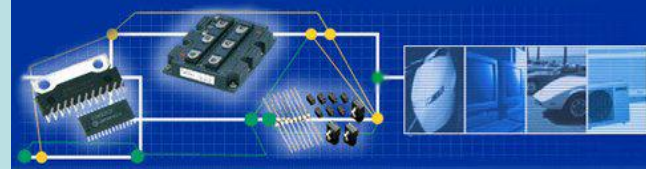


Твердотельная электроника

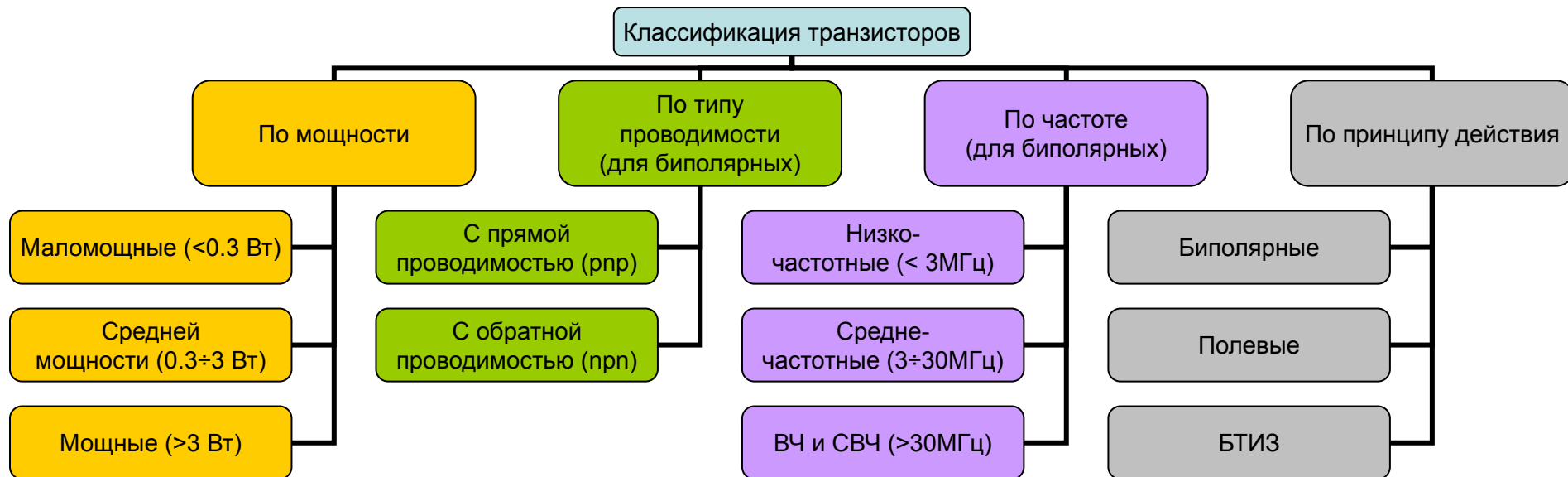
Лекция 3

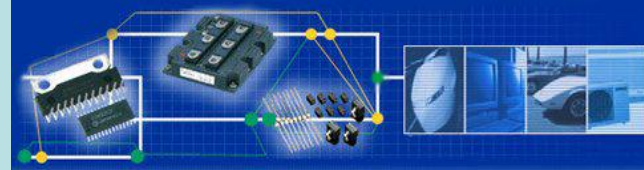


3. Биполярные транзисторы

3.1 Классификация и маркировка транзисторов

Транзистором называется полупроводниковый преобразовательный прибор, способный усиливать мощность.





МАРКИРОВКА:

Г	Т	-	313	А
К	П	-	103	Л
I	II	-	III	IV

I – материал полупроводника: Г или 1 – германий, К или 2 – кремний, А или 3 – арсенид галлия, И или 4 – соединения индия.

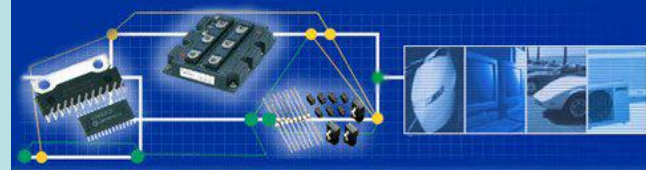
II – тип транзистора по принципу действия: Т – биполярные, П – полевые.

III – три или четыре цифры – группа транзисторов по электрическим параметрам. Первая цифра показывает частотные свойства и мощность транзистора в соответствии с ниже приведённой таблицей.

P \ f	<3 МГц НЧ	3 – 30 МГц СрЧ	>30 МГц ВЧ и СВЧ
ММ <0,3 Вт	1	2	3
СрМ 0,3÷3 Вт	4	5	6
М >3 Вт	7	8	9

Тип	Структура	$P_{K\max}$, мВт	$f_{гр}$, МГц	$U_{KЭ\max}$, В	$I_{K\max}$, мА	$h_{21Э}$	S_K , пФ	$g_{KЭ\text{нас}}$, Ом	g_b , Ом	3D мод. 1	3D мод. 2	3D мод. 3
КТ315А	п-р-п	150	250	25	100	30-120	≤ 7	≤ 20	≤ 40			
КТ315Б	п-р-п	150	250	20	100	50-350	≤ 7	≤ 20	≤ 40			
КТ315В	п-р-п	150	250	40	100	30-120	≤ 7	≤ 20	≤ 40			
КТ315Г	п-р-п	150	250	35	100	50-350	≤ 7	≤ 20	≤ 40			
КТ315Д	п-р-п	150	250	40	100	20-90	≤ 7	≤ 20	≤ 40			
КТ315Е	п-р-п	150	250	35	100	50-350	≤ 7	≤ 20	≤ 40			
КТ315Ж	п-р-п	100	250	15	100	30-250	≤ 7	≤ 20	≤ 40			
КТ315И	п-р-п	100	250	60	100	≥ 30	≤ 7	≤ 20	≤ 40			
КТ315Н	п-р-п	150	250	20	100	50-350	≤ 7	-	-			
КТ315Р	п-р-п	150	250	35	100	150-350	≤ 7	-	-			

IV – модификация транзистора в 3-й группе.



3.2 Устройство биполярных транзисторов

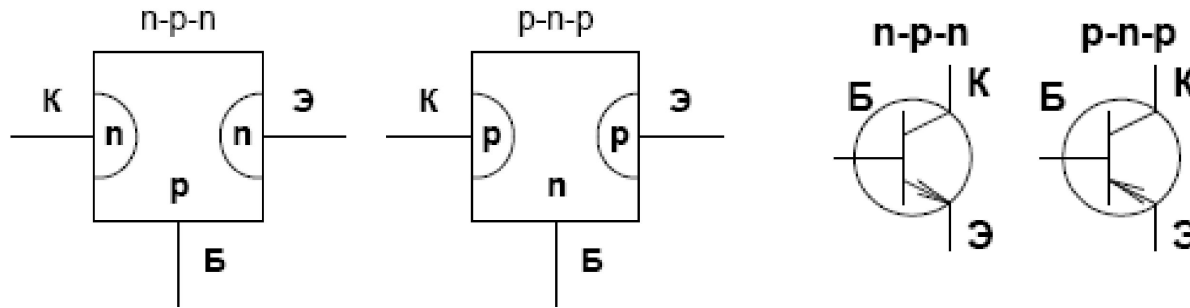


Рис. 1 Структура и условное графическое изображение биполярных транзисторов

Направление стрелки в транзисторе показывает направление протекающего тока.

Основной особенностью устройства биполярных транзисторов является неравномерность концентрации основных носителей зарядов в эмиттере, базе и коллекторе.

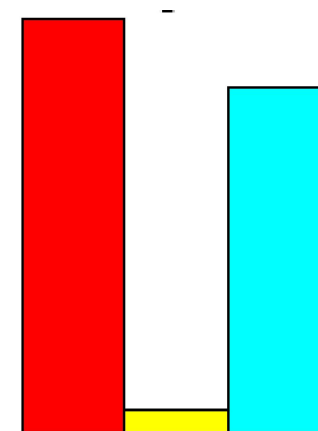
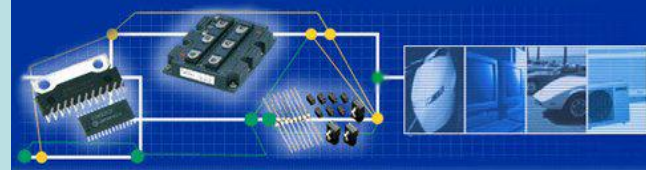


Рис. 2 Различие в концентрациях носителей заряда



3.3 Принцип действия биполярных транзисторов

При работе транзистора в усилительном режиме эмиттерный переход открыт, а коллекторный – закрыт. Это достигается соответствующим включением источников питания.

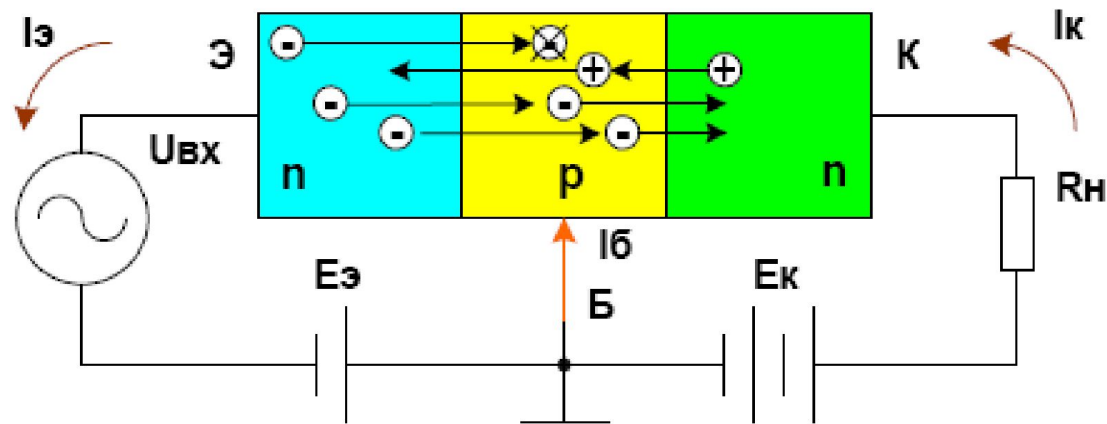


Рис.3 Движение основных носителей заряда в БТ

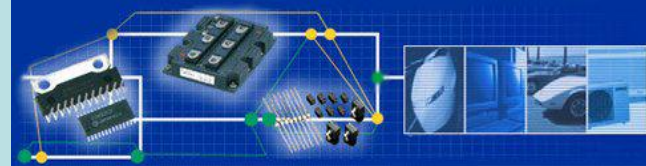
Эффективность эмиттера оценивается коэффициентом инжекции:

$$\gamma = \frac{I_{э.н}}{I_э} \quad (0.999);$$

$$I_э = I_{э.н} + I_{э.р}$$

Степень рекомбинации носителей зарядов в базе оценивается коэффициентом перехода носителей зарядов δ :

$$\delta = \frac{I_{к.н.}}{I_{э.н.}}$$



Инжекцией зарядов называется переход носителей зарядов из области, где они были основными в область, где они становятся неосновными.

Переход носителей зарядов из области, где они были не основными, в область, где они становятся основными, называется **экстракцией зарядов**.

Основное соотношение токов в транзисторе следующее:

$$I_{\varepsilon} = I_{\kappa} + I_{\sigma}$$

$$\delta \cdot \gamma = \frac{I_{\varepsilon.n.} \cdot I_{\kappa.n.}}{I_{\varepsilon} \cdot I_{\varepsilon.n.}} = \frac{I_{\kappa.n.}}{I_{\varepsilon}} = \alpha$$

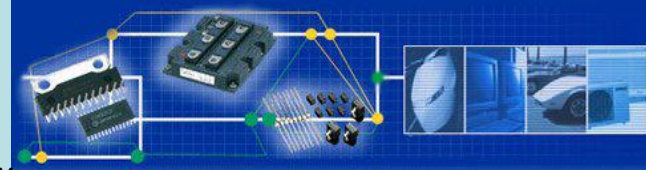
где α – коэффициент передачи тока транзистора или коэффициент усиления по току:

$$I_{\kappa} = \alpha \cdot I_{\varepsilon}$$

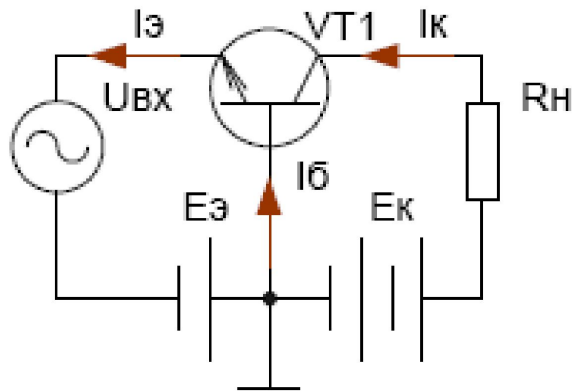
Дырки из коллектора как неосновные носители зарядов будут переходить в базу,

образуя обратный ток коллектора $I_{\kappa\sigma}$:

$$I_{\kappa} = \alpha \cdot I_{\kappa} + I_{\kappa\sigma}$$



3.4 Схема включения БТ с общей базой



$$I_{вх} = I_{э}$$

$$I_{вых} = I_{к}$$

$$U_{вх} = U_{бэ}$$

$$U_{вых} = U_{бк}$$

Рис.4 Схема включения БТ с общей базой

Показатели схемы с ОБ:

- коэффициент усиления по току $I_{вых}/I_{вх} = I_{к}/I_{э} = \alpha$ [$\alpha < 1$]
- входное сопротивление $R_{вхб} = U_{вх}/I_{вх} = U_{бэ}/I_{э}$.

Входное сопротивление для схемы с общей базой (рисунок 4) мало и составляет десятки Ом, так как входная цепь транзистора при этом представляет собой открытый эмиттерный переход транзистора.

Недостатки схемы с общей базой:

- схема не усиливает ток $\alpha < 1$
- малое входное сопротивление
- два разнополярных источника напряжения для питания.

Достоинства – хорошие температурные и частотные свойства.

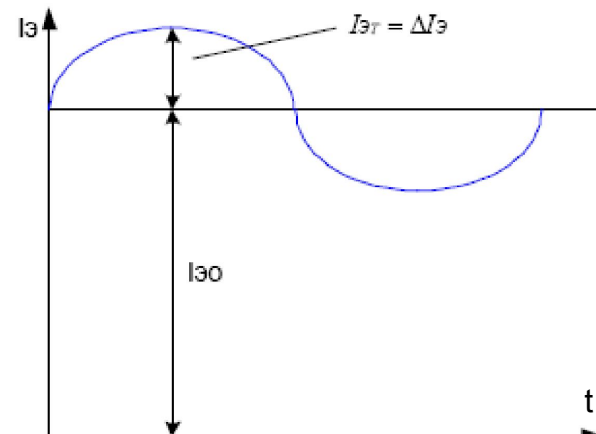
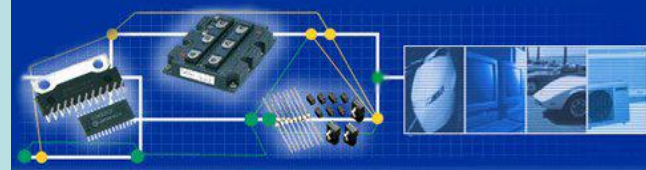


Рис. 5 Постоянная и переменная составляющие эмиттерного тока



3.5 Схема включения БТ с общим эмиттером

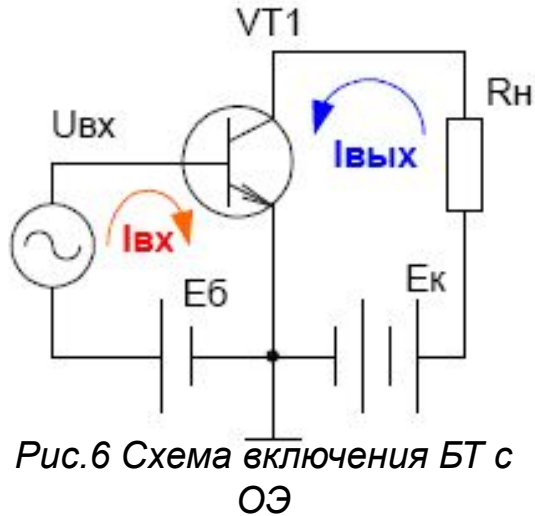


Рис.6 Схема включения БТ с ОЭ

$$I_{вх} = I_{б}$$

$$I_{вых} = I_{к}$$

$$U_{вх} = U_{бэ}$$

$$U_{вых} = U_{кэ}$$

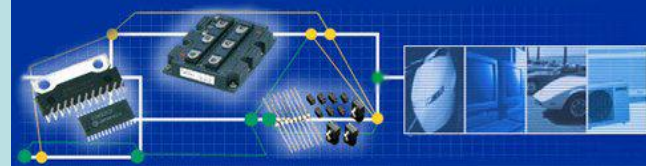
$$\beta = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{I_{к}}{I_{б}} \quad (n : 10 \div 100)$$

$$R_{M_{\text{ОЭ}}} = n \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \frac{U_{бэ}}{I_{б}} \quad [\quad] \quad (: 100 \div 1000)$$

Достоинства схемы с общим эмиттером:

- большой коэффициент усиления по току
- большее, чем у схемы с общей базой, входное сопротивление
- для питания схемы требуются два однополярных источника, что позволяет на практике обходиться одним источником питания.

Недостатки: худшие, чем у схемы с общей базой, температурные и частотные свойства. Однако за счёт преимуществ схема с ОЭ применяется наиболее часто.



3.6 Схема включения БТ с общим коллектором (эмиттерный повторитель)

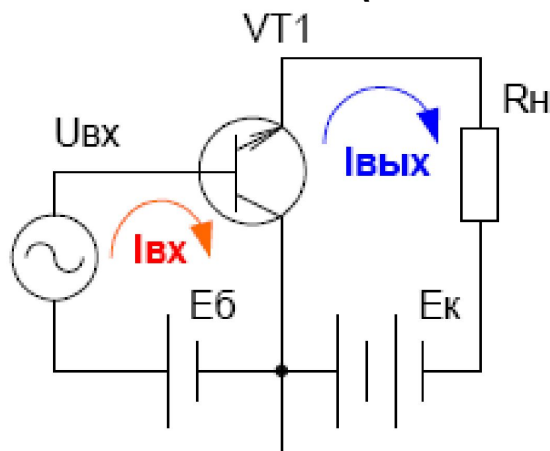


Рис.7 Схема включения БТ с ОК

$$I_{вх} = I_{б}$$

$$I_{вых} = I_{э}$$

$$U_{вх} = U_{бк}$$

$$U_{вых} = U_{кэ}$$

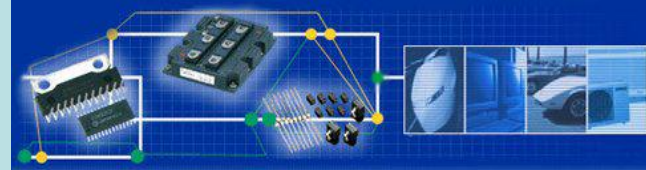
$$\frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{I_{э}}{I_{б}} = \frac{(I_{к} + I_{б})}{I_{б}} = \beta + 1 = n$$

$$n = 10 \dots 100$$

$$R_{вх} \approx \frac{U_{бк}}{I_{б}} = n(10 \dots 100)$$

Так как входная цепь представляет собой закрытый коллекторный переход, входное сопротивление каскада по схеме ОК составляет десятки килоом, что является важным **достоинством** схемы. Выходное сопротивление схемы с ОК, наоборот, получается сравнительно небольшим, обычно единицы килоом или сотни Ом. Эти **достоинства** схемы с ОК побуждают использовать её для согласования различных устройств по входному сопротивлению.

Недостатком схемы является то, что она не усиливает напряжение – коэффициент усиления чуть меньше 1.



3.7 Усилительные свойства БТ

Независимо от схемы включения, транзистор характеризуется тремя коэффициентами усиления:

$$K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}$$

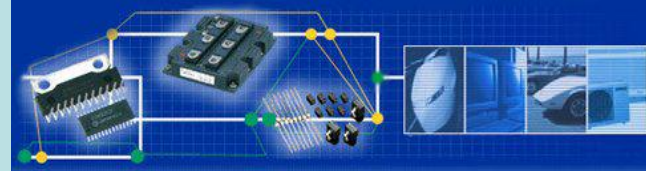
– по
току;

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{(I_{вых} R_H)}{(I_{вх} R_{вх})} = K_I \cdot \frac{R_H}{R_{вх}}$$

– по
напряжению;

$$K_P = \frac{P_{вых}}{P_{вх}} = \frac{(U_{вых} \cdot I_{вых})}{(U_{вх} \cdot I_{вх})} = \frac{K_I^2 \cdot R_H}{R_{вх}}$$

– по
мощности.



Для схемы с ОБ:

$$K_I = \frac{I_{\kappa}}{I_{\vartheta}} = \alpha (\alpha < 1)$$

$$K_U = \alpha \cdot \left(\frac{R_H}{R_{\text{ex}}} \right)$$

$$R_H \approx n \cdot 1$$

$$R_{\text{ex}} \approx n \cdot 10 \Omega$$

$$K_P = K_U \cdot K_I$$

Для схемы с ОК:

$$K_I = \frac{I_{\vartheta}}{I_{\delta}} = \beta + 1$$

$$K_U = \beta \cdot \left(\frac{R_H}{R_{\text{ex}}} \right) \approx 1$$

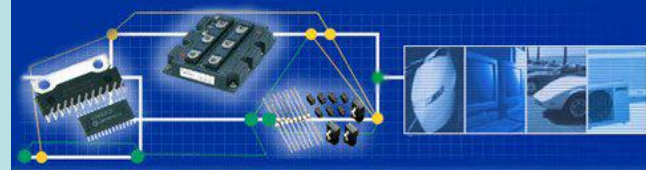
$$K_P = (\beta + 1)^2$$

Для схемы с ОЭ:

$$K_I = \frac{I_{\kappa}}{I_{\delta}} = \beta = n(10 \div 100)$$

$$K_U = \beta \cdot \left(\frac{R_H}{R_{\text{ex}}} \right)$$

$$K_P = K_I \cdot K_U = n \cdot (1000 \div 10000)$$



3.7 Статические характеристики БТ

Статические характеристики транзисторов бывают двух видов: входные и выходные.

- 1) Входная характеристика. **$I_{вх} = f(U_{вх})$ при $U_{вых} = const$**
 Входная характеристика – это зависимость входного тока от входного напряжения при постоянном выходном напряжении.
- 2) Выходная характеристика. **$I_{вых} = f(U_{вых})$ при $I_{вх} = const$**
 Выходная характеристика – это зависимость выходного тока от выходного напряжения при постоянном входном токе.

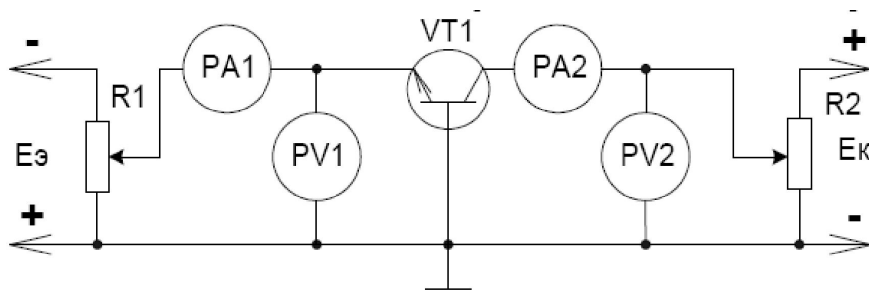


Рис.8 Схема измерения статических характеристик каскада с ОБ

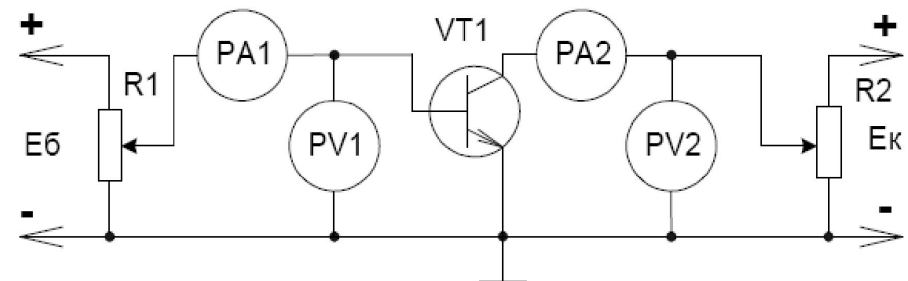


Рис.9 Схема измерения статических характеристик каскада с ОЭ

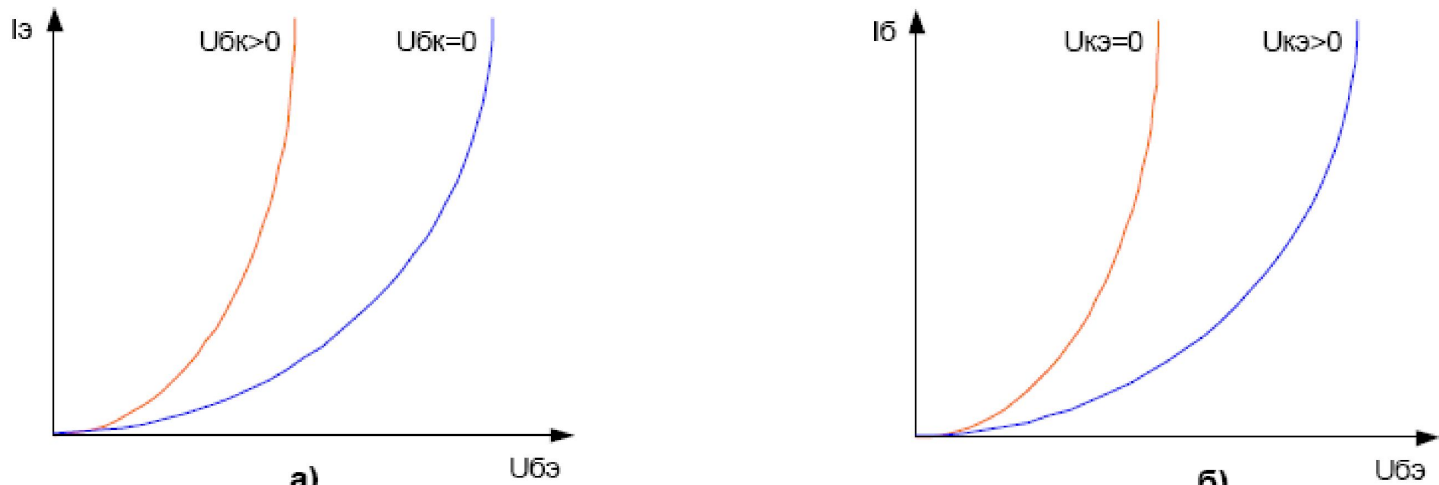
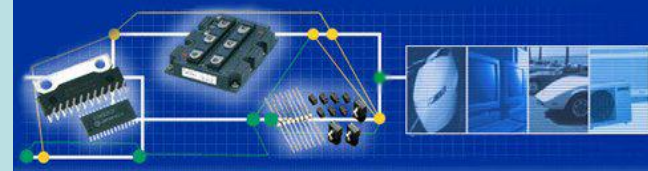


Рис.10 Входные характеристики для схемы с ОБ (а) и схемы с ОЭ (б)

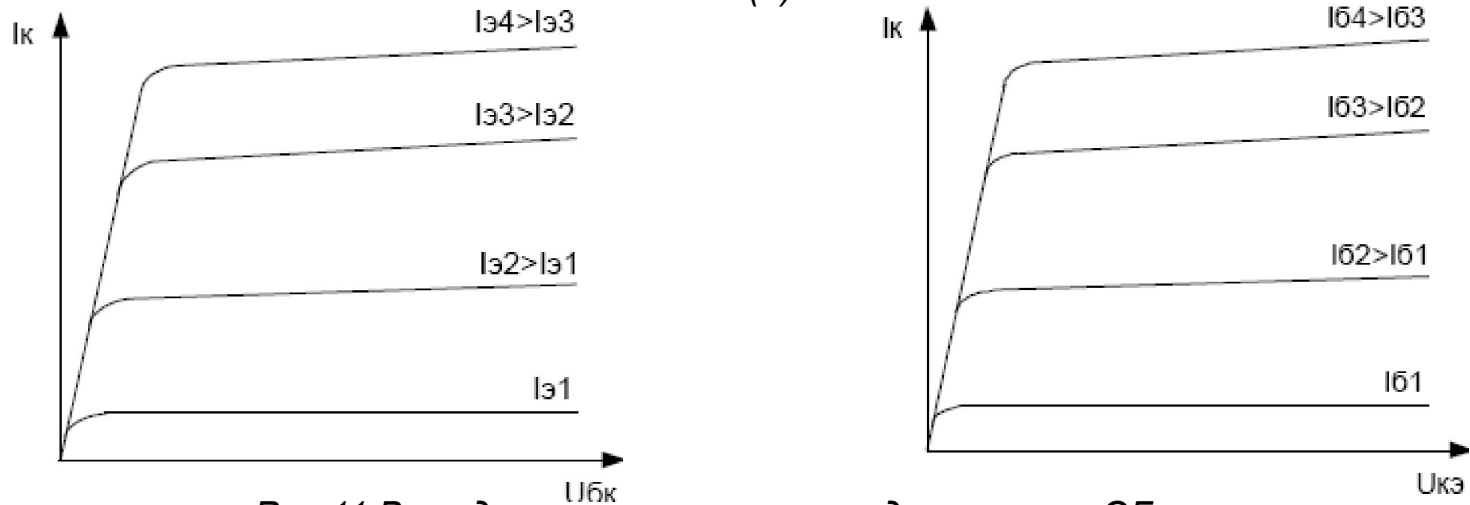
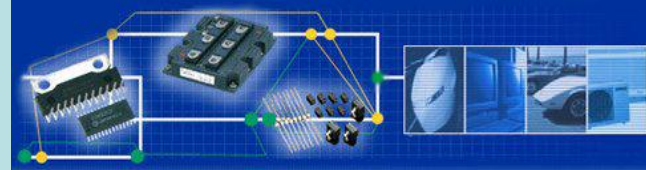
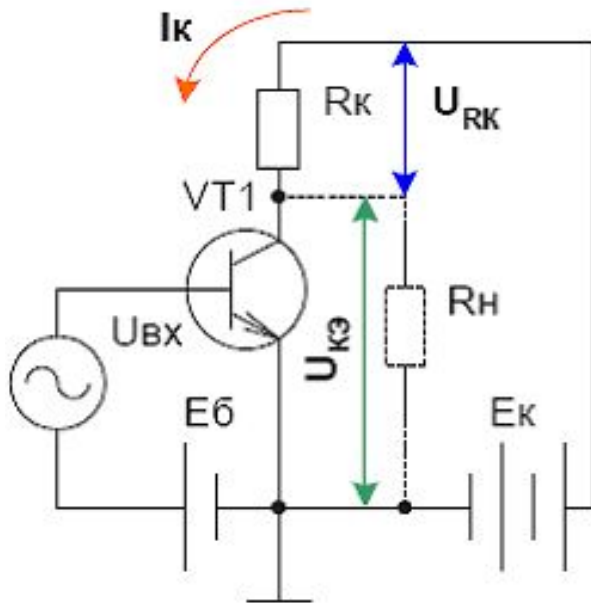


Рис.11 Выходные характеристики для схемы с ОБ и схемы с ОЭ



3.7 Динамический режим работы БТ

Динамическим режимом работы транзистора называется такой режим, при котором в выходной цепи стоит нагрузочный резистор, за счёт которого изменение входного тока или напряжения будет вызывать изменение выходного напряжения.



$$E_k = U_{R_k} + U_{кэ}$$

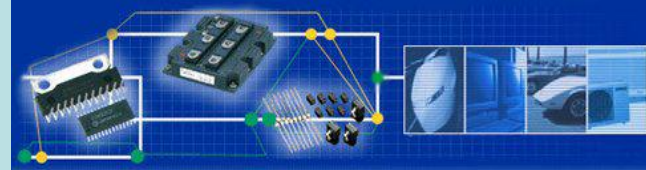
$$U_R = I_k \cdot R_k$$

$$E_k = U_{кэ} + I_k \cdot R_k$$

$$U_{кэ} = E_k - I_k \cdot R_k$$

– уравнение динамического режима работы БТ

Рис.12 БТ, включённый по схеме с ОЭ



3.8 *Динамические характеристики и понятие рабочей точки*

Уравнение динамического режима является уравнением выходной динамической характеристики. Так как это уравнение линейное, выходная динамическая характеристика представляет собой прямую линию и строится на выходных статических характеристиках.

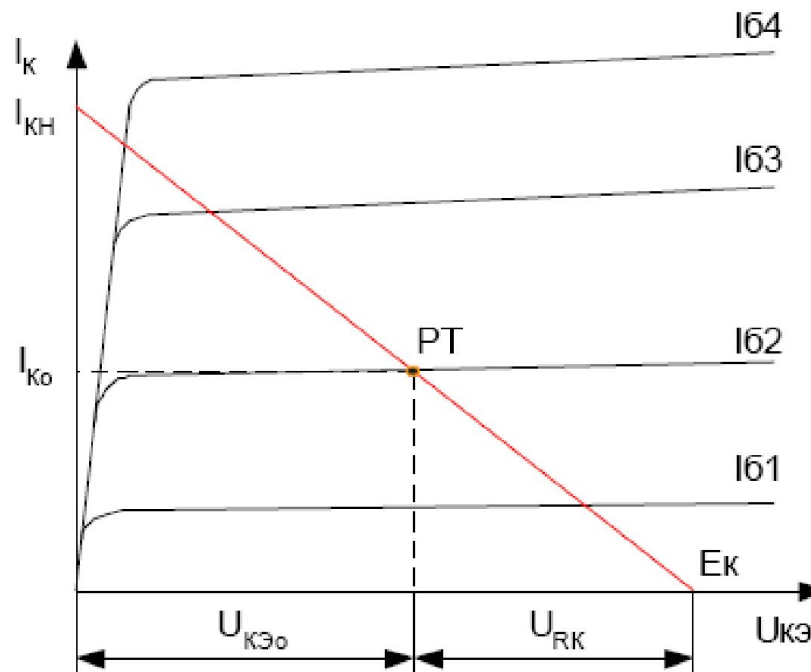
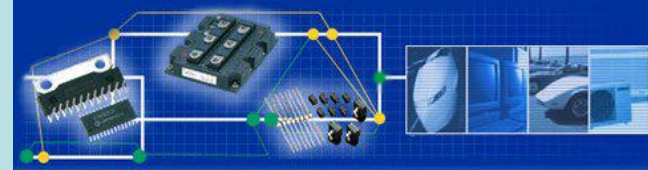


Рис.13 Выходные статические характеристики и нагрузочная прямая



3.9 Режимы работы транзистора

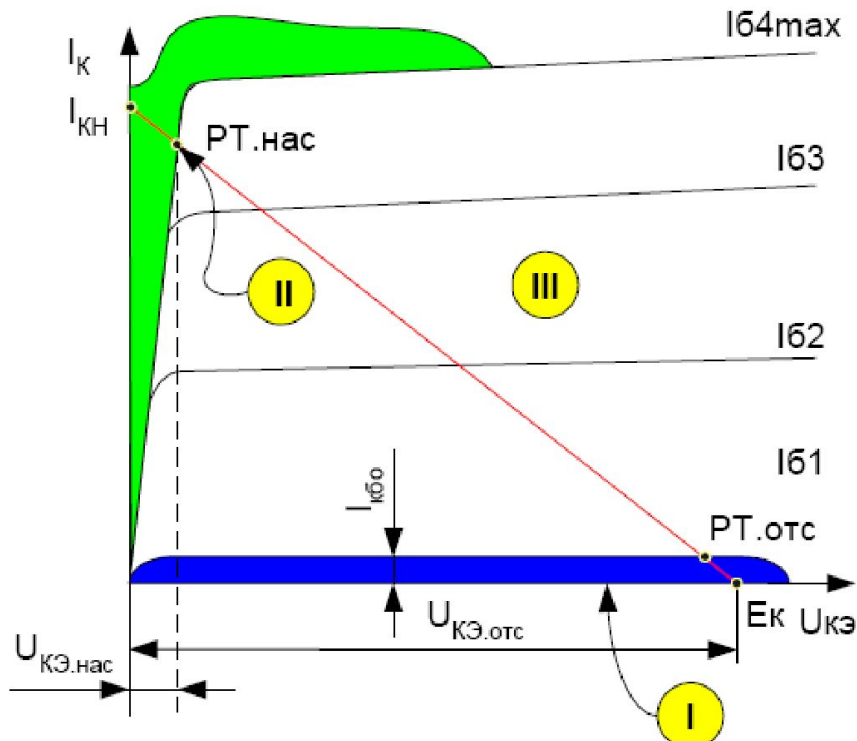


Рис. 14 Режимы работы биполярного транзистора

I) **Режим отсечки** – это режим, при котором оба его перехода закрыты (и эмиттерный и коллекторный). Ток базы в этом случае равен нулю. Ток коллектора будет равен обратному току. Уравнение динамического режима будет иметь вид: $U_{кэ} = E_к - I_{кбо} \cdot R_к$. Произведение $I_{кбо} \cdot R_к$ будет равно нулю. Значит, $U_{кэ} \rightarrow E_к$.

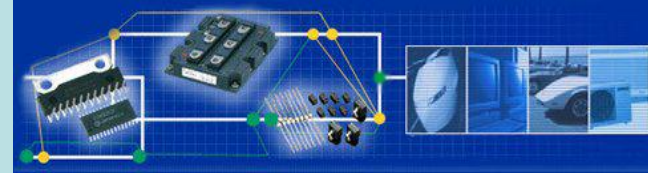
II) **Режим насыщения** – это режим, когда оба перехода – и эмиттерный, и коллекторный открыты, в транзисторе происходит свободный переход носителей зарядов, ток базы будет максимальный, ток коллектора будет равен току коллектора насыщения. $I_{б} = \max, I_к \approx I_{кн}, U_{кэ} = E_к - I_{кн} \cdot R_к$. Произведение $I_{кн} \cdot R_к$ будет стремиться к $E_к$. Значит, $U_{кэ} \rightarrow 0$.

III) **Линейный режим** – это режим, при котором эмиттерный переход открыт, а коллекторный закрыт.

$$I_{б\max} > I_{б} > 0$$

$$I_{кн} > I_к > I_{кбо}$$

$$E_к > U_{кэ} > U_{кэ.нас}$$



3.10 Ключевой режим работы транзистора

Ключевым режимом работы транзистора называется такой режим, при котором рабочая точка транзистора скачкообразно переходит из режима отсечки в режим насыщения и наоборот, минуя линейный режим.

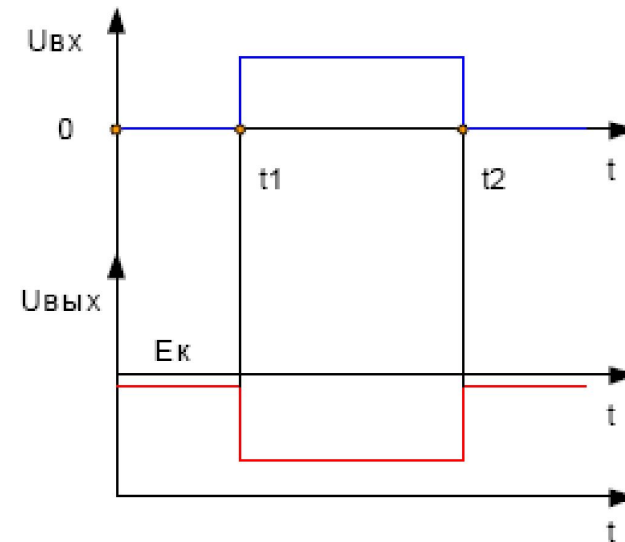
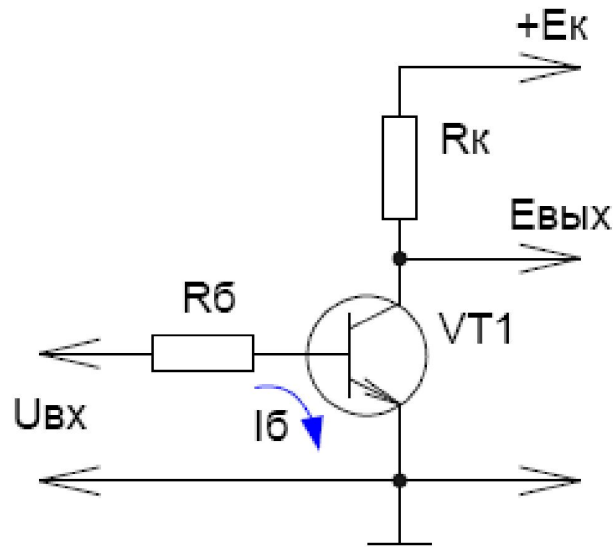
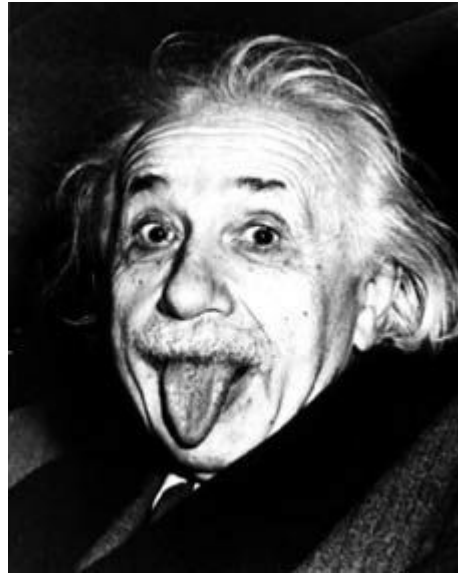
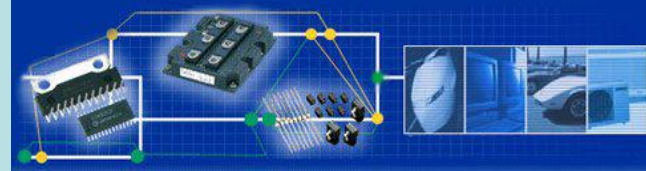


Рис.15 Временные диаграммы входного и выходного напряжения в ключевом режиме работы БТ



*That's all
folks...*