

*БИПОЛЯРНЫЕ*

*ТРАНЗИСТОРЫ (БТ)*

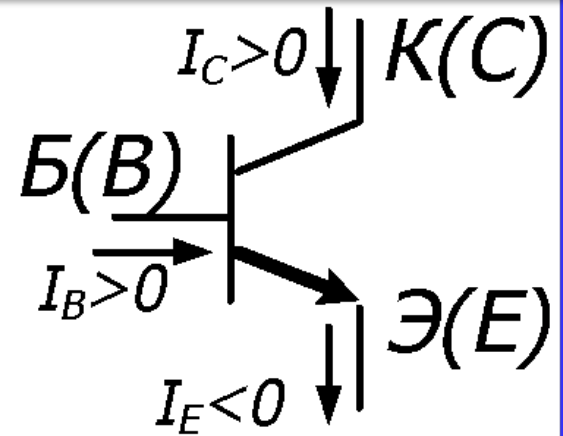
*BJT (Bipolar Junction Transistor)*

*Принципы работы.*

# 1. Структура и УГО транзистора. Направление токов.

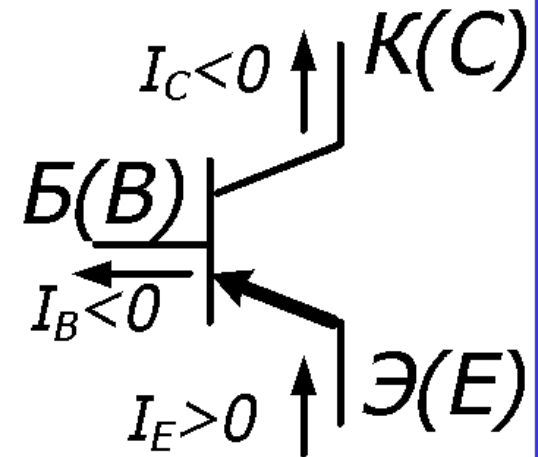
*npr* - транзистор

$n^{++}$	$p$	$n^+$
эмиттер (emitter)	база (base)	коллектор (collector)



*pnр* - транзистор

$p^{++}$	$n$	$p^+$
эмиттер (emitter)	база (base)	коллектор (collector)



$n^+ - p$ :  $n_n > p_p$  хотя бы на порядок  
 $n^{++} - p$ :  $n_n > p_p$  не менее чем на 2-3 порядка

Стрелка в УГО показывает, куда из эмиттера направлен ток.  
Ток базы "переползает" в эмиттер (*npr*) и наоборот (*pnр*)

Транзистор имеет три ПП-области с внешними выводами:

- **эмиттер** (Э, E) – с наибольшей концентрацией атомов примеси  $N_E \gg N_B$ ; из него происходит инжекция (эмиссия) носителей в базу,
- **база** (Б, B) – с наименьшей концентрацией атомов примеси  $N_B$ ; по ней происходит диффузия носителей, инжектированных из эмиттера до области коллектора,
- **коллектор** (К, C) – концентрация атомов примеси  $N_I < N_C < N_E$ ; он собирает носители, пришедшие в процессе диффузии от эмиттера через базу

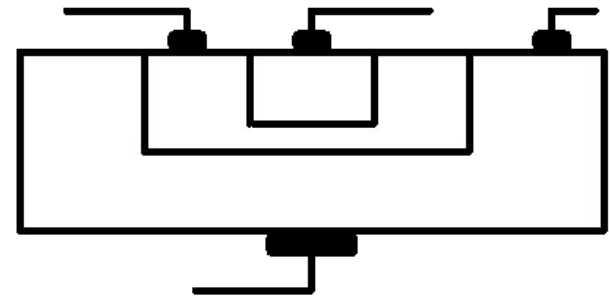
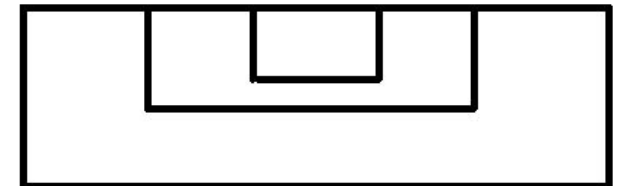
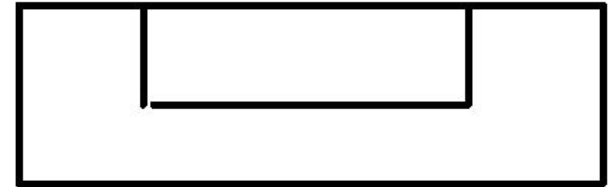
Транзистор – это **две** структуры с рп-переходами:

**эмиттер-база** и **коллектор-база**, причем, область базы – общая для обеих структур.

Транзистор с указанной структурой называется **БИПОЛЯРНЫМ**  
далее **БТ**

(причина названия – в процессе анализа работы)

# 3. Этапы изготовления транзистора типа **npn** (условно)



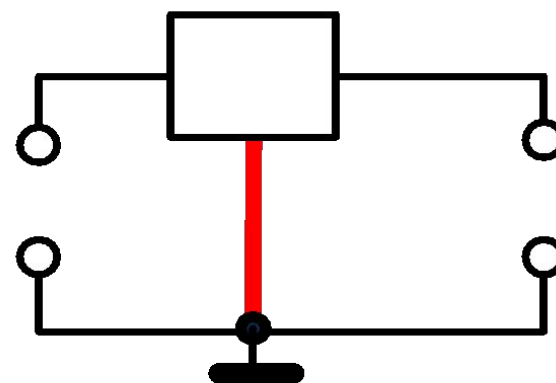
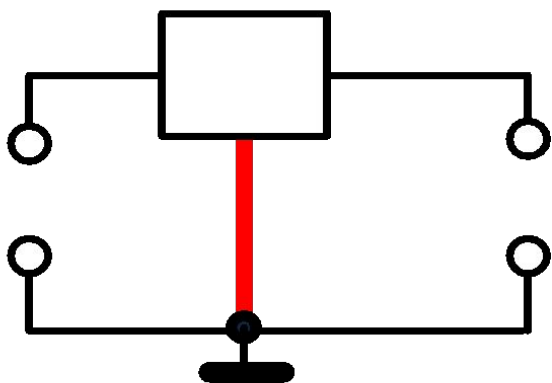
*Схемы включения БТ и  
режимы работы.*

4.

## Схемы включения БТ

БТ – это ППП, имеющий **три** электрода (вывода):  
**Э**миттер, **Б**аза, **К**оллектор

Схема включения определяется ориентацией электродов (выводов)  
относительно понятий "**ВХОД**" и "**ВЫХОД**"



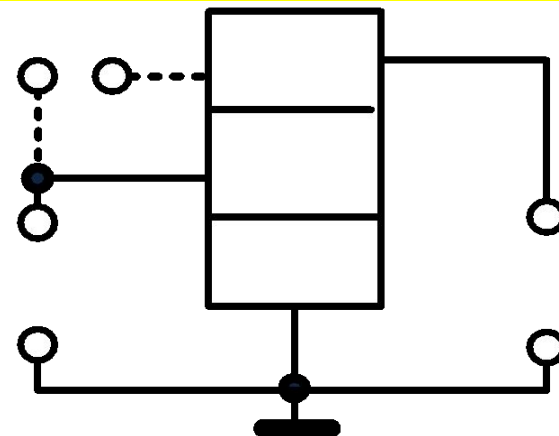
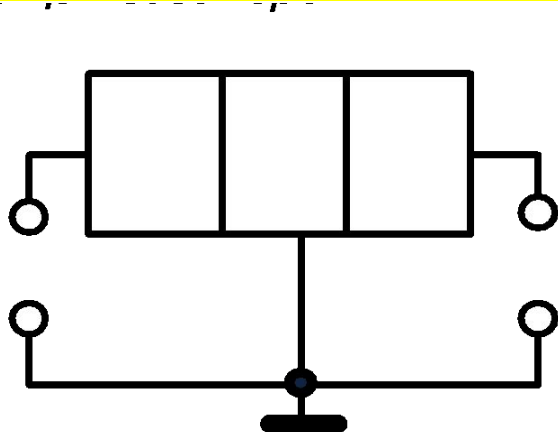
Понятие "**схема включения**" не зависит от типа транзистора **npn/рnp**;  
поэтому на рисунке нет конкретного УГО.

Пока (!!!) **общим** называется вывод присутствующий на входе и выходе,  
подключенный к точке с потенциалом **0В** ("**Земля**")

В курсе "Электроника" рассматриваются только схемы с **ОБ** и **ОЭ**.

БТ - это две взаимодействующие структуры с рп-переходами Э-Б (Е-В) и К-Б (С-В)

Режим работы определяется **совокупностью** состояний рп-переходов: "открыт – прямое напряжение" – "закрыт – обратное напряжение"



**!!!** В схеме с ОЭ внешним является напряжение  $U_{CE}$ , но режим определяется напряжением на рп-переходе  $U_{CB} = U_{CE} - U_{BE}$

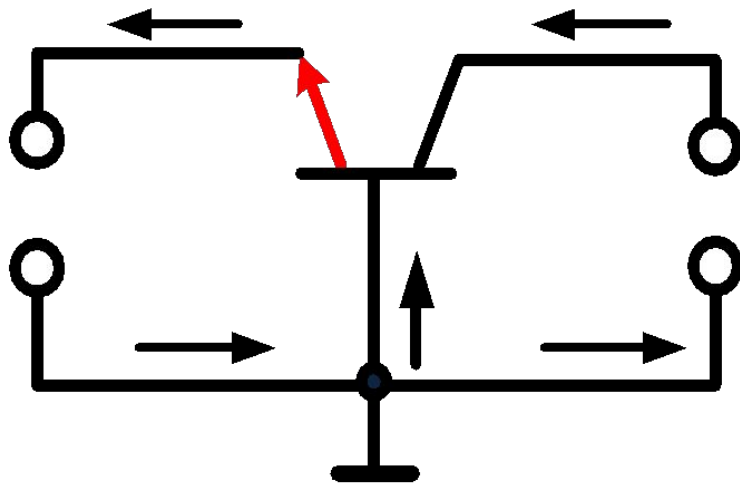
Конкретный знак напряжений на рп-переходах (но не их состояние!) определяется **типом БТ** – **npn** или **pnp** и схемой включения ОБ или ОЭ.

Понятие "**режим**" определяется только состоянием рп-переходов, т.е. не зависит от типа БТ и схемы включения

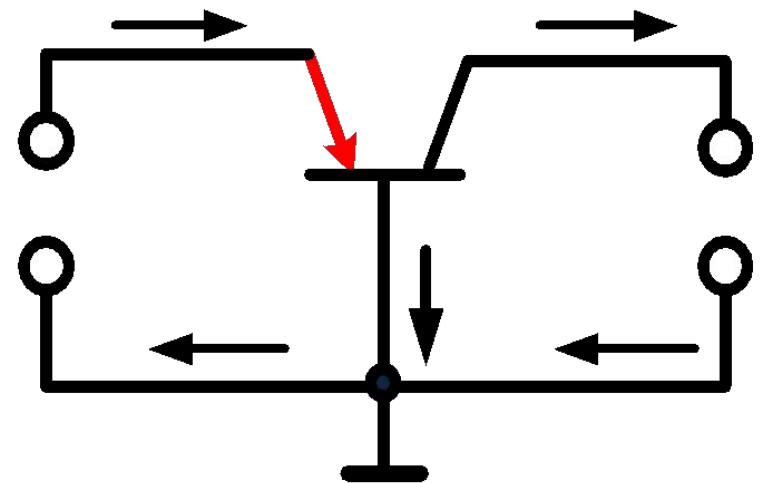
## 6. Соответствия в схемах для различных типов транзисторов.

Принцип работы, свойства и характеристики БТ  
объясняются для **npn – типа**.

Чтобы на схеме перейти к аналогичному состоянию на схеме с БТ  
для **pnp – типа**, нужно изменить  
полярности напряжений и направления токов.



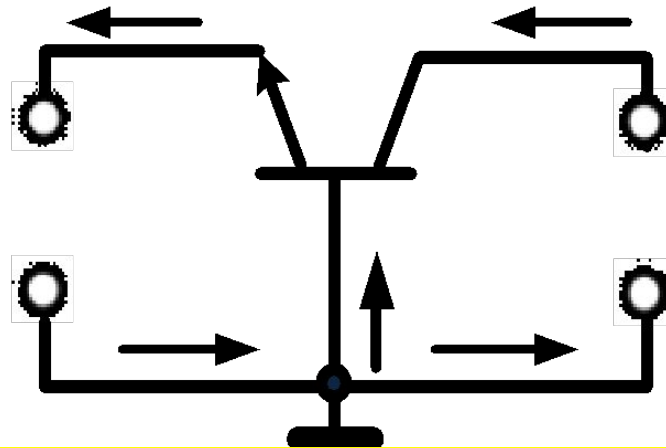
Режим БТ-npn,  
соответствующий состояниям:  
Э-Б открыт, К-Б закрыт



Аналогичный режим БТ-pnp,  
соответствующий состояниям:  
Э-Б открыт, К-Б закрыт



*Принцип работы БТ на  
примере **npn**-транзистора  
в схеме с **ОБ**.*



По закону Кирхгофа для узла **0**:  $I_E = I_C + I_B$

### Главные особенности АР:

- значение входного тока  $I_E$  сильно зависит от значения входного напряжения  $U_{EB}$ .  $I_E(U_{EB})$  – это прямая ветвь ВАХ,
- изменение выходного тока  $I_C$  повторяет закон изменения входного тока  $I_E$ ; в схеме с ОБ вообще  $I_C \approx I_E$ .
- значение выходного тока  $I_C$  практически не зависит от значения напряжения  $U_{CB}$ .

## 8. Динамика носителей в БТ (то же самое, что у диодов).

### 1. Образование и исчезновения носителей

генерация: атом  $Si \rightarrow$  электрон + дырка (в БТ почти не влияет)

рекомбинация: электрон + дырка  $\rightarrow$  атом  $Si$

### 2. Переход между областями ПП с различным типом проводимости

А. Инжекция – переход носителей через прямо включенный рп-переход Э-Б под влиянием grad концентрации между Э и Б

**!!!** После перехода **ОН** из Э в Б они для Б становятся **НОН**

В. Экстракция – выход носителей из области под влиянием электрического поля; восстановление электронейтральности:

- через обратно включенный рп-переход К-Б,
- из любой области во внешнюю цепь

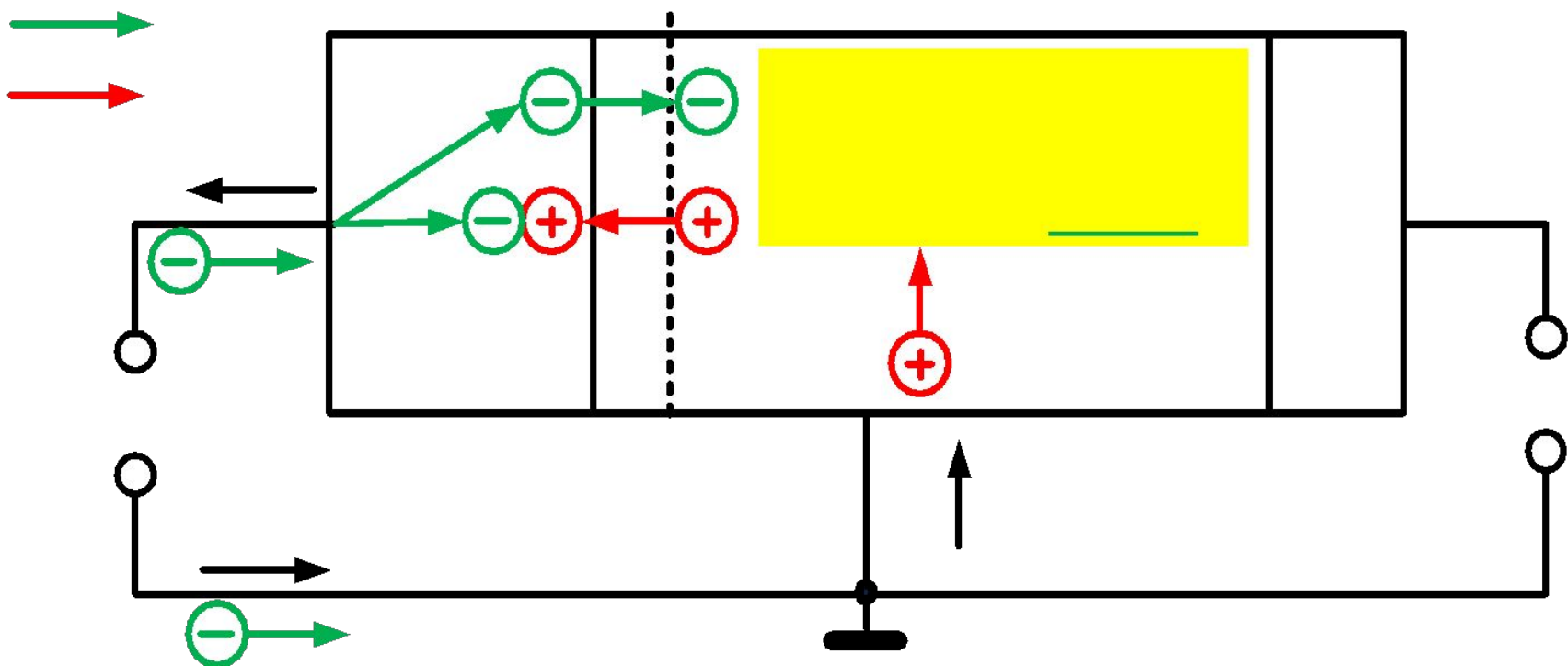
### 3. Движение по области

А. Диффузия – движение носителей по базе после инжекции под влиянием grad концентрации в базе Э  $\rightarrow$  К (только НОН!)

В. Дрейф – движение основных носителей под влиянием электрического поля (только ОН!)

## 9. Движение носителей в БТ-ОБ; АР – инжекция в базу

**Инжекция** через открытый рп-переход Э-Б.



1 – **инжекция** электронов – ток инжекции  $I_{E(n)}$

2 – **инжекция** дырок – ток инжекции  $I_{E(p)}$

3 – часть  $I_E$ , равная электронной части тока инжекции

4 – часть  $I_E$ , равная дырочной части тока инжекции

5а=2 – часть  $I_B$ , равная дырочной части тока инжекции

10. Почему в базе p-типа происходит диффузия электронов?

Равновесная концентрация носителей в базе p-типа в  $[cm^{-3}]$ :

$$p_p \cdot n_p = n_i^2 \approx 10^{20}$$

Дырки – ОН, электроны – НОН.

$p_p \approx N_A$  – определяется исходными свойствами.

Например:  $p_p \approx N_A = 10^{16}$ , тогда  $n_p \approx 10^4$  (очень малая!)

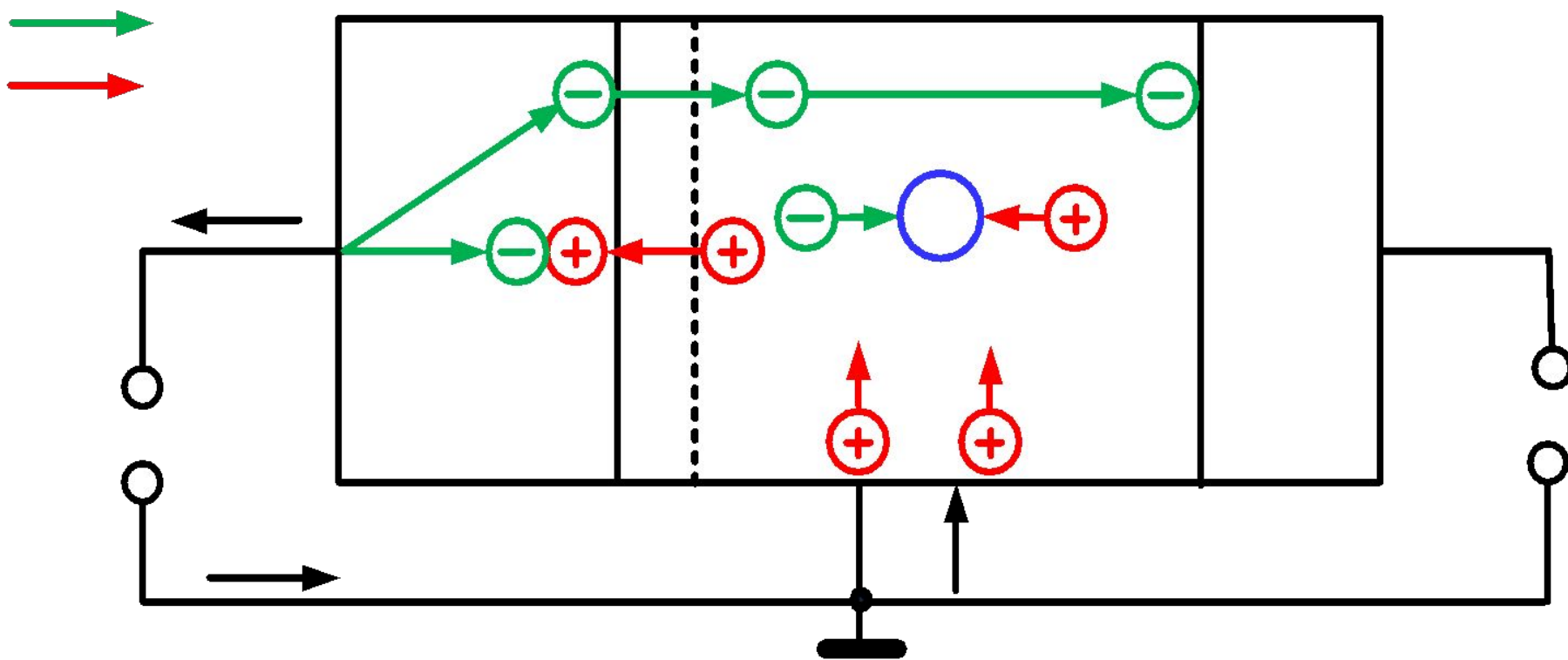
Неравновесная концентрация электронов, инжектируемых в базу из эмиттера, очень мала:

и по сравнению с  $n_n \approx N_D$  в эмиттере (например  $N_D = 10^{18}$ ),  
и по сравнению с  $p_p \approx N_A$  в базе.

Но она очень велика по сравнению с исходной равновесной концентрацией НОН-электронов в базе.

Поэтому, возникает градиент и начинается диффузия по базе.

**Диффузия неравновесных НОН и рекомбинация в базе.**



6 – диффузия НОН-электронов по базе под действием **Grad(n)**

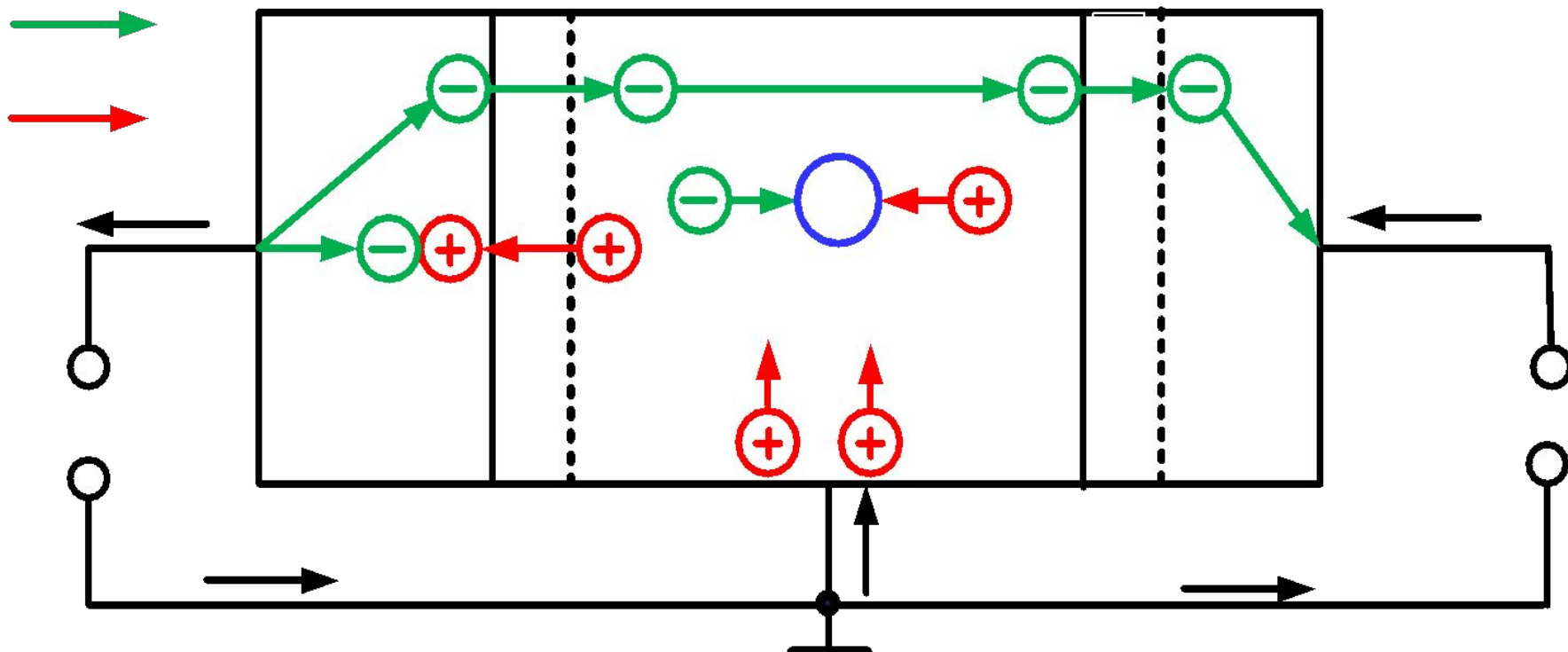
7 – рекомбинация электронов и дырок - потеря ОН-дырок

5a=2 – часть тока базы, равная дырочной части тока инжекции

5b=7 – часть тока базы, равная току рекомбинации

12. Движение носителей в транзисторе; AP – экстракция в коллектор

Экстракция происходит через закрытый(!!!) pn-переход К-Б.



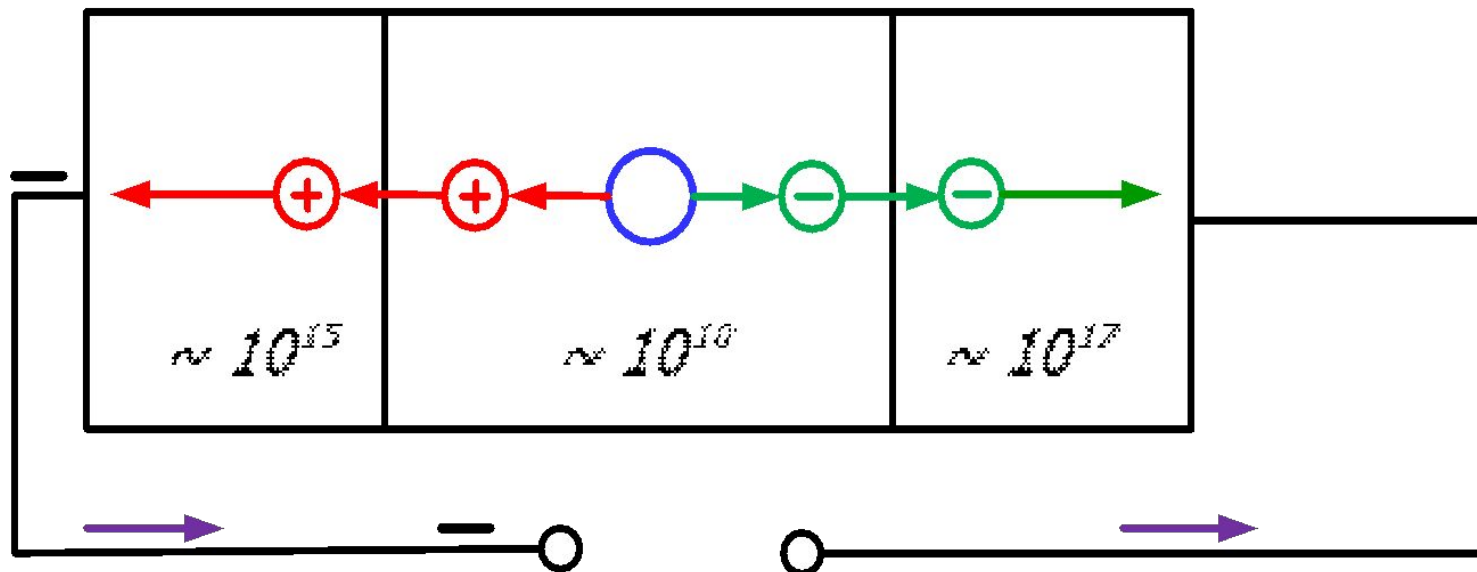
3=(8–9)– экстракция электронов из базы через pn-переход

!!! Все НОН, прошедшие через Б, извлекаются в К

9 – дрейф электронов через коллектор во внешнюю цепь

! Токи во внешних цепях (проводниках) создаются **только электронами**

### 13. Прохождение тока через закрытый pn-переход в диоде



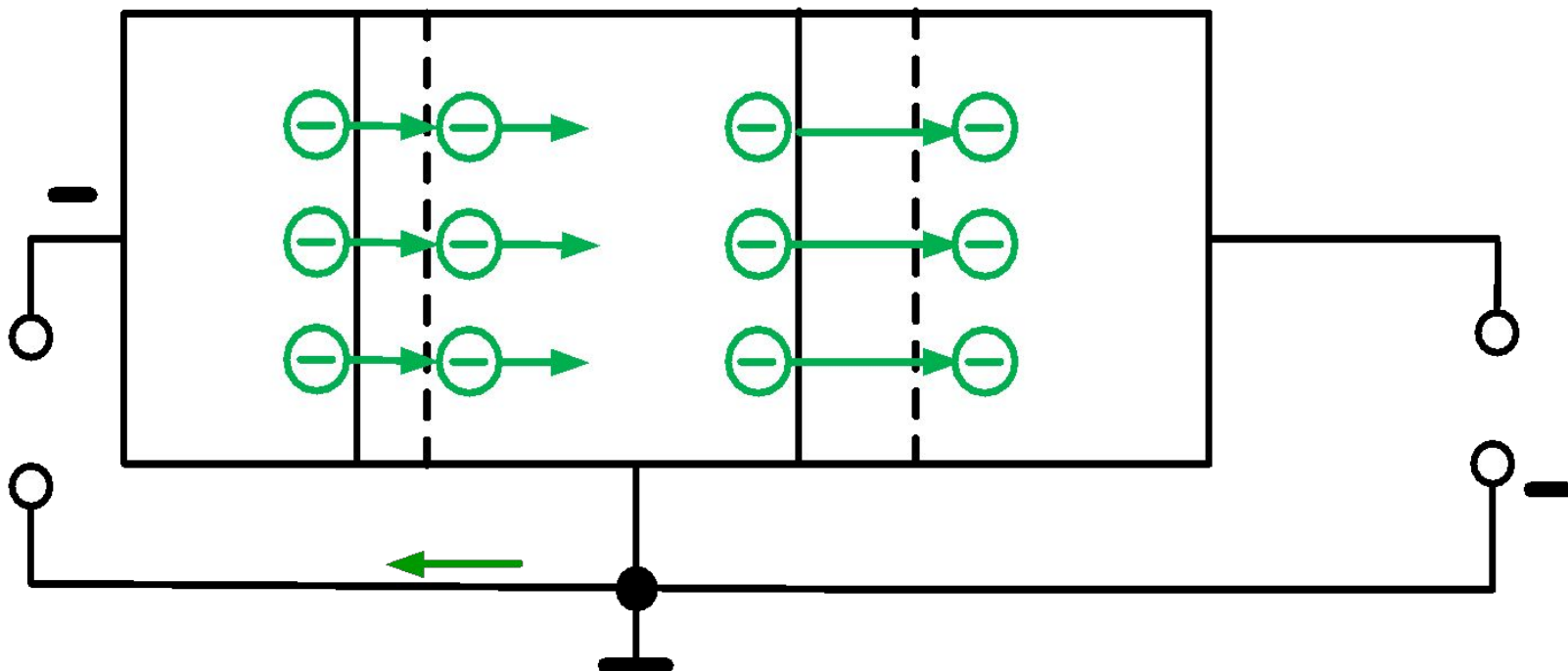
При обратном включении диода внешнее поле может переносить через pn-переход только электроны из **p** в **n** или дырки из **n** в **p**, а их там НЕТ

Это поле может только обеспечить экстракцию носителей из pn-перехода, которые образованы генерацией (их очень мало!).

После экстракции внешнее поле обеспечивает дрейф основных носителей по "своим" областям.



## 14. Прохождение тока через закрытый рп-переход К-Б в БТ



При обратном включении рп-перехода в БТ внешнее поле опять может переносить электроны из р-базы в п-коллектор. Но теперь на границу Б-К подходят почти все электроны, инжектированные из эмиттера. **В р-области есть электроны**

Этих носителей может быть уже достаточно много – ток на прямой ветви ВАХ рп-перехода Б-Э.

## 15. Баланс заряда в эмиттере **npr**-БТ.

Ток эмиттера **в ПП** образуется двумя типами носителей:

1) инжекция электронов из эмиттера (уход) в базу  $I_{E(n)}$

2) инжекция дырок из базы (приход) в эмиттер  $I_{E(p)}$

**!!!** приход дырки для изменения заряда – это то же самое, что уход электрона (реально, вообще то же самое!)

Уход электронов компенсируется их приходом из внешней цепи, поэтому в БТ типа **npr** (!)  $I_E < 0$

$$I_E = I_{E(n)} + I_{E(p)} < 0$$

$$\frac{I_{E(n)}}{I_{E(p)}} \approx \frac{N_{D(E)}}{N_{A(B)}} \gg \gg \gg 1; \quad I_E \approx I_{E(n)}$$

## 16. Баланс заряда в базе **pnp-БТ**.

Ток базы в ПП создается только дырками приходящими в базу для компенсации потери дырок:  
1) после инжекции (ухода) дырок в эмиттер из базы  
2) после рекомбинации (потери) дырок в базе

Уход и потери дырок в базе компенсируется приходом дырок в базу, т.е. уходом электронов атомов оболочек атомов Si во **внешнюю цепь** и образованием дырок  
В БТ типа pnp  $I_B > 0$

$$I_B = I_{E(p)} + I_{REC} > 0$$

$I_{REC}$  – это потеря части электронов, инжектированных в базу из эмиттера.

**!!!** Нельзя путать ток самой базы, т.е. ПП-области и ток внешней цепи базы, который в любом режиме и любом типе БТ создается **электронами**.

## 17. Баланс заряда в коллекторе **npn-БТ**.

Ток коллектора в ПП создается только электронами, инжектированными из эмиттера в базу за вычетом потерь в базе на рекомбинацию

$$I_C = I_{E(n)} - I_{REC}$$

Все электроны, приходящие из базы в коллектор, уходят из него, создавая ток коллектора во **внешней цепи**

$$I_C = I_E - \left( I_{E(p)} + I_{REC} \right)$$

Непосредственно в ПП токи создаются носителями различного знака:  $I_E$  и  $I_C$  – **электроны**,  $I_B$  – **дырки**.  
Отсюда название – биполярные транзисторы (БТ)

## 18. От чего зависит ток коллектора БТ в АР?

Ток коллектора во внешней цепи определяется количеством носителей (в ед. времени!), которое внешнее поле перенесло через закрытый рп-переход К-Б путем экстракции из базы.

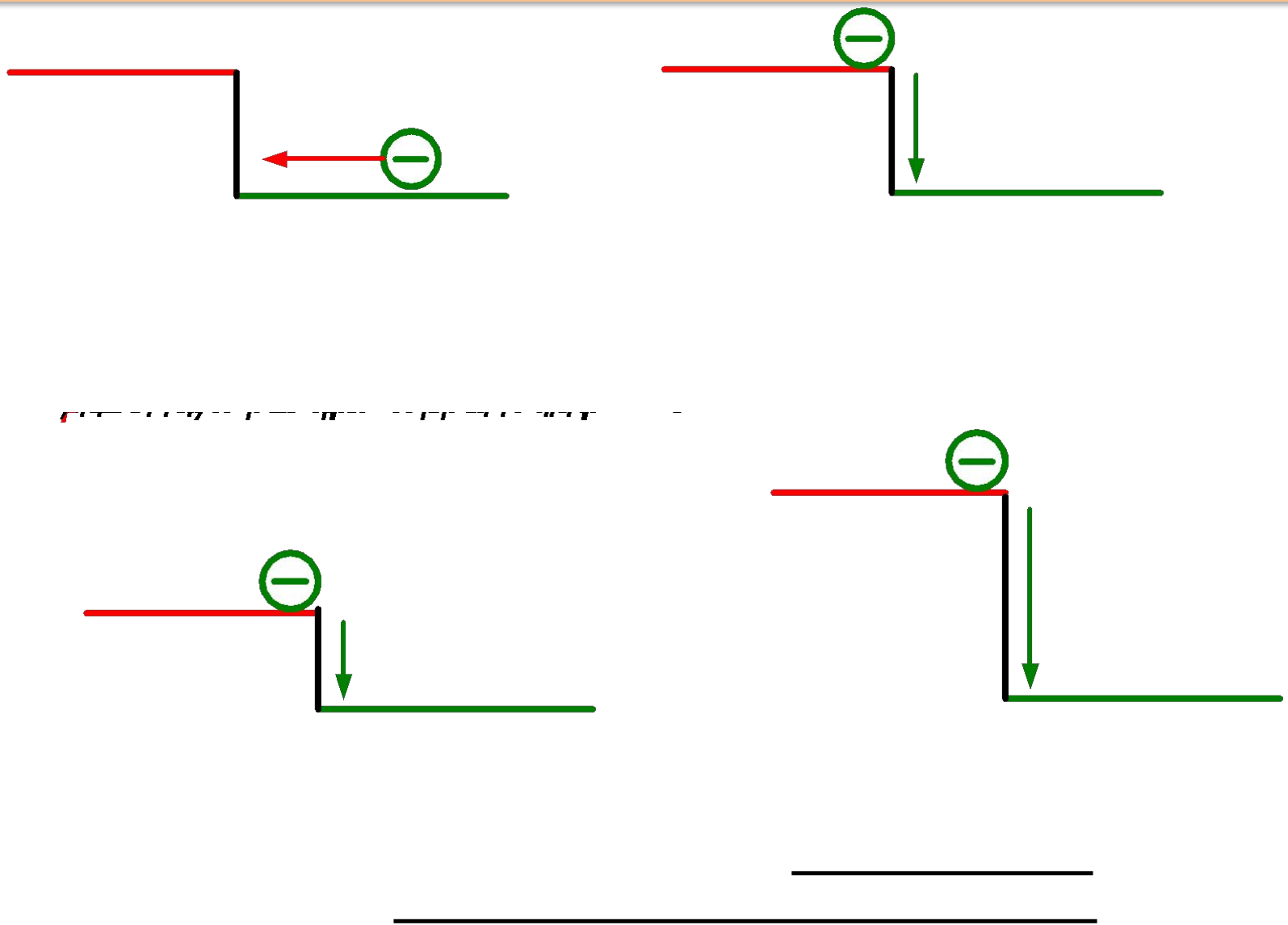
Это количество, в свою очередь, равно количеству носителей, перешедших из эмиттера в базу путем инъекции и прошедших через базу путем диффузии минус потери на рекомбинацию.

**ВЫВОДЫ** по активному режиму.:

- 1) ток коллектора зависит от напряжения на рп-переходе Б-Э, т.е. от  $U_{IN}$ ,
- 2) ток коллектора зависит также от следующих свойств БТ:
  - уровень инъекции Б-Э, т.е. отношения  $I_{E(n)}/I_{E(p)}$ ,
  - рекомбинация в базе при диффузии НОН,
- 3) ток коллектора не зависит от напряжения на рп-переходе К-Б, т.е. от  $U_{OUT}$

В АР БТ может работать,  
как **преобразователь входного сигнала в выходной**

# 19. Независимость тока коллектора от $U_{CB}$

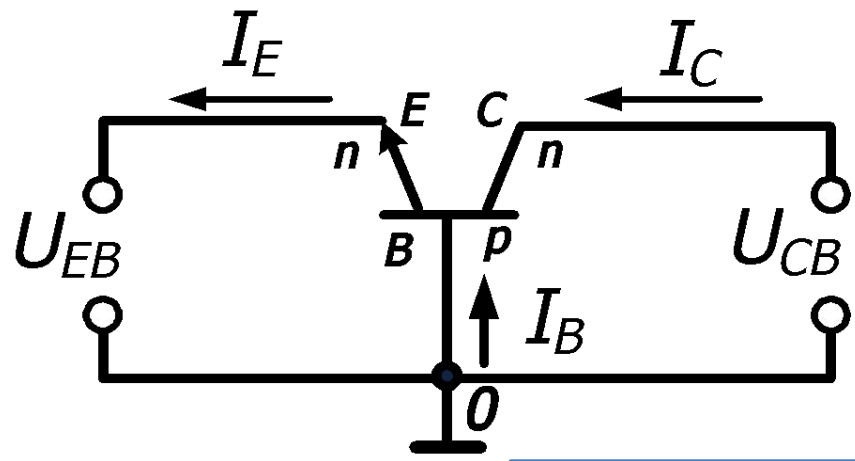


А электронов подойдет столько, сколько их инжектируется в базу под воздействием напряжения  $U_{EB}$  (минус потери на рекомбинацию)

20. Коэффициент передачи тока в схеме с ОБ (1)

Вход  
переход Э-Б  
**ОТКРЫТ**

$U_{IN} = U_{EB}$   
 $I_{IN} = I_E$



Выход  
переход К-Б  
**ЗАКРЫТ**

$U_{OUT} = U_{CB}$   
 $I_{OUT} = I_C$

$I_E = I_C + I_B$

$I_C = I_E - I_B = \alpha \cdot I_E$

$\alpha$  – коэффициент передачи постоянного тока в схеме с ОБ

$I_B \ll I_E$ , но  $I_B \neq 0$

$\alpha \approx \text{НО}$        $\alpha < 1$

Почему режим называется активным?

$I_{OUT} = I_C = \alpha \cdot I_E = \alpha \cdot I_{IN}$

Выходной сигнал зависит только от входного сигнала и повторяет закон его изменения.

## 21. Коэффициент передачи тока в схеме с ОБ (2)

Значение  $\alpha$  зависит от исходных параметров ПП  
и технологии изготовления

Величина  $\alpha$  имеет расчетные формулы (нам их не надо!!!)

$$\alpha = \gamma \cdot \theta$$

$$\gamma = 1 - \frac{N_B}{N_E} \approx 1$$

Коэффициент эффективности эмиттера:  
 $N_E, N_B$  – концентрации примеси в Э и Б.

Обычно  $N_E > N_B$  на 2 – 3 порядка

$$\theta = \frac{I_C}{\gamma \cdot I_E} \approx 1$$

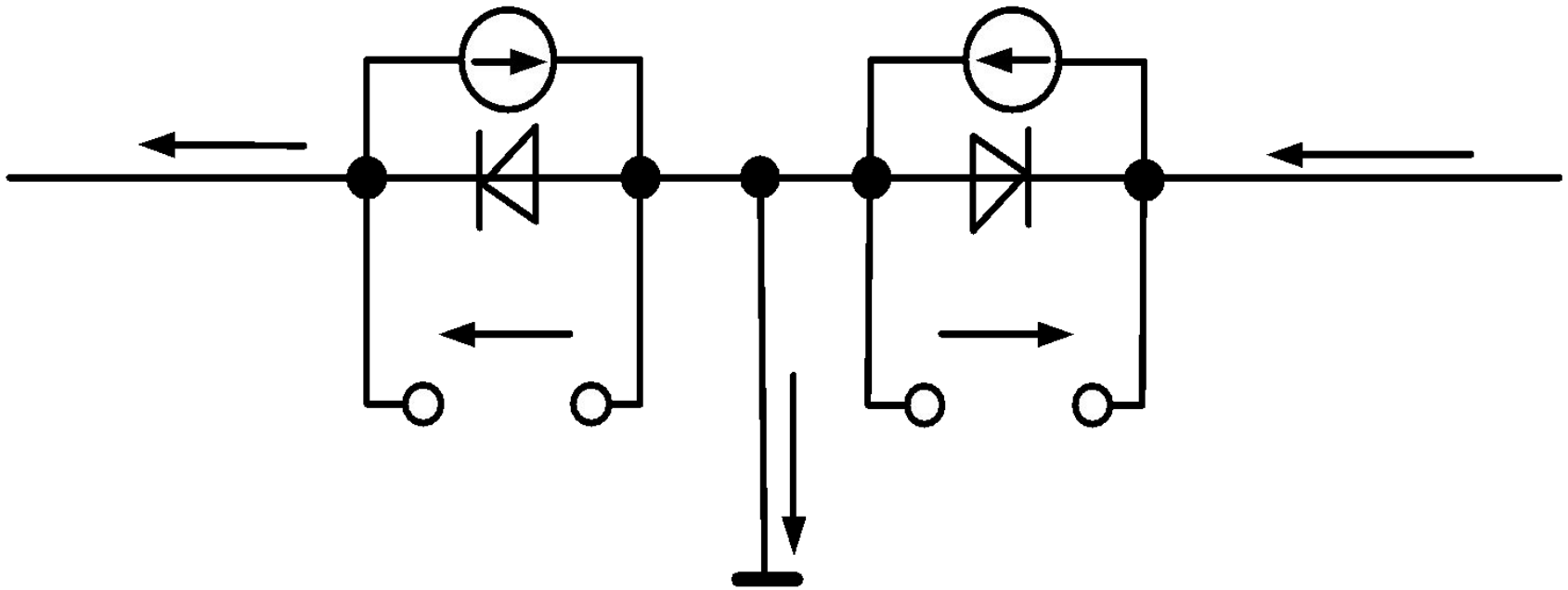
Коэффициент переноса НОН через базу  
при диффузии  
с учетом потерь на рекомбинацию.

При ТОНКОЙ базе доля рекомбинации  
мала (Успевают пройти почти без потерь)



*Уравнения статических состояний БТ  
(Молла-Эберса)  
для схемы с ОБ.*

## 22. Эквивалентная схема БТ-ОБ. Модель Молла - Эберса

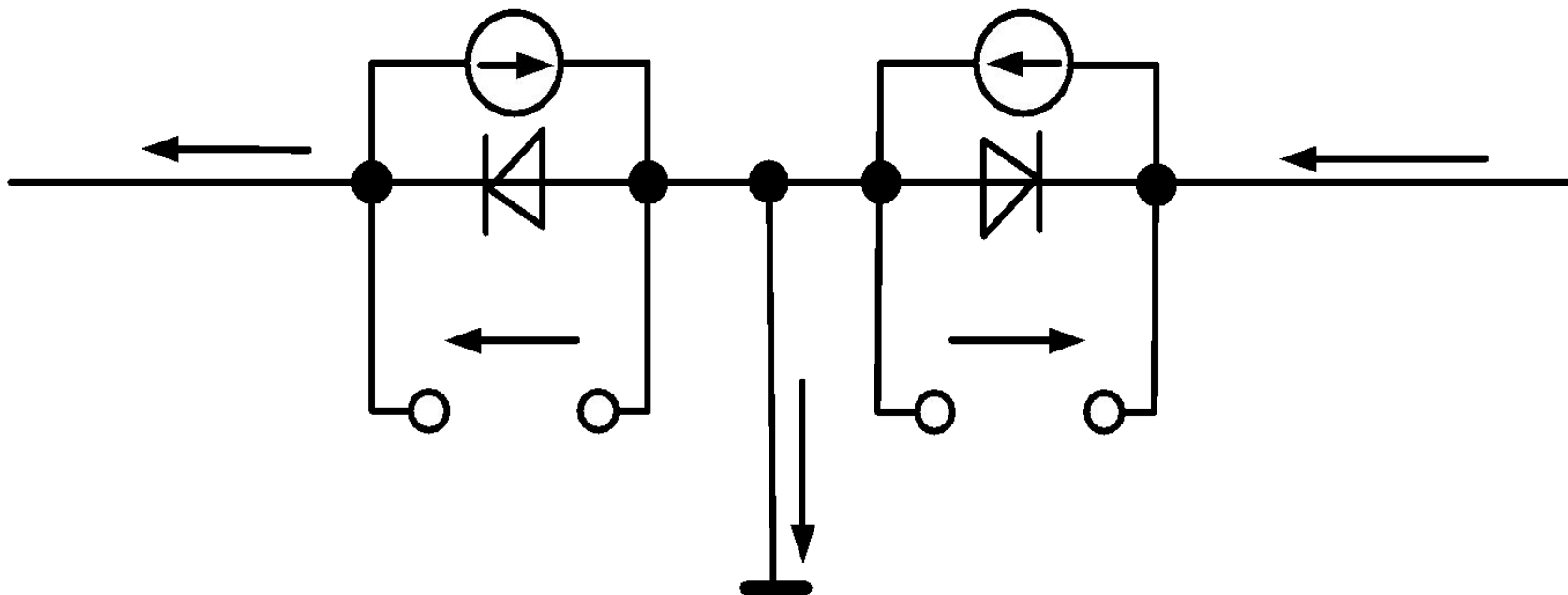


$I_1, I_2$  – токи, создаваемые в  $pn$ -переходах приложенным напряжением, т.е. ВАХ

$$I_1 = I_{E0} \cdot \left( e^{\frac{U_{EB}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

$$I_2 = I_{C0} \cdot \left( e^{\frac{U_{CB}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

## 23. Взаимное влияние рп-переходов.

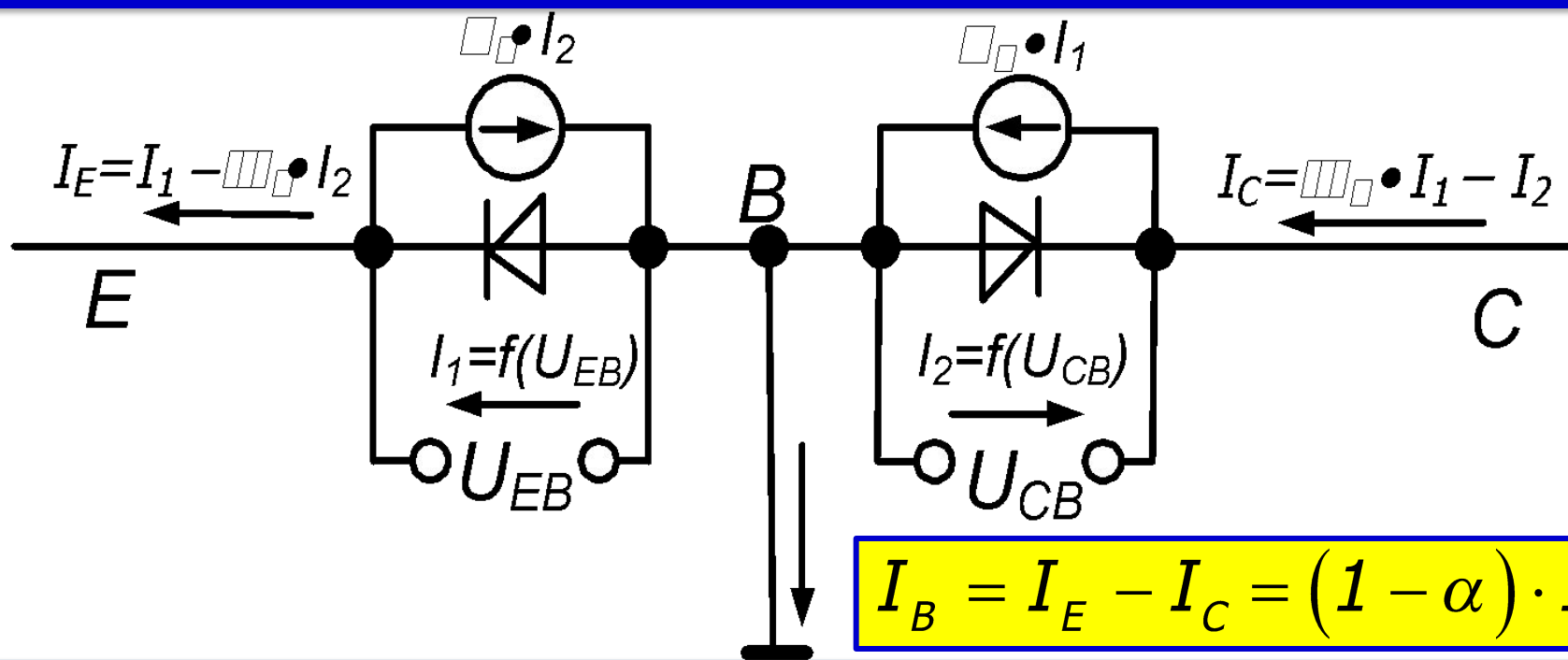


$a_N \cdot I_1, a_I \cdot I_2$  – токи, переносимые через базу из другого рп-перехода

$a_N$  – Normal или просто  $a$  – коэффициент передачи тока при нормальном включении: Э-Б открыт, К-Б закрыт

$a_I$  – Inverse – коэффициент передачи тока при инверсном включении: Э-Б закрыт, К-Б открыт

24. Уравнения Молла – Эберса для схемы с ОБ



Общий вид уравнений для любого и 4-х возможных режимов

$$I_C = \alpha_N \cdot I_1 - I_2 = \alpha_N \cdot I_{E0} \cdot \left( e^{\frac{U_{EB}}{\varphi_T}} - 1 \right) - I_{C0} \cdot \left( e^{\frac{U_{CB}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

$$I_E = I_1 - \alpha_I \cdot I_2 = I_{E0} \cdot \left( e^{\frac{U_{EB}}{\varphi_T}} - 1 \right) - \alpha_I \cdot I_{C0} \cdot \left( e^{\frac{U_{CB}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

## 25. Реальные формулы расчета при использовании модели М-Э.

При расчете токов БТ в реальных устройствах используют очень упрощенные уравнения Молла-Эберса с применением следующих допущений для уравнений ВАХ  $I=f(U)$ :

- при открытом рп-переходе пренебрегают единицей,
- при закрытом рп-переходе пренебрегают экспонентой.

Основания см. През. №02, №№34,35.

Значениями обратных токов  $I_{E0}$ ,  $I_{C0}$ , присутствующих в общей сумме без множителя-экспоненты, также пренебрегают.

Уравнения ВАХ для прямой ветви

$$I_1 = I_{E0} \cdot e^{\frac{U_{EB}}{\varphi_T}}$$

$$I_2 = I_{C0} \cdot e^{\frac{U_{CB}}{\varphi_T}}$$

Уравнения ВАХ для обратной ветви

$$I_1 \approx -I_{E0} \approx 0$$

$$I_2 \approx -I_{C0} \approx 0$$

## 26. Токи в схеме с ОБ в активном режиме.

Переход Э-Б открыт, переход К-Б закрыт

$$I_C = \alpha_N \cdot I_1 - I_2 = \alpha_N \cdot I_{E0} \cdot e^{\frac{U_{EB}}{\varphi_T}} + I_{C0} \approx \alpha_N \cdot I_{E0} \cdot e^{\frac{U_{EB}}{\varphi_T}}$$

$$I_E = I_1 - \alpha_I \cdot I_2 = I_{E0} \cdot e^{\frac{U_{EB}}{\varphi_T}} - I_{C0} \approx I_{E0} \cdot e^{\frac{U_{EB}}{\varphi_T}}$$

В реальных схемах значение  $I_E$  задается и рассчитывается по внешним параметрам схемы; расчет по экспоненте не делают.

$$I_C = \alpha \cdot I_E \approx I_E$$

Индекс N у параметра  $\alpha$  опускается, т.к. параметр  $\alpha_I$  больше нигде не появляется.

В активном режиме

**между токами рп-переходов присутствует связь, в которой  $I_{OUT}$  зависит только от тока  $I_{IN}$**

## 27. Токи в схеме с ОБ в режиме отсечки .

Переход Э-Б закрыт, переход К-Б закрыт

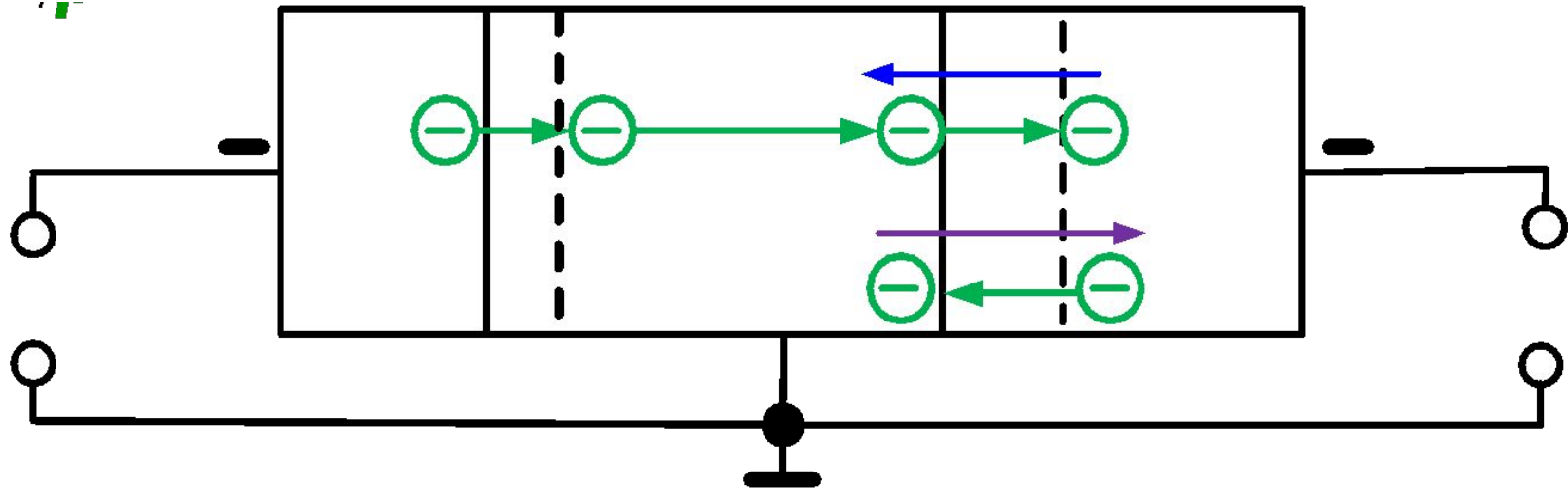
$$I_C = \alpha_N \cdot I_1 - I_2 = -\alpha_N \cdot I_{E0} + I_{C0} \approx 0$$

$$I_E = -I_{E0} - I_{C0} \approx 0$$

В режиме отсечки БТ

**связь между токами рп-переходов отсутствует**

## 28. Режим двойной инжекции в схеме с ОБ – носители.



Ток инжекции – это ток через открытый рп-переход (любой)

1-я (**основная в АР**) инжекция – ток через рп-переход Э-Б

$$I_{EB(inj1)} \approx I_{E(n)} = I_{E0} \cdot e^{\frac{U_{EB}}{\varphi_T}} = f(U_{EB}) \neq f(U_{CB})$$

2-я (**отсутствующая в АР**) инжекция – ток через рп-переход К-Б

$$I_{CB(inj2)} = I_{C0} \cdot e^{\frac{U_{CB}}{\varphi_T}} = f(U_{CB})$$



## 29. Токи в схеме с ОБ в режиме двойной инжекции.

Переход Э-Б открыт, **переход К-Б открыт**

В уравнениях Молла-Эберса оказывают влияние ВСЕ ЧЛЕНЫ

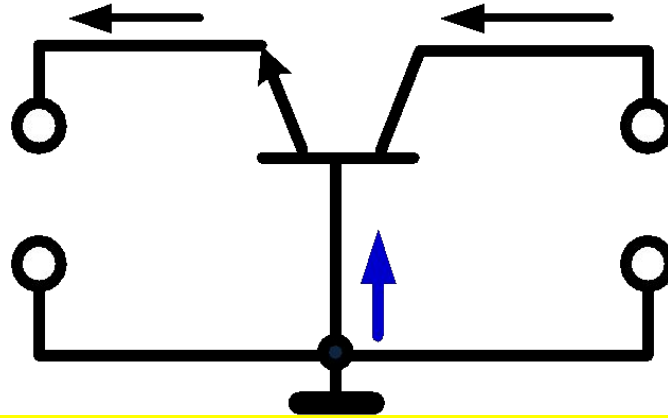
$$I_C = \alpha_N \cdot I_1 - I_2 = \alpha_N \cdot I_{E0} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{\varphi_T}} - I_{C0} \cdot \left( e^{\frac{U_{CB}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

$$I_E = I_1 - \alpha_I \cdot I_2 = I_{E0} \cdot \left( e^{\frac{U_{BE}}{\varphi_T}} - 1 \right) - \alpha_I \cdot I_{C0} \cdot \left( e^{\frac{U_{CB}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

**НО!!!** В реальных схемах пользоваться такими "сложными" формулами практически никогда не приходится.

Есть гораздо более простая формула определения  $I_C$  в режиме двойной инжекции по значениям параметров схемы. Она будет приведена и использована при изучении усилительного каскада на БТ.

## 30. Влияние обратного тока $np$ -перехода К-Б на общий ток $I_C$



В любом случае в ток  $I_C$  вносит свой вклад обратный (собственный) ток  $np$ -перехода К-Б  $I_{C0}$

АР:  $I_{CB} = I_{C0}$ ,  $I_C = \alpha \cdot I_{EB} + I_{C0}$

Отсечка:  $I_C = I_{CB} = I_{C0}$

Для современных Si БТ в большинстве расчетов можно принимать  $I_{C0} = 0$

## 31. Реальные режимы работы БТ в аналоговых схемах.

Работа аналоговых преобразовательных устройств происходит в основном в **активном режиме**, в котором  $I_C \approx \alpha \cdot I_E \approx I_E$

В определенные моменты времени работа может происходить в **режиме отсечки**, в котором  $I_C \approx I_E \approx 0$ .

В обоих режимах рп-переход К-Б закрыт, т.е. для рпн-БТ Напряжение питания задается  $> 0$  и  $U_{CB}$  получается  $> 0$

В нормальных условиях работы аналогового устройства на основе рпн-БТ переход Б-К никогда должен быть открытым

В правильной схеме напряжение питания всегда задается  $> 0$ :

- инверсный режим с  $U_{BE} < 0$ ,  $U_{CB} < 0$  отсутствует в принципе
- режим двойной инжекции с  $U_{BE} > 0$ ,  $U_{CB} < 0$  может возникнуть по ряду причин, которые станут ясными при рассмотрении реальных схем усилительных каскадов.

*Статические  
характеристики (графики)  
схемы с ОБ*

## 32. Характеристики БТ

Основные характеристики транзистора – функция всегда ток

$$\text{Входная: } I_{IN} = f(U_{IN})$$

$$\text{Выходная: } I_{OUT} = f(U_{OUT})$$

$$\text{Передаточная: } I_{OUT} = f(U_{IN}) \text{ или } I_{OUT} = f(I_{IN})$$

У БТ передаточная характеристика –

это просто число – **значение**  $K_{TR}$

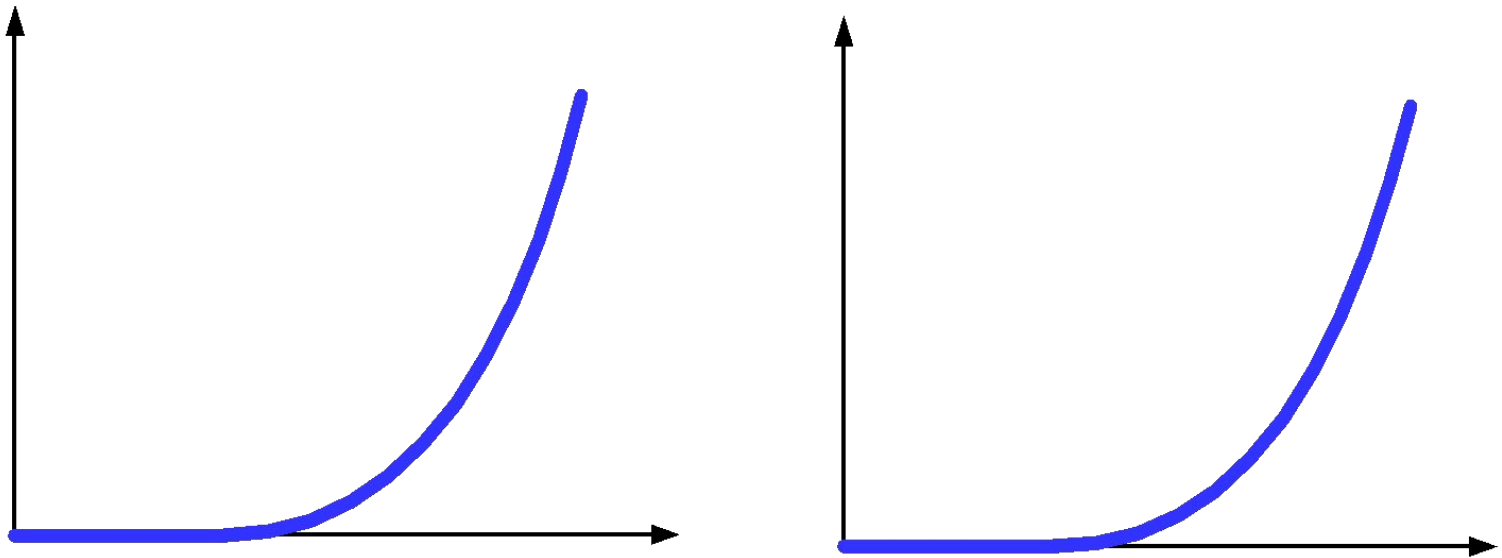
$$I_{OUT} = K_{TR} \square I_{IN} \quad (K_{TR} \text{ – коэффициент передачи})$$

В схеме с ОБ коэффициент передачи тока  $K_{TR} = \square < 1$

$$K_{TR} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{I_C}{I_E} = \alpha < 1 \quad (\alpha \approx 1)$$

### 33. Входные характеристики БТ в схеме с ОБ

Входная характеристика – это прямая ветвь ВАХ рп-перехода Э-Б

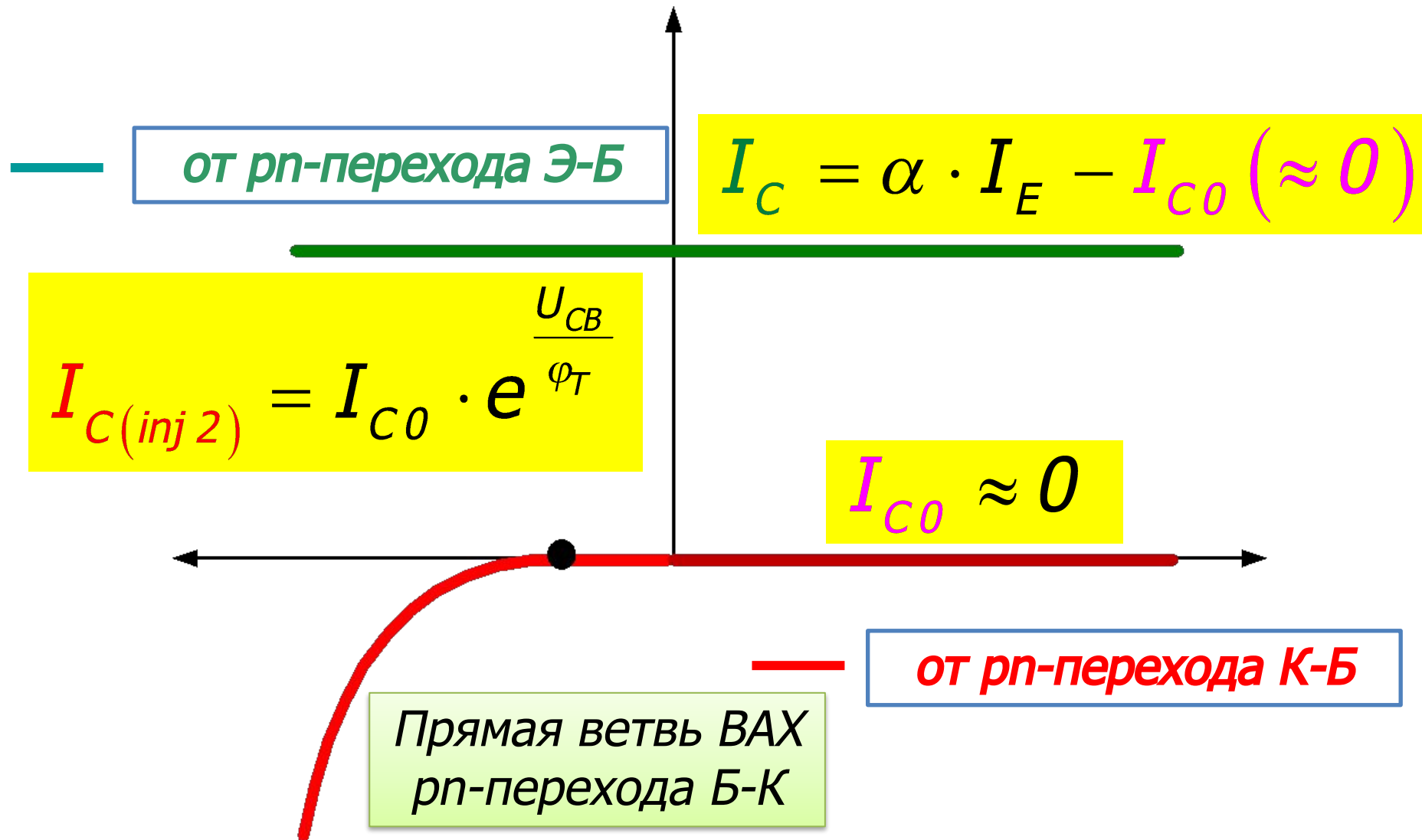


Тип БТ определяется только по знакам  $I_E$  и  $U_{EB}$

Знак тока определяется направлением относительно соответствующего вывода БТ:

- втекает – плюс,
- вытекает – минус

## 34. Составляющие выходной характеристики БТ в схеме с ОБ.



В любом режиме  $I_C$  во внешней цепи равен алгебраической сумме токов через оба рп-перехода

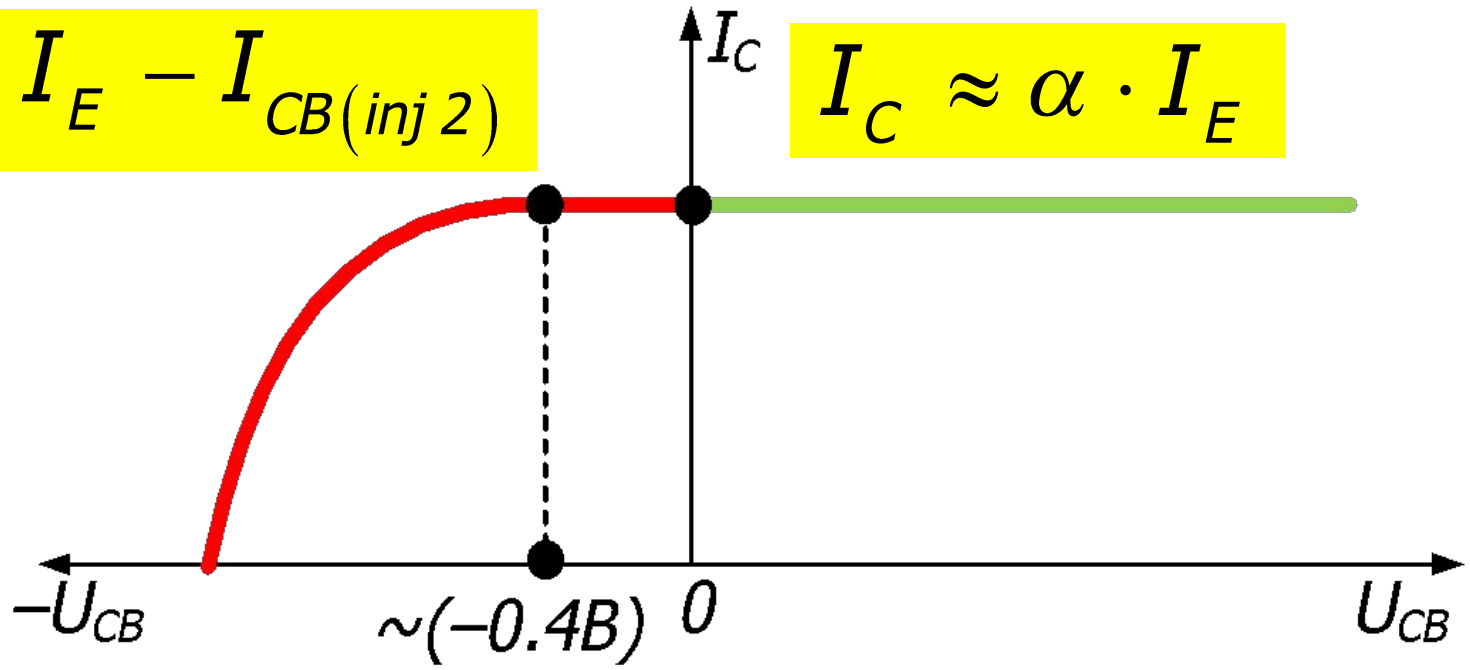
### 35. Одиночная выходная характеристика БТ в схеме с ОБ.

Режим двойной  
инъекции:  $U_{CB} < 0$

Активный режим:  $U_{CB} > 0$

$$I_C \approx \alpha \cdot I_E - I_{CB(inj\ 2)}$$

$$I_C \approx \alpha \cdot I_E$$



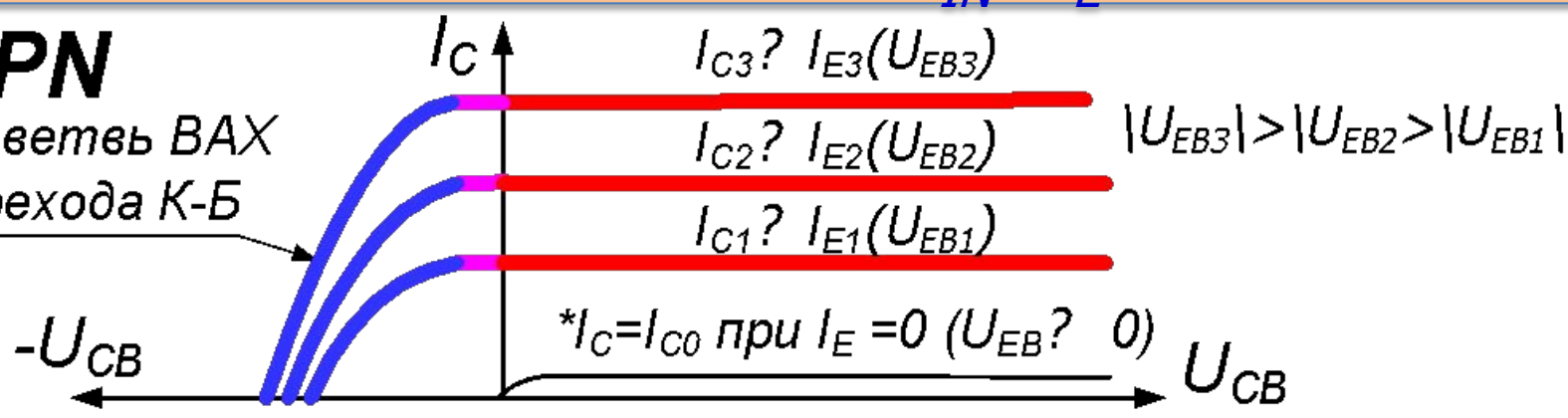
Одиночная ВХ не является полностью информативной,  
т.к. ее значения сильно зависят от параметра  $I_E$

Поэтому ВХ обычно представляют в виде семейства (СВХ)  
с параметром  $I_E$



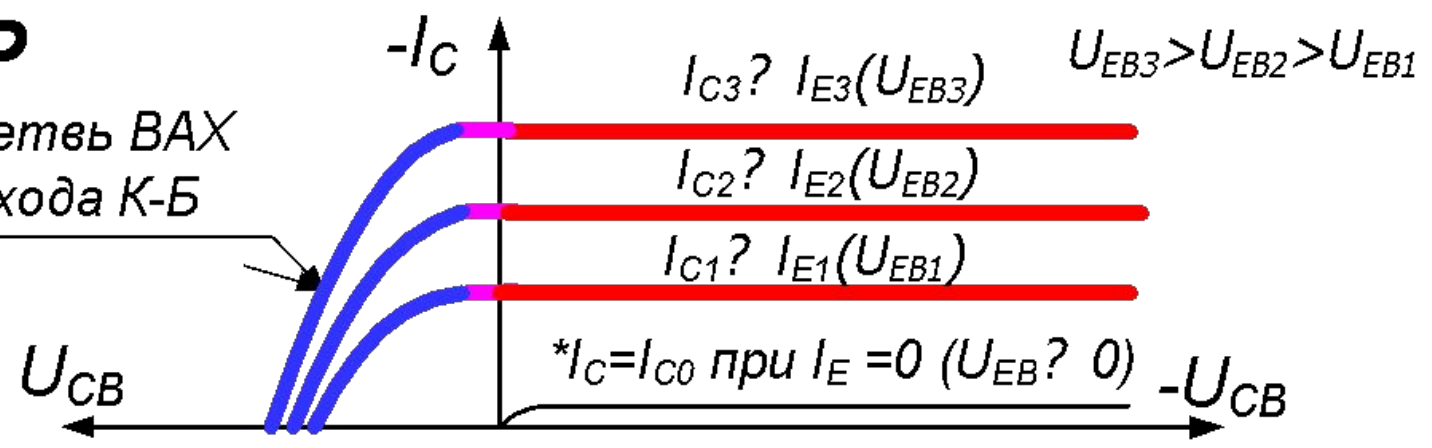
### NPN

прямая ветвь ВАХ  
рп-перехода К-Б



### PNP

прямая ветвь ВАХ  
рп-перехода К-Б



\* – для  $I_{C0}$  в режиме отсечки масштаб не соблюден

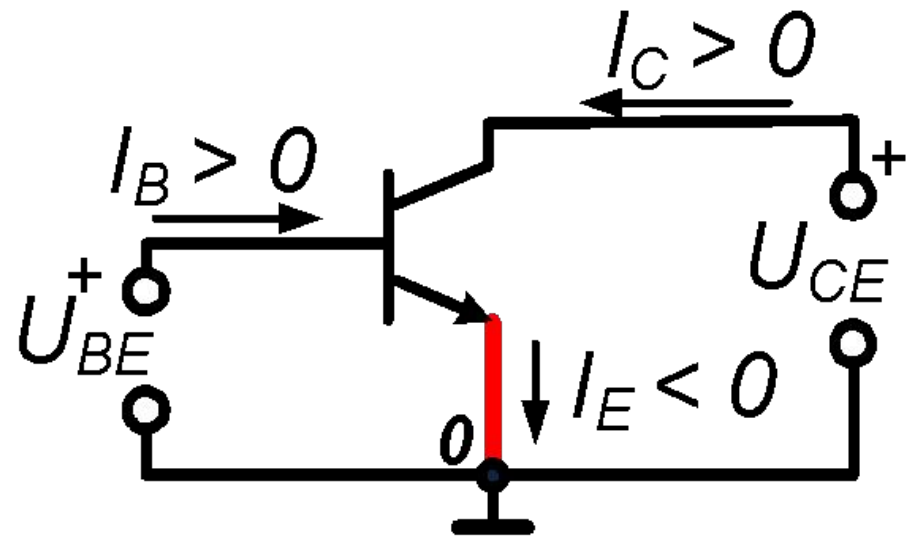
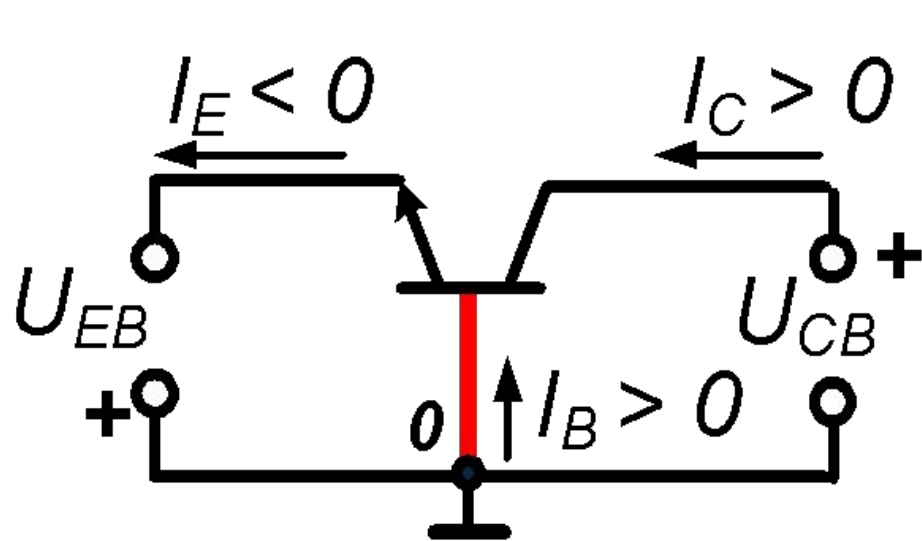
Схема включения – начало СВХ левее оси Y

Тип транзистора – определяется по знакам величин на осях.

Крутая часть ВХ – режим двойной инжекции  
Пологая часть ВХ – активный режим.

*Схема включения с  
общим эмиттером (ОЭ)  
Основная схема УК!!!*

## 37. **Общность** схем включения с ОБ и с ОЭ



1) **направления** (знаки) токов:  $I_E < 0$ ,  $I_B > 0$ ,  $I_C > 0$ ,

2) **состояния(!) рп-переходов** в каждом режиме:

активный: Б-Э открыт, К-Б закрыт,

отсечка: Б-Э закрыт, К-Б закрыт,

двойная инжекция: Б-Э открыт, К-Б открыт,

3) **носители**, составляющие ток в каждой области:

Э – электроны  $\geq 99\%$ , К – электроны, Б – дырки

4) **выходной ток**  $I_{OUT} = I_C$

38.

## Передача тока в схеме с ОБ и с ОЭ

Схема с ОБ

Входной ток:

$$I_{IN} = I_E$$

Схема с ОЭ

Входной ток:

$$I_{IN} = I_B \ll I_E$$

Выходной ток:  $I_{OUT} = I_C$ 

Коэффициенты передачи постоянного тока

$$K_{ОБ} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{I_C}{I_E} = \alpha$$

$$K_{ОЭ} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{I_C}{I_B} = \beta$$

В схемах с ОБ и ОЭ коэффициенты передачи имеют различные формулы, т.к. в этих схемах один и тот же выходной ток, но **различные входные токи**

## 39. Связь между коэффициентами передачи тока в ОБ и ОЭ

Для ОБ

$$I_C = \alpha \cdot I_E$$

Для ОЭ

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Общее для ОБ и ОЭ

$$I_E = I_C + I_B$$

Связь  $\alpha$  и  $\beta$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}; \quad \alpha \approx 1, \quad \beta \gg 1$$

или

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}; \quad \beta \gg 1, \quad \alpha \approx 1$$

## 40. Идентичность схем ОБ и ОЭ в АР .

При одинаковых значениях напряжений на рп-переходах токи в выводах БТ будут иметь одинаковые значения в любой схеме включения (Л.Р.№3).

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ ,  
связывающих между собой значения токов  $I_C$ ,  $I_E$  и  $I_B$ ,  
можно измерять в любой схеме включения.

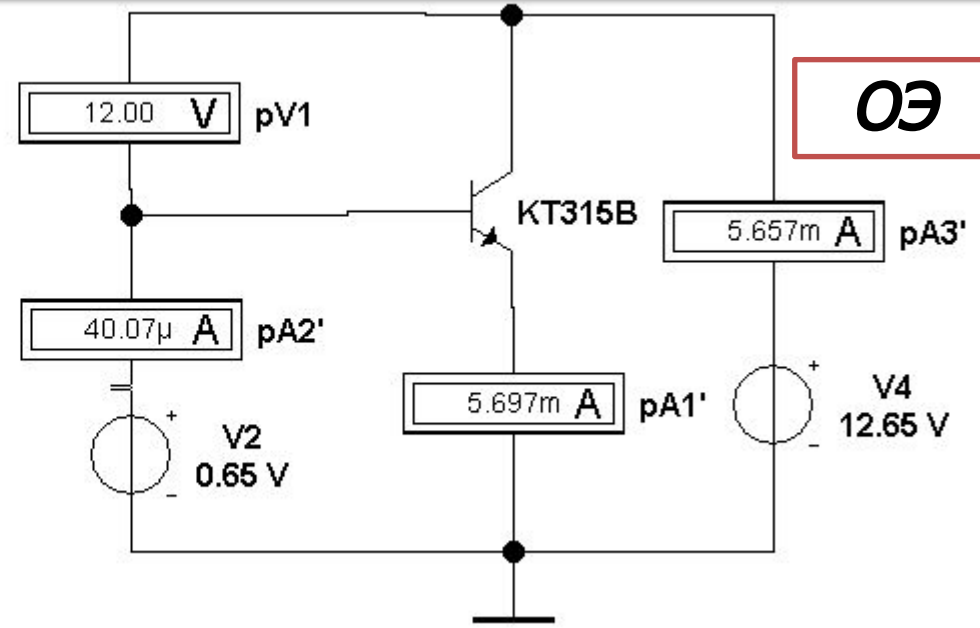
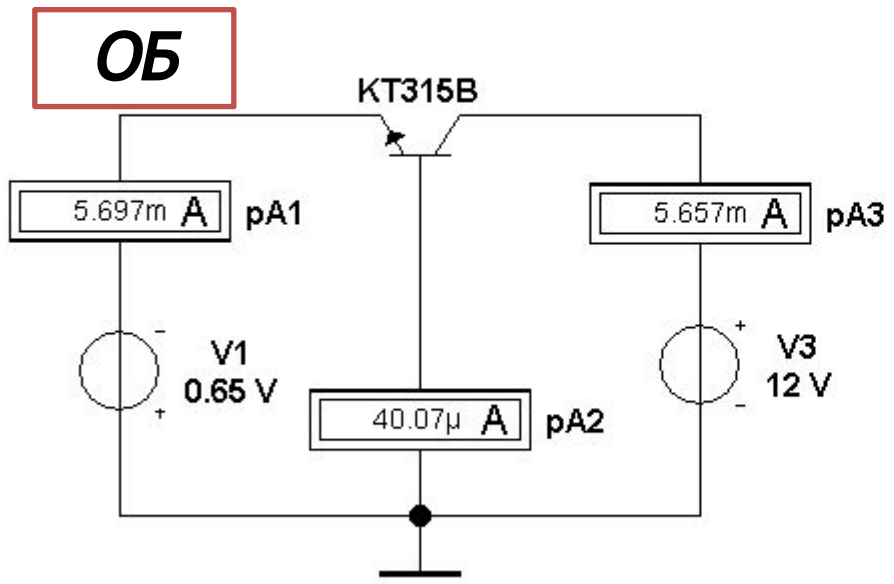
Названия:

- $\alpha$  – коэффициент передачи тока в схеме с ОБ,
  - $\beta$  – коэффициент передачи тока в схеме с ОЭ,
- отражают физический смысл, но не обязательность схемы включения ОБ для измерения  $\alpha$  или ОЭ для измерения  $\beta$

Вообще, для измерения коэффициентов передачи достаточно измерить два любых тока в любой схеме включения, а далее – расчет согласно №39.

# 41. Условие идентичности схем с ОБ и ОЭ (Л.Р.№3)

Создание идентичности условий на рп-переходах:  
на входе –  $V1=V2$ , на выходе  $V4=V3+V2$



Результат:

в активном режиме токи во всех соответствующих выводах **равны**,  
любой коэффициент передачи можно измерять в любой схеме

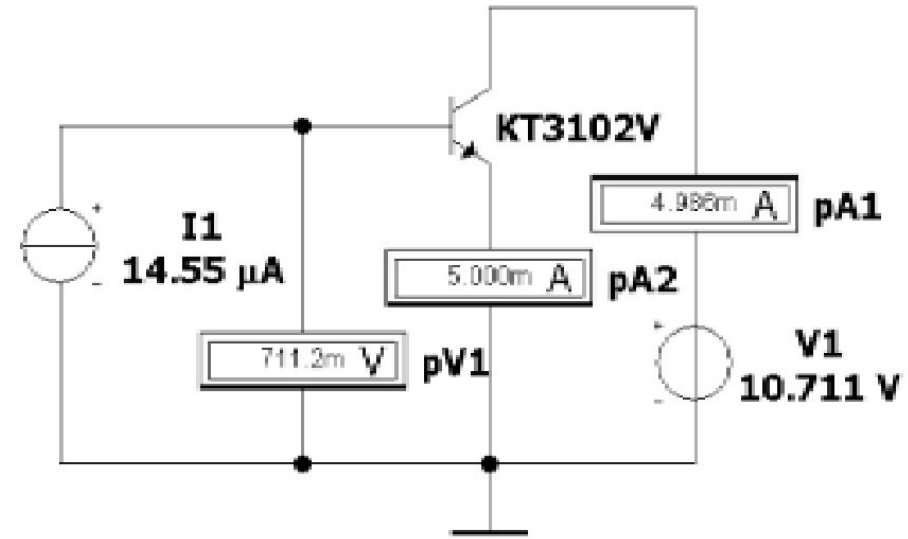
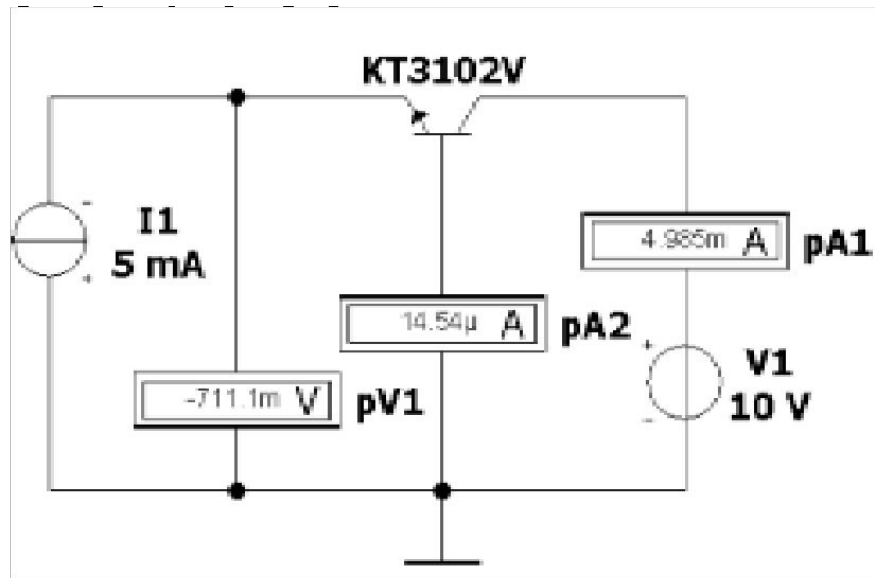
Измерения в схеме с ОБ

$$\alpha = \frac{pA3}{pA1}, \quad \beta = \frac{pA3}{pA2}$$

Измерения в схеме с ОЭ

$$\alpha = \frac{pA3'}{pA1'}, \quad \beta = \frac{pA3'}{pA2'}$$

## 42. Идентичность результатов в различных схемах включения



$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{pA1}{I1} = \frac{4.985}{5} = 0.997$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{pA1}{pA2} = \frac{4.986}{5} \approx 0.997$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{pA1}{I1} = \frac{4.986 \text{ mA}}{14.55 \text{ μA}} \approx 343$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{pA1}{pA2} = \frac{4.985 \text{ mA}}{14.54 \text{ μA}} \approx 343$$

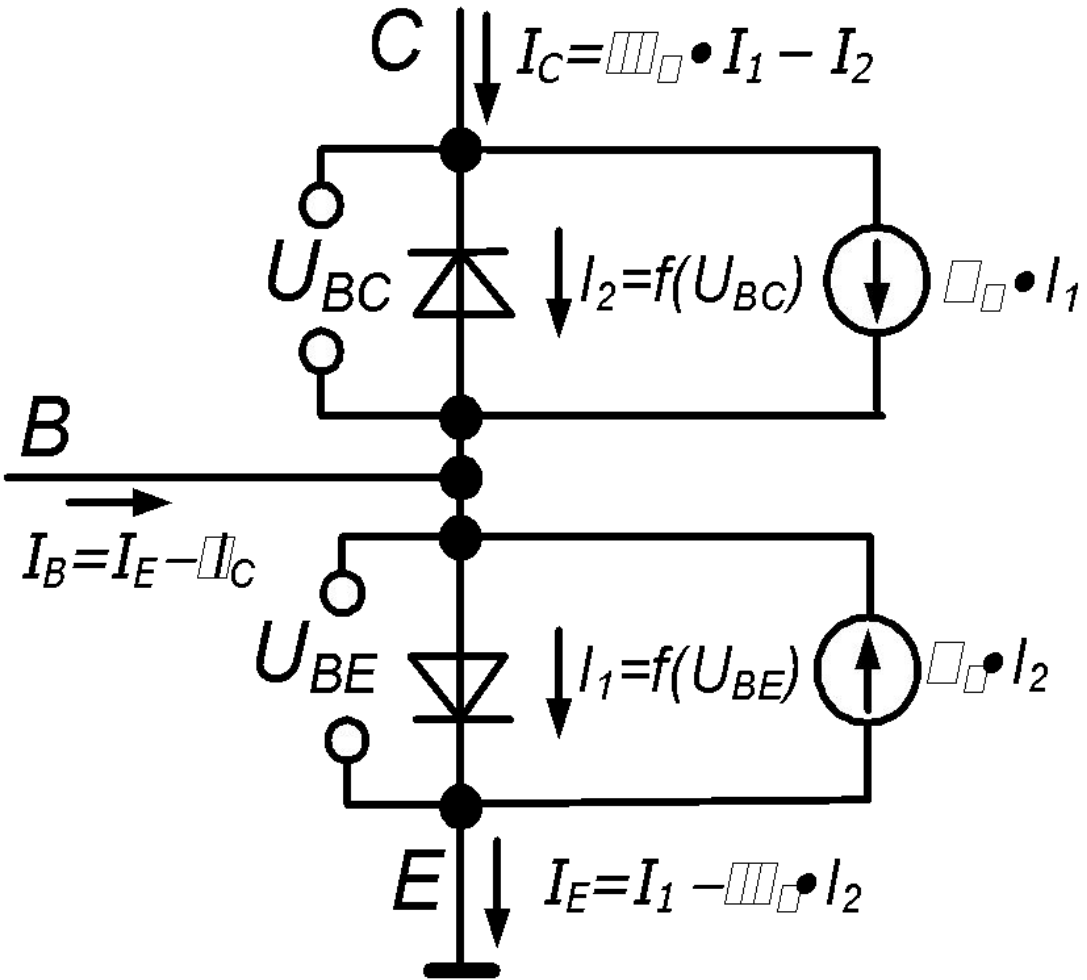
При равных напряжениях на рп-переходах равны токи в электродах  
**и их соотношения, т.е. α и β**

В схеме с ОБ можно сразу задать значение  $I_E$   
для БТ с неизвестным (!!!) коэффициентом передачи



*Уравнения статических состояний БТ  
(Молла-Эберса)  
для схемы с ОЭ.*

43. Эквивалентная схема БТ-ОЭ. Модель Молла – Эберса (01)



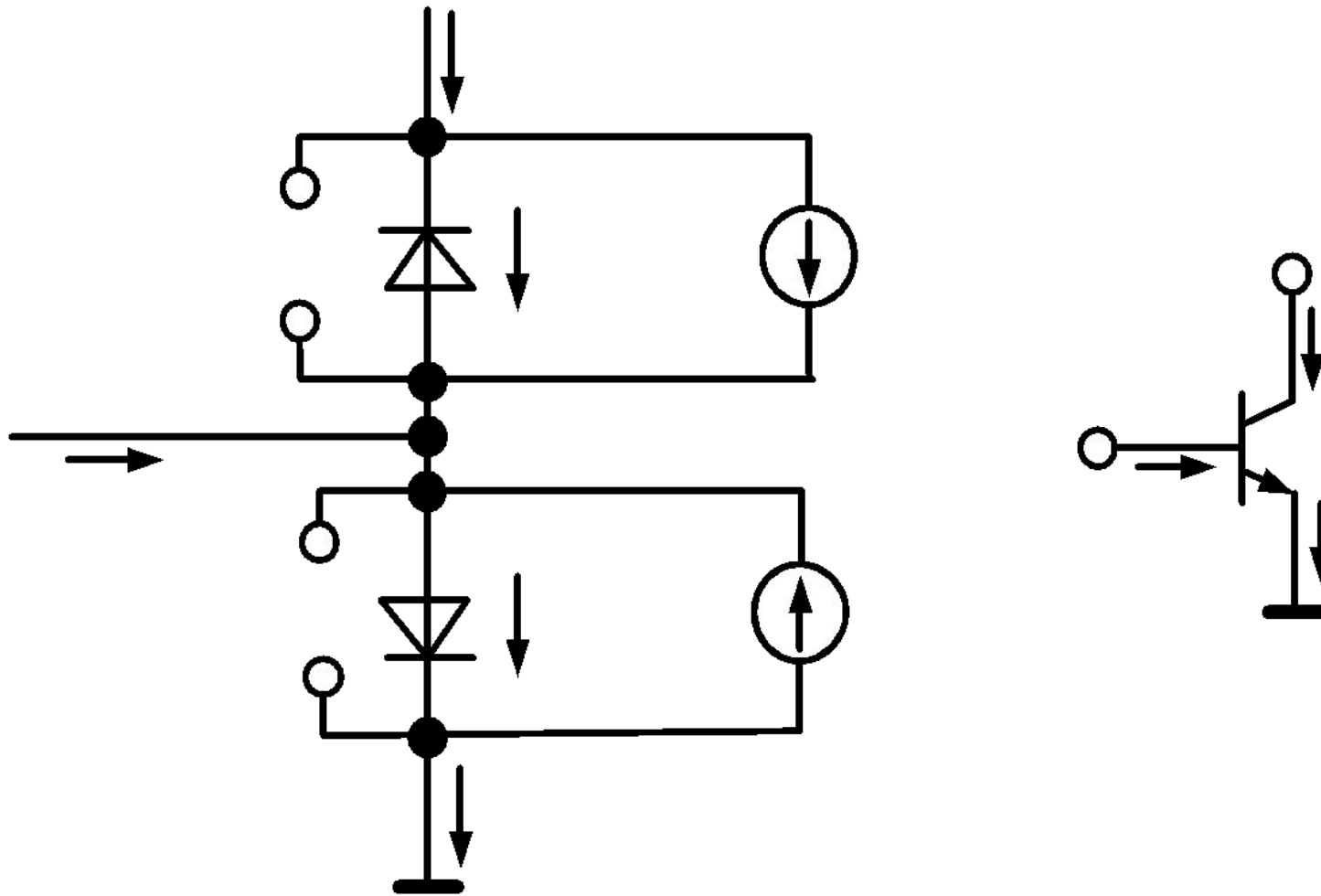
$$I_1 = I_{E0} \cdot \left( e^{\frac{U_{BE}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

$$I_2 = I_{C0} \cdot \left( e^{\frac{U_{BC}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

Уравнения имеют тот же вид, что и для схемы с ОБ с учетом отличий:

переход Б-Э открыт при  $U_{BE} > 0$  (то же, что и  $U_{EB} < 0$ )  
 переход Б-К открыт при  $U_{BC} > 0$ , т.е. при  $U_{BE} - U_{CE} > 0$

# 44. Эквивалентная схема БТ-ОЭ. Модель Молла – Эберса (02)



При  $U_{BE} > 0$  и  $U_{CE} > 0$ , т.е. при "правильном" задании знаков  $U$  для АР БТ все равно может оказаться в режиме двойной инжекции

Например,  $U_{BE} = 0.7V$ ,  $U_{CE} = 0.6V$ , получится  $U_{BE} - U_{CE} = +0.1V$   
т.е. открытый рп-переход Б-К

## 45. Упрощенные значения для АР и отсечки в схеме с ОЭ

Допущения для ВАХ рп-переходов те же, что и для схемы с ОБ:

- при открытом рп-переходе пренебрегаем единицей,
- при закрытом рп-переходе пренебрегаем экспонентой.

Допущения для обратных токов:

Значениями обратных токов, если они без множителя-экспоненты можно пренебрегать в любом режиме.

Входной ток  $I$ ; связь между коэффициентами передачи (см. №39):

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$\beta \gg 1, \alpha \approx 1$$

Активный Режим:  $U_{BE} > 0, U_{BC} = U_{BE} - U_{CE} < 0$

$$I_C = \alpha \cdot I_E = \beta \cdot I_B$$

Режим отсечки:  $U_{BE} < 0, U_{BC} = U_{BE} - U_{CE} < 0$

$$I_C \approx 0, I_E \approx 0, I_B \approx 0$$

*Движение носителей  
в схеме с ОЭ*

## 46. Соответствие представлениям в №9, №11, №12 (для ОБ)

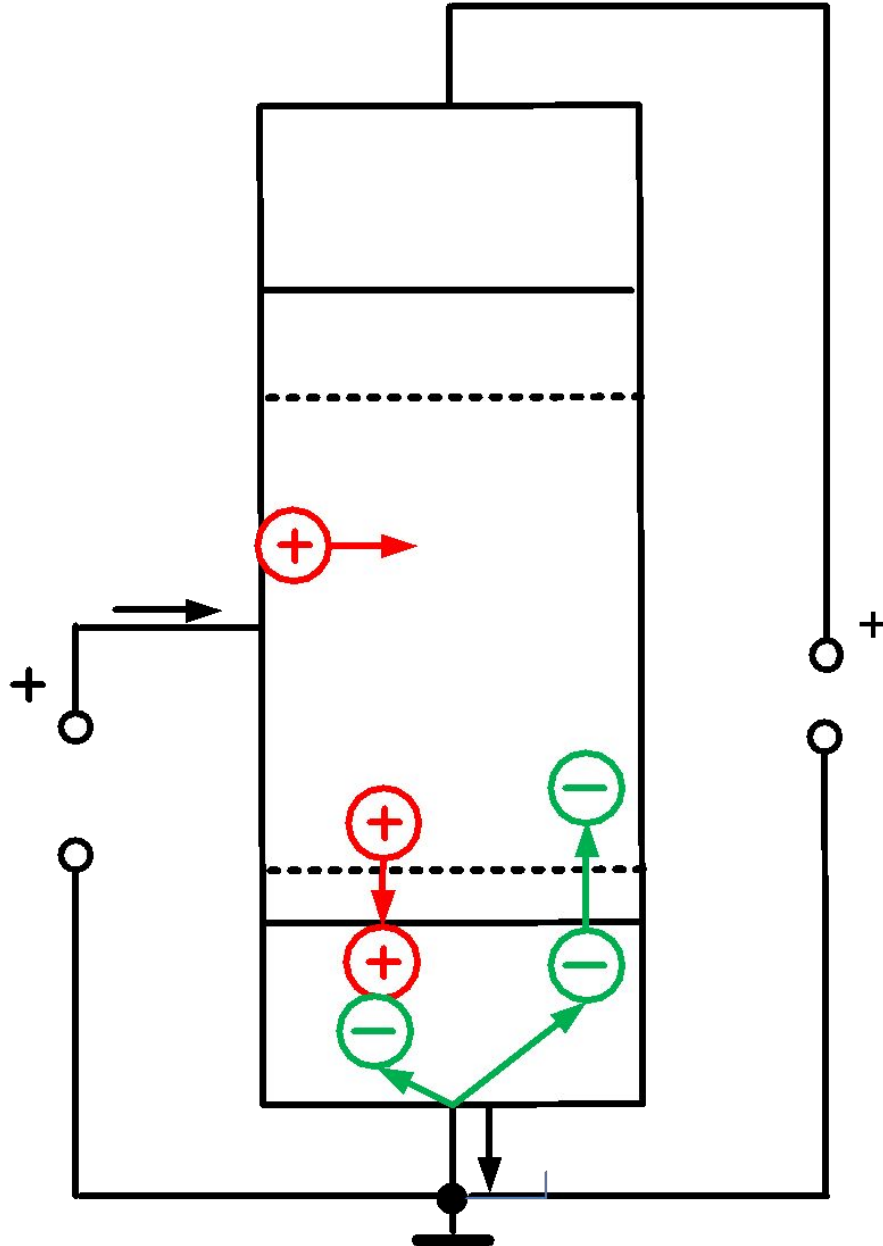
Структура, соответствующая схеме с ОБ поворачивается на  $90^\circ$  против ч.с.

1) Со стороны входа точка 0В переносится с базы на эмиттер, напряжение  $U_{EB} < 0$  меняет свой знак и получается  $U_{BE} > 0$ , при котором переход Б-Э открыт

2) Со стороны выхода внешнее напряжение приложено между коллектором и 0В; при условии  $U_{CE} \geq U_{BE}$  получится  $U_{CB} > 0$ , т.е. переход Б-К закрыт.

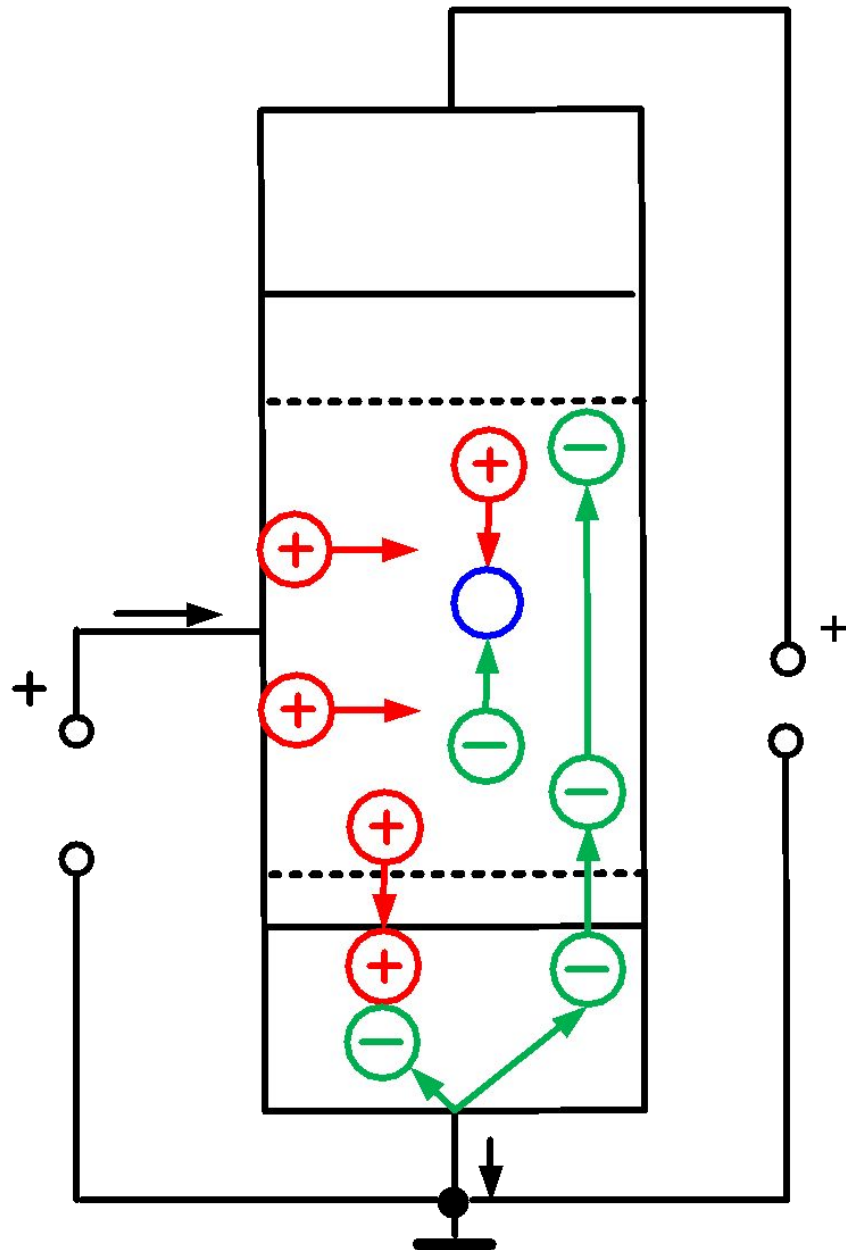
### ВЫВОД

При выполнении условий:  
 $U_{BE} \approx 0.7\text{В}, \geq 0$  и  $U_{CE} \geq U_{BE} \approx 0.7\text{В}$   
в БТ-ОЭ будет обеспечен АР.



- 1 – инжекция электронов – ток инжекции  $I_{E(n)}$
- 2 – инжекция дырок – ток инжекции  $I_{E(p)}$
- 3 – часть  $I_E$ , равная электронной части тока инжекции
- 4 – часть  $I_E$ , равная дырочной части тока инжекции
- 5а=2 – часть  $I_B$ , равная дырочной части тока инжекции

48. Движение носителей в БТ-ОЭ; АР – диффузия по базе (ср. №11)



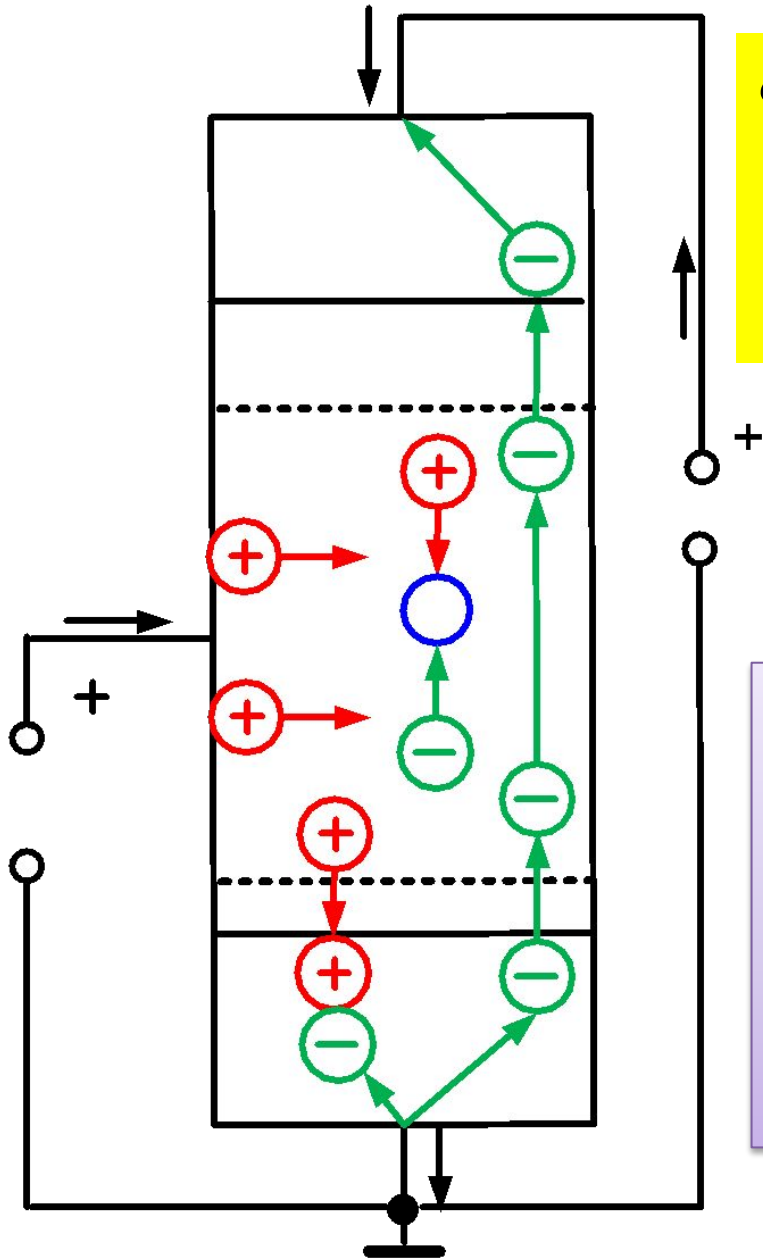
**6 – диффузия электронов по базе**

**7 – рекомбинация электронов и дырок в базе**

**$5b=7$  – часть тока базы, равная току рекомбинации**



49. Движение носителей в БТ-ОЭ; АР – экстракция в коллектор (ср. №12)



$8 = (6 - 7)$  – экстракция электронов из базы через рп-переход Б-К  
 $9 = 8$  – дрейф электронов через коллектор во внешнюю цепь

Экстракция электронов из базы через рп-переход Б-К производится напряжением, приложенным к этому рп-переходу, т.е.

$$U_{BC} = U_{CE} - U_{BE}$$

В АР оно должно быть **>0!!!**

## 50 Выводы по движению носителей в схеме с ОЭ

На всех этапах рассмотрения движение носителей в схеме с ОЭ описывается так же, как и в схеме с ОБ. Это означает:

- одинаковые механизмы перехода границ областей,
- одинаковые механизмы движения по областям.

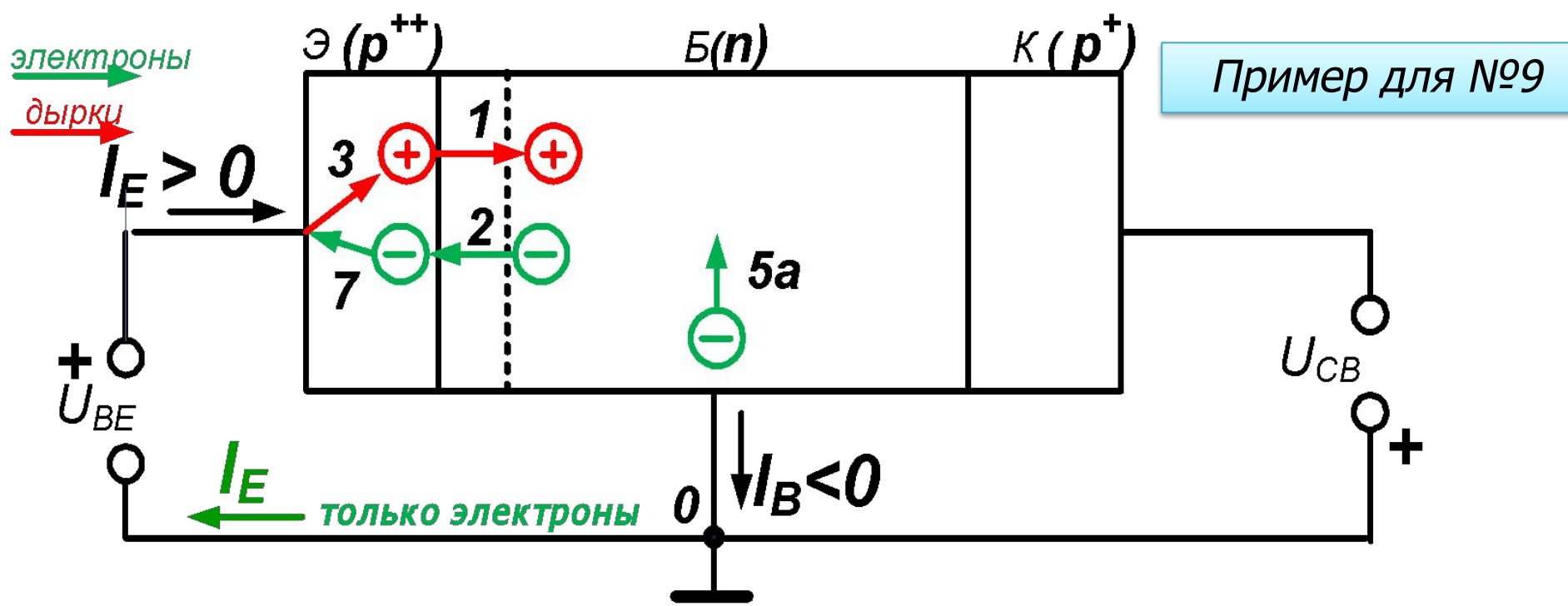
Независимо от типа БТ, схемы включения и режима работы:  
движение неосновных носителей по базе – диффузия,  
движение основных носителей по "своим" областям – дрейф,  
движение носителей во внешней цепи – дрейф электронов,  
переход носителей через открытый рп-переход – инжекция,  
переход носителей через закрытый рп-переход – экстракция,

### ВЫВОД

Движение носителей в обеих схемах включения описывается одинаково!!!

# 51. Описание движения носителей в ррр-БТ

- ❑ 1. На рисунке, отражающем движение носителей, следует поменять между собой графические обозначения электронов и дырок.
- ❑ 2. Направления стрелок оставить, т.к. они отражают направление движения.
- ❑ 3. Изменить на противоположные направления токов во внешних цепях.
- ❑ 4. В текстовом описании (ответе) взаимно заменяются слова "электроны" и "дырки." **НО!!! Во внешней цепи – только электроны**



## 52. Почему нигде не рассмотрен инверсный режим?

Нормальным режимом работы БТ в аналоговых устройствах является активный режим.

Режимы отсечки и насыщения могут возникнуть в формально правильной схеме по причинам:  
неправильный расчет значений параметров, чаще всего, сопротивлений резисторов,  
увеличение амплитуды входного сигнала в полностью правильной схеме

Инверсный режим отсутствует в любой формально правильной схеме, в которой коллектор при монтаже не перепутан с эмиттером

*Статические  
характеристики  
схемы с ОЭ*

Основные характеристики транзистора – функция всегда ток

$$\text{Входная: } I_{IN} = f(U_{IN})$$

$$\text{Выходная: } I_{OUT} = f(U_{OUT})$$

$$\text{Передаточная: } I_{OUT} = f(U_{IN}) \text{ или } I_{OUT} = f(I_{IN})$$

У БТ передаточная характеристика –

это просто число – значение  $K_{TR}$

$$I_{OUT} = K_{TR} \square I_{IN} \quad (K_{TR} \text{ – коэффициент передачи})$$

$$K_{TR} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{I_C}{I_B} = \beta \gg 1; \quad \left( \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right)$$

В схеме с ОЭ коэффициент передачи тока  $\gg 1$  (!!!)

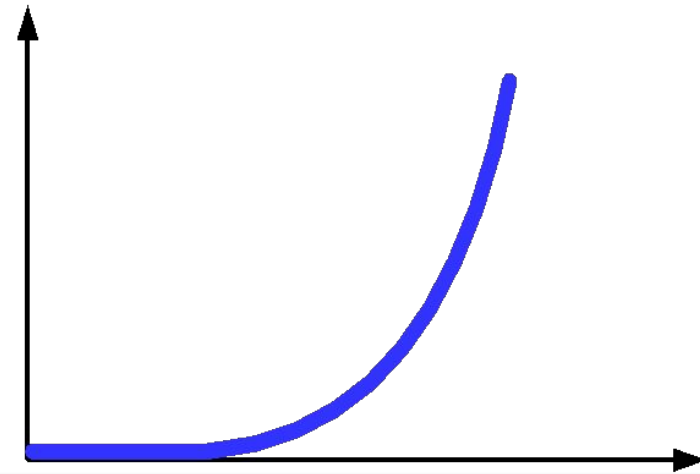
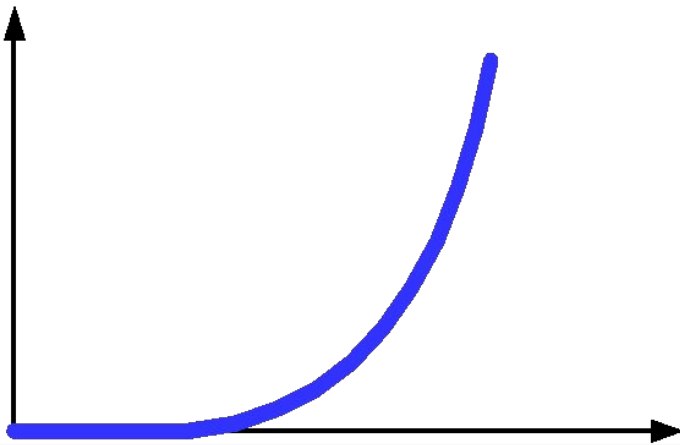
## 54. Входные характеристики БТ в схеме с ОЭ

Входная характеристика **аналогична** прямой ветви ВАХ рп-перехода Б-Э

Но формулой

$$I_E \approx I_{BE0} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{\varphi_T}}$$

описывается ток  $I_B \ll I_E$



Тип БП опознается по знакам  $I_B$  и  $U_{BE}$

Отличия от схемы с ОБ

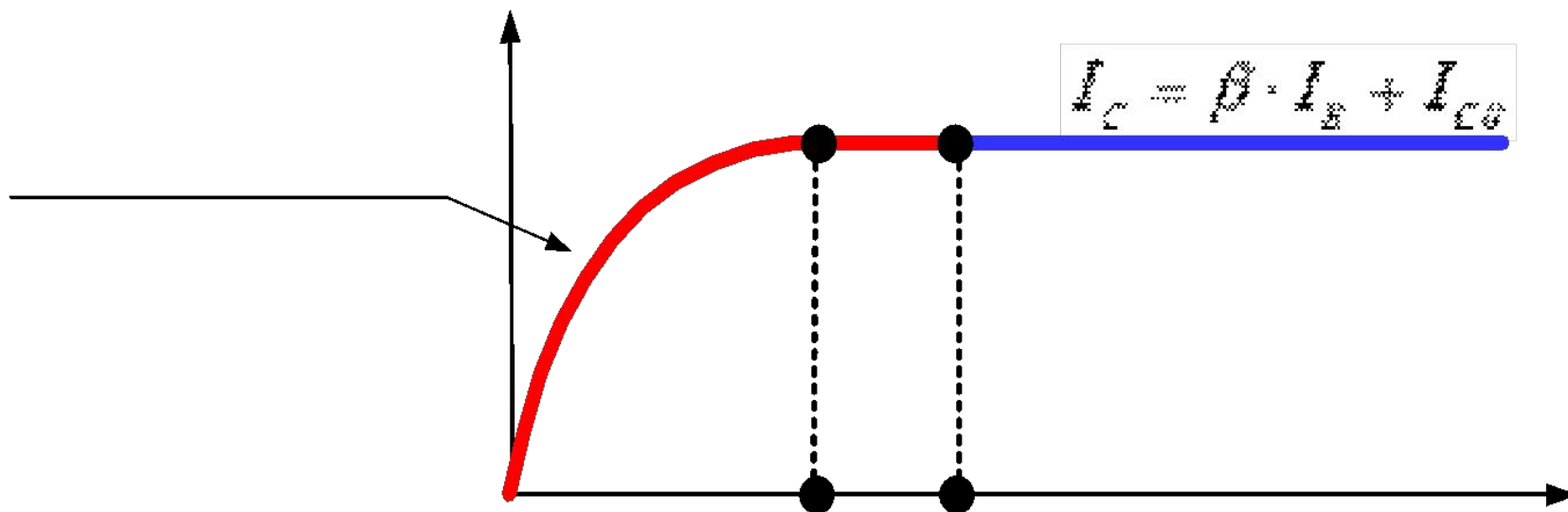
У-координата  $I_B$   
значения токов  $\sim$  в (50 – 500) раз меньше, чем в схеме с ОБ

## 55. Одиночная выходная характеристика для схемы с ОЭ.

При значении  $U_{CE} > U_{BE} \approx 0.7V$  возникает  $U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} > 0$ .  
Переход Б-К закрыт, БТ в АР с  $I_C = \beta \cdot I_B$

При снижении  $U_{CE}$  до значения  $U_{BE} \approx 0.7V$  возникает  $U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} = 0V$ .

При дальнейшем снижении  $U_{CE}$  возникает  $U_{CB} < 0$ , открывающее рп-переход  
Появляется ток инжекции  $I_{CB(inj2)}$  через рп-переход К-Б.  
Ток инжекции вычитается из  $I_C$ ; он растет с уменьшением  $U_{CE}$   
При уменьшении  $U_{CE}$  растет  $|U_{CB}|$ , оставаясь  $U_{CB} < 0$   
При  $U_{CE} \approx U_{BE}$  общий ток  $I_C$  становится = 0





## 56. Характеристики БТ в схеме с ОЭ с параметром $I_{IN}=I_B$

4' ' 11

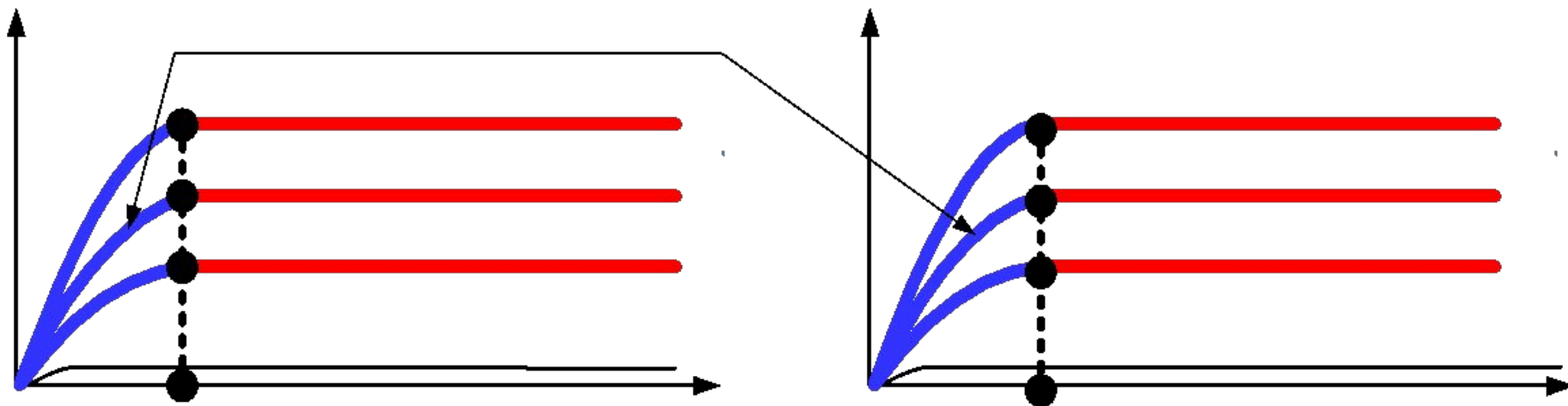
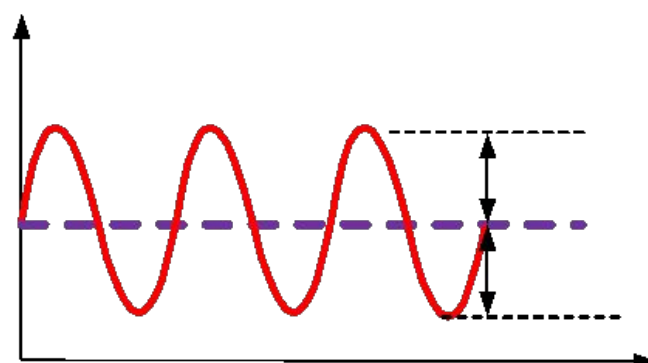
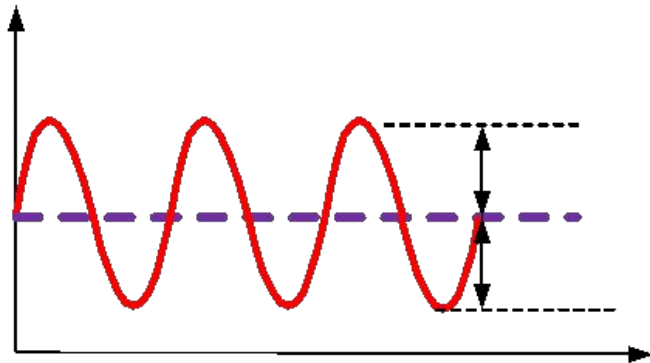
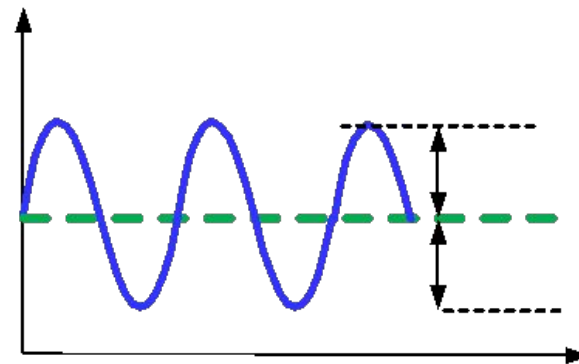
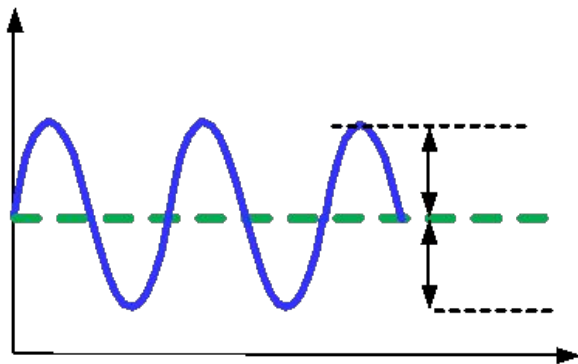


Схема включения – начало СВХ в точке начала координат  
Тип транзистора – знаки величин на осях.

Крутая часть ВХ – режим двойной инжекции  
Пологая часть ВХ – активный режим.

*Малосигнальные  
параметры БТ*



Коэффициенты, связывающие между собой значения токов и напряжений АС (сигналов), называют малосигнальными параметрами.

Полагается, что  $i_{AC,MAX} \ll I_{DC}$ ,  $u_{AC,MAX} \ll U_{DC}$

## 58. Общий подход к понятию "малосигнальные параметры"



Связь между АС-током и АС-напряжением, действующими на одной стороне объекта – это динамическое сопротивление или сопротивление переменному току, размерность  $[\Omega]$

$$r_{IN} = \frac{u_{IN}}{i_{IN}} ; \quad r_{OUT} = \frac{u_{OUT}}{i_{OUT}}$$

Связь между АС-током и АС-напряжением, действующими на разных сторонах объекта – это крутизна, размерность  $[A/V]$  или  $[\Omega^{-1}]$ , чаще всего  $[mA/V]$

$$S = \frac{i_{OUT}}{u_{IN}} ; \quad S_R = \frac{i_{IN}}{u_{OUT}}$$

## 59. Связь между токами и напряжениями (неструктурированная)



$$i_{IN} = \frac{1}{r_{IN}} \cdot u_{IN} + S_R \cdot u_{OUT}$$

$$i_{OUT} = S \cdot u_{IN} + \frac{1}{r_{OUT}} \cdot u_{OUT}$$

В обоих случаях 1-е слагаемое  $\gg$  2-го, т.е. влияние входа на выход намного сильнее, чем обратное влияние.

**!!!** Это утверждение нельзя применить к любому объекту, НО для БТ оно вполне справедливо.

## 60. Система у-параметров БТ, как 4-полюсника (01)



При представлении БТ, как абстрактного четырехполюсника:

1. Токи и напряжения имеют цифровые индексы: 1 для  $I_N$ , 2 для  $O_U$
2. Связь между токами и напряжениями описывается некоторой системой параметров.
3. Если в качестве независимых величин выбраны  $u_1 = u_{IN}$  и  $u_2 = u_{OUT}$ , то параметры носят названия  $y$ -параметров

Токи и напряжения в системе  $y$ -параметров

$$i_1 = y_{11} \cdot u_1 + y_{12} \cdot u_2$$

$$i_2 = y_{21} \cdot u_1 + y_{22} \cdot u_2$$

Фактически это повторение уравнений в №59, только в другом представлении.

## 61. Система у-параметров БТ, как 4-полюсника (02)



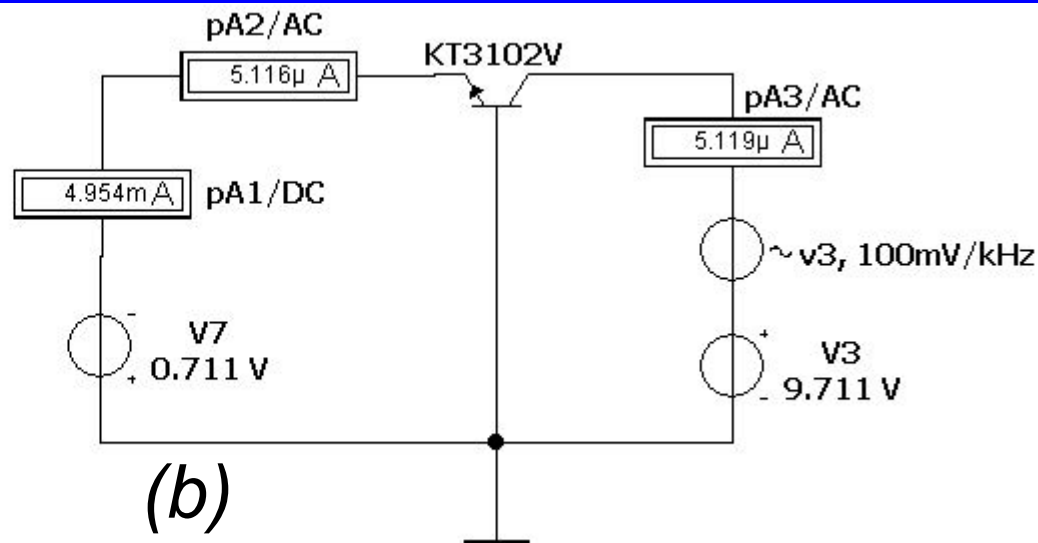
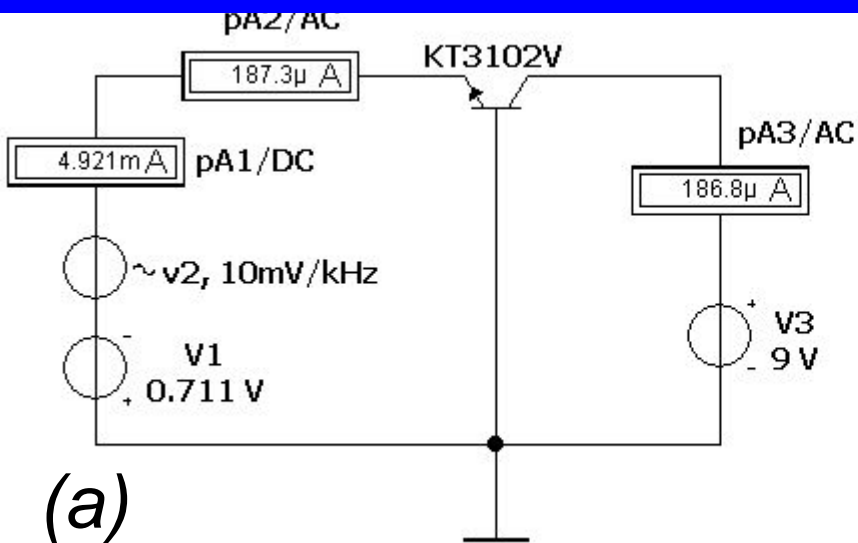
$$i_1 = y_{11} \cdot u_1 + y_{12} \cdot u_2$$

$$i_2 = y_{21} \cdot u_1 + y_{22} \cdot u_2$$

Все значения  $y_{11}$ ,  $y_{12}$ ,  $y_{21}$ ,  $y_{22}$  имеют физический смысл – проводимость:  
 $y_{11}$  – входная проводимость, величина обратная  $r_{IN}$ ,  
 $y_{12}$  – обратная передаточная проводимость (обратная крутизна),  
 $y_{21}$  – передаточная проводимость (крутизна),  
 $y_{22}$  – выходная проводимость, величина обратная  $r_{OUT}$

Значения  $u_1$ ,  $u_2$  – задаются. значения  $i_1$ ,  $i_2$  – измеряются.  
Значения  $y$  рассчитываются в условиях измерений:

- $y_{11}$ ,  $y_{21}$  – при  $u_2=0$ , т.е. КЗ на выходе,
- $y_{12}$ ,  $y_{22}$  – при  $u_1=0$ , т.е. КЗ на входе.



(a) –  $u_2=0$ , режим КЗ а выходе по переменному току (!!!)

$$y_{11} = \frac{i_1}{u_1} = \frac{pA2}{v_2}$$

$$y_{21} = \frac{i_2}{u_1} = \frac{pA3}{v_2}$$

(b) –  $u_1=0$ , режим КЗ а входе по переменному току (!!!)

$$y_{12} = \frac{i_1}{u_2} = \frac{pA2}{v_3}$$

$$y_{22} = \frac{i_2}{u_2} = \frac{pA3}{v_3}$$



## 63. Проблемы при измерении $u$ -параметров

Режим КЗ по переменному току обеспечивается применением источника постоянного напряжения с малым внутренним сопротивлением, т.е. вполне решаемая задача.

**НО!** подключение на входе источника напряжения к рп-переходу означает, что для режима DC ток будет изменяться по закону

$$I_E \approx I_{E0} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{N \cdot \Phi_T}}$$

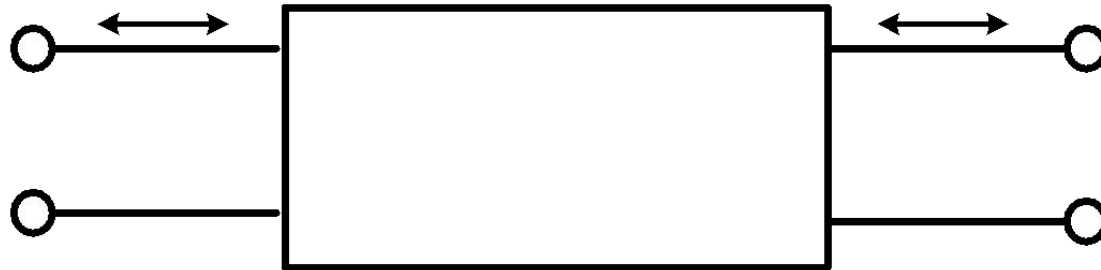
$1 < N < 2$  – эмпирическая величина  
для каждой модели БТ

Выводы:

- для модели с неизвестными параметрами значение  $I_E$  может быть только подобрано изменением  $V_{DC}$  на входе,
- даже подбор значения  $V_{DC}$  для требуемого значения  $I_E$  на одном экземпляре модели, не гарантирует точного повтора на другом экземпляре такой же модели,
- источник DC должен иметь точность регулировки не хуже, чем 0.01V

*h-параметры БТ,  
как 4-полюсника*

## 64. Система $h$ -параметров БТ, как 4-полюсника



В качестве независимых величин выбирают входной ток  $i_1$  выходное напряжение  $u_2$ .

Коэффициенты, связывающие токи и напряжения, называются  $h$ -параметры.

$$u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2$$

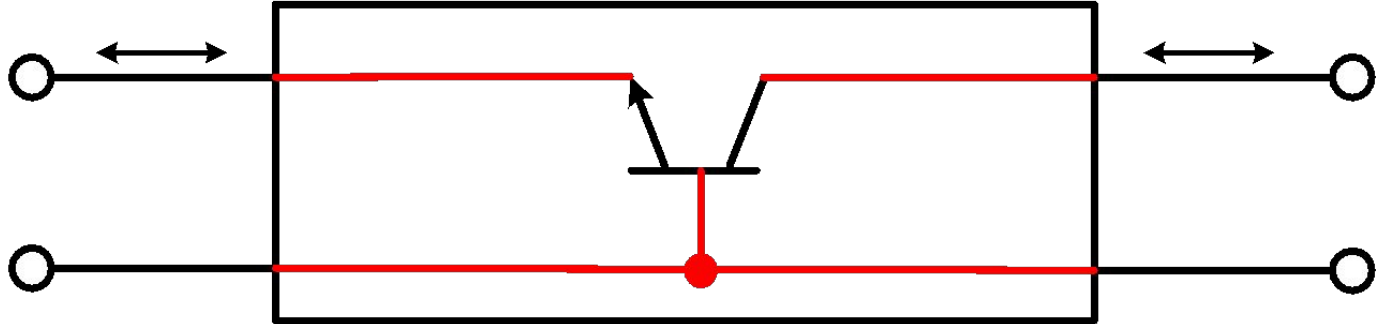
$$i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2$$

Значения  $i_1, u_2$  – задаются, значения  $i_2, u_1$  – измеряются.

Значения  $h$  рассчитываются в условиях измерений:

- $h_{11}, h_{21}$  – при  $u_2=0$  – КЗ на выходе **по переменному току (!!!)**
- $h_{12}, h_{22}$  – при  $i_1=0$  – обрыв на входе **по переменному току (!!!)**

65. Физический смысл  $h$ -параметров по схеме включения ОБ



$$u_1 = h_{11b} \cdot i_1 + h_{12b} \cdot u_2$$
$$i_2 = h_{21b} \cdot i_1 + h_{22b} \cdot u_2$$

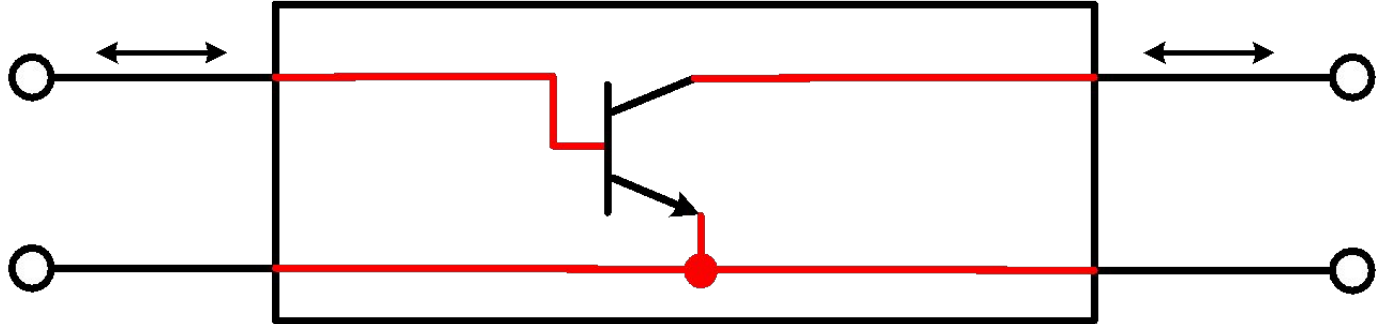
В условиях  $u_2=0$ , т.е. КЗ на выходе

$$h_{11b} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{u_{IN}}{i_{IN}}; \quad h_{21b} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{i_{OUT}}{i_{IN}}$$

В условиях  $i_1=0$ , т.е. обрыв на входе

$$h_{12b} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{u_{IN}}{u_{OUT}}; \quad h_{22b} = \frac{i_2}{u_2} = \frac{i_{OUT}}{u_{OUT}}$$

66. Определение значений h-параметров по схеме включения ОЭ



$$u1 = h11e \cdot i1 + h12e \cdot u2$$
$$i2 = h21e \cdot i1 + h22e \cdot u2$$

В условиях  $u2=0$ , т.е. КЗ на выходе

$$h11e = \frac{u1}{i1} = \frac{u_{IN}}{i_{IN}}; \quad h21e = \frac{i2}{i1} = \frac{i_{OUT}}{i_{IN}}$$

В условиях  $i1=0$ , т.е. обрыв на входе

$$h12e = \frac{u1}{u2} = \frac{u_{IN}}{u_{OUT}}; \quad h22e = \frac{i2}{u2} = \frac{i_{OUT}}{u_{OUT}}$$

В условиях  $u_2=0$ , т.е. КЗ на выходе

$$h_{11}(b, e) = \frac{u_1}{i_1} = \frac{u_{IN}}{i_{IN}}$$

Входное сопротивление  $r_{IN}$

$$h_{21}(b, e) = \frac{i_2}{i_1} = \frac{i_{OUT}}{i_{IN}}$$

Коэффициент передачи тока:  
 $h_{21b}$ , как  $\alpha$   
 $h_{21e}$ , как  $\beta$

В условиях  $i_1=0$ , т.е. обрыв на входе

$$h_{12b} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{u_{IN}}{u_{OUT}}$$

Коэффициент обратной  
 передачи напряжения  
 $u_{IN}/u_{OUT}$

$$h_{22b} = \frac{i_2}{u_2} = \frac{i_{OUT}}{u_{OUT}}$$

Выходная проводимость  $1/r_{OUT}$

## 68. Коэффициенты передачи тока в режиме АС

Определения коэффициентов передачи тока в режиме АС полностью аналогичны определениям в режиме DC.

Аналог  
коэффициента  $\alpha$   
для схемы с ОБ.

$$h_{21b} = \frac{i_{OUT}}{i_{IN}} = \frac{i_C}{i_E} < 1 \quad (h_{21b} \approx 1)$$

Аналог  
коэффициента  $\beta$   
для схемы с ОЭ.

$$h_{21e} = \frac{i_{OUT}}{i_{IN}} = \frac{i_C}{i_B} \gg 1$$

Связь между коэффициентами такая же, как между  $\alpha$  и  $\beta$ .

$$h_{21b} = \frac{h_{21e}}{h_{21e} + 1}; \quad h_{21e} = \frac{h_{21b}}{1 - h_{21b}}$$

## 69. Измерение **значений** коэффициентов передачи (1)

Коэффициенты передачи тока в режиме АС **не имеют формул** для аналитического вычисления. Их значения определяются **только отношениями токов** и могут быть получены **только экспериментально**, (т.е. измерены).

**!!!** На практике при необходимости получения значений  $\beta$  и  $\beta$  их тоже не рассчитывают, а измеряют

Как проводить измерения коэффициентов передачи?

"Очевидный" ответ:  $\beta$  и  $h_{21b}$  в схеме с ОБ, а  $\beta$  и  $h_{21e}$  – в схеме с ОЭ. Такое решение вызывает определенные неудобства.

**!!!** Схема БТ-ОБ гораздо более удобна для любых измерений, хотя измерять всегда **требуется** коэффициенты передачи для БТ-ОЭ

Коэффициенты передачи для БТ-ОБ сохраняют значение  $\approx 1$  для всех БТ и в широком диапазоне влияющих факторов.

Напротив, коэффициенты передачи для БТ-ОЭ не только подвержены влиянию различных факторов, но даже имеют разброс в пределах разных экземпляров одной модели БТ



*Некоторые практические  
аспекты измерения  
h-параметров*

## 70. Почему определение коэффициентов удобнее проводить в схеме с ОБ?

Значения коэффициентов зависят от частоты, температуры и режима. За показатель режима принято считать значение  $I_{E.OP}$  в режиме DC, которое задается параметрами внешней цепи:

- в схеме с ОБ на входе задается непосредственно значение  $I_{E.OP}$ ,
- в схеме с ОЭ на входе задается непосредственно значение  $I_{B.OP}$ , а значение  $I_{E.OP}$  получается через неизвестный заранее коэффициент передачи, т.е. необходим подбор для получения требуемого значения.

**!!!** Установка амперметра в цепи базы для схемы с ОБ формально выводит эту схему из класса 4-полюсника, но на достоверность результатов никак не влияет.

Идентичность результатов получается только при измерении коэффициентов  $h_{11}(b,e)$  и  $h_{21}(b,e)$ , определяемых в режиме КЗ на выходе.

Но коэффициенты  $h_{12}(e,b)$  и  $h_{22}(e,b)$  имеют очень малые значения. Влиянием этих факторов обычно пренебрегают

## 71. Что такое "КЗ на выходе" и "обрыв на входе" в реальных измерениях?

Понятия "КЗ на выходе" и "обрыв на входе" относятся только к переменным сигналам.

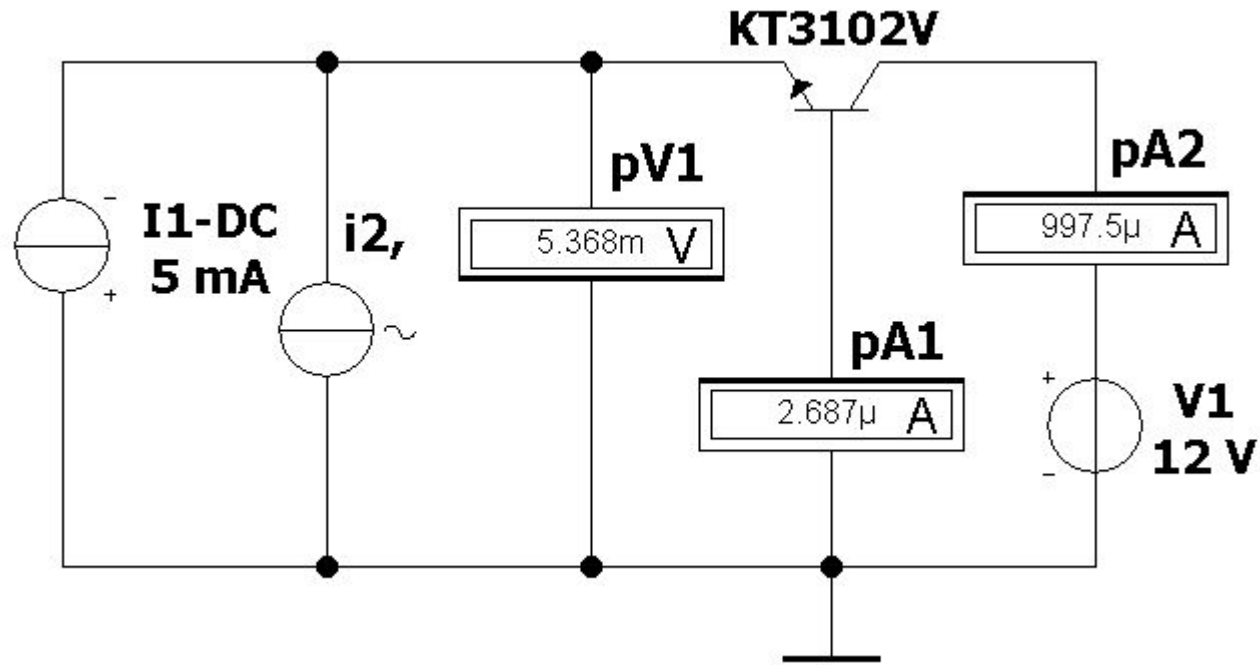
При одновременном действии АС- и DC-токов и напряжений:

- источник DC-напряжения на выходе представляет собой КЗ для последовательно соединенного с ним источника АС-напряжения,
- источник DC-тока на входе оказывает бесконечно большое сопротивление любой попытке изменить этот ток, т.е. представляет собой обрыв для источника АС-тока

Конкретная реализация источника DC-тока на входе:

- в Л.Р.№3 используется идеальный источник тока из программы, позволяющий непосредственно задавать значение  $I_E$ ,
- в Л.Р. №4 (и вообще на практике) для создания приближения к источнику тока используется простая схема с расчетным значением  $I_E$  независимо от модели БТ.

## 72. Идеальная схема для измерений при КЗ на выходе



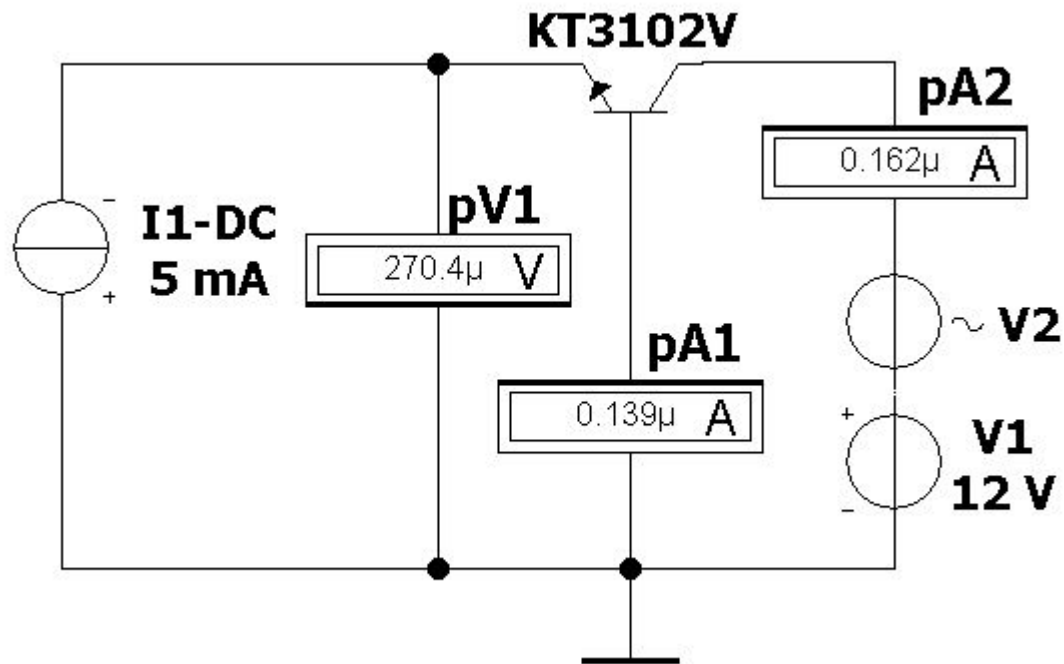
$$h_{11b} = \frac{u_E}{i_E} = \frac{pV1}{i2} \approx 5.4 \Omega$$

$$h_{21b} = \frac{i_C}{i_E} = \frac{pA2}{I2} \approx 0.997$$

$$h_{11e} = \frac{u_E}{i_B} = \frac{pV1}{pA1} \approx 2 k\Omega$$

$$h_{21e} = \frac{i_C}{i_B} = \frac{pA2}{pA4} \approx 364$$

# 73. Идеальная схема для измерений при обрыве на входе



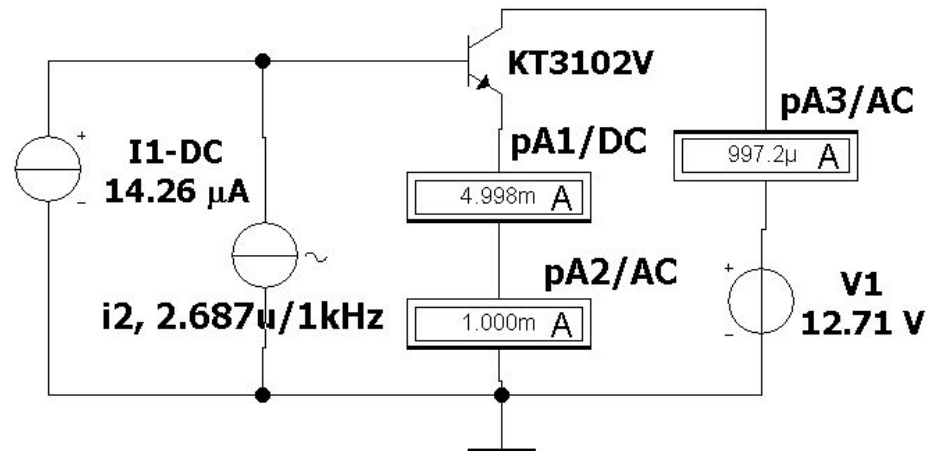
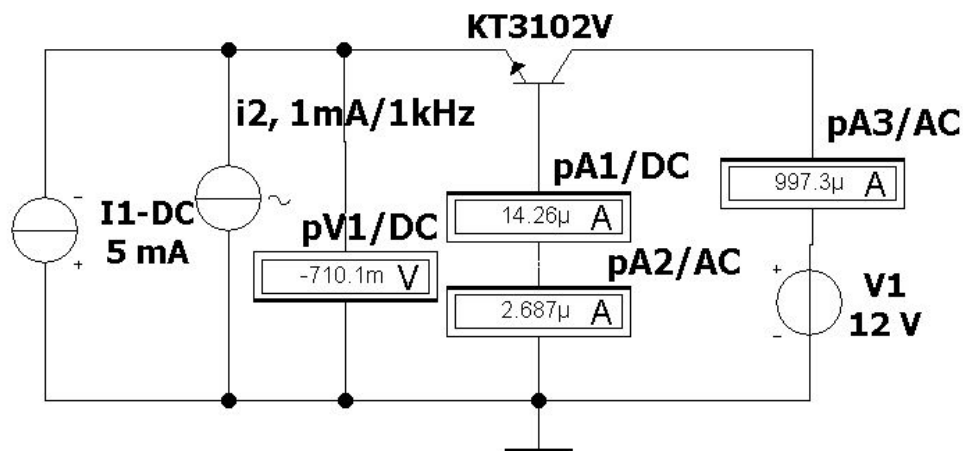
$$h_{12b} = \frac{u_E}{u_C} = \frac{pV1}{v2} \approx 2.7 \cdot 10^{-4}$$

$$h_{22b} = \frac{i_C}{u_C} = \frac{pA2}{v2} \approx 1.6 \cdot 10^{-7} \left[ \Omega^{-1} \right]$$

Соответствует значению

$$r_{OUT} \approx 6 \cdot 10^6 \Omega$$

# 74. Получение идентичности для схем ОБ и ОЭ (Л.Р.№3)



## Идентичность по DC:

- установить  $I1_{ОЭ} = I_{B(ОЭ)} = I_{B(ОБ)} = pA1$
- установить  $V1_{ОЭ} = U_{CB(ОБ)} + U_{EB(ОБ)} = V1_{ОБ} + |pV1|$
- тогда получается:  $U_{CB(ОЭ)} = U_{CB(ОБ)}$

В результате должно получиться:

для постоянных токов эмиттера в обеих схемах:  $I1_{ОБ} = pA1_{ОЭ}$

для постоянных токов базы в обеих схемах:  $pA1_{ОБ} = I1_{ОЭ}$

для переменных токов эмиттера в обеих схемах:  $i2_{ОБ} = pA2_{ОЭ}$

для переменных токов базы в обеих схемах:  $pA2_{ОБ} = i2_{ОЭ}$

***END-EL#04!!!***