

БИПОЛЯРНЫЕ

ТРАНЗИСТОРЫ (БТ)

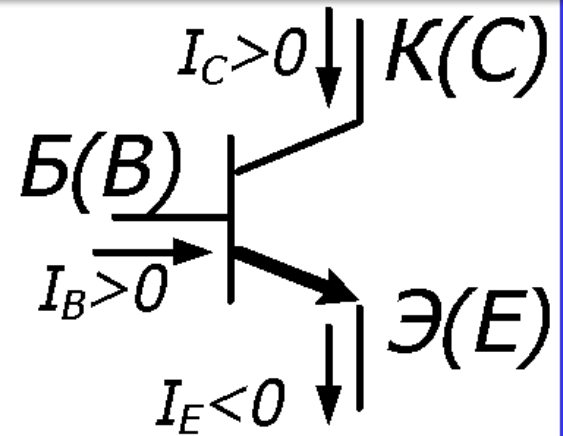
BJT (Bipolar Junction Transistor)

Принципы работы.

1. Структура и УГО транзистора. Направление токов.

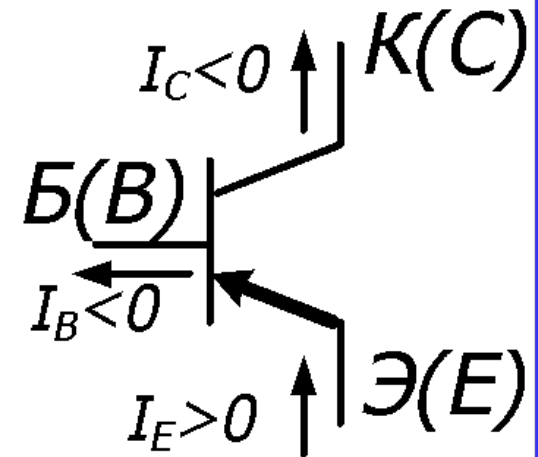
npn - транзистор

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



pnp - 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 (npn) и наоборот (pnp)

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

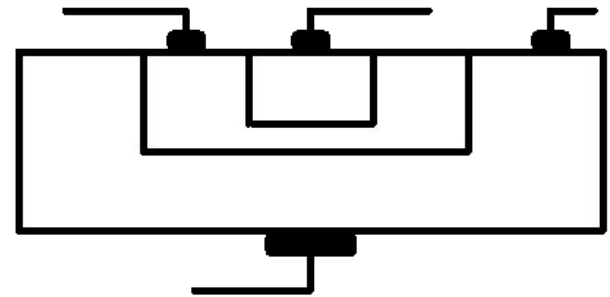
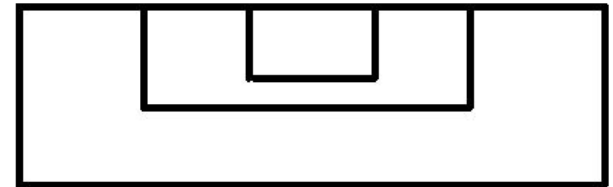
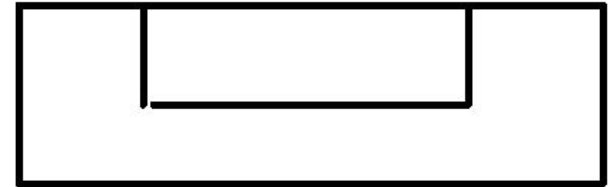
Транзистор – это **две** структуры с рп-переходами:

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)



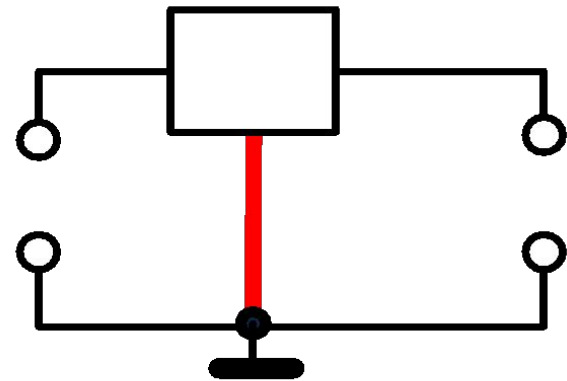
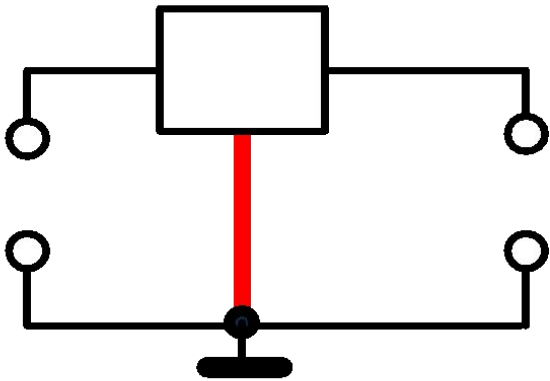
*Схемы включения БТ и
режимы работы.*

4.

Схемы включения БТ

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

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



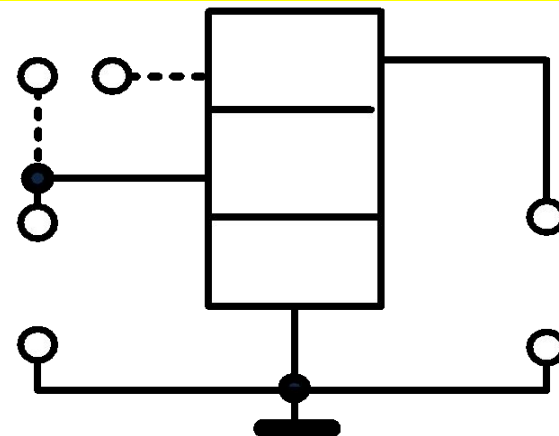
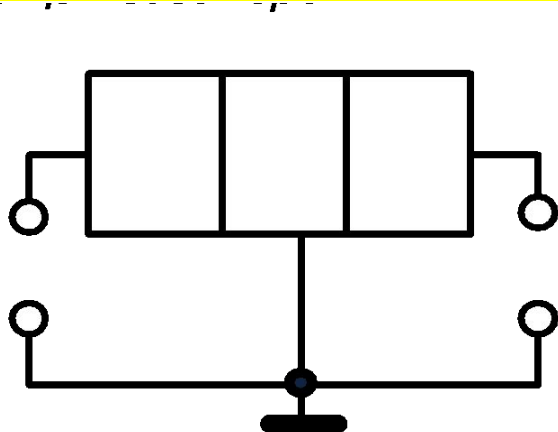
Понятие "**схема включения**" не зависит от типа транзистора **npn/pnp**;
поэтому на рисунке нет конкретного УГО.

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

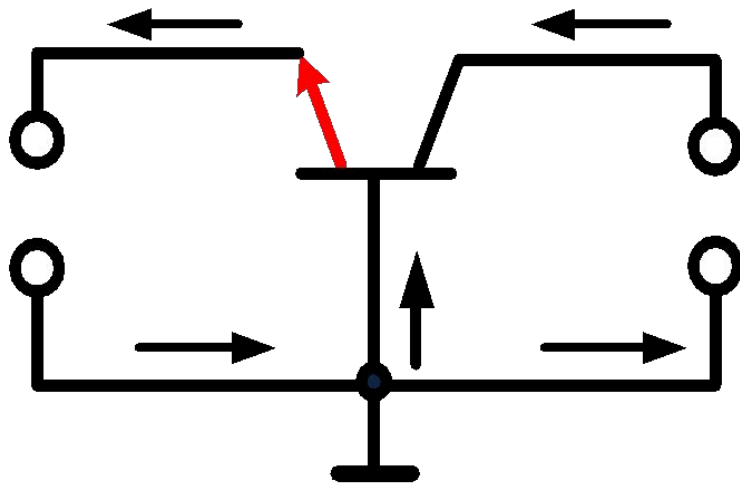
Конкретный знак напряжений на рп-переходах (но не их состояние!) определяется **типом БТ** – **npn** или **pnp** и схемой включения ОБ или ОЭ.

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

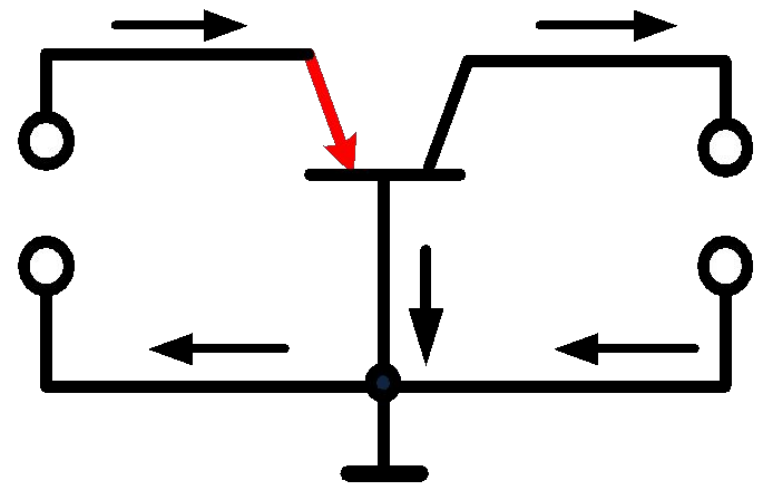
6. Соответствия в схемах для различных типов транзисторов.

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.

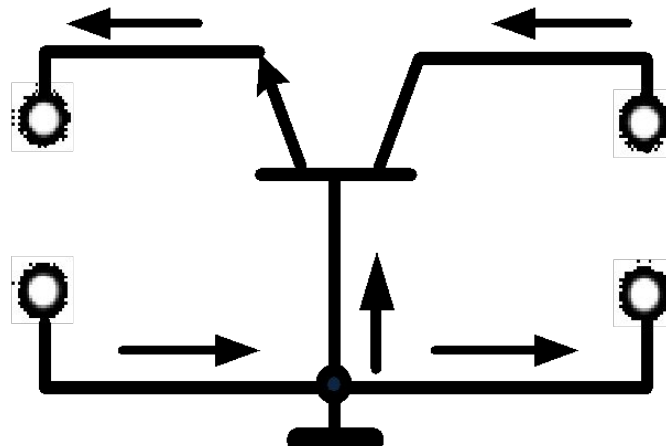


Режим БТ-npn,
соответствующий состояниям:
Э-Б открыт, К-Б закрыт



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 → электрон + дырка (в БТ почти не влияет)

рекомбинация: электрон + дырка → 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

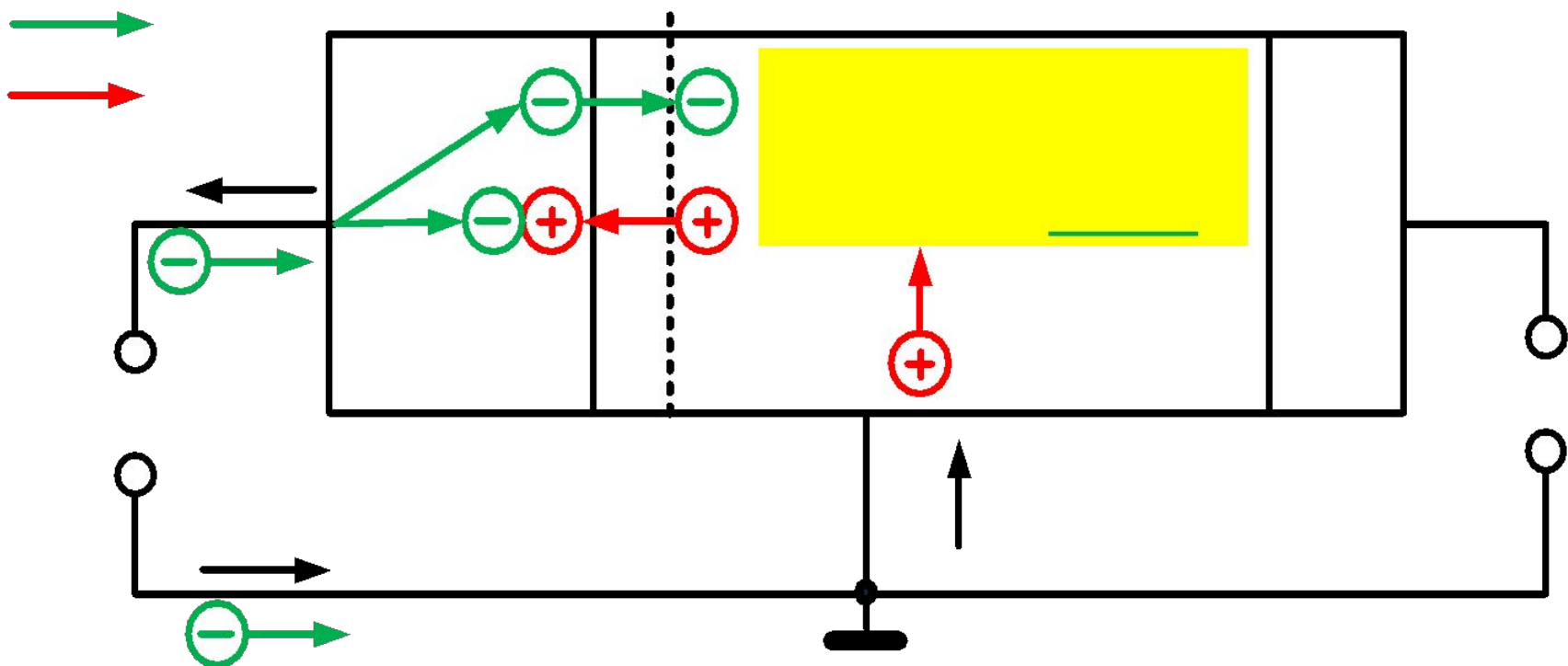
3. Движение по области

А. Диффузия – движение носителей по базе после инжекции под влиянием grad концентрации в базе Э → 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!)

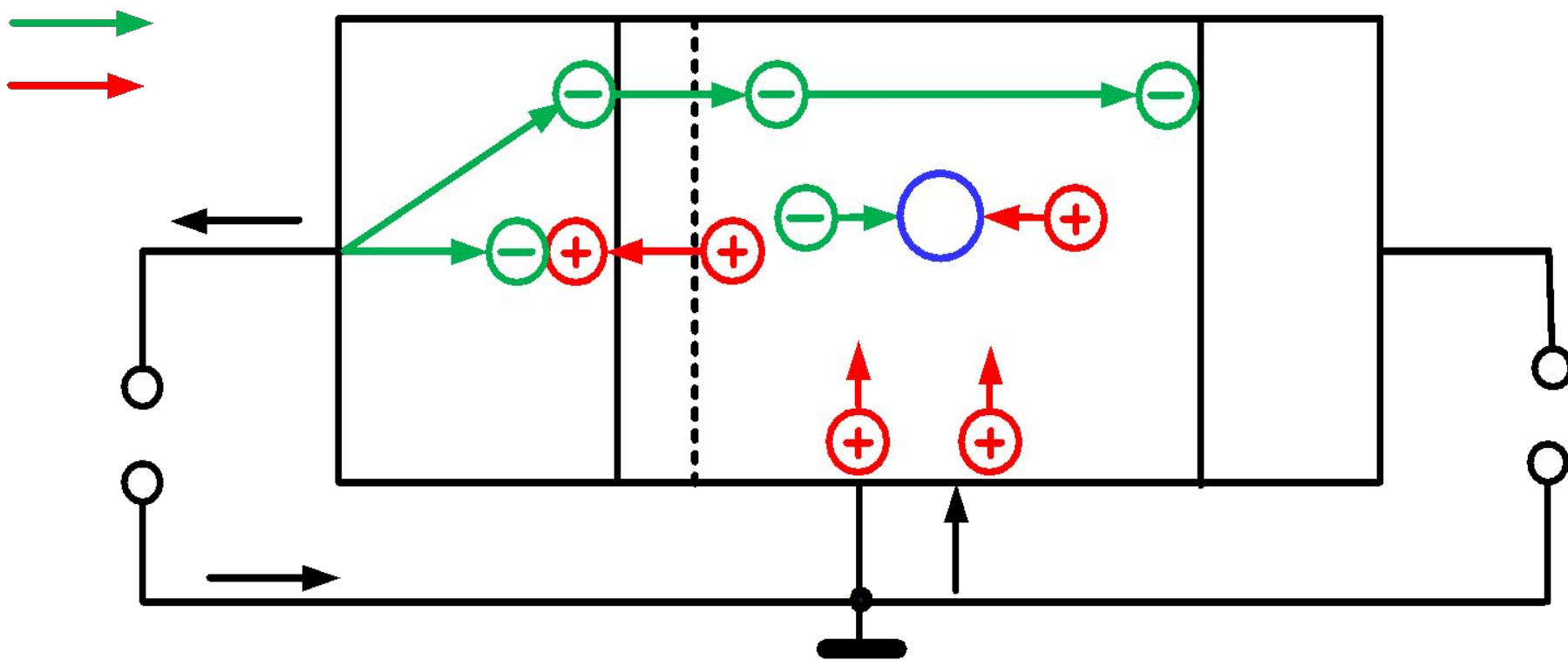
Неравновесная концентрация электронов, инжектируемых в базу из эмиттера, очень мала:

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)**

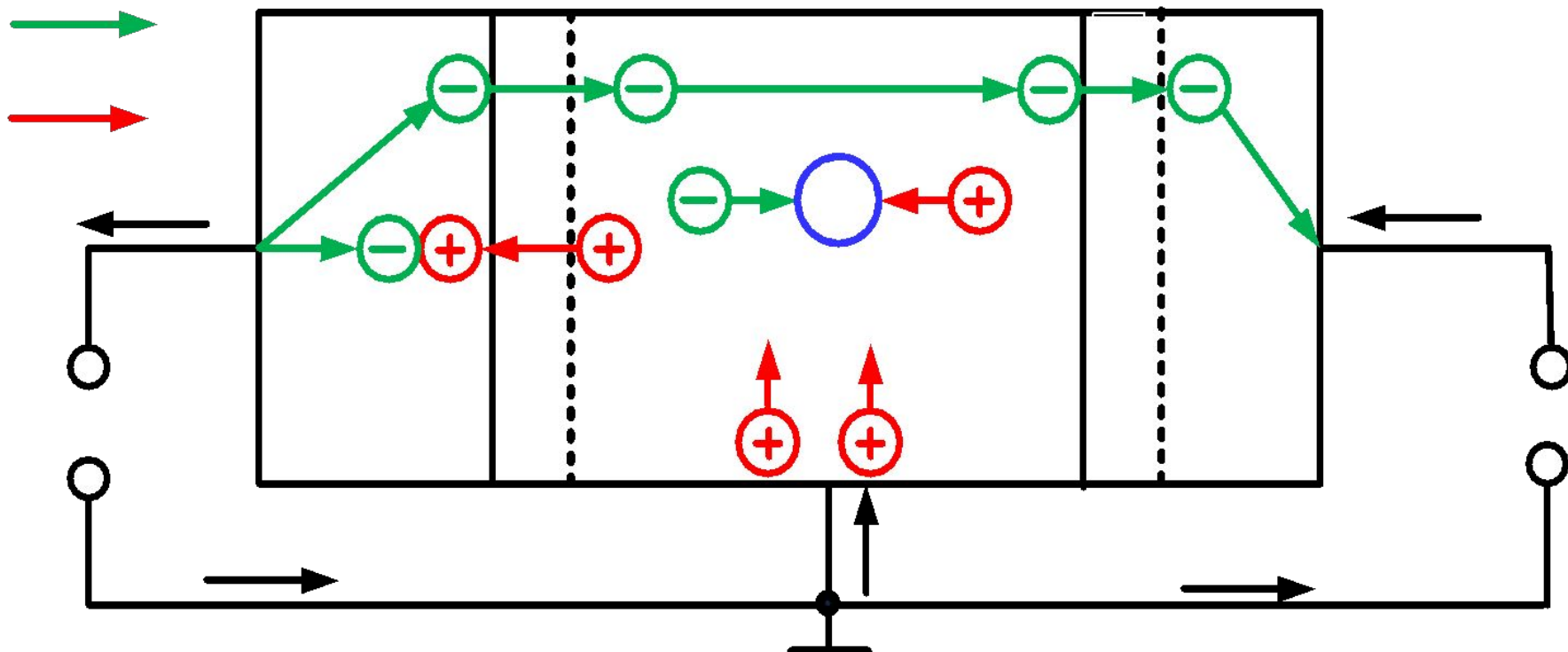
7 – рекомбинация электронов и дырок - потеря ОН-дырок

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(!!!) рп-переход К-Б.



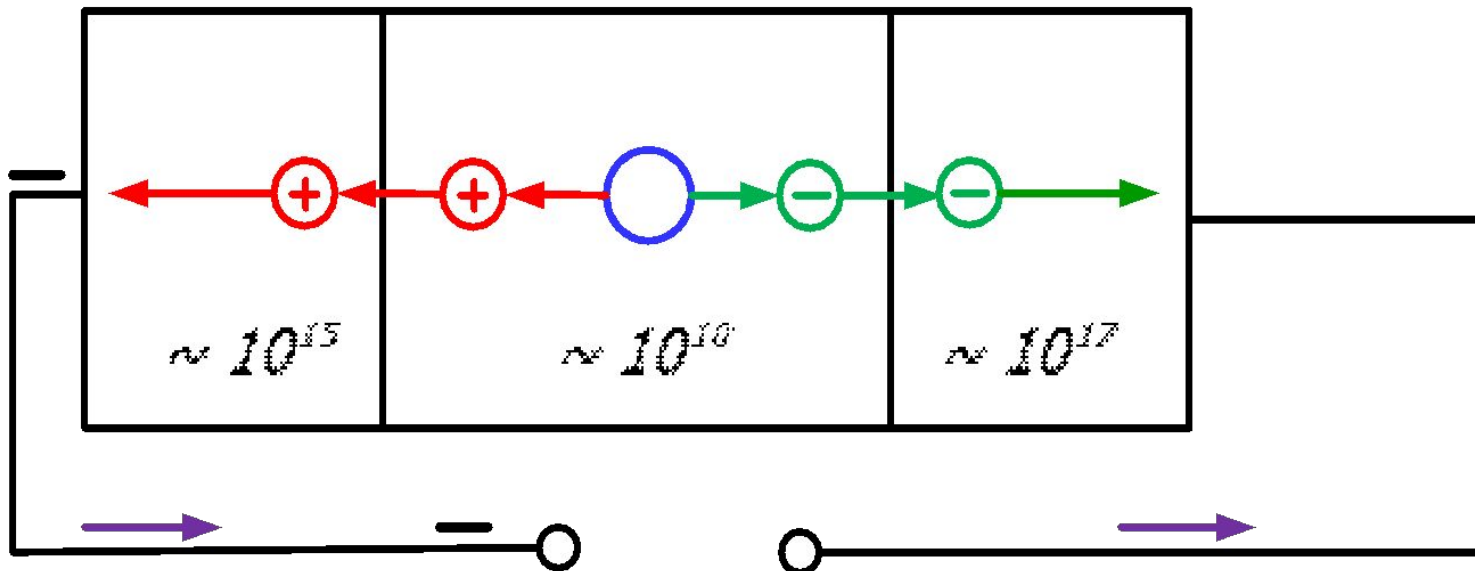
3=(8–9)– экстракция электронов из базы через рп-переход

!!! 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

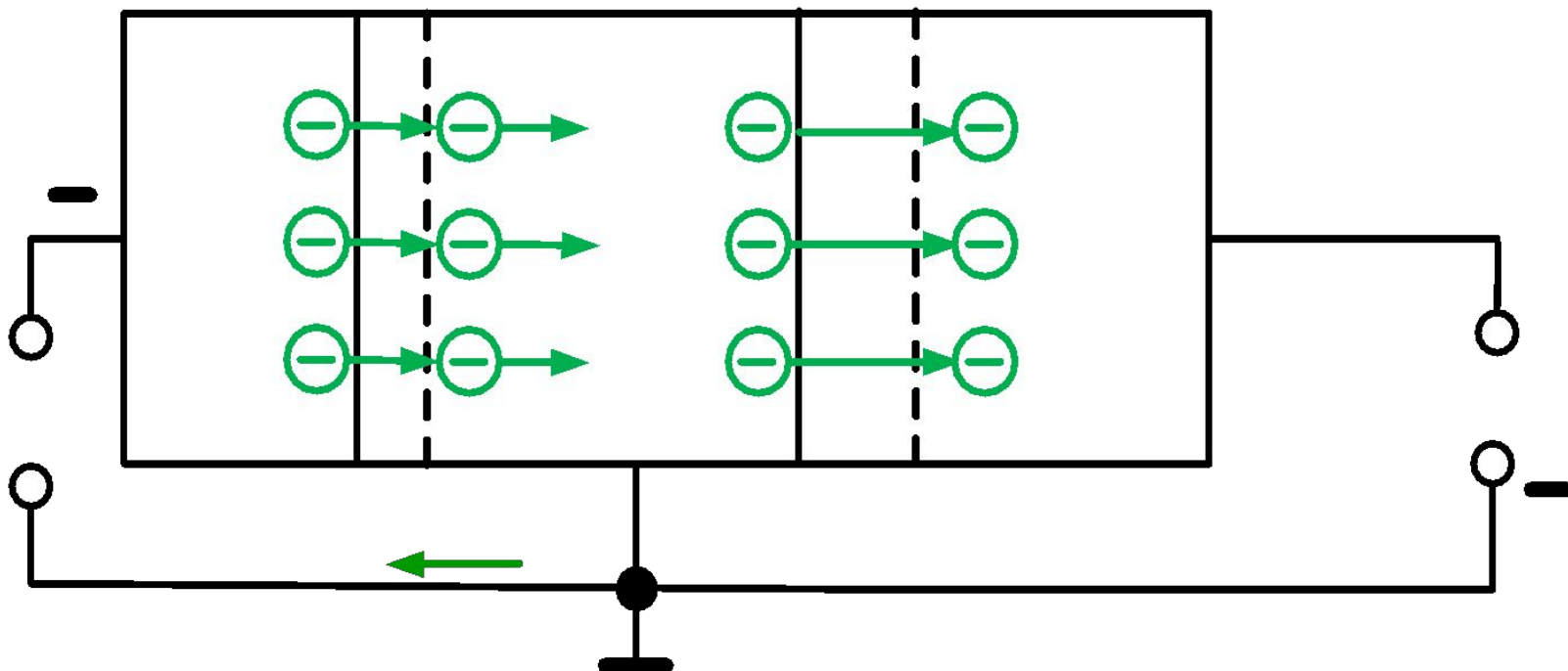


При обратном включении диода внешнее поле может переносить через pn-переход только электроны из **p** в **n** или дырки из **n** в **p**, а их там НЕТ

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 **npn-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 npn $I_B > 0$

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

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.

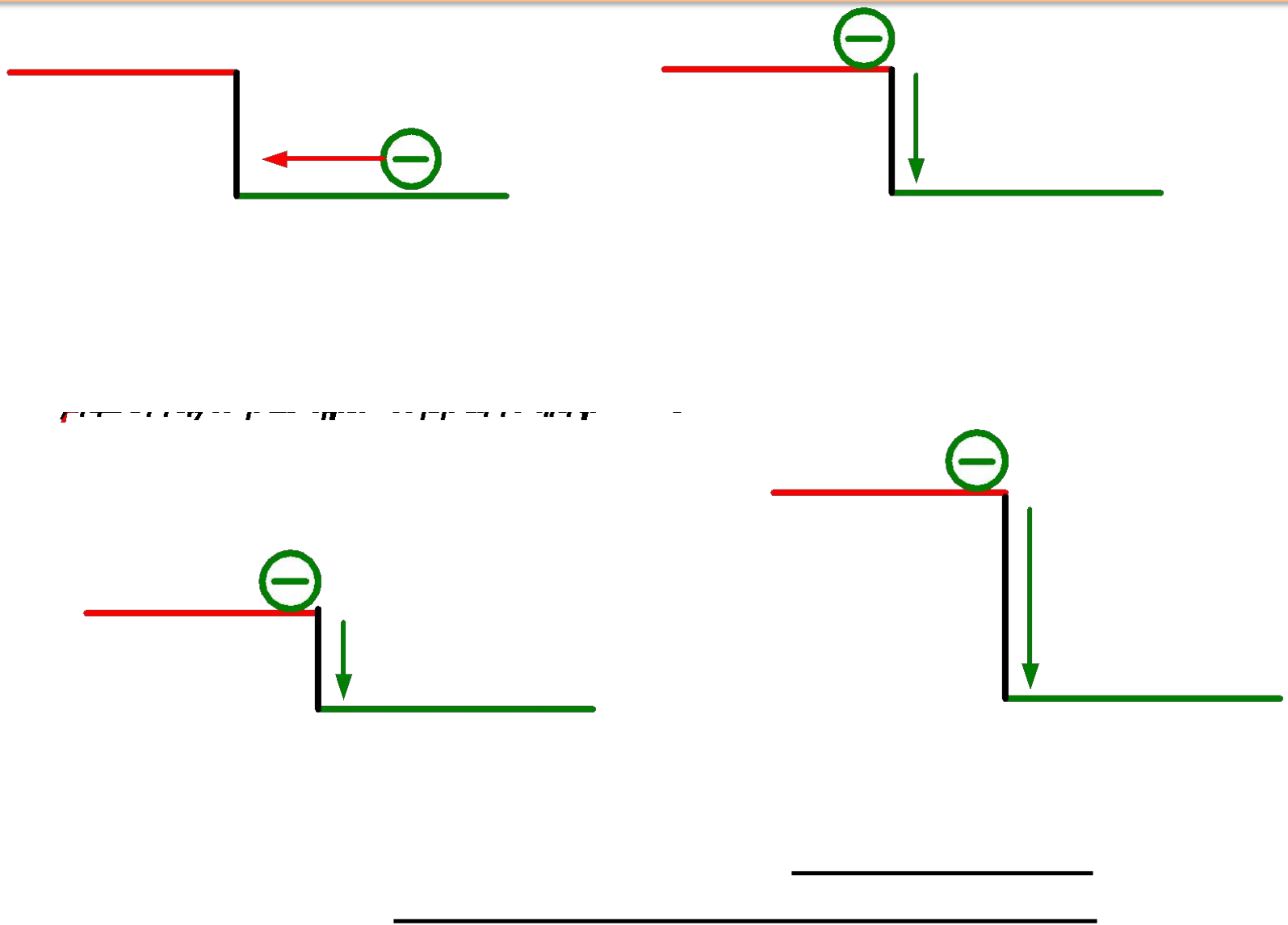
Это количество, в свою очередь, равно количеству носителей, перешедших из эмиттера в базу путем инъекции и прошедших через базу путем диффузии минус потери на рекомбинацию.

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 инжекции 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}



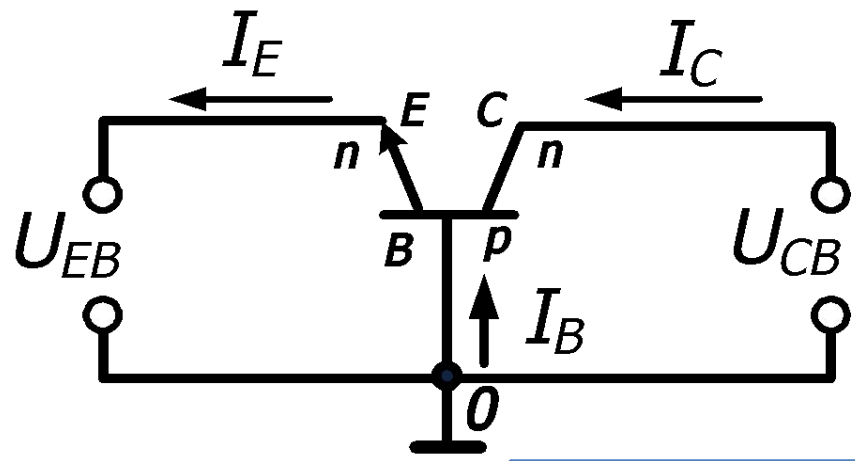
А электронов подойдет столько, сколько их инжектируется в базу под воздействием напряжения U_{EB} (минус потери на рекомбинацию)

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

$$U_{OUT} = U_{CB}$$

$$I_{OUT} = I_C$$

$$I_E = I_C + I_B$$

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

α – коэффициент передачи постоянного тока в схеме с ОБ

$$I_B \ll I_E, \text{ но } I_B \neq 0$$

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

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 α зависит от исходных параметров ПП
и технологии изготовления

Величина α 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

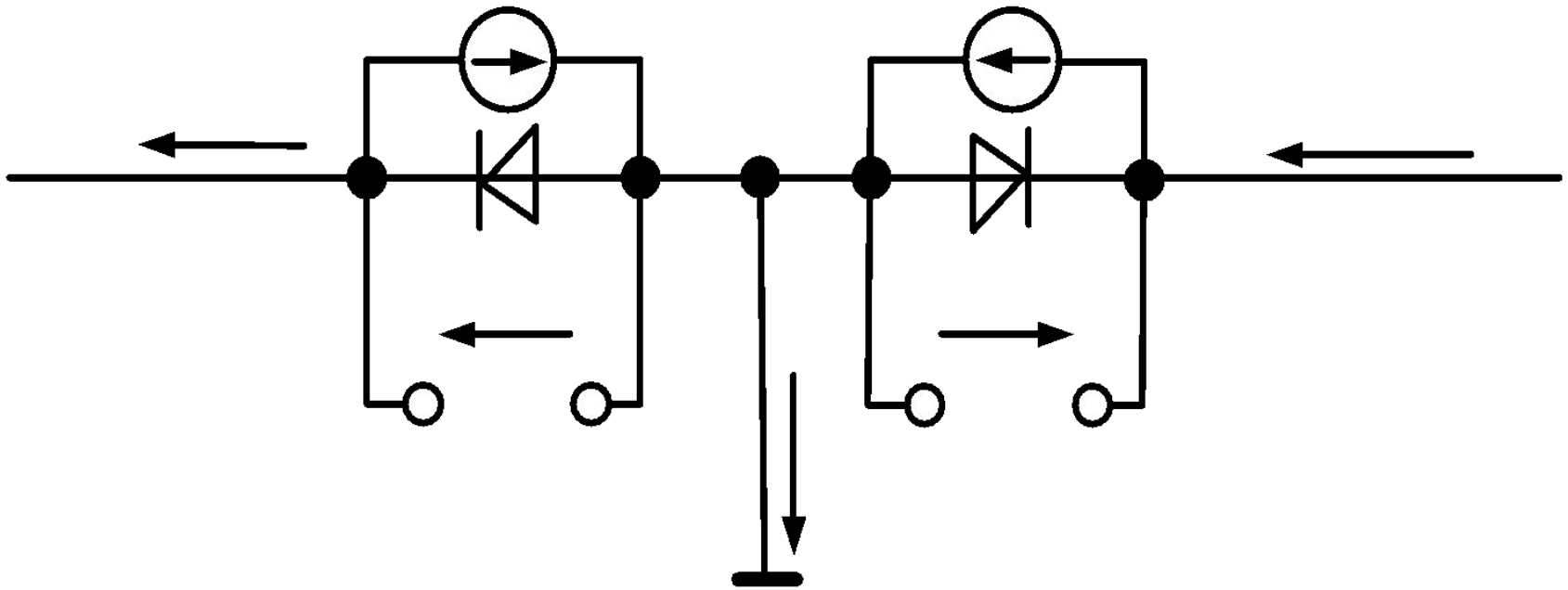
$$\theta = \frac{I_C}{\gamma \cdot I_E} \approx 1$$

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

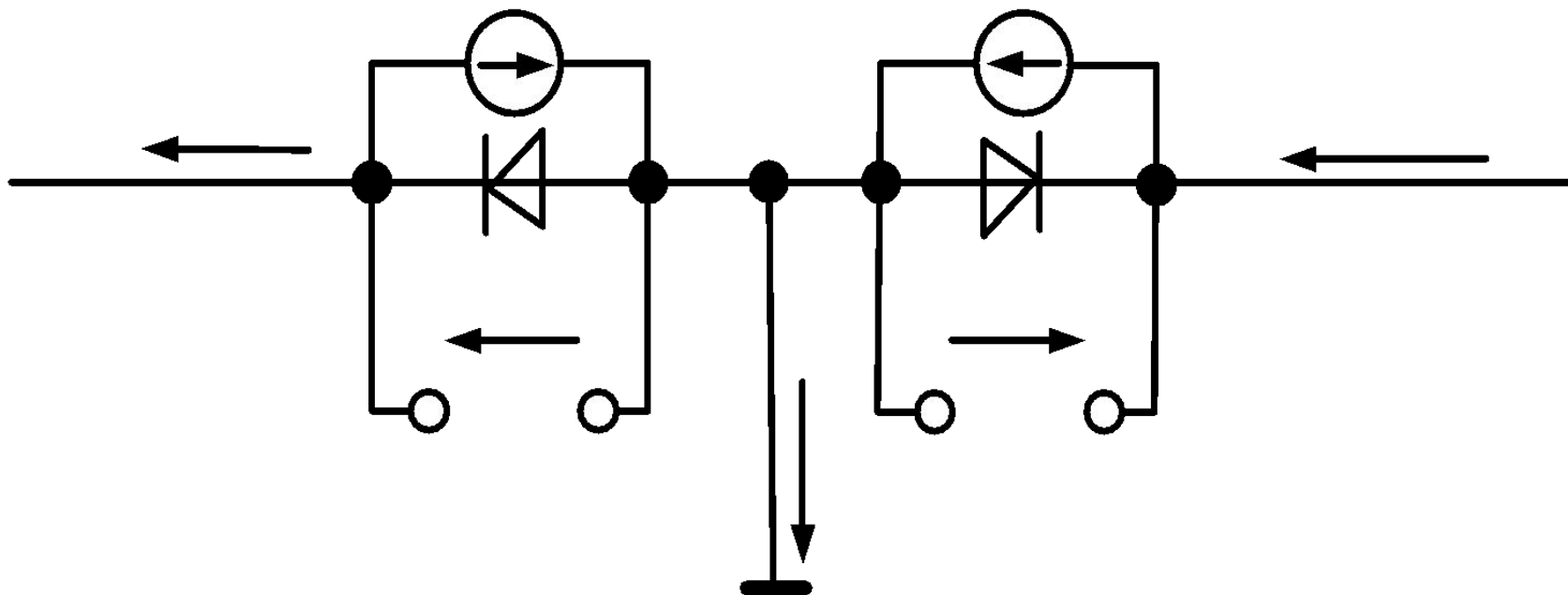


I_1, I_2 – токи, создаваемые в pn -переходах приложенным напряжением, т.е. ВАХ

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

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

23. Взаимное влияние рп-переходов.

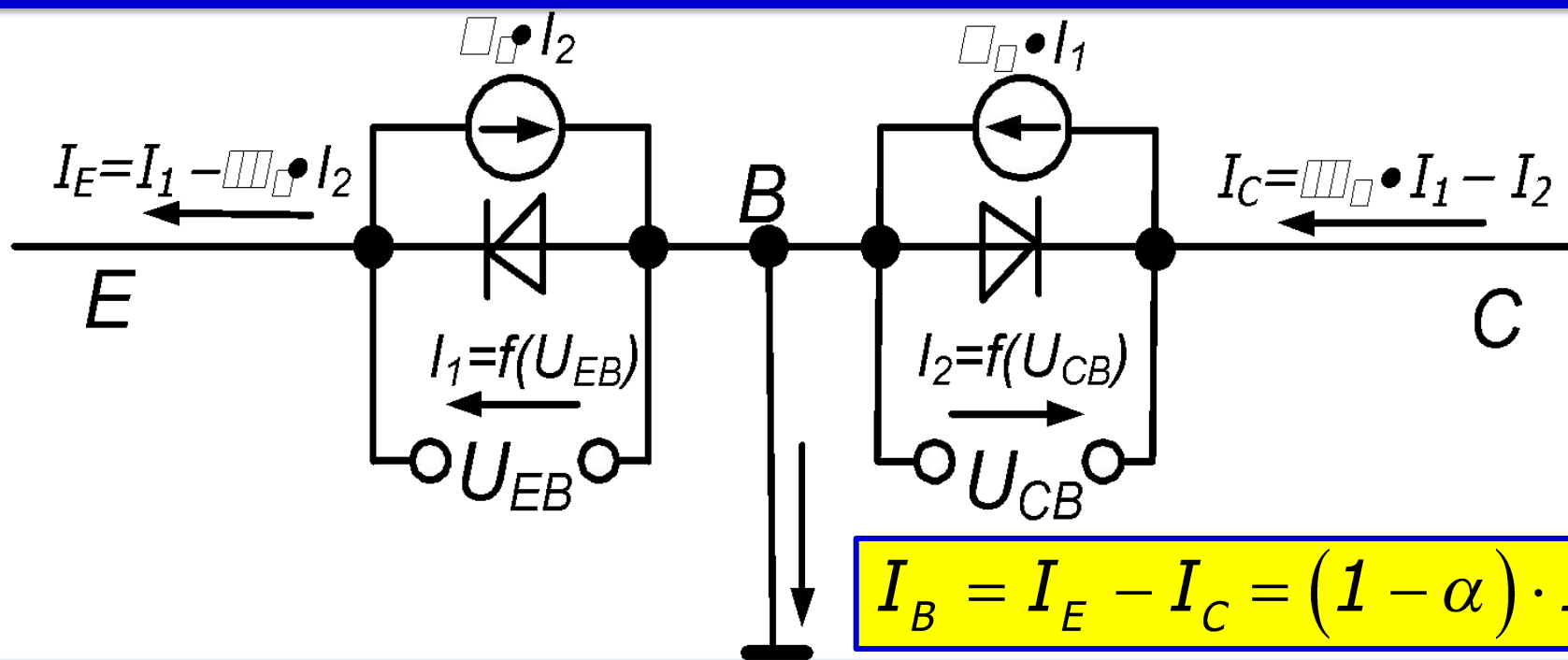


$a_N \cdot I_1, a_I \cdot I_2$ – токи, переносимые через базу из другого рп-перехода

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 α опускается, т.к. параметр α_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

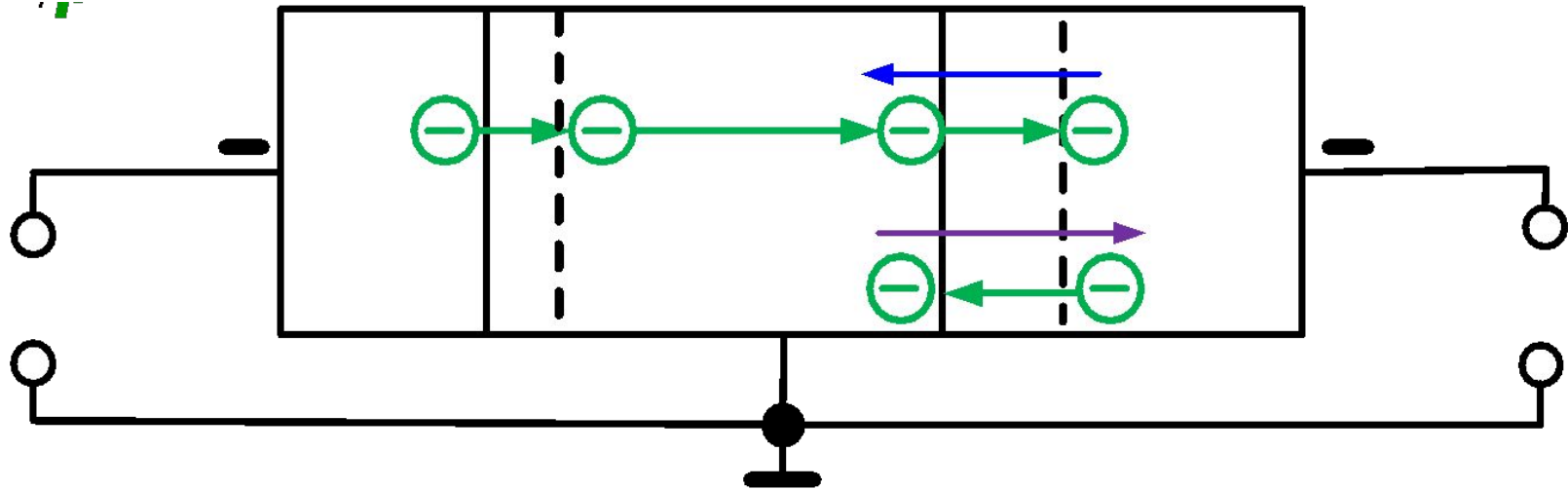
$$I_C = \alpha_N \cdot I_1 - I_2 = -\alpha_N \cdot I_{E0} + I_{C0} \approx 0$$

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

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

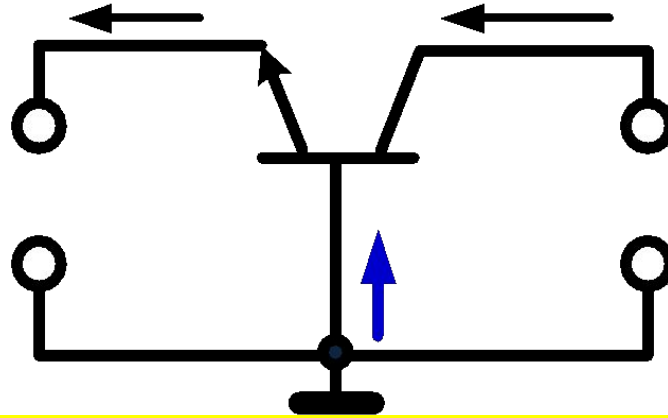
$$I_C = \alpha_N \cdot I_1 - I_2 = \alpha_N \cdot I_{E0} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{\varphi_T}} - I_{C0} \cdot \left(e^{\frac{U_{CB}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

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

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 рп-перехода К-Б на общий ток I_C



В любом случае в ток I_C вносит свой вклад обратный (собственный) ток рп-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*

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}

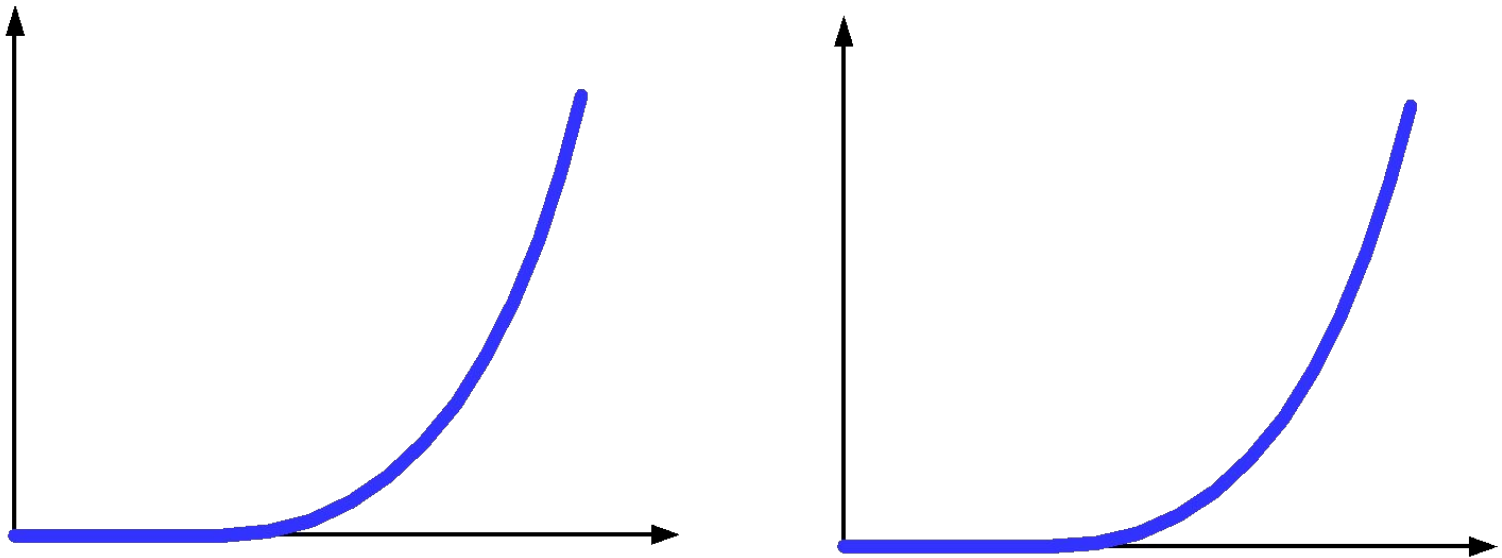
$$I_{OUT} = K_{TR} \square I_{IN} \quad (K_{TR} \text{ – коэффициент передачи})$$

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

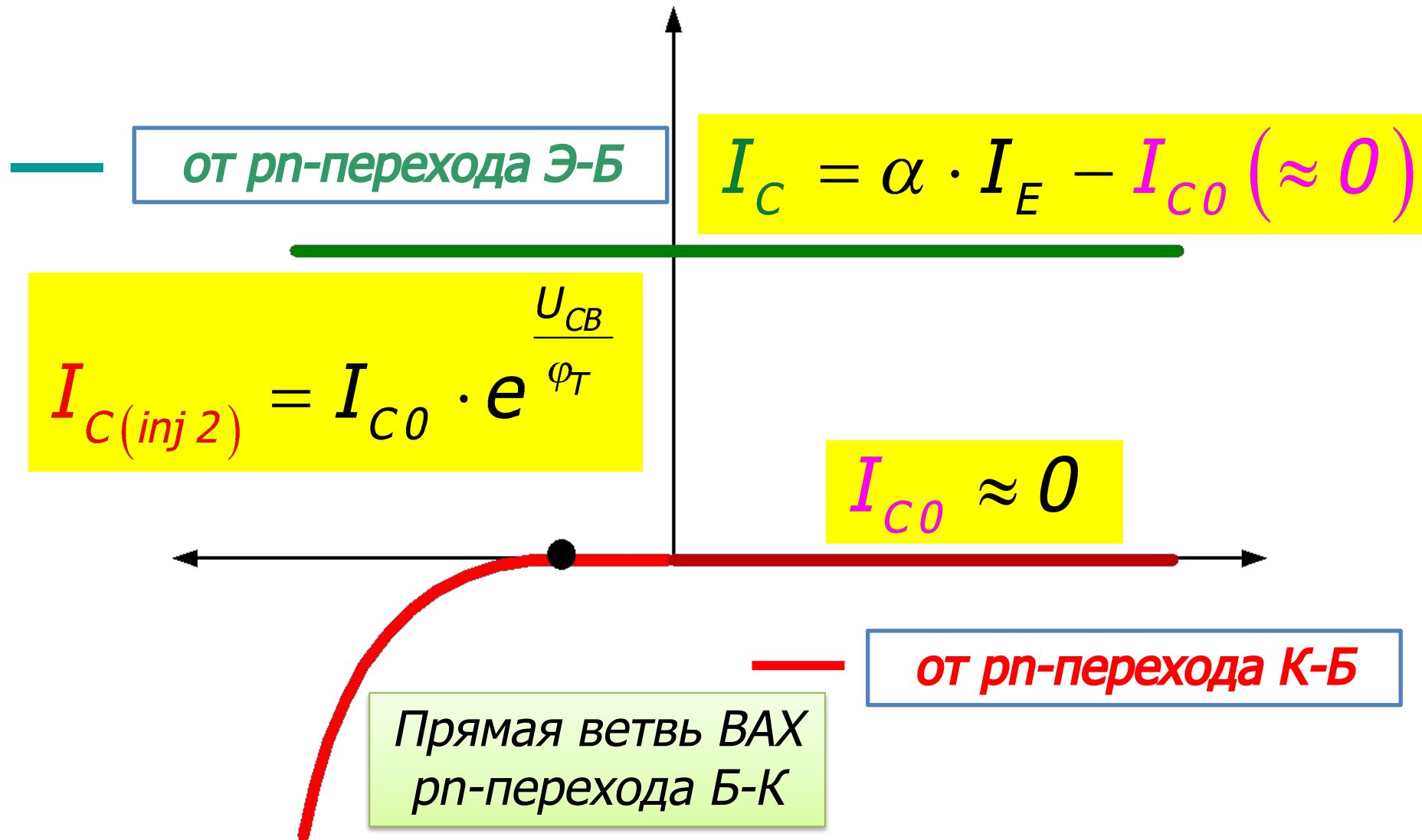


Тип БТ определяется только по знакам I_E и U_{EB}

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

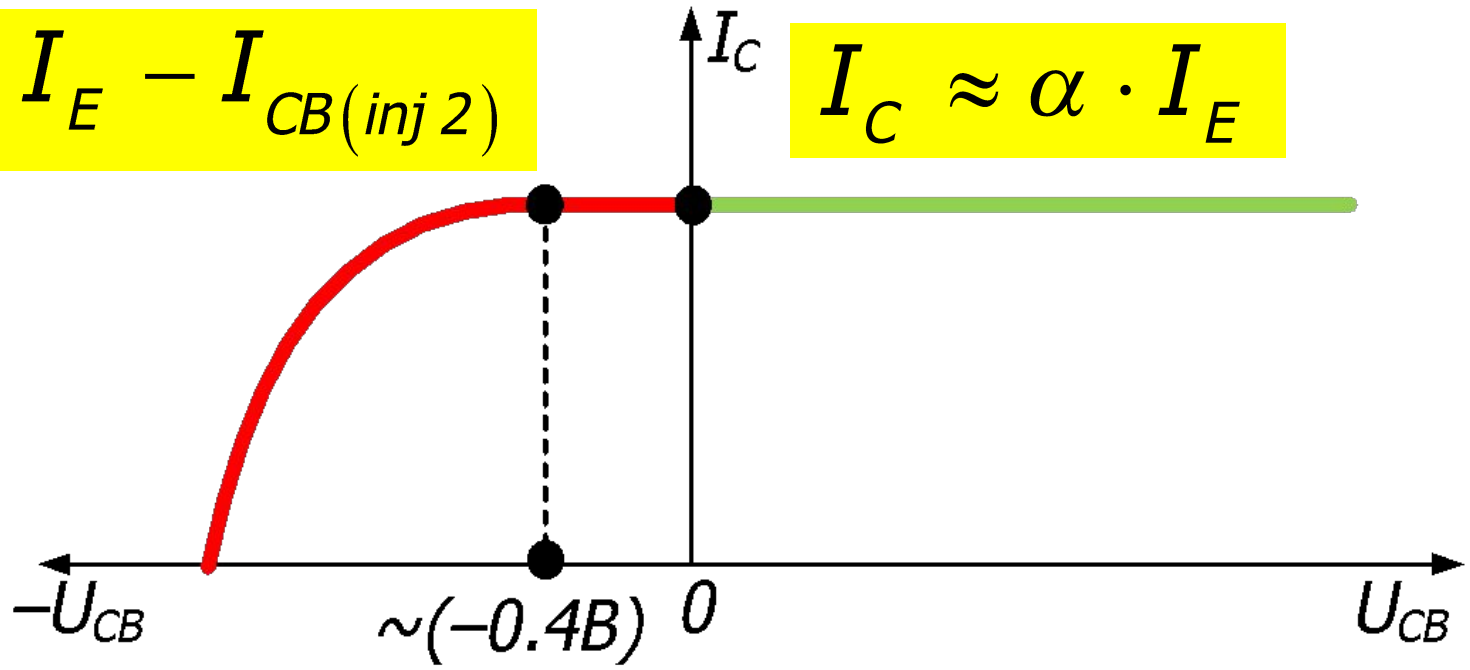
35. Одиночная выходная характеристика БТ в схеме с ОБ.

Режим двойной
инъекции: $U_{CB} < 0$

Активный режим: $U_{CB} > 0$

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

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

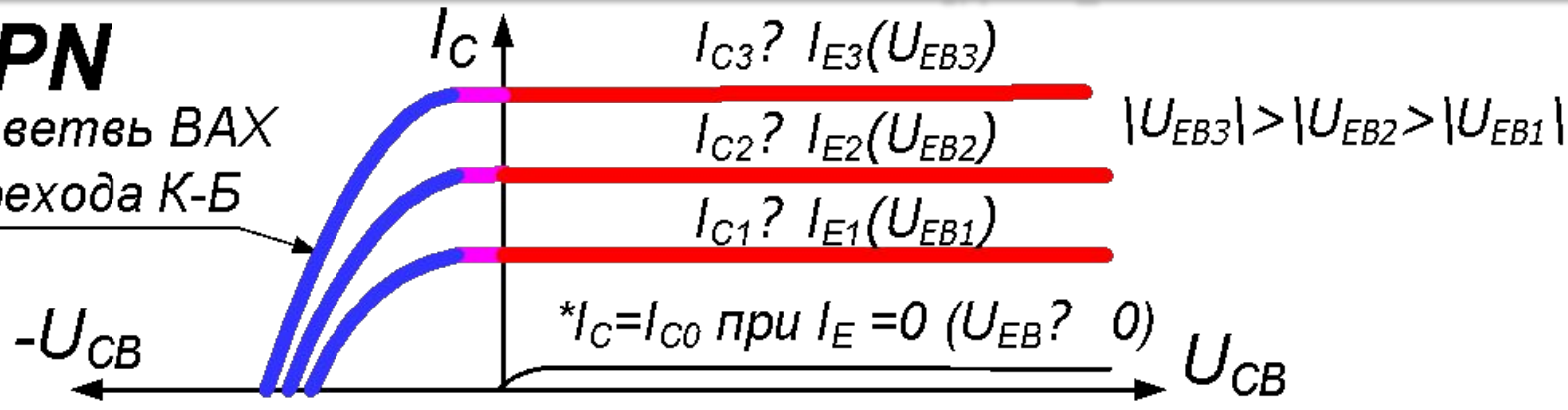


Одиночная ВХ не является полностью информативной,
т.к. ее значения сильно зависят от параметра I_E

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

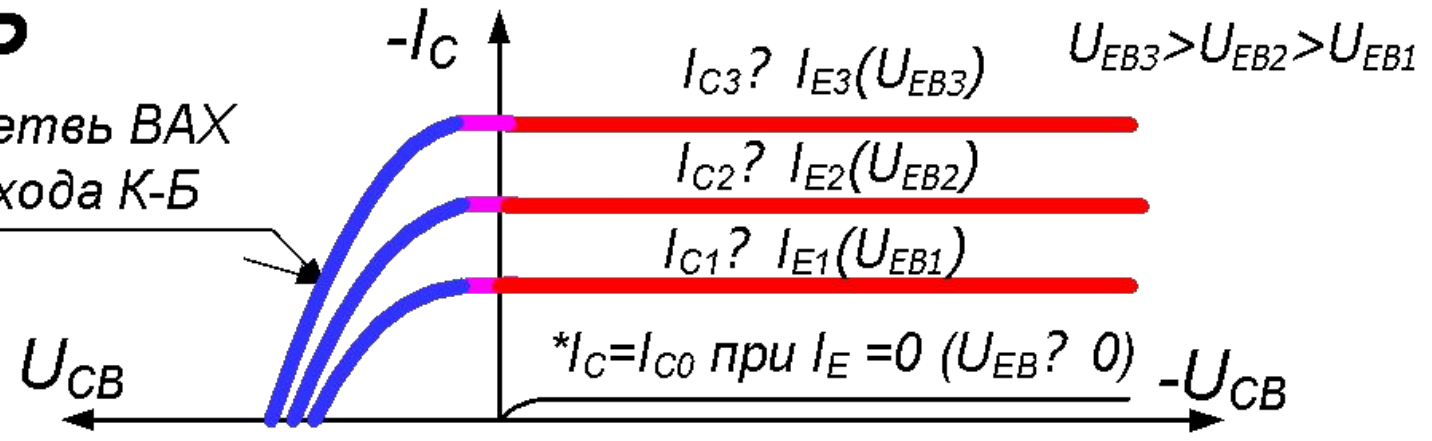
NPN

прямая ветвь ВАХ
рп-перехода К-Б



PNP

прямая ветвь ВАХ
рп-перехода К-Б



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

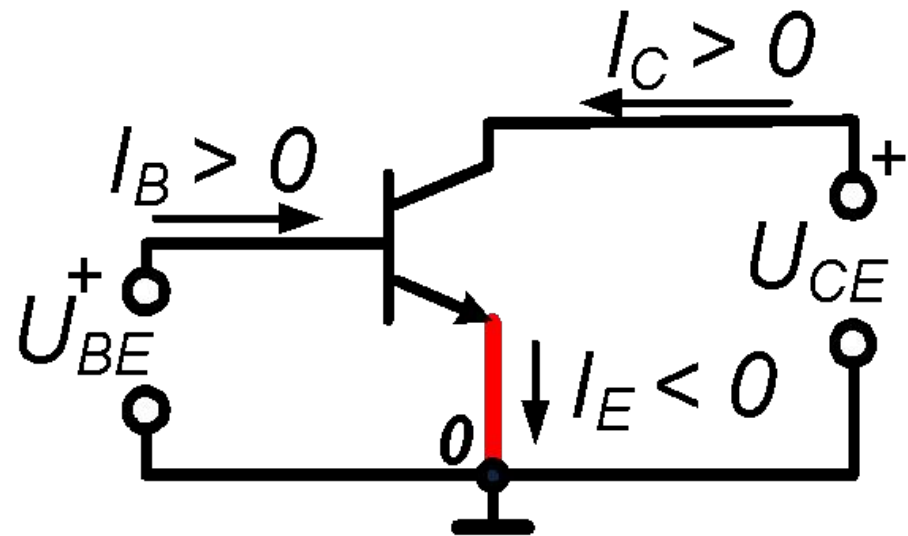
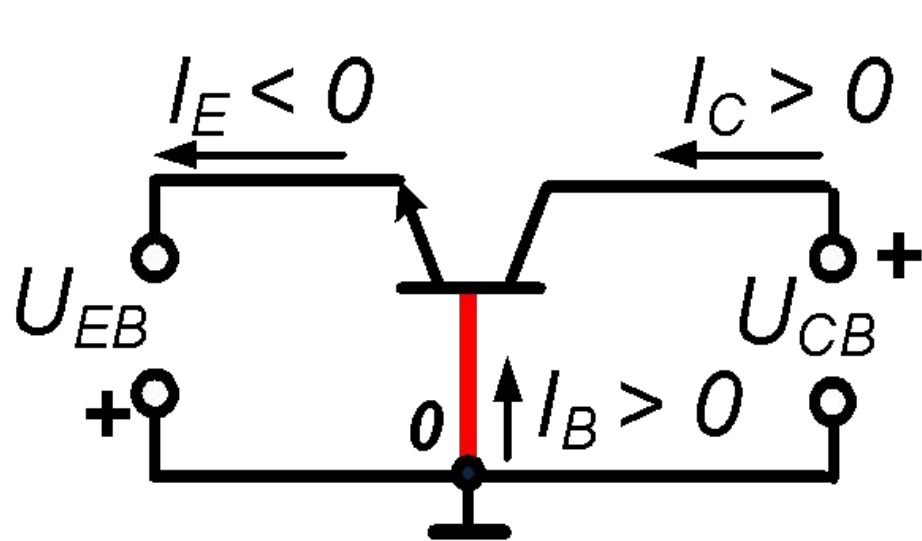
Схема включения – начало СВХ левее оси Y

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

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

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

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 α и β

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

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 α и β ,
связывающих между собой значения токов I_C , I_E и I_B ,
можно измерять в любой схеме включения.

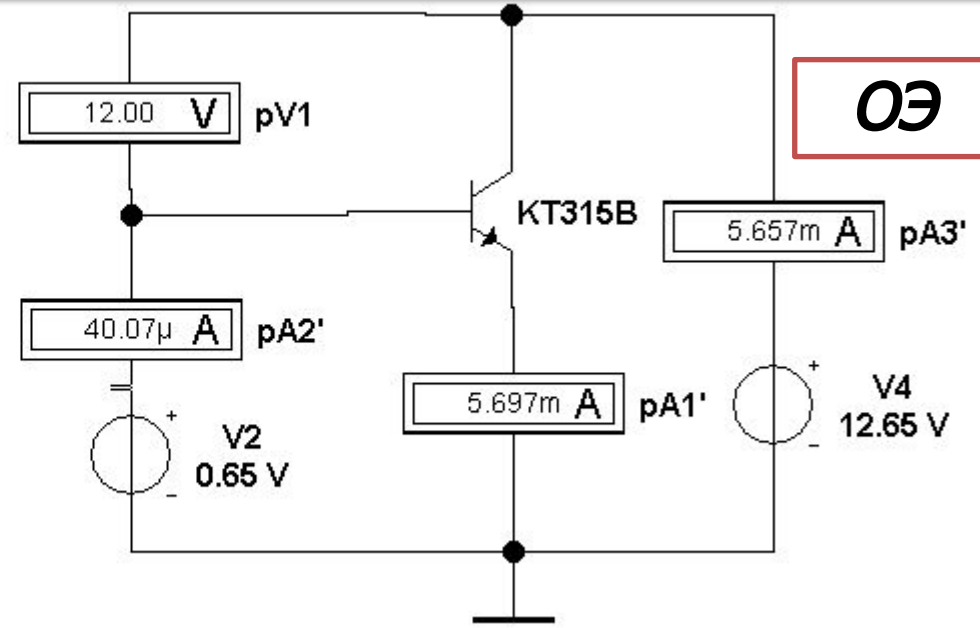
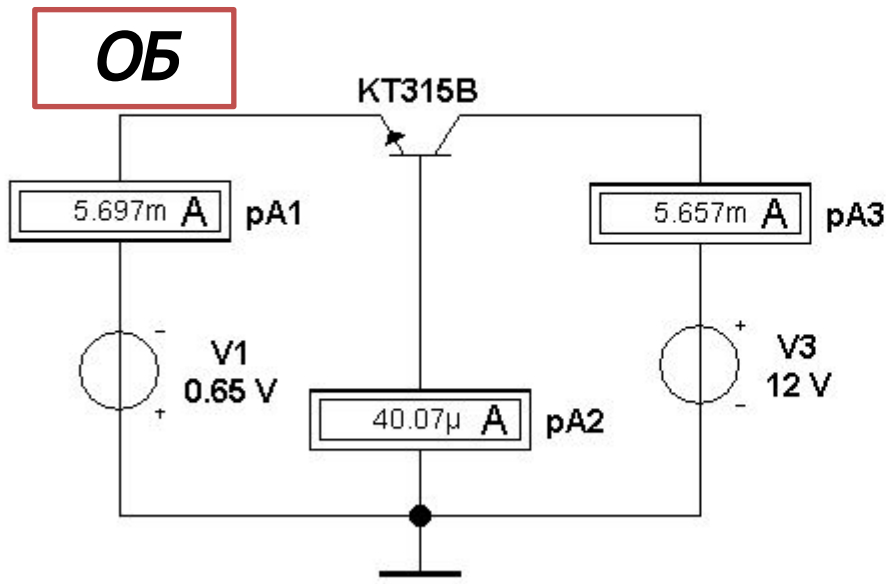
Названия:

- α – коэффициент передачи тока в схеме с ОБ,
 - β – коэффициент передачи тока в схеме с ОЭ,
- отражают физический смысл, но не обязательность схемы включения ОБ для измерения α или ОЭ для измерения β

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

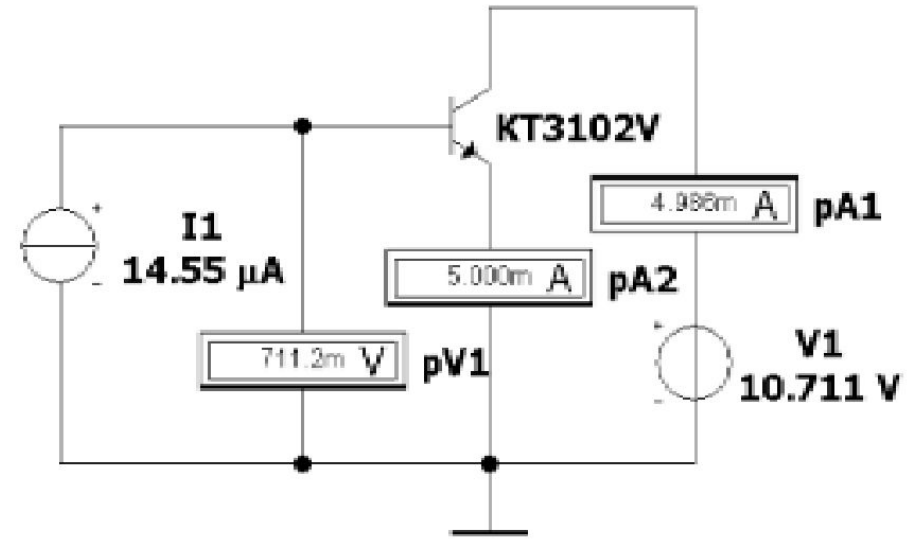
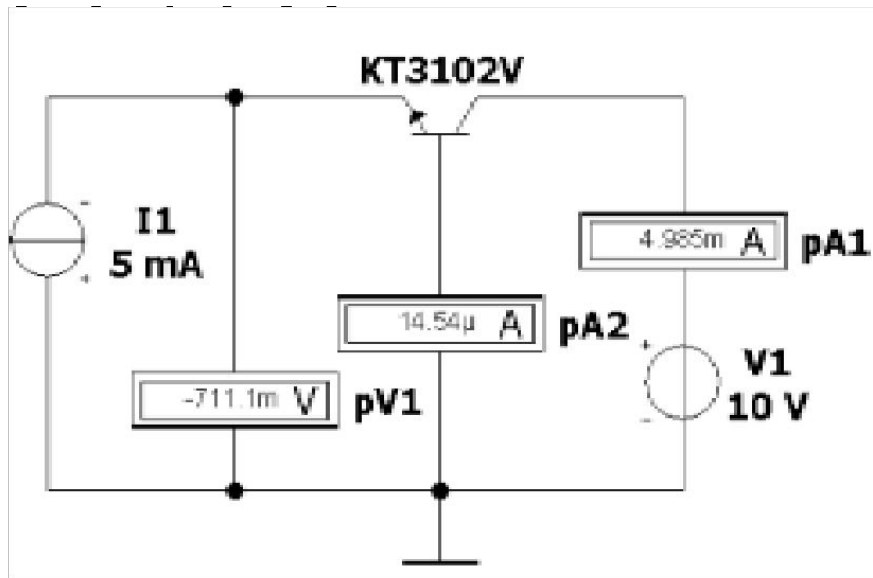
Измерения в схеме с ОБ

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

Измерения в схеме с ОЭ

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

42. Идентичность результатов в различных схемах включения



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

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

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

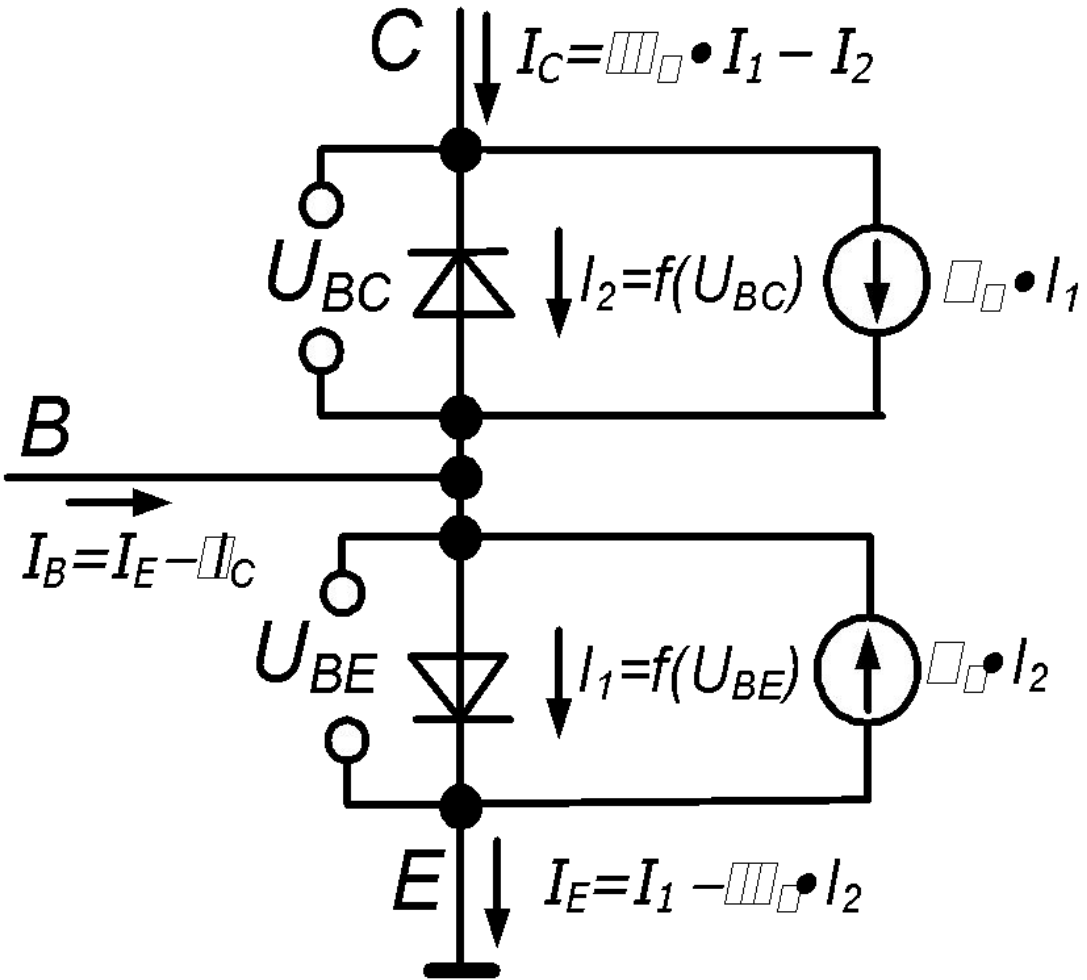
$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{pA1}{pA2} = \frac{4.985 \text{ mA}}{14.54 \text{ μA}} \approx 343$$

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)



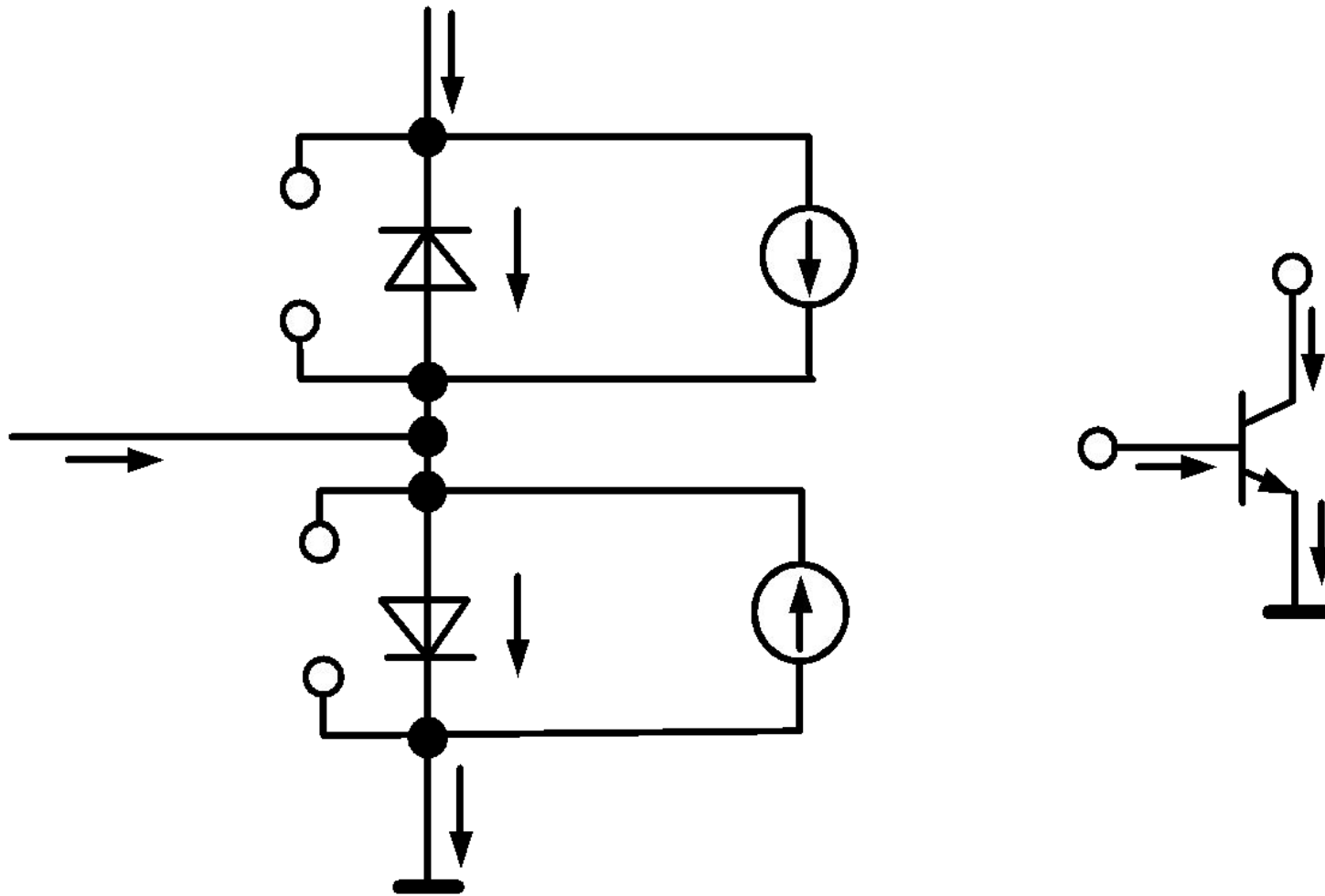
$$I_1 = I_{E0} \cdot \left(e^{\frac{U_{BE}}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

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

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)

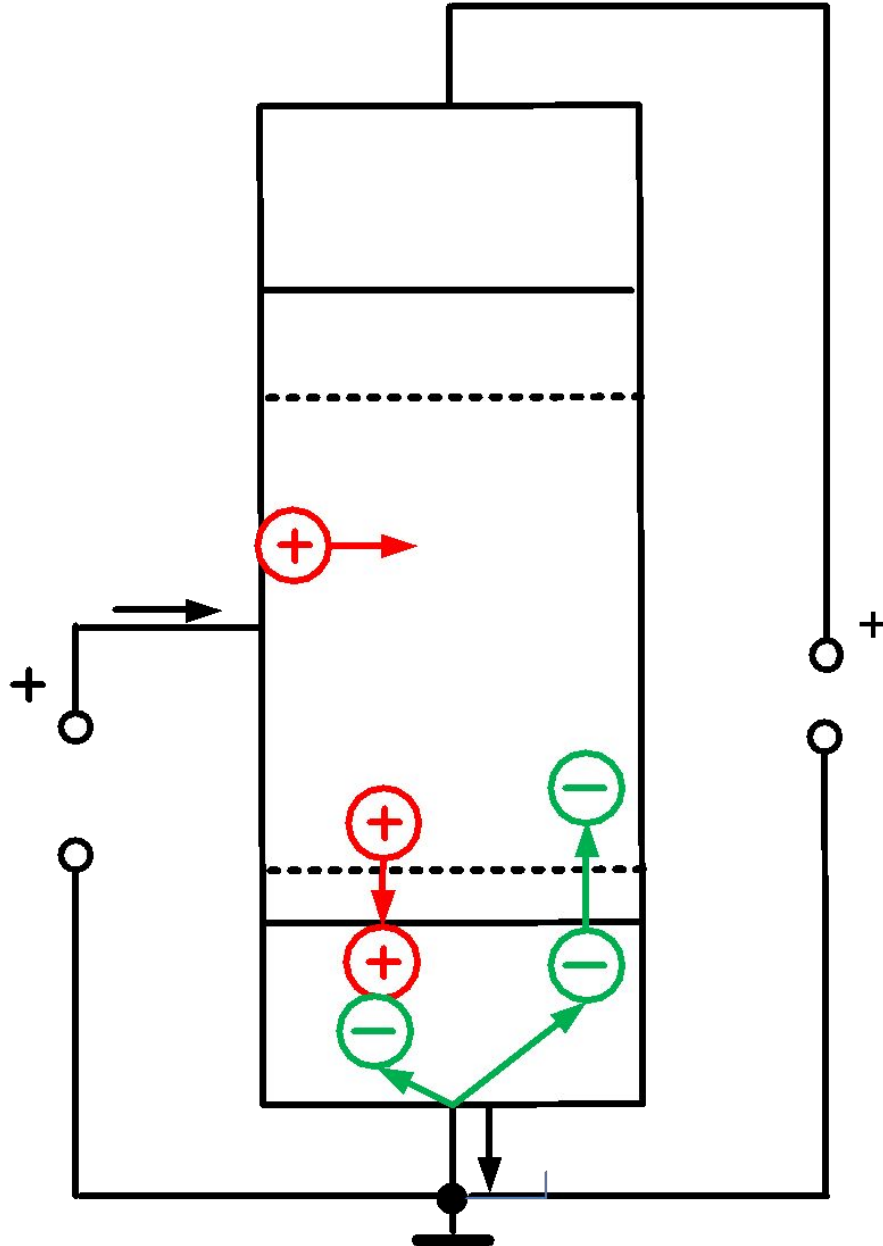
Структура, соответствующая схеме с ОБ поворачивается на 90° против ч.с.

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.

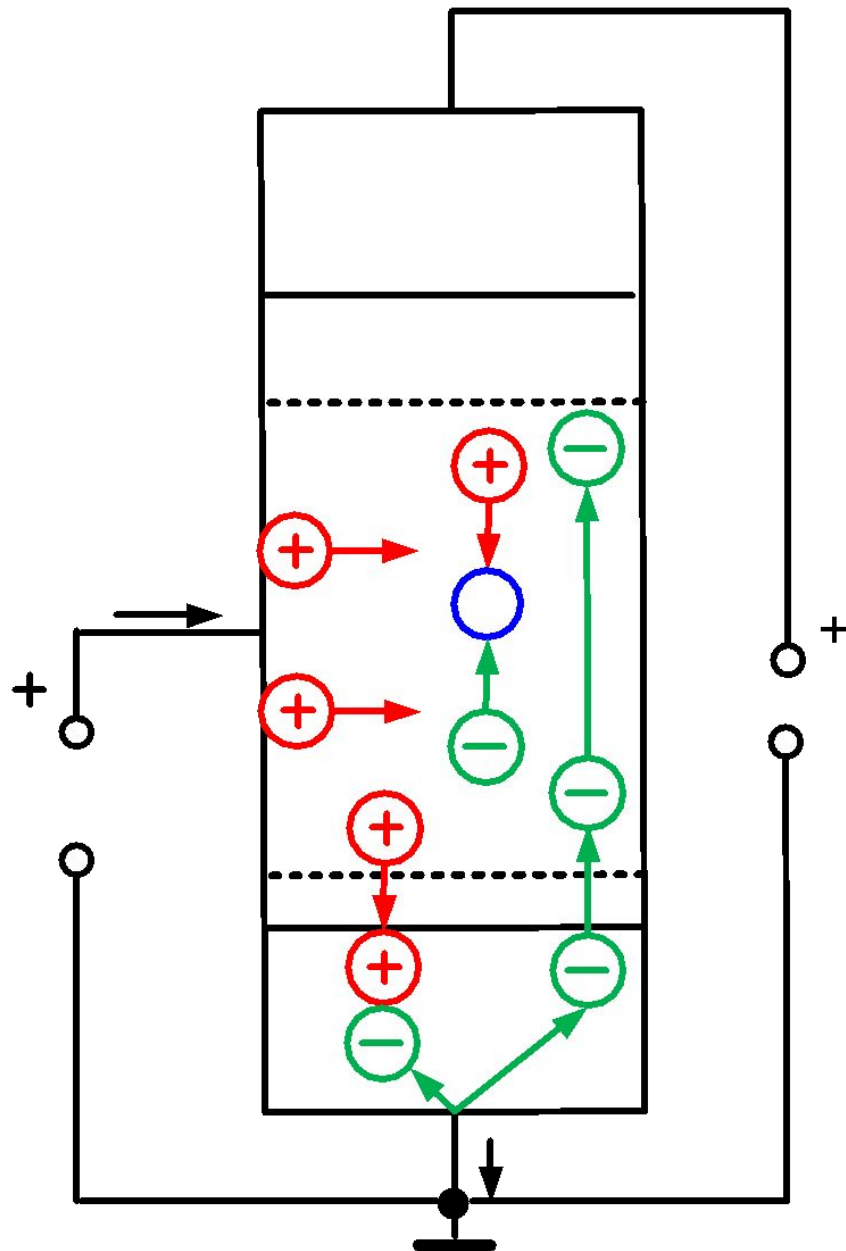
ВЫВОД

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)

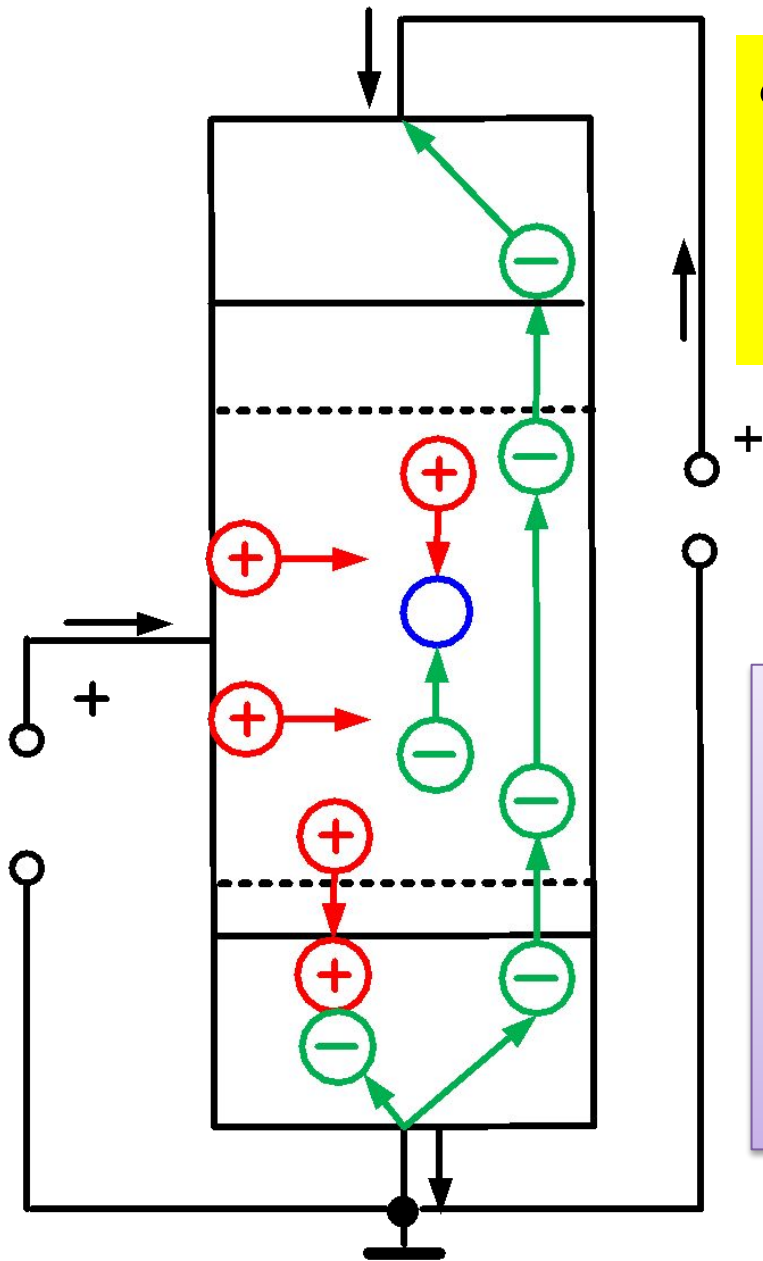


6 – диффузия электронов по базе

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.

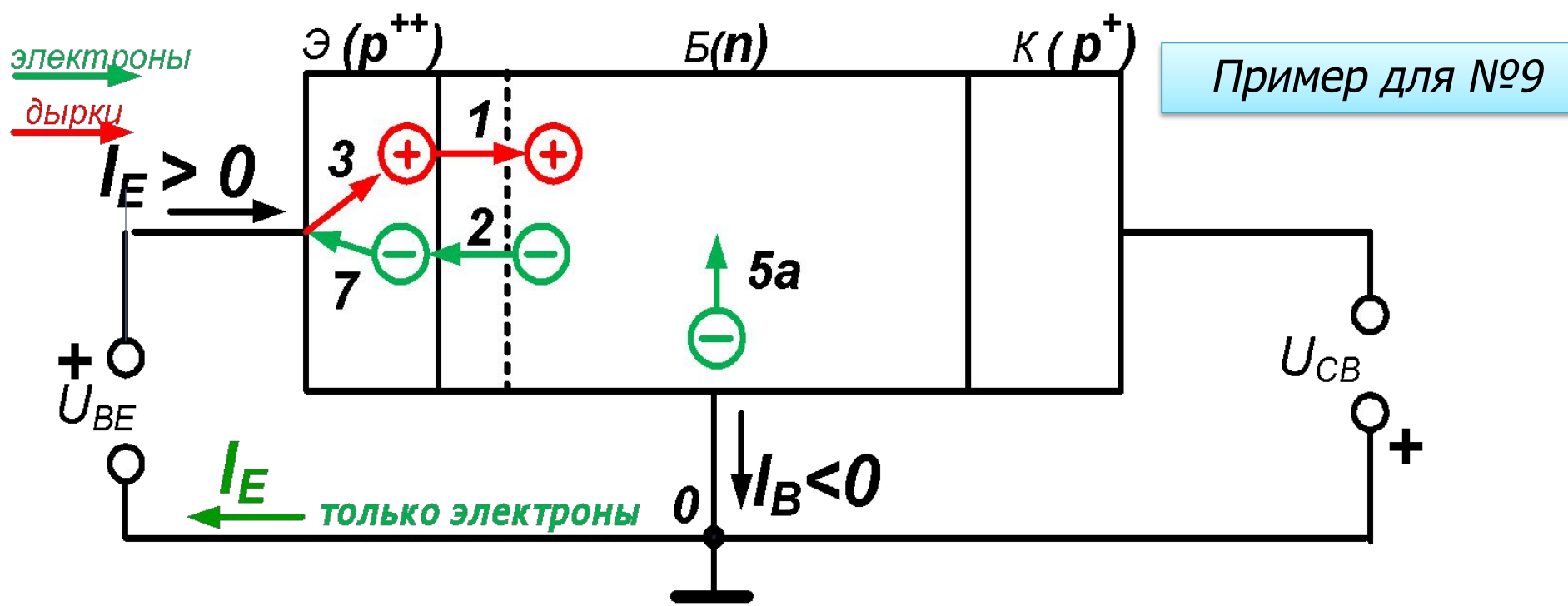
Независимо от типа БТ, схемы включения и режима работы:
движение неосновных носителей по базе – диффузия,
движение основных носителей по "своим" областям – дрейф,
движение носителей во внешней цепи – дрейф электронов,
переход носителей через открытый рп-переход – инжекция,
переход носителей через закрытый 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 $\gg 1$ (!!!)

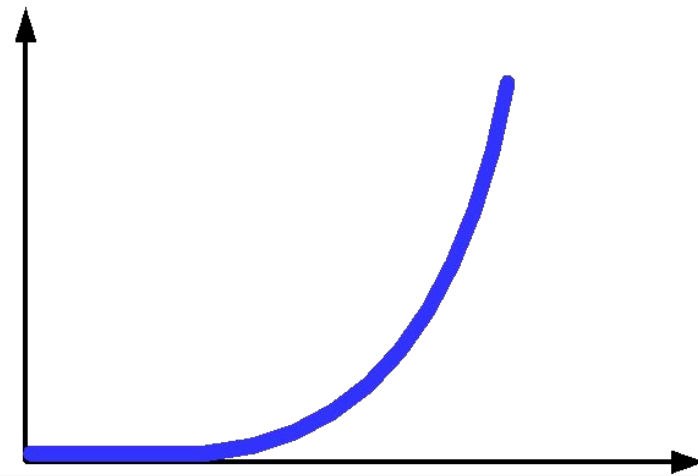
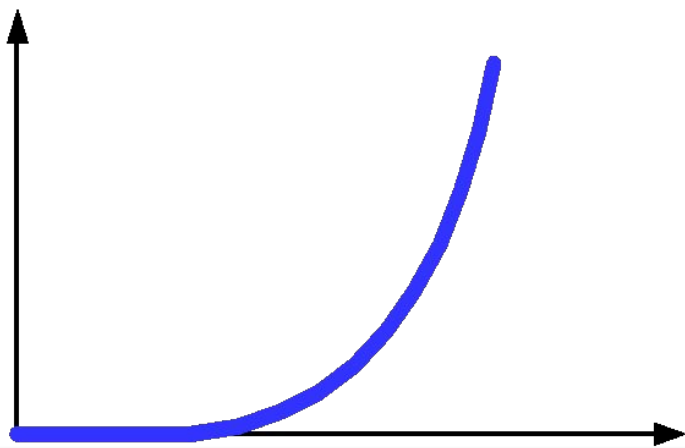
54. Входные характеристики БТ в схеме с ОЭ

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

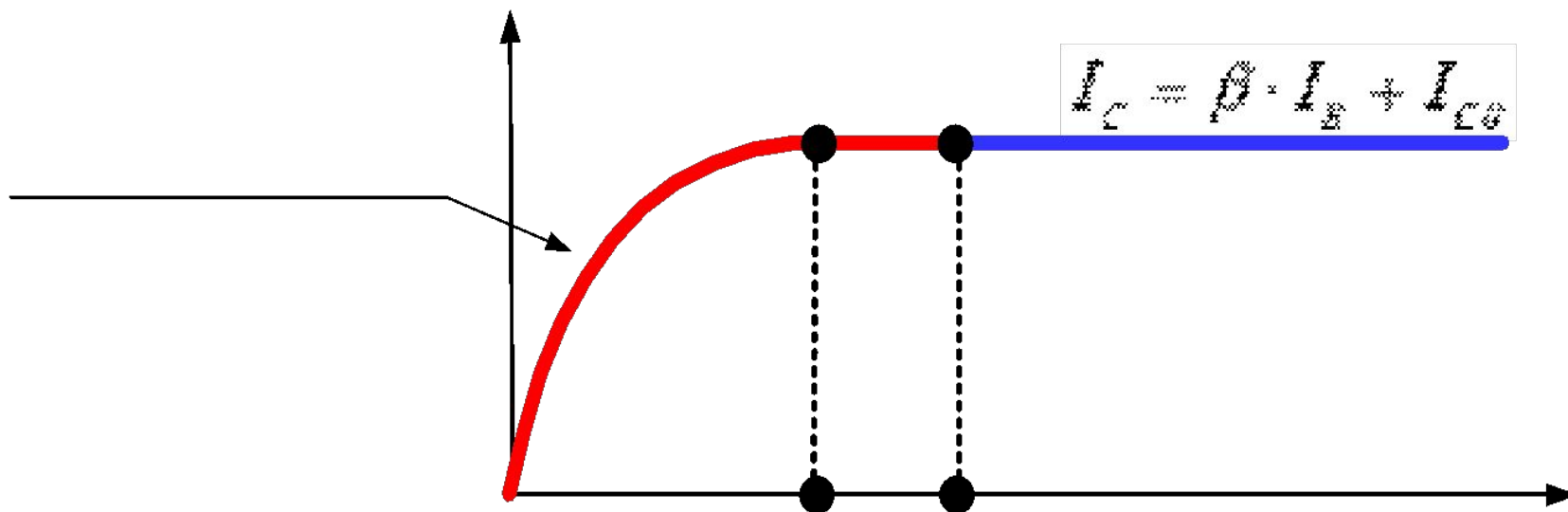
У-координата I_B
значения токов \sim в (50 – 500) раз меньше, чем в схеме с ОБ

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

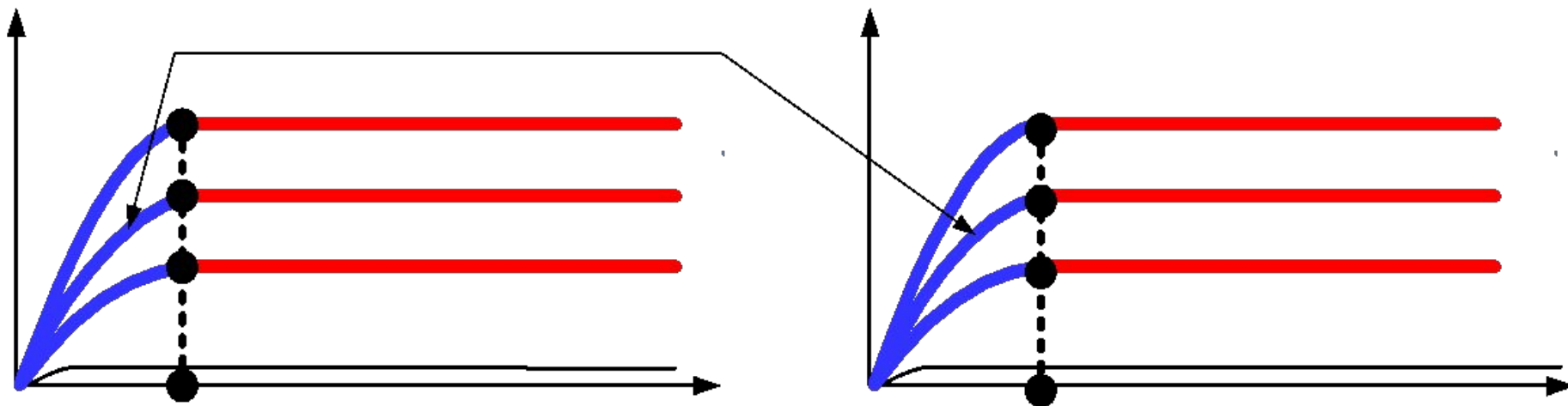
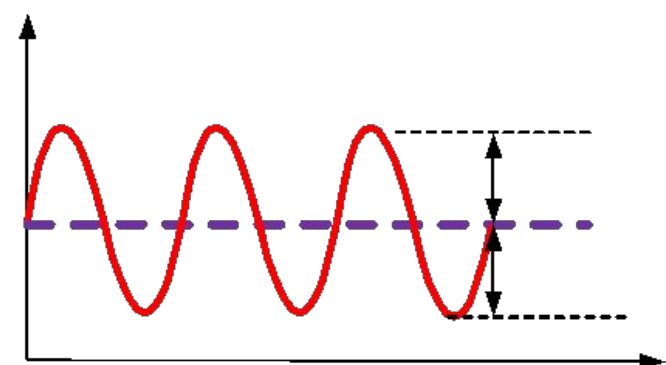
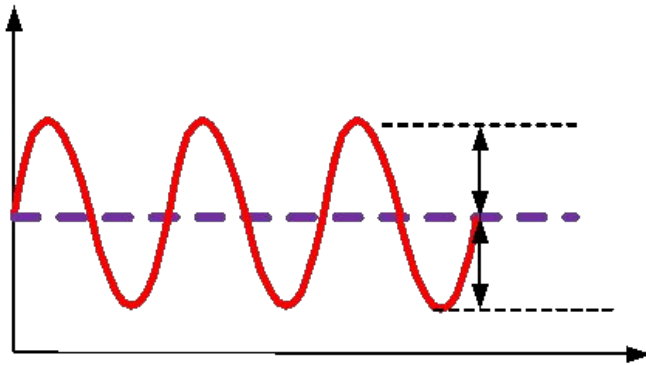
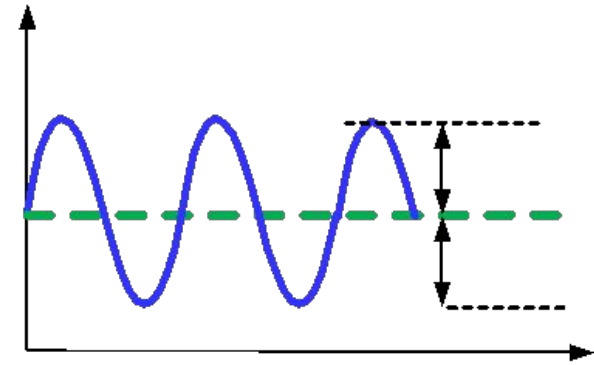
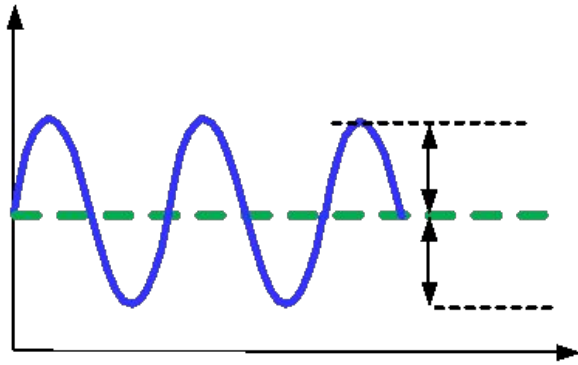


Схема включения – начало СВХ в точке начала координат
Тип транзистора – знаки величин на осях.

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)



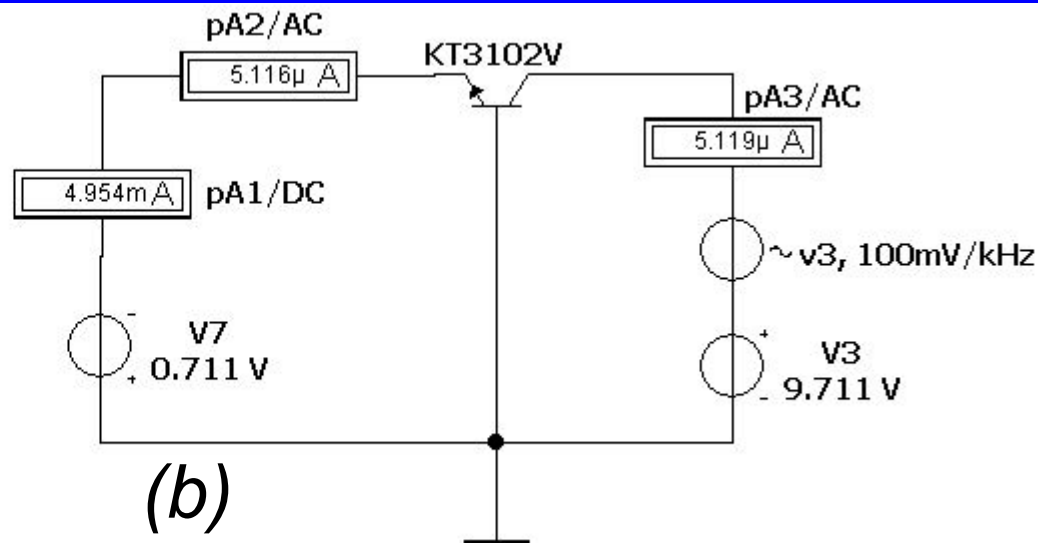
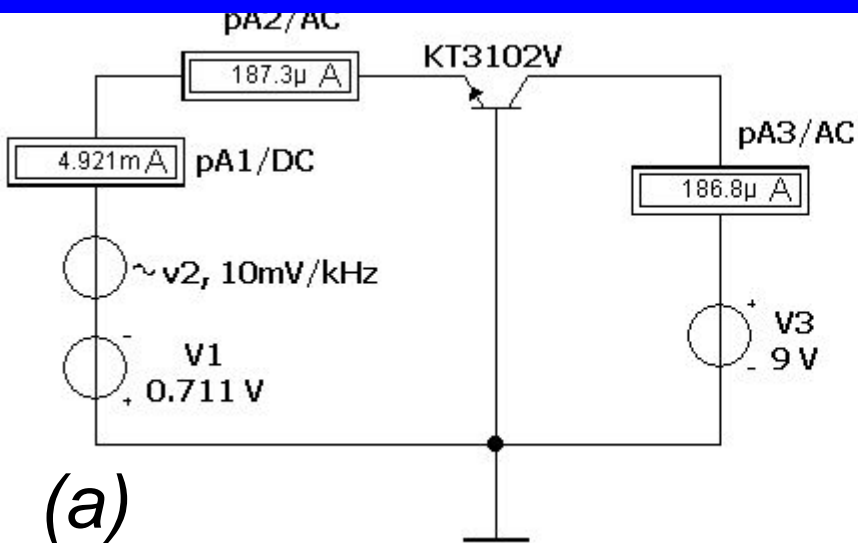
$$i_1 = y_{11} \cdot u_1 + y_{12} \cdot u_2$$

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

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

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

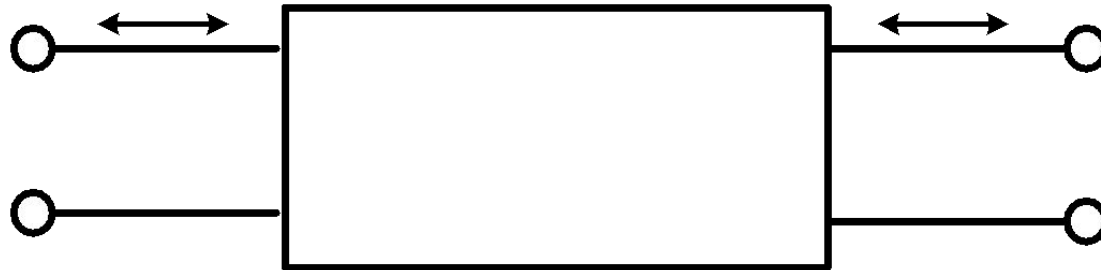
$1 < N < 2$ – эмпирическая величина
для каждой модели БТ

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.

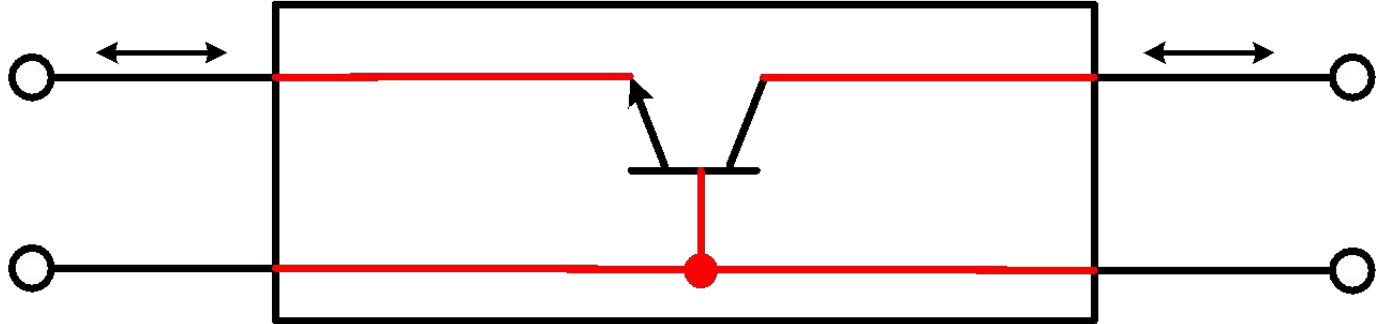
$$u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2$$

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

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



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

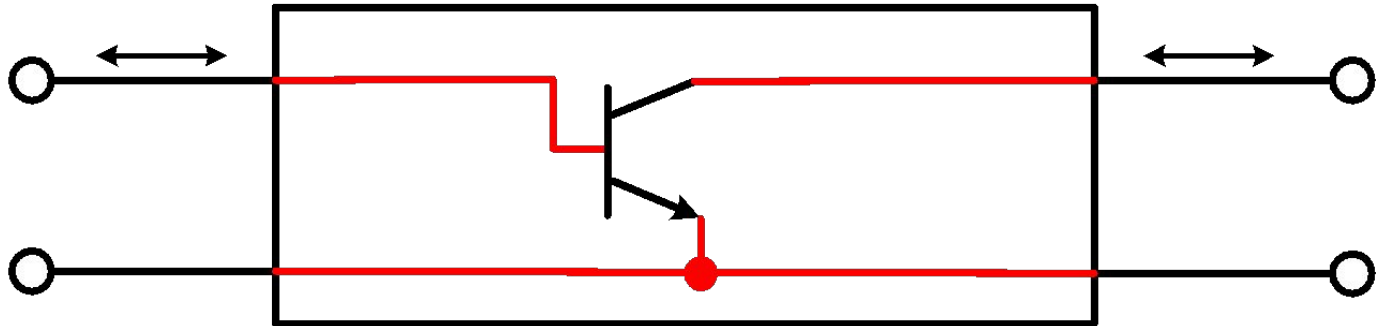
В условиях $u_2=0$, т.е. КЗ на выходе

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

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



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

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

В условиях $u_2=0$, т.е. КЗ на выходе

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

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

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

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 α
 h_{21e} , как β

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 α
для схемы с ОБ.

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

Аналог
коэффициента β
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 α и β .

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

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 \square и β их тоже не рассчитывают, а измеряют

Как проводить измерения коэффициентов передачи?

"Очевидный" ответ: \square и h_{21b} в схеме с ОБ, а β 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 ≈ 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.

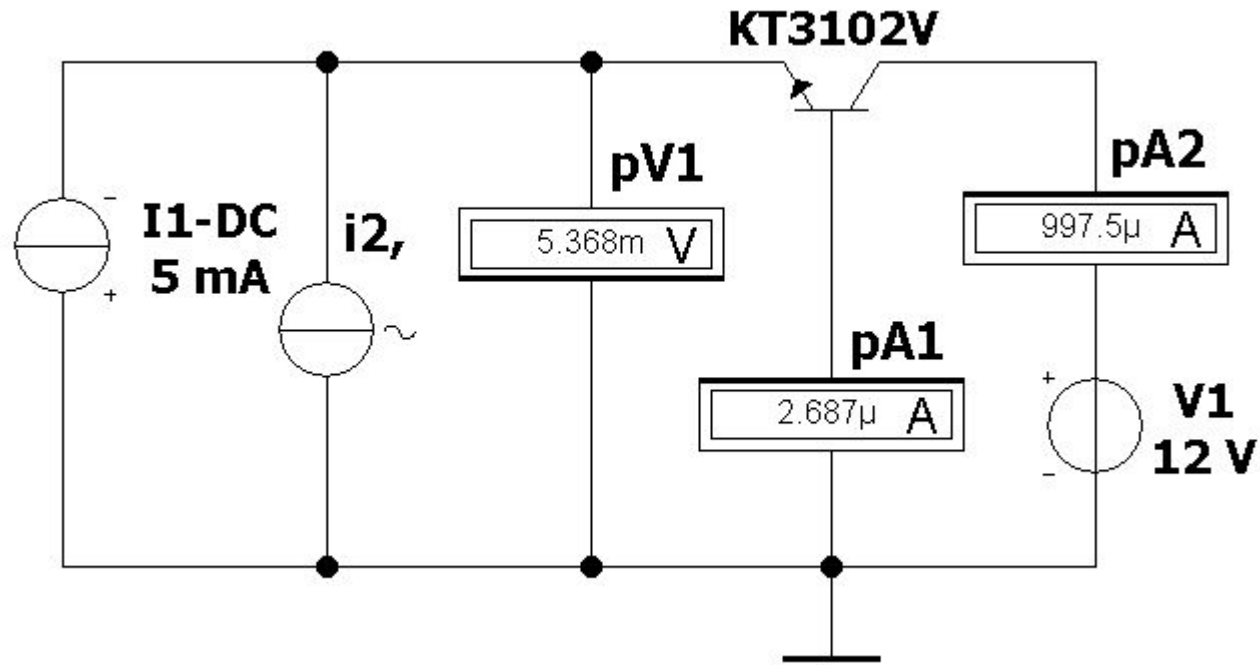
При одновременном действии АС- и DC-токов и напряжений:

- 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



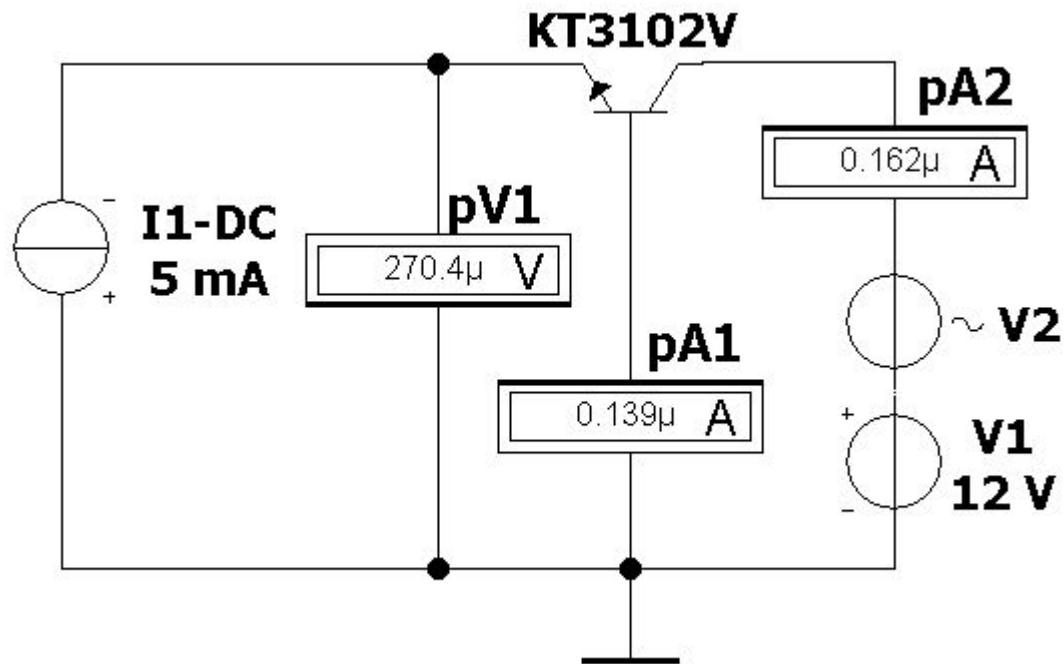
$$h_{11b} = \frac{u_E}{i_E} = \frac{pV1}{i2} \approx 5.4 \Omega$$

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

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

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

73. Идеальная схема для измерений при обрыве на входе



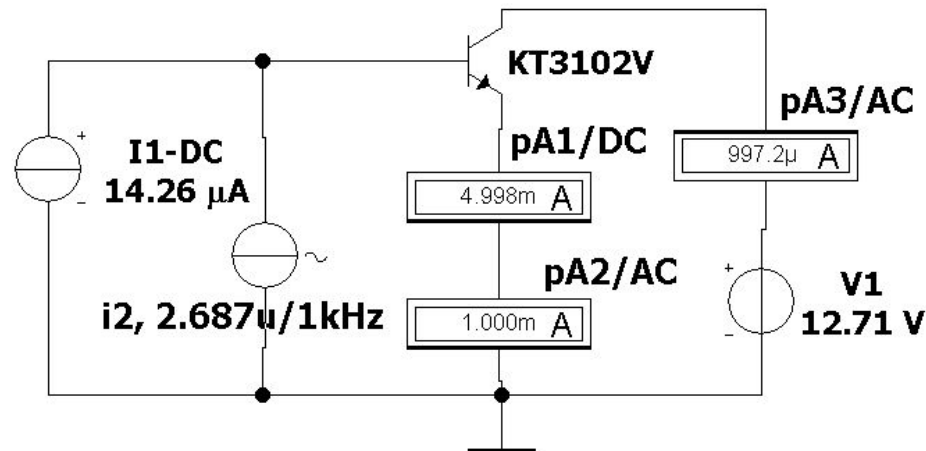
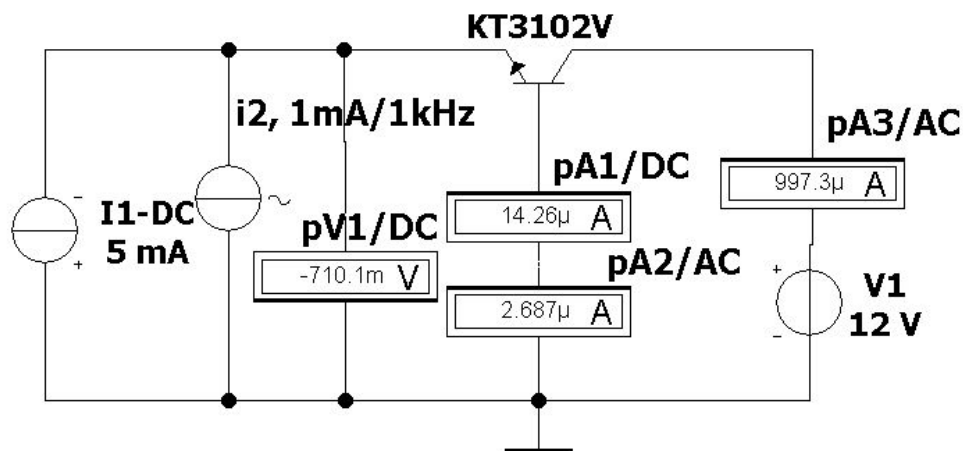
$$h_{12b} = \frac{u_E}{u_C} = \frac{pV1}{v2} \approx 2.7 \cdot 10^{-4}$$

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

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!!!