора.

$$V_C = R_B I_B + V_{BE} \quad \text{так как} \quad I_B = I_C / \beta \quad V_C = (I_C / \beta) R_B + V_{BE}$$



## Схема смещения с коллекторной обратной связью



Т.о. для расчета коллекторного тока применяется выражение

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B / \beta}$$

На практике для расчета резисторов м.б. использованы следующие соотношения

$$I_{C(\max)} = \frac{V_{CC}}{R_C} \quad I_{C(\max)} / 2$$

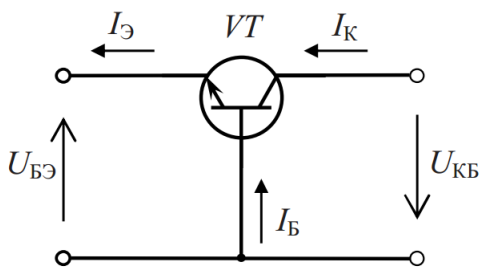
$$I_C = \frac{1}{2} I_{C(\max)} = \frac{V_{CC}}{2R_C} \quad R_B = \beta \cdot R_C$$

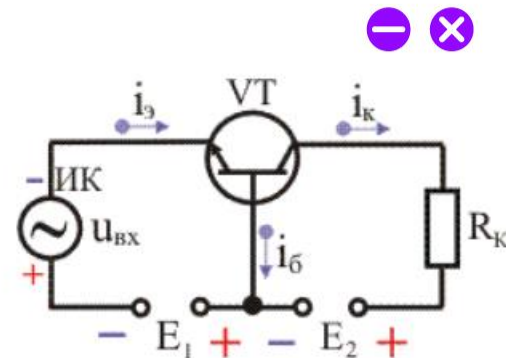
## *Схемы смещения. Выводы:*



- Схема фиксированного смещения проста, но недостаточно стабильна;
- Схема смещения с делителем напряжения демонстрирует хорошую стабильность, часто применяется в усилителях общего назначения, других линейных и цифровых схемах, требует большого числа резисторов;
- Схема эмиттерного смещения показывает хорошую устойчивость при изменении окружающей температуры и коэффициента  $\beta$ , но требует двух отдельных источников питания;
- Схема смещения с коллекторной обратной связью имеет приемлемую устойчивость рабочей точки. Простота схемы находит применение в цифровых схемах, где стабильность не является главным требованием.

## Схема включения с общей базой

С общей базой (ОБ)		$I_{\text{вх ОБ}} = -I_{\text{Э}}, U_{\text{вх ОБ}} = -U_{\text{БЭ}},$ $I_{\text{вых ОБ}} = I_{\text{К}}, U_{\text{вых ОБ}} = U_{\text{КБ}};$ $\alpha = \left. \frac{\partial I_{\text{К}}}{\partial I_{\text{Э}}} \right _{U_{\text{КБ}} = \text{const}},$ $\alpha < 1 \approx 0,9 \dots 0,99$
-----------------------	---	---



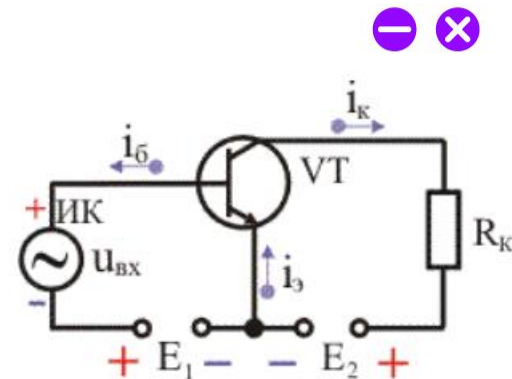
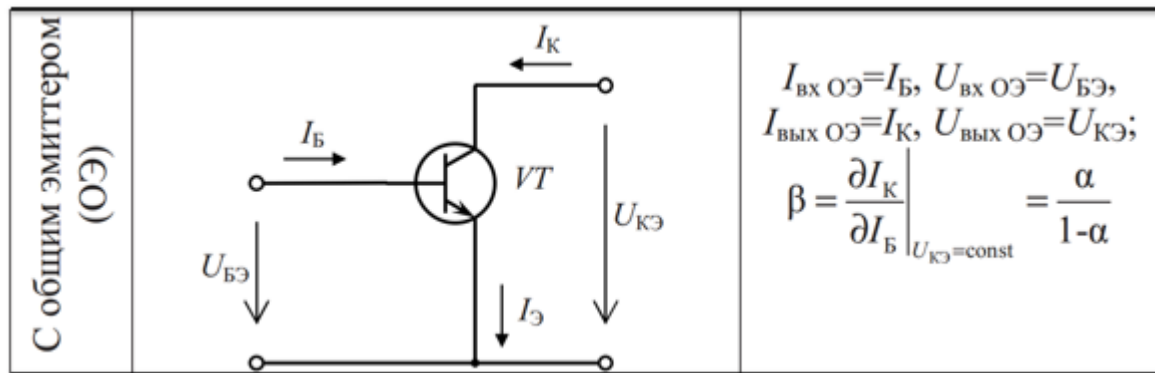
### Достоинства:

- Хорошие температурные и широкий частотный диапазон.
- Высокое допустимое коллекторное напряжение.

### Недостатки:

- Малое усиление по току, равное  $\alpha$ , так как  $\alpha$  всегда немного менее 1
- Малое входное сопротивление

## Схема включения с общим эмиттером



### Достоинства:

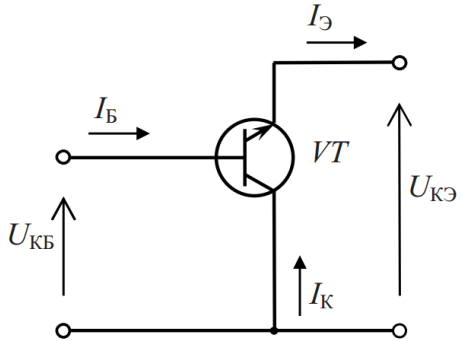
- Большой коэффициент усиления по току, напряжению, мощности.
- Можно обойтись одним источником питания.
- Выходное переменное напряжение инвертируется относительно входного.

### Недостатки:

Имеет меньшую температурную стабильность.

Частотные свойства по сравнению со схемой с ОБ существенно хуже.

## Схема включения с общим коллектором

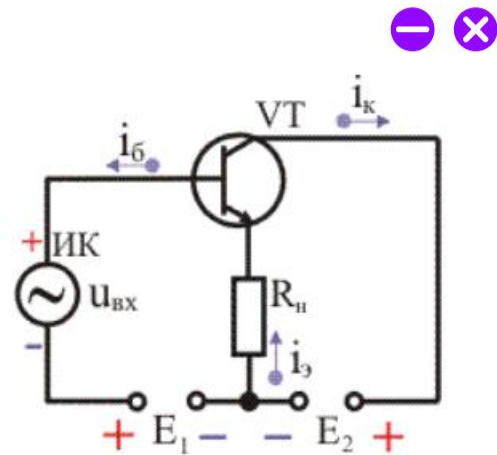
С общим коллектором (ОК)		$I_{\text{вх ОК}} = I_B, U_{\text{вх ОК}} = -U_{\text{КБ}},$ $I_{\text{вых ОК}} = I_{\text{Э}}, U_{\text{вых ОК}} = -U_{\text{КЭ}};$ $K_{U_{\text{ОК}}} = \frac{U_{\text{вых ОК}}}{U_{\text{вх ОК}}} \approx 1$
-----------------------------	---	---

### Достоинства:

- Большое входное сопротивление.
- Малое выходное сопротивление.

### Недостатки:

- Коэффициент усиления по напряжению немного меньше 1.
- Схему с таким включением часто называют «эмиттерным повторителем».



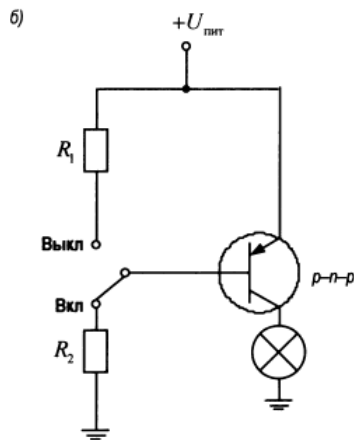
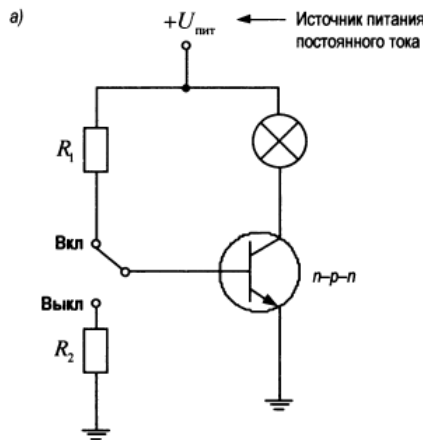
## ***Методика анализа усилителей***



1. Все источники постоянного напряжения и тока приводятся к нулю. Источники напряжения замыкаются накоротко (т.е. заземляются), все клеммы источников тока разрываются.
2. При анализе на переменном токе действие переходных и блокировочных конденсаторов не учитывается. Конденсаторы рассматриваются как идеальные и предполагаются замкнутыми.
3. При анализе на постоянном токе все источники переменного напряжения и тока приводятся к нулю, переходные и блокировочные конденсаторы рассматриваются как обрыв (бесконечное сопротивление).
4. Если для любой цели требуется знать полные значения тока и напряжения, применяется принцип суперпозиции, т.е. считается, что алгебраическая сумма переменного и постоянного тока (напряжения) дает полный ток (напряжение) на участке цепи.

## Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]

### 1. Транзисторный переключатель



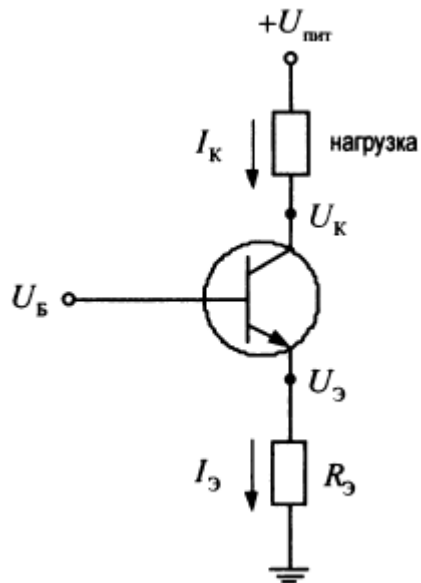
$$I_B = \frac{U_{\text{э}} + 0,6 \text{ В}}{R_1} = \frac{0 \text{ В} + 0,6 \text{ В}}{R_1}.$$

Ток коллектора  $I_K = \beta I_B$ .  
Напряжение на лампочке не д.б.  
слишком большим,  $U_K > 0,6 + U_{\text{э}}$ .

$R_2$  должен иметь высокое  
сопротивление, чтобы свести к  
минимуму ток на землю ( $R_2 \approx 10 \text{ кОм}$ )

## Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]

### 2. Источник тока



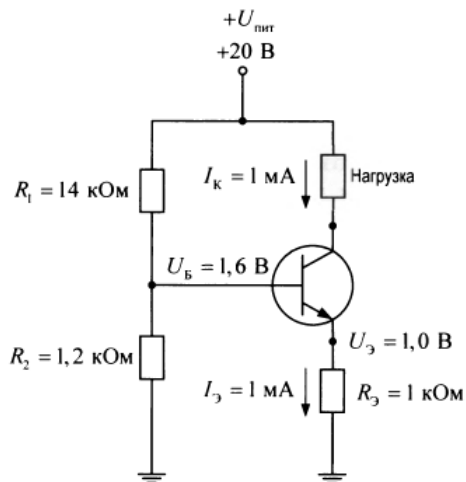
Небольшим значением входного напряжения и тока базы можно управлять большим током нагрузки

$$I_K = I_{нагр} \frac{U_B - 0,6 \text{ В}}{R_3}.$$

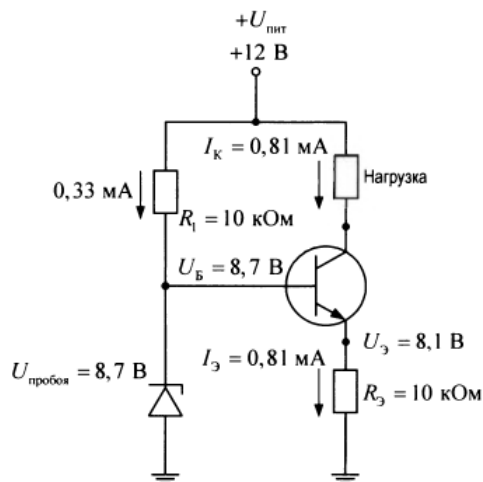


## Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]

### 3. Способы токового смещения



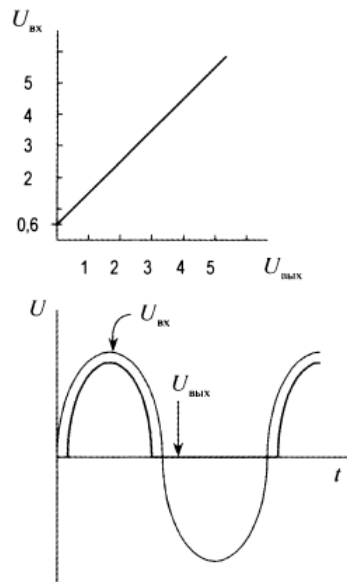
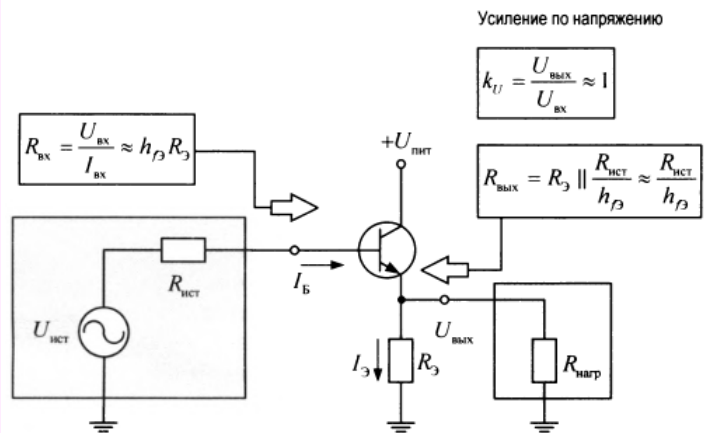
$$U_{\text{б}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{\text{пит}}.$$



$$U_{\text{б}} = U_{\text{проб}}.$$

## Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]

### 4. Эмиттерный повторитель



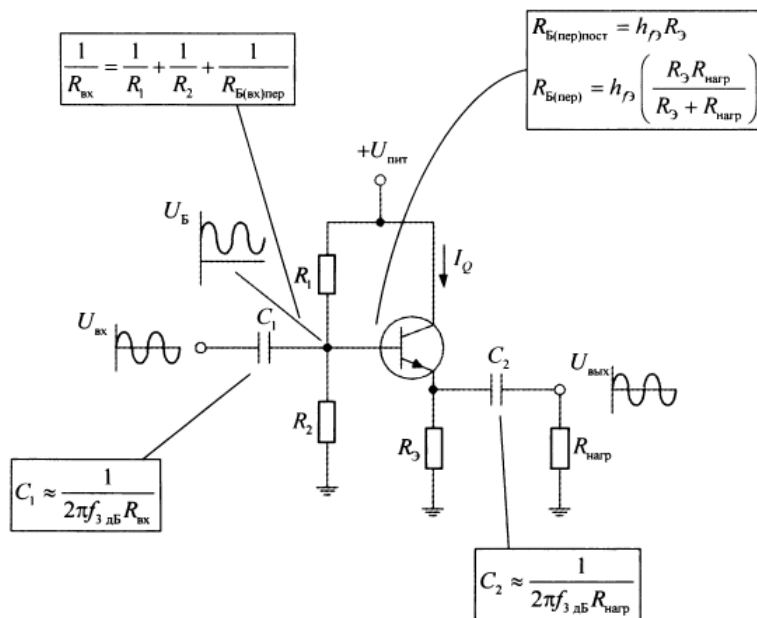
$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} \approx h_{\text{э}} R_{\text{э}};$$

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{э}} \parallel \frac{R_{\text{ист}}}{h_{\text{э}}} \approx \frac{R_{\text{ист}}}{h_{\text{э}}};$$

$$k_{\text{U}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx 1,$$

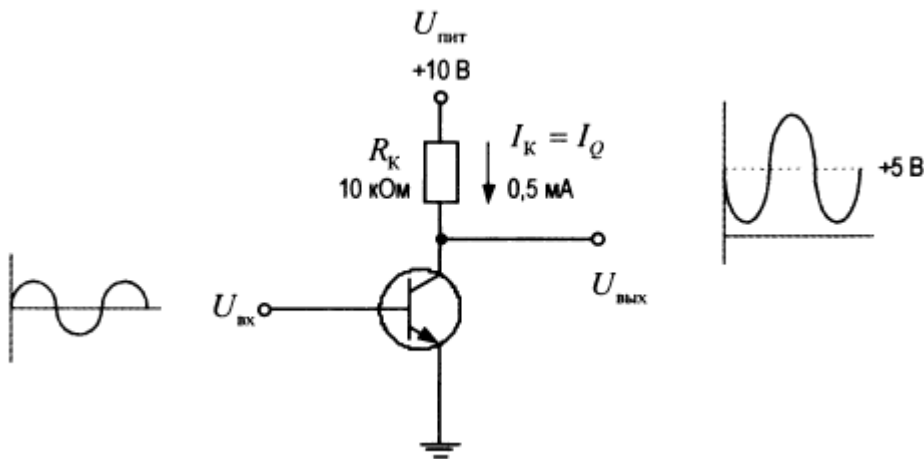
— ×

— ×



## Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]

### 6. Схема с общим эмиттером



Для получения максимального размаха выходного напряжения зададим  $U_K = \frac{1}{2} U_{\text{пит}}$

$$R_K = \frac{U_{\text{пит}} - U_K}{I_K} = \frac{U_{\text{пит}} - 1/2 U_{\text{пит}}}{I_Q} = \frac{1/2 U_{\text{пит}}}{I_Q}.$$

Определение к-та усиления

$$\Delta I_3 = \frac{\Delta U_3}{R_3} = \frac{\Delta U_B}{R_3} = \Delta I_K.$$

$$U_K = U_{\text{пит}} - I_K R_K$$

$$\Delta U_K = \Delta I_K R_K = \frac{\Delta U_B}{R_3} R_K.$$

## ***Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]***

### ***6. Схема с общим эмиттером***

Так как  $U_K = U_{\text{ВЫХ}}$  и  $U_B = U_{\text{ВХ}}$ , то

$$\text{Усиление} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_B} = \frac{R_K}{R_Э}.$$

Таким образом т.к.  $R_Э = 0$  к-т усиления должен быть равен бесконечности.

## Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]



### 6. Схема с общим эмиттером

Так как  $U_K = U_{\text{ВЫХ}}$  и  $U_B = U_{\text{ВХ}}$ , то

$$\text{Усиление} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_B} = \frac{R_K}{R_Э}.$$

Таким образом т.к.  $R_Э = 0$  к-т усиления должен быть равен бесконечности.



## Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]



### 6. Схема с общим эмиттером

Так как  $U_K = U_{\text{ВЫХ}}$  и  $U_B = U_{\text{ВХ}}$ , то

$$\text{Усиление} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_B} = \frac{R_K}{R_3}.$$

Таким образом т.к.  $R_3 = 0$  к-т усиления должен быть равен бесконечности.

Биполярные транзисторы обладают свойством переходного сопротивления (небольшое внутреннее сопротивление) в области эмиттера.

$$r_{\text{п с}} \approx \frac{0,026 \text{ В}}{I_3}.$$
$$\text{Усиление} = -\frac{R_K}{R_3} = -\frac{R_K}{r_{\text{п с}}}$$

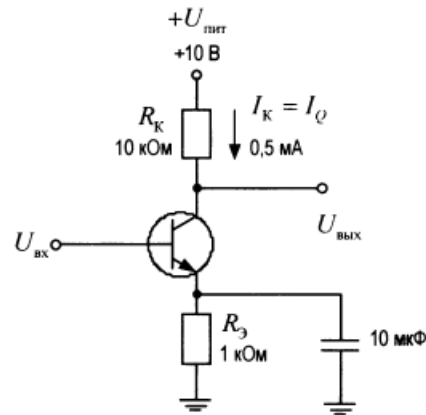
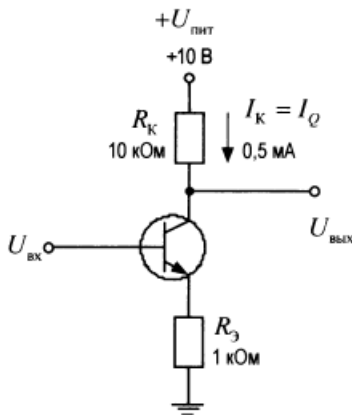


## Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]

### 6. Схема с общим эмиттером

Проблема использования переходного сопротивления – значение сопротивления нестабильно (зависит от температуры), следовательно коэффициент усиления нестабилен. Для устранения этой проблемы в цепь эмиттера устанавливают резистор  $R_3$ .

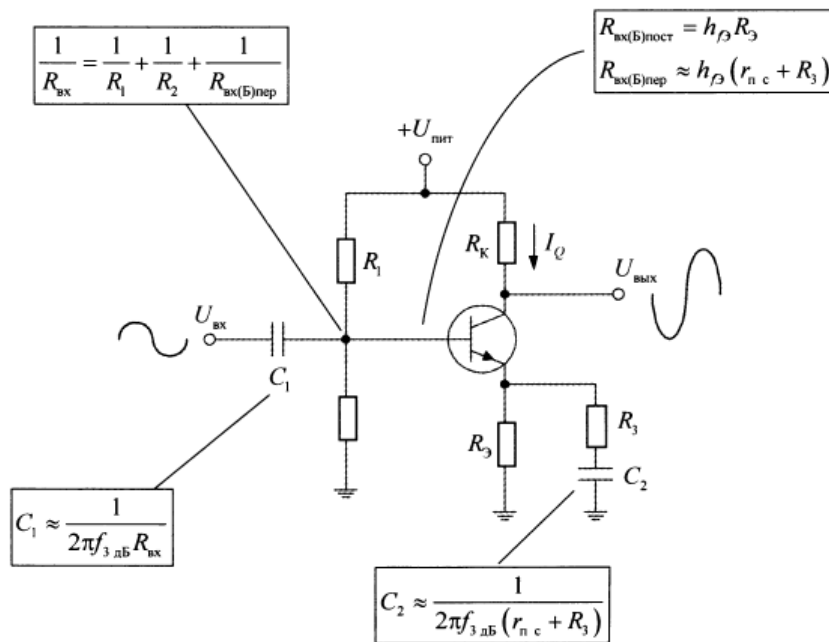
$$\text{Усиление} = \frac{R_K}{R_3 + r_{пс}}$$





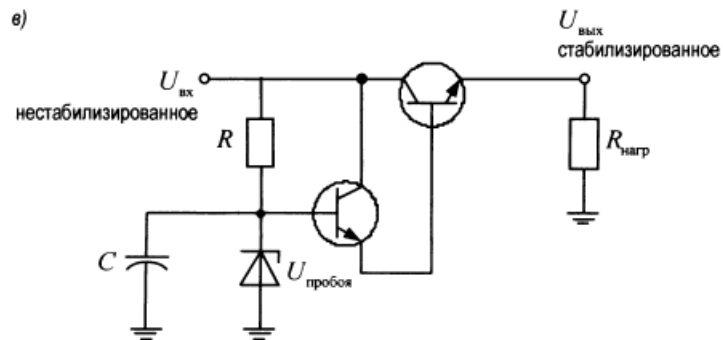
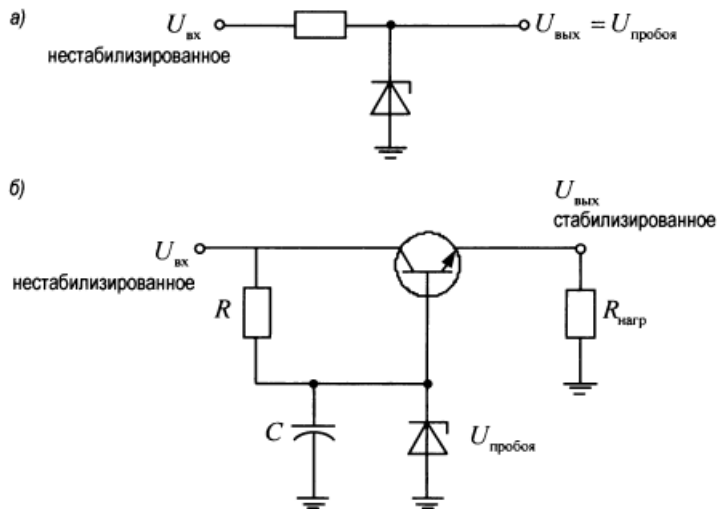
## Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]

### 7. Схема с общим эмиттером



## Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]

### 8. Стабилизатор напряжения



## Основные функции, выполняемые биполярными транзисторами [2]

### 8. Пара Дарлингтона

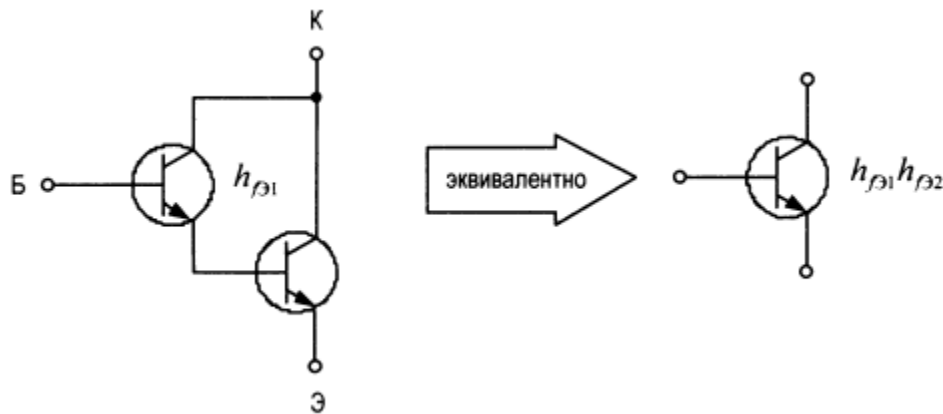
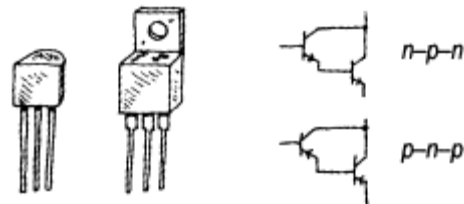


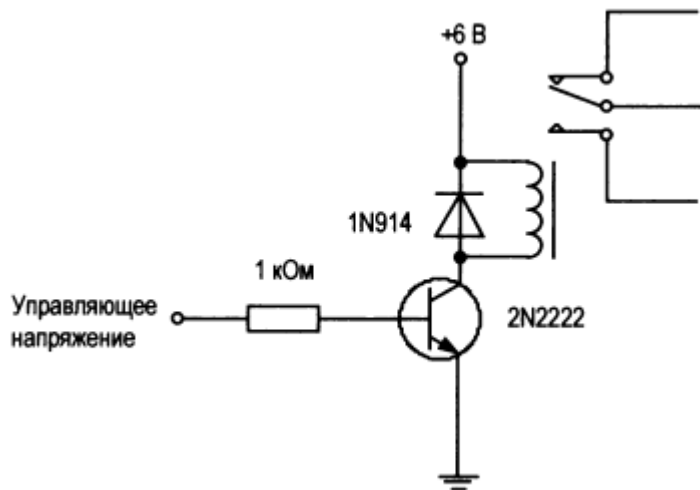
Схема обладает большим коэффициентом усиления по току, который равен произведению коэффициентов усиления. Пары Дарлингтона доступны в моноблочном исполнении.



## Применение биполярных транзисторов [2]



### 1. Управление реле



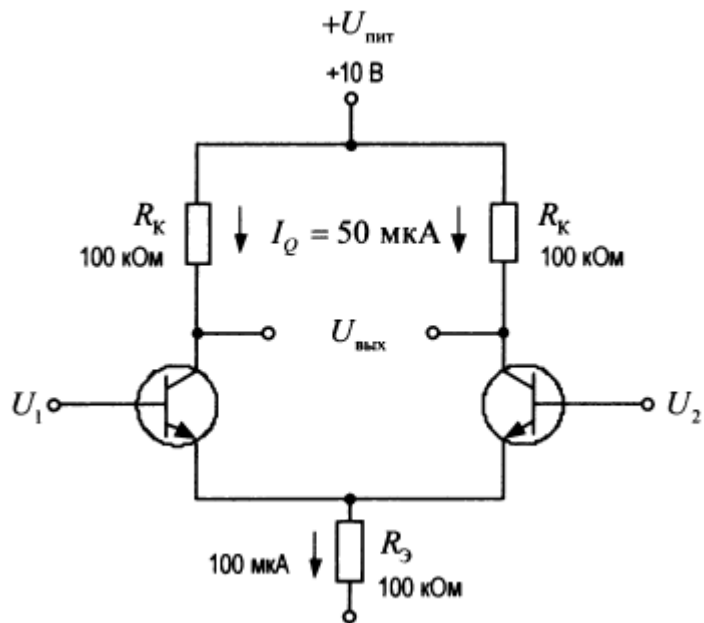
При подаче управляющего напряжения транзистор открывается, ток течет через катушку реле, реле переключается в другое состояние.

Диод предназначен для подавления всплесков напряжения, создаваемых катушкой реле.

## Применение биполярных транзисторов [2]



### 2. Дифференциальный усилитель



Дифференциальный усилитель представляет собой устройство, сравнивающее два отдельных входных сигнала, а затем усиливающий разницу между ними.

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{R_{\text{к}}}{r_{\text{пс}}} (U_1 - U_2).$$

## Применение биполярных транзисторов [2]



### 3. Усилитель на комплементарных транзисторах

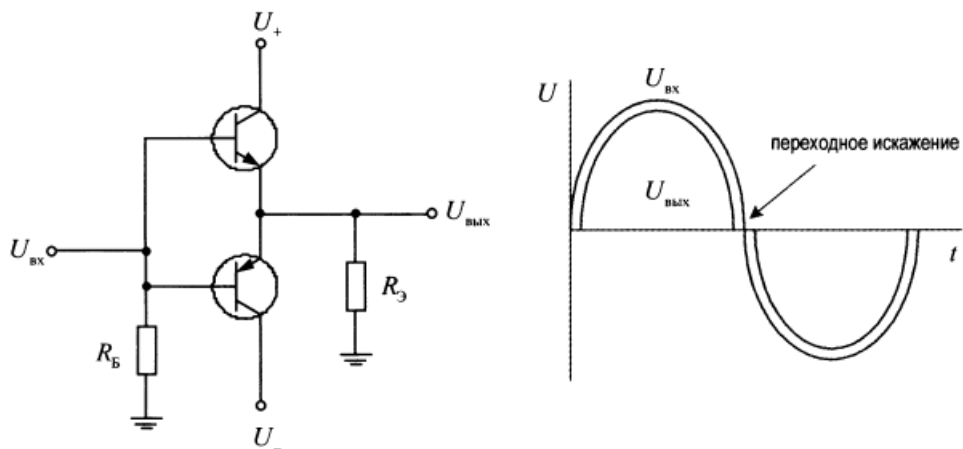


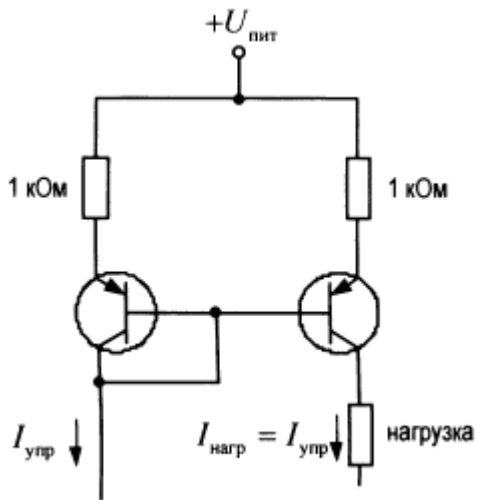
Схема представляет собой двухтактный эмиттерный повторитель.

Данная схема является экономичной, так как рабочая точка обоих транзисторов лежит вблизи тока коллектора  $I_K = 0$ .

## Применение биполярных транзисторов [2]



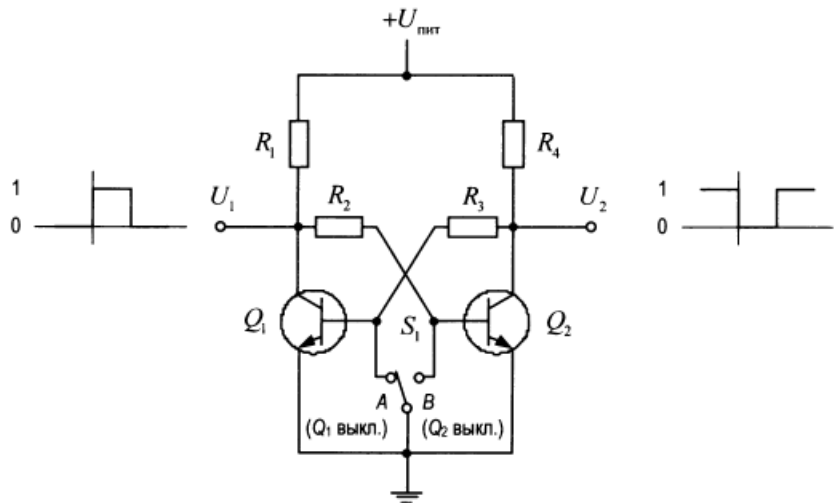
### 4. Токовое зеркало



В данной схеме ток нагрузки является «зеркальным отображением» тока управления, который потребляется от коллектора левого транзистора.

## Применение биполярных транзисторов [2]

### 5. Мультивибраторы (триггеры). Бистабильный мультивибратор

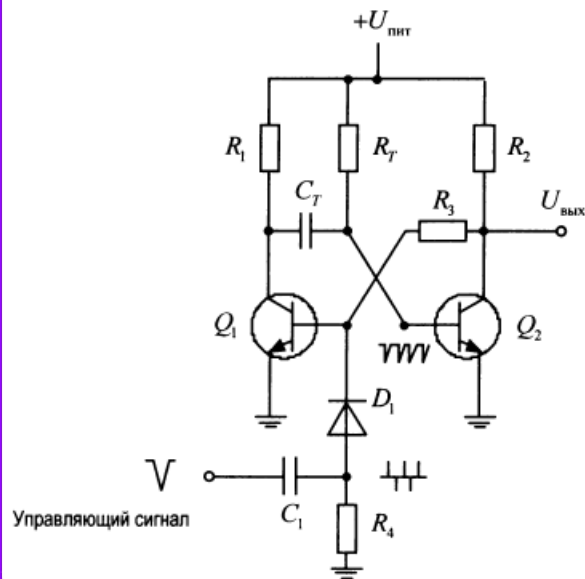


Представляет собой схему, которая находится в одном из двух состояний до тех пор, пока не поступит управляющий сигнал, переключающий ее в другое состояние.



## Применение биполярных транзисторов [2]

### 6. Моностабильный мультивибратор

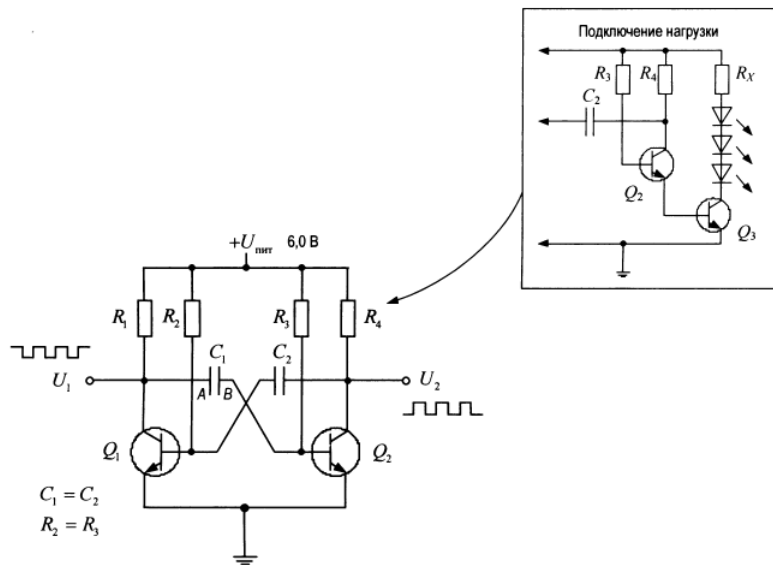


Данный мультивибратор обладает одним устойчивым состоянием.

Перевод в нестабильное состояние осуществляется кратковременным приложением управляющего сигнала, однако по истечении определенного времени (определяется параметрами  $C_T R_T$ ) схема переходит в исходное устойчивое состояние.

## Применение биполярных транзисторов [2]

### 7. Неустойчивый мультивибратор

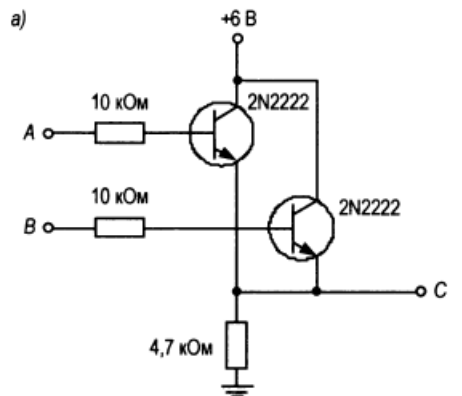


Не имеет устойчивого состояния и работает как генератор импульсов. Для переключения из одного состояния в другое не требуется входной сигнал.

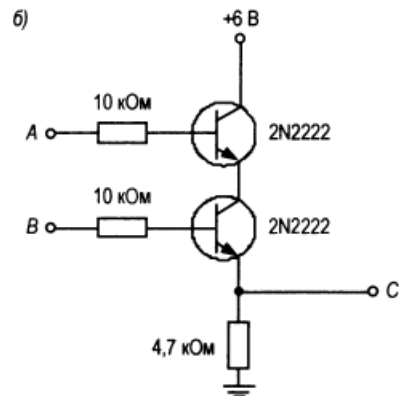
Переключение между выходными состояниями осуществляется посредством цепи положительной обратной связи внутренних управляющих сигналов, создаваемых контуром RC.

## Применение биполярных транзисторов [2]

### 8. Логические элементы на транзисторах



A	B	C
Низкое	Низкое	Низкое
Низкое	Высокое	Низкое
Высокое	Низкое	Низкое
Высокое	Высокое	Высокое



A	B	C
Низкое	Низкое	Низкое
Низкое	Высокое	Высокое
Высокое	Низкое	Высокое
Высокое	Высокое	Высокое

## Графический метод анализа усилителей

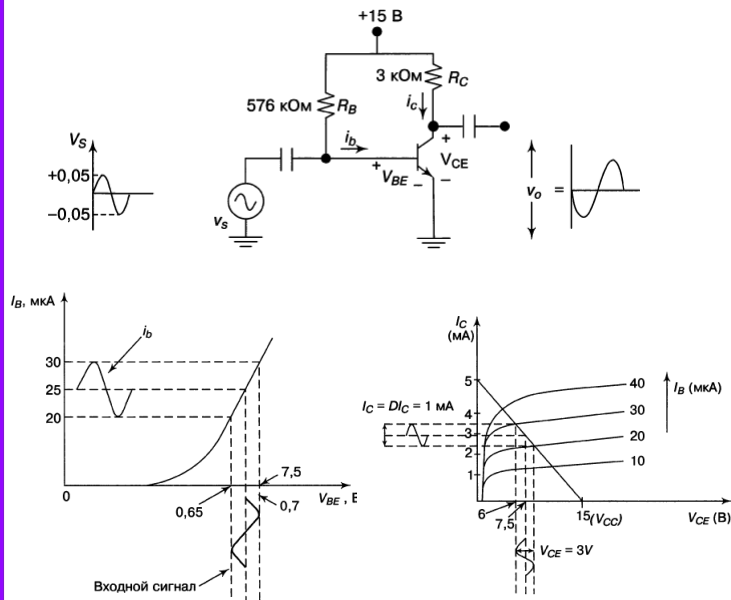
Рассмотрим простейшую схему с ОЭ.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = (15 - 0,7)/576 \text{ кОм} = 25 \text{ мкА}.$$

Для анализа необходимы входная и выходная характеристики транзистора.

Приняв, что напряжение между базой и эмиттером 0,7 В, имеем входное напряжение 0.65...0.75 В, при этом базовый ток меняется от 20 до 30 мкА.

$I_C$  в  $\beta$  раз больше, чем  $I_B$ . Пусть  $\beta = 100$ .  
 $\Delta I_C = i_c = \beta \Delta I_B = \beta \cdot i_b = 100 \times 10 \text{ мкА} = 1 \text{ мА}.$



Изменение  $I_C$  на 1 мА вызывает изменение напряжения на выходе на 3 В.

## Графический метод анализа усилителей



Все важные параметры усилителя можно оценить из графиков – коэффициенты усиления по току, по напряжению, входной и выходной импеданс (полное сопротивление).

Выходной ток  $i_c = \Delta I_C = 3 \text{ мА} - 2 \text{ мА} = 1 \text{ мА}$ .

Входной ток  $i_b = \Delta I_B = 30 \text{ мкА} - 20 \text{ мкА} = 10 \text{ мкА}$ .

Выходное напряжение  $v_{ce} = \Delta V_{CE} = 6 \text{ В} - 9 \text{ В} = -3 \text{ В}$ .

Входное напряжение  $v_{be} = \Delta V_{BE} = 0,75 \text{ В} - 0,65 \text{ В} = 0,1 \text{ В}$ .

Пренебрегая малой потерей тока, вызванной шунтированием источника сигнала базовым резистором 576 кОм получаем коэффициенты усиления по току и напряжению

## Графический метод анализа усилителей



Коэффициент усиления по току

$$A_i = \frac{\text{выходной переменный ток}}{\text{входной переменный ток}} = \frac{i_c}{i_b} = \frac{1 \text{ мА}}{10 \text{ мкА}} = 100$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$A_v = \frac{\text{выходное переменное напряжение}}{\text{входное переменное напряжение}} = \frac{v_{ce}}{v_{be}} = \frac{-3 \text{ В}}{0,1 \text{ В}} = -30$$

Входной импеданс

$$Z_i = \frac{\text{входное переменное напряжение}}{\text{входной переменный ток}} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{0,1 \text{ В}}{10 \text{ мкА}} = 10\,000 \text{ Ом}$$

Выходной импеданс

$$Z_o = \frac{\text{выходное переменное напряжение}}{\text{выходной переменный ток}} = \frac{v_{ce}}{i_c} = \frac{3 \text{ В}}{1 \text{ мА}} = 3 \text{ кОм}$$

## Усилитель малого сигнала



*Малые сигналы* – это такие сигналы, которые вызывают изменения напряжения и тока, намного меньше, чем постоянный ток и постоянное напряжение рабочей точки.

*Усилители малого сигнала* – маломощные усилители, их мощность рассеяния (обычно такая же как и потребляемая мощность) не превышает нескольких сотен милливатт.

Для анализа схем в области малых сигналов справедливо

$$i_c \approx i_e \quad i_b = i_c / \beta \quad i_b \approx i_e / \beta$$

коэффициент  $\beta$  обычно приводится производителем.

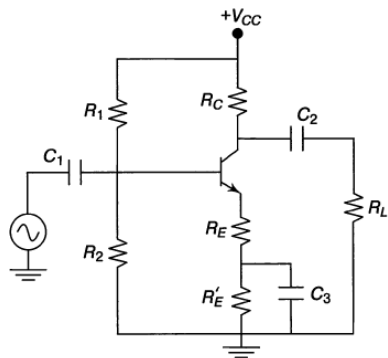
## ***Анализ схем с использованием $r$ -параметров [1]. Достоинства метода $r$ -параметров по сравнению с $h$ -параметрами***



1. Анализ  $r$ -параметрами простой и прямой.
2. Значения  $h$ -параметров зависят от тока и напряжения (т. е. их значения меняются при изменении рабочей точки). Для точного анализа требуется иметь  $h$ -параметры, вычисленные для тока и напряжения в рабочей точке схемы. При анализе с помощью  $r$ -параметров требуется, чтобы был вычислен только один параметр — динамическое сопротивление эмиттера, и вычислить его несложно.
3. Уравнения характеристик схемы проще, чем в случае с  $h$ -параметрами, так что их легко применять и легко запоминать.
4. При  $r$ -анализе характеристики схемы могут быть визуализированы, что способствует простой переделке и модификации устройства.
5. И самое важное —  $r$ -параметры близки к действительным измерениям.



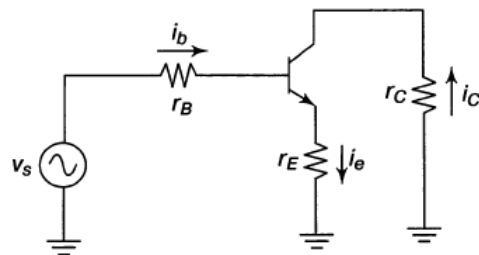
## Анализ схем с использованием $r$ -параметров.



Анализ схем с использованием  $r$ -параметров производится на основе коэффициента усиления тока  $\beta$  и динамического сопротивления эмиттера транзистора  $r'_e$ , которое приблизительно вычисляется

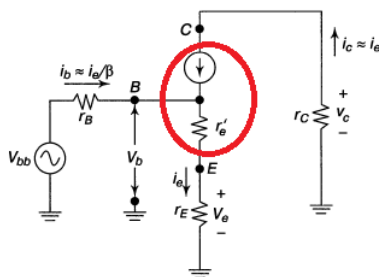
$$r'_e = \frac{25 \text{ мВ}}{I_E}$$

Для проведения расчетов транзистор заменяется его моделью



$$R_B = R_1 || R_2$$

$$r_c = R_C || R_L \quad r_E = R_E$$

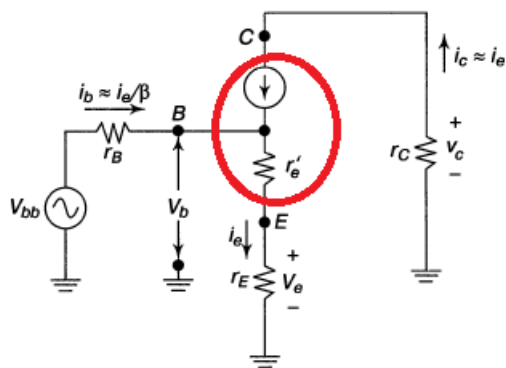


Рассмотрим входной контур по часовой стрелке

$$-v_{bb} + i_b r_b + i_e (r'_e + r_E) = 0 \quad i_b = i_e / \beta$$

$$i_e = \frac{v_{bb}}{r'_e + r_E + r_B / \beta}$$

## Анализ схем с использованием $r$ -параметров.



Для переменных напряжений можно записать выражения через ток эмиттера:

$$v_b = i_e(r'_e + r_E),$$

$$v_e = i_e r'_e,$$

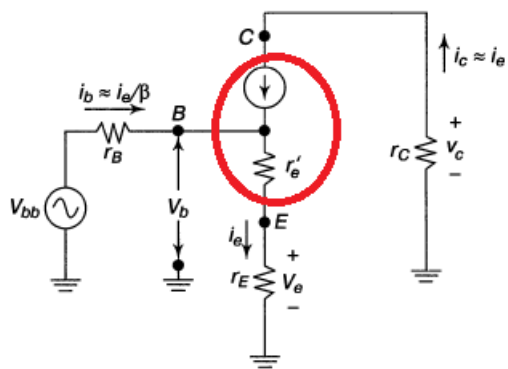
$$v_c = i_e r_c.$$

Коэффициент усиления по напряжению  $A_v = \frac{v_c}{v_b}$

$$A_v = \frac{i_e r_c}{i_e(r'_e + r_E)} \quad \text{или} \quad A_v = \frac{r_c}{(r'_e + r_E)}$$

Введение шунтирующего конденсатора параллельно сопротивлению эмиттера позволяет накоротко замкнуть эмиттерное сопротивление сигналу переменного тока и увеличить коэффициент усиления по напряжению.  $A_v = \frac{r_c}{r'_e}$

## Анализ схем с использованием $r$ -параметров.

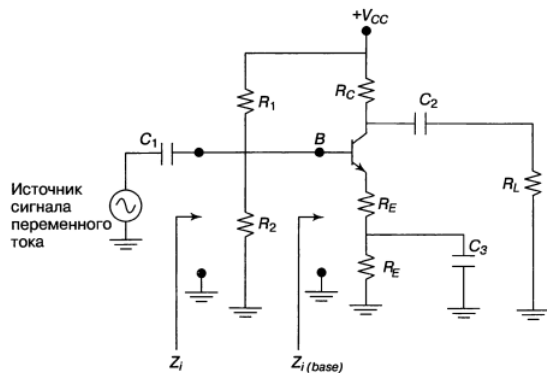


Входное сопротивление (импеданс) - важный параметр любой схемы. Малое переменное напряжение на входе вызывает переменный ток. Их отношение есть величина входного импеданса. Обычно желательно иметь высокий входной импеданс, чтобы схема не потребляла большой ток от источника.

$$A_v = \frac{r_c}{r'_e}$$

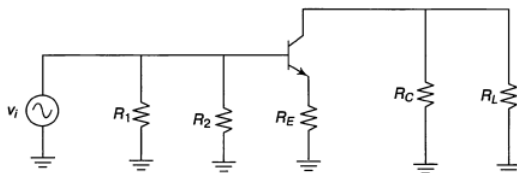
## Анализ схем с использованием $r$ -параметров.

Определение входного сопротивления (схема с ОЭ)



$Z_i$  - входной импеданс усилителя.

Исходная схема преобразуется к эквивалентной схеме для переменного тока



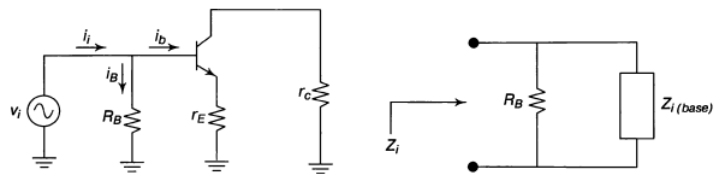
$$R_B = R_1 || R_2,$$

$$r_c = R_C || R_L,$$

$$r_E = R_E.$$

## Анализ схем с использованием $r$ -параметров.

Определение входного сопротивления (схема с ОЭ)



Входной ток делится на ток базы и ток через делитель.

Входной импеданс равен

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i}$$

$$Z_i = R_B || Z_{i(base)}$$

$$Z_{i(base)} = v_b / i_b \quad \text{импеданс базы}$$

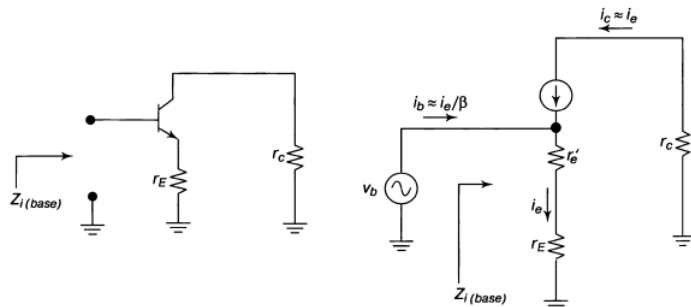
$$v_b = i_e (r'_e + r_E)$$

$$i_e = \beta i_b$$

$$v_b = i_b \cdot \beta (r'_e + r_E)$$

$$Z_{i(base)} = \frac{v_b}{i_b} = \beta \cdot (r'_e + r_E)$$

$$Z_{i(base)} = \beta \cdot (r'_e + r_E)$$



## Анализ схем с использованием $r$ -параметров.



Определение выходного сопротивления (схема с ОЭ)

Выходной импеданс усилителя – это полный эквивалентный импеданс на его выходных зажимах. Если известны выходное переменное напряжение и выходной переменный ток, то выходной импеданс рассчитывается просто по закону Ома.

Выходной импеданс в схеме с ОЭ может быть вычислен преобразованием в эквивалентную схему по теореме Тевенина. В действительности, так как входной импеданс усилителя с ОЭ в  $\beta$  раз больше импеданса с ОБ, то выходной импеданс усилителя с ОЭ равен  $1/\beta$  выходного усилителя с ОБ.

Выходной импеданс схемы с ОЭ равен  $r_c/\beta$

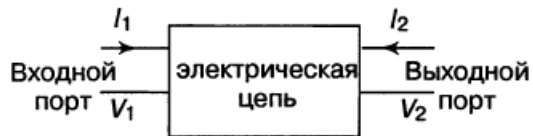
	Схема с общей базой	Схема с общим эмиттером
Входной импеданс	$Z_i = r'_e$	$Z_i = \beta \cdot r'_e$
Выходной импеданс	$Z_o \approx r_c$	$Z_o = r_c/\beta$

## Биполярный транзистор - Z-, Y- и h- параметры



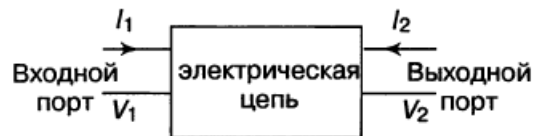
Свойства малосигнального усилителя характеризуются его входным импедансом, коэффициентом усиления по напряжению, коэффициентом усиления по току и выходным импедансом. Формулы для вычисления этих параметров можно получить, взяв исходные данные Z-, X- и h- параметры.

Усилитель рассматривается как «черный ящик», нас не интересуют внутренние детали четырехполюсника. Характеристики оцениваются на основе токов клемм и напряжений.



$I_1, I_2, U_1$  и  $U_2$  - мгновенные значения (сумма постоянного (смещение) и переменного (вызванного сигналом))

## Биполярный транзистор - Z-, Y- и h- параметры



Такой анализ актуален в малосигнальных цепях, когда изменения, вызванные входным сигналом, малы по сравнению с постоянными токами и напряжениями. Применим для схем с линейным (кусочно-линейными характеристиками).

Любые две из четырех переменных величин на клеммах  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U_1$  и  $U_2$  могут быть выбраны независимыми переменными, а другие могут быть выражены через эти независимые переменные и параметры четырехполюсника. Возможно всего три набора переменных и они ведут к Z-, X- и h- параметрам.



## Биполярный транзистор - Z-параметры

В качестве независимых переменных берутся токи  $I_1$  и  $I_2$ , тогда напряжения могут быть вычислены через функциональные соотношения

$$V_1 = f_1(I_1, I_2)$$

$$V_2 = f_2(I_1, I_2)$$

При работе на переменном токе токи и напряжения меняются, эти изменения можно выразить через полные дифференциалы

$$dV_1 = \left( \frac{\partial V_1}{\partial I_1} \right) \cdot dI_1 + \left( \frac{\partial V_1}{\partial I_2} \right) \cdot dI_2;$$

$$dV_2 = \left( \frac{\partial V_2}{\partial I_1} \right) \cdot dI_1 + \left( \frac{\partial V_2}{\partial I_2} \right) \cdot dI_2.$$

Начальные напряжения и токи представлены мгновенными значениями с фиксированной постоянной составляющей и переменной составляющей. Если считать переменные части  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U_1$  и  $U_2$  синусоидальными, изменения мгновенных значений можно представить их действующими значениями ( $dV_1 = v_1$  и т.п.), тогда

$$v_1 = Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2;$$

$$v_2 = Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2.$$



## **Биполярный транзистор - Z-параметры**

Таким образом имеем 4 импедансных параметра:

1. Входной импеданс при разомкнутых для переменного тока выходных клеммах  $i_2 = 0$

$$Z_{11} = z_i = \left. \frac{v_1}{i_1} \right|_{i_2=0}$$

2. Импеданс обратной передачи при разомкнутом для переменного тока входном порте

$$Z_{12} = Z_r = \left. \frac{v_1}{i_2} \right|_{i_1=0}$$

3. Импеданс прямой передачи при  $i_2 = 0$

$$Z_{21} = Z_f = \left. \frac{v_2}{i_1} \right|_{i_2=0}$$



4. Выходной импеданс при  $i_1 = 0$

$$Z_{22} = Z_o = \left. \frac{v_2}{i_2} \right|_{i_1=0}$$

Так как для всех Z параметров  $i_1 = 0$  или  $i_2 = 0$ , то Z параметры также называют параметрами холостого хода.



## **Биполярный транзистор - Y-параметры**

**Y – параметры** в качестве независимых переменных выбирают напряжения  $V_1$  и  $V_2$ .  

Выражения для полных дифференциалов имеют вид

$$dI_1 = \left( \frac{\partial I_1}{\partial V_1} \right) dV_1 + \left( \frac{\partial I_1}{\partial V_2} \right) dV_2;$$

$$dI_2 = \left( \frac{\partial I_2}{\partial V_1} \right) dV_1 + \left( \frac{\partial I_2}{\partial V_2} \right) dV_2.$$

Частные производные имеют размерность проводимости

Уравнения м.б. представлены в виде

$$i_1 = Y_{11}v_1 + Y_{12}v_2;$$

$$i_2 = Y_{21}v_1 + Y_{22}v_2.$$

## Биполярный транзистор - Y-параметры



Y-параметры имеют вид

$$Y_{11} = Y_i = \left. \frac{i_1}{v_1} \right|_{v_2=0}$$

Y11 – входная проводимость при коротком замыкании выходного порта  $v_2=0$

$$Y_{12} = Y_r = \left. \frac{i_1}{v_2} \right|_{v_1=0}$$

Y12 – проводимость обратной передачи при коротком замыкании входа  $v_1=0$

$$Y_{21} = Y_f = \left. \frac{i_2}{v_1} \right|_{v_2=0}$$

Y21 – проводимость прямой передачи при коротком замыкании выхода  $v_2=0$

$$Y_{22} = Y_o = \left. \frac{i_2}{v_2} \right|_{v_1=0}$$

Y22 – выходная проводимость при замкнутом входе  $v_1=0$

Y- параметры называют параметрами замкнутой схемы.

## ***Биполярный транзистор - $h$ -параметры***



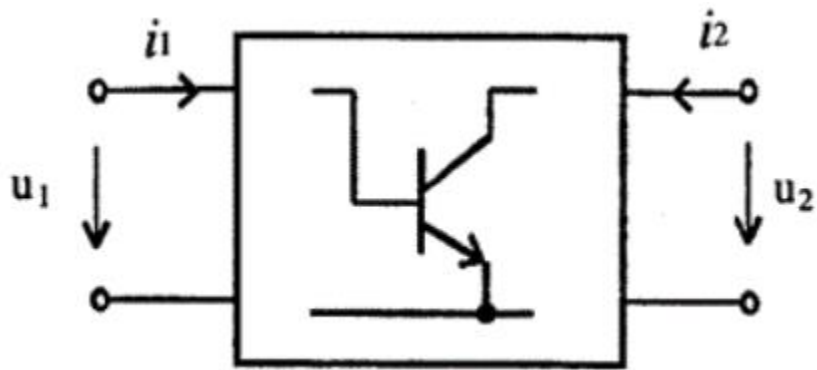
$h$ -параметры являются дифференциальными и характеризуют свойства транзистора в статическом режиме (при работе без нагрузки) в рабочей точке.

Положение рабочей точки на статических характеристиках определяется значениями постоянных напряжений (и, соответственно, токов) на входных и выходных зажимах транзистора.

Определить параметры можно опытным путем, осуществляя режимы короткого замыкания и холостого хода по переменному току.

Для определения  $h$ -параметров в качестве независимых переменных выбирают ток в выходной цепи и напряжение во входной цепи.

## Биполярный транзистор - $h$ -параметры



$$dV_1 = \left( \frac{\partial V_1}{\partial I_1} \right) dI_1 + \left( \frac{\partial V_1}{\partial V_2} \right) dV_2;$$

$$dI_2 = \left( \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \right) dI_1 + \left( \frac{\partial I_2}{\partial V_2} \right) dV_2.$$

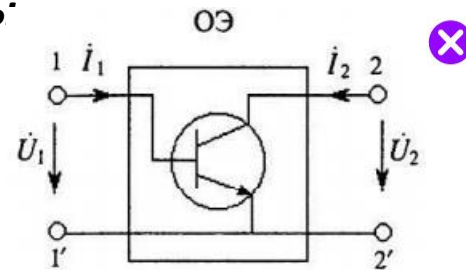
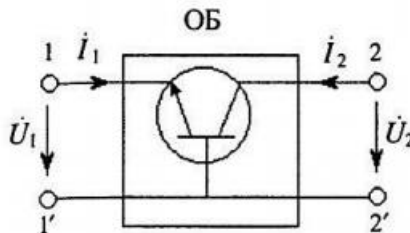
$$\begin{aligned} u_1 &= h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2; \\ i_2 &= h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2. \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

## Биполярный транзистор - h-параметры

$$\Delta U_1 = h_{11}\Delta I_1 + h_{12}\Delta U_2;$$

$$\Delta I_2 = h_{21}\Delta I_1 + h_{22}\Delta U_2.$$

где для схемы с ОБ



$h_{11}$  – дифференциальное входное сопротивление (входное сопротивление при коротком замыкании на выходе)

$h_{12}$  – коэффициент обратной связи по напряжению (коэффициент обратной связи при холостом ходе во входной цепи)

$h_{21}$  – коэффициент усиления транзистора по току (коэффициент передачи тока при коротком замыкании на выходе)

$h_{22}$  – дифференциальная выходная проводимость (выходная проводимость при холостом ходе во входной цепи)

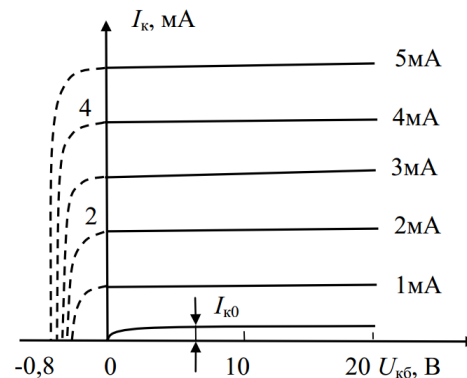
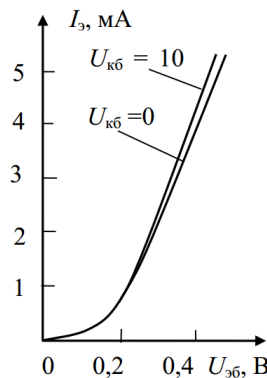
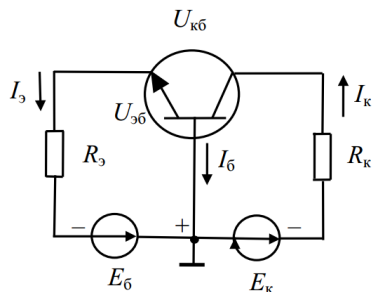
$$h_{11} = (\Delta U_{\text{бэ}} / \Delta I_{\text{б}}) | U_{\text{кэ}} = \text{const.}$$

$$h_{12} = (\Delta U_{\text{бэ}} / \Delta U_{\text{кэ}}) | I_{\text{б}} = \text{const.}$$

$$h_{21} = (\Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}}) | U_{\text{кэ}} = \text{const.}$$

$$h_{22} = (\Delta I_{\text{к}} / \Delta U_{\text{кэ}}) | I_{\text{б}} = \text{const.}$$

## Биполярный транзистор - $h$ -параметры



Для схемы включения биполярного транзистора с ОБ  $h$ -параметры определяются следующим образом:

$$h_{11(об)} = (\Delta U_{36} / \Delta I_3) | U_{кб} = \text{const};$$

$$h_{12(об)} = (\Delta U_{36} / \Delta U_{кб}) | I_3 = \text{const};$$

$$h_{21(об)} = (\Delta I_{к'} / \Delta I_3) | U_{кб} = \text{const};$$

$$h_{22(об)} = (\Delta I_{к'} / \Delta U_{кб}) | I_3 = \text{const}.$$



## Основные свойства схем включения



Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
$k_i$	Десятки – сотни	$< 1$	Десятки – сотни
$K_U$	Десятки – сотни	Десятки – сотни	$< 1$
$K_P$	Сотни–десятки тысяч	Десятки – сотни	Десятки – сотни
$R_{вх}$	Сотни ом – единицы килоом	Единицы – десятки ом	Десятки – сотни килоом
$R_{вых}$	единицы – десятки килоом	Сотни килоом – Единицы мегаом	Сотни ом – единицы килоом
Фазовый сдвиг между $U_{вх}$ и $U_{вых}$	$180^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$

## ***Частотные свойства биполярного транзистора***



Известно, что чем выше частота сигнала, поступающего на вход транзисторного каскада, тем меньше коэффициент усиления по току.

Основной вклад в снижение усилительных свойств несут:

- барьерная емкость
- отставание переменных токов коллектора от эмиттера на время, необходимое для диффузии носителей заряда в области базы
- емкости между корпусом и выводами транзистора пагубно влияют на усилительные свойства прибора.

Коллекторный переход транзистора обладает высоким сопротивлением. Повышение частоты приводит к снижению реактивной емкости коллекторного перехода, что приводит к его существенному шунтированию и ухудшению усилительных свойств каскада.

Чтобы повысить граничную частоту усиления транзистора, необходимо выполнить область базы как можно меньшей толщины, повысить скорость прохождения через нее неосновных носителей зарядов, уменьшить емкость корпуса и выводов транзистора и прочее.

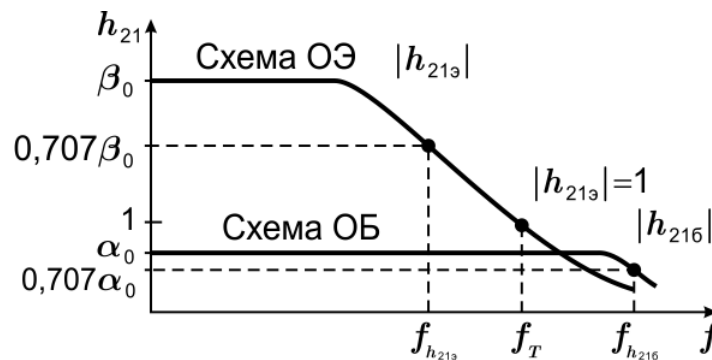
## Частотные свойства биполярного транзистора

Для характеристики частотных свойств в БТ используют понятия:

максимальной частоты генерации  $f_{\max}$ ,

предельной частоты  $f_{h21}$ ,

граничной частоты  $f_T$ .



Частоту  $f_{\max}$  определяют как наибольшую, на которой способен генерировать БТ в схеме автогенератора.

Заметим, что  $f_{\max}$  фактически инвариантна схеме включения БТ и поэтому широко используется для оценки его возможностей. Значение  $f_{\max}$  может достигать 10...20 ГГц, Используют же БТ на частотах в 1,5...2 раза ниже, где их усиление не менее 3...6 дБ.

Предельными называют частоты  $f_{h21э}$  (или  $f_{\beta}$ ) и  $f_{h21б}$  (или  $f_{\alpha}$ ), на которых модули коэффициентов передачи тока в схеме с общим эмиттером (ОЭ)  $h_{21э}$  и в схеме с общей базой (ОБ)  $h_{21б}$  уменьшаются в раз (на 3 дБ) по сравнению с их низкочастотными значениями.

## ***Температурные свойства биполярного транзистора***



Чтобы транзистор не вышел из строя, температура его кристалла должна быть меньше:

- для германиевого транзистора примерно 70 °С,
- для кремниевого транзистора – меньше 125 ... 150 °С,
- для арсенид-галлиевого транзистора – меньше 150 ... 200 °С.

Введение легирующих добавок несколько корректирует максимально допустимую температуру кристалла. Нагрев биполярных транзисторов вызывает увеличения проводимости области базы и обратного тока коллектора.

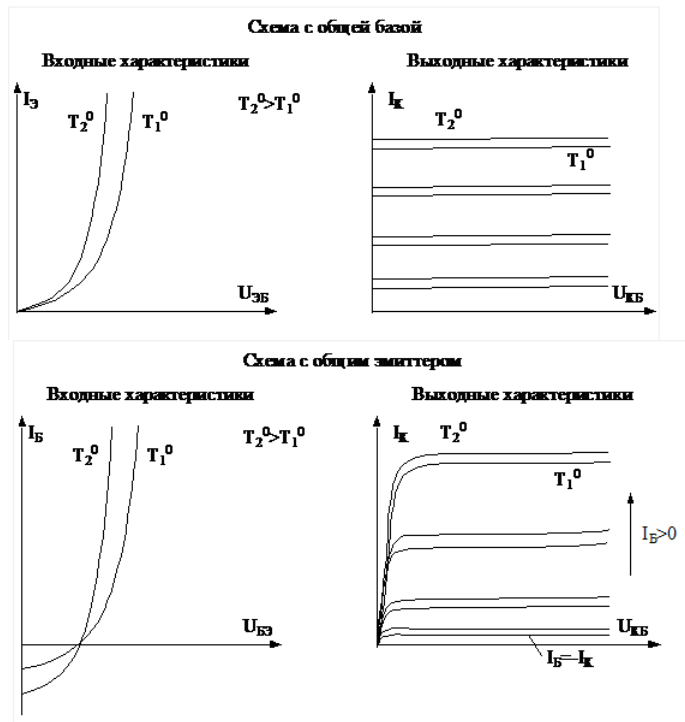
При повышении температуры корпуса транзистора от 20 °С до 60 °С обратный ток коллектора обычно может возрасти до шести раз.

Следовательно, изменения температуры оказывают очень существенное влияние на функционирование транзисторного каскада, вызывая значительные изменения режима его работы.

Чтобы изменения температуры не привели, допустим, к возникновению автогенерации каскада, предназначенного для усиления, или другим вредным последствиям, необходимо применять цепи термостабилизации режимов работы транзисторов.

## Температурные свойства биполярного транзистора

Графически влияние температуры на характеристики транзистора в схемах с общей базой и общим эмиттером показаны соответственно на рисунках:



## Контрольные вопросы



1. Что представляет собой биполярный транзистор?
2. По схеме включения транзистора объясните его принцип действия как управляемого прибора
3. Объясните процесс усиления электрических колебаний с помощью транзистора.
4. Какие возможны схемы включения транзистора и какими основными свойствами они отличаются.
5. Нарисуйте входные и выходные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером.
6. Что такое нагрузочная линия?
7. Для чего необходимо смещать транзистор?
8. Что такое рабочая точка? Какие факторы и условия ее смещают?
9. Назовите известные схемы смещения.
10. Перечислите первичные и  $h$ -параметры транзистора и покажите, как определяются коэффициенты усиления тока  $\alpha$  и  $\beta$  по характеристикам.

## ***Список использованных источников***



1. Дьюб Д. С. Электроника: схемы и анализ. – 2008.
2. Монк С., Шерц П. Электроника. Теория и практика.–4-е изд.: Пер. с англ //Санкт-Петербург: БХВ-Петербург. – 2018.
3. Гейтс Э. Д. Введение в электронику //Ростов-н/Д: Феникс. – 1998.

**Спасибо  
за внимание!**

**it**'s **MO** *re than a*  
**UNIVERSITY**

[Nikolay.A.Nikolaev@gmail.com](mailto:Nikolay.A.Nikolaev@gmail.com)