

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Факультет «ФЭУ»

Кафедра «ПЭ»

Расчетно-графическая работа

По дисциплине «Физические основы электроники»

Студент группы 9ПЭБа-1

А.А. Семенов

Преподаватель

А.К. Смирнова

2021

## Содержание

Задача 1.....	3
Задача 15.....	4
Задача 20.....	6
Задача 21.....	7
Задача 26.....	8
Задание 4. «Биполярные транзисторы».....	9
4.1. По входным и выходным ВАХ найти $h$ - параметры транзистора как четырехполюсника для схемы с ОЭ.....	9
Задача 31.....	9
4.2. Найти физические и $h$ - параметры транзистора как четырехполюсника для схемы с ОЭ, используя $h$ - параметры для схемы с ОБ.....	16
Задача 41.....	16
Вариант.....	16
4.3. Рассчитать частотные свойства транзистора.....	20
Список использованных источников.....	22

### Задача 1.

p-n-переход имеет обратный ток насыщения  $I_0 = 10 \text{ мкА}$ , напряжение, приложенное к переходу, равно 0,5 В. Пользуясь уравнением ВАХ идеального p-n-перехода, найти отношение прямого тока к обратному при  $T = 300 \text{ К}$

Дано:

$$I_0 = 10 \text{ мкА} = 10^{-5} \text{ А}$$

$$U = 0,5 \text{ В}$$

$$T = 300 \text{ К}$$

Найти:  $\frac{I_{пр}}{I_{обр}} = ?$

Решение

Зависимость силы тока от напряжения для идеального полупроводникового p-n-перехода имеет вид

$$I = I_0 \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

где  $I_0$  - обратный ток насыщения,

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  - элементарный заряд,

$U$  - напряжение, В;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  - постоянная Больцмана,

$T$  - температура, К.

Величина прямого тока

$$I_{пр} = I_0 \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

$$I_{пр} = 10^{-5} \cdot \left( e^{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,5}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} - 1 \right) = 247 \text{ А}$$

Величина обратного тока

$$I_{обр} = 10^{-5} \cdot \left( e^{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,5}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} - 1 \right) = 10^{-5} \text{ А}$$

$$\frac{I_{пр}}{I_{обр}} = \frac{247}{10^{-5}} = 2,47 \cdot 10^7$$

Ответ:  $\frac{I_{пр}}{I_{обр}} = 2,47 \cdot 10^7$

### Задача 15.

Определить ширину электронно-дырочного перехода  $l_n$  и  $l_p$  в  $n$ - и  $p$ -областях соответственно, контактную разность потенциалов  $\varphi_k$  и максимальное значение напряженности электрического поля  $E_{max}$  в  $p$ - $n$ -переходе германиевого туннельного диода при  $T = 300 \text{ К}$  с  $N_a = N_d = 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Дано:

$$T = 300 \text{ К}$$

$$N_a = N_d = 10^{19} \text{ см}^{-3} = 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

Найти:

$$\varphi_k\text{-?}; l_n\text{-?}; l_p\text{-?}; E_{max}\text{-?}$$

Решение:

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n \cdot p_p}{n_i^2}$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  - постоянная Больцмана,

$q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  заряд электрона

$n_n, p_p$ - концентрации электронов и дырок соответственно в  $n$  - и  $p$  - полупроводниках.

$n_i$  - концентрация электронов в собственном проводнике в зоне проводимости.

Для германия при  $T=300$  К

$$n_i \approx 2,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

В примесных полупроводниках при рабочих температурах

$$n_n \approx N_a, p_p \approx N_d$$

где  $N_a, N_d$  - концентрации акцепторной и донорной примесей.

$$\varphi_x = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{10^{19} \cdot 10^{19}}{(2,4 \cdot 10^{10})^2} = 1,03 \text{ В}$$

Ширина p-n перехода в равновесном состоянии

$$l_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \varphi_x \cdot \frac{N_a + N_d}{N_a \cdot N_d}}{q}}$$

где  $\varepsilon = 16$  - относительная диэлектрическая проницаемость германия ;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  - диэлектрическая постоянная.

$$l_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot 16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,03 \cdot \frac{10^{25} + 10^{25}}{10^{25} \cdot 10^{25}}}{1,602 \cdot 10^{-19}}} = 1,91 \cdot 10^{-8} \text{ м} \\ = 19,1 \text{ нм}$$

Ширина p-n перехода  $l_n$  и  $l_p$  в p и n – областях соответственно связана с концентрациями примесей зависимостью

$$\frac{l_n}{l_p} = \frac{N_a}{N_d}$$

По условию  $N_a = N_d$ , значит

$$l_n = l_p = 9,55 \text{ нм}$$

Максимальное значение напряженности поля в равновесном переходе

$$E_{max} = \frac{2 \cdot \varphi_k}{l_0}$$

$$E_{max} = \frac{2 \cdot 1,03}{1,91 \cdot 10^{-8}} = 1,1 \cdot 10^8 \text{ В/м}$$

Ответ:  $\varphi_k = 1,03 \text{ В}$ ;  $l_n = l_p = 9,55 \text{ нм}$ ;  $E_{max} = 1,1 \cdot 10^8 \text{ В/м}$

### Задача 20.

Барьерная емкость варикапа равна 40 пФ при обратном напряжении 3 В. Определить уменьшение емкости при уменьшении обратного напряжения до 9 В .

Дано:

$$C_{\delta 1} = 40 \text{ пФ}$$

$$U_1 = 3 \text{ В}$$

$$U_2 = 9 \text{ В}$$

Найти:  $\Delta C_{\delta-?}$

Решение:

Пренебрегая контактной разностью потенциалов, можно записать

$$C_{\delta 1} = \frac{k}{\sqrt{U_1}},$$

где  $k$  - постоянная;

$U_1$  - обратное напряжение

$$k = C_{\delta 1} \cdot \sqrt{U_1}$$

При изменении обратного напряжения меняется и барьерная емкость варикапа

$$C_{\delta 2} = \frac{k}{\sqrt{U_2}} = \frac{C_{\delta 1} \cdot \sqrt{U_1}}{\sqrt{U_2}}$$

$$C_{\delta 2} = \frac{40 \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{9}} = 2,3 \text{ нФ}$$

Таким образом, барьерная емкость уменьшилась на

$$\Delta C_{\delta} = C_{\delta 1} - C_{\delta 2}$$

$$\Delta C_{\delta} = 40 - 2,3 = 37,7 \text{ нФ}$$

Ответ: барьерная емкость уменьшилась на  $\Delta C_{\delta} = 37,7 \text{ нФ}$

### Задача 21.

Определить статические коэффициенты усиления по току биполярного транзистора, включенного в схемы с ОБ, ОЭ, если при изменении тока эмиттера на 1,6 мА ток коллектора увеличился на 1,57 мА

Дано:

$$\Delta I_{\text{э}} = 1,6 \text{ мА}$$

$$\Delta I_{\text{к}} = 1,57 \text{ мА}$$

Найти:  $\alpha, \beta$  - ?

Решение:

Статический коэффициент усиления по току биполярного транзистора с ОБ

$$\alpha = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}}$$

где  $\Delta I_{\text{э}}$  - изменение тока эмиттера, А;

$\Delta I_{\text{к}}$  - изменение тока коллектора, А.

$$\alpha = \frac{1,57 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-3}} = 0,98$$

Статический коэффициент усиления по току  $\beta$  биполярного транзистора с ОЭ

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

$$\beta = \frac{0,98}{1 - 0,98} = 52,3$$

Ответ:  $\alpha = 0,98$ ;  $\beta = 52,3$ .

### Задача 26.

В схеме на рисунке 1  $E_K = 10\text{В}$ ,  $E_B = 5\text{В}$ ,  $R_K = 2\text{кОм}$ ,  $R_B = 100\text{кОм}$ ,  $\beta = 100$ . Рассчитать токи в электродах и напряжение  $U_K$ .

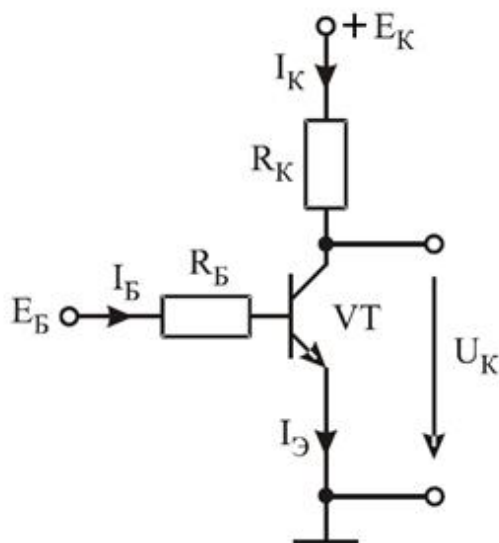


Рисунок 1 – Схема к задаче 26

Дано:

$$E_K = 10\text{ В},$$

$$E_B = 5\text{ В},$$

$$R_B = 100\text{ кОм}$$



$$R_K = 2 \text{ кОм},$$

$$\beta = 100$$

Найти:  $U_K$  -?;  $I_B$  -?;  $I_E$  -?;  $I_K$  -?.

Решение:

Ток базы

$$I_B = \frac{E_B}{R_b}$$

$$I_B = \frac{5}{100000} = 0,000005 \text{ А} = 0,005 \text{ мА}$$

Ток коллектора

$$I_K = \beta \cdot I_B$$

$$I_K = 100 \cdot 0,000005 = 0,0005 \text{ А} = 0,5 \text{ мА}$$

$$U_K = E_K - I_K R_K$$

$$U_K = 10 - 0,0005 \cdot 2000 = 9 \text{ В}$$

Ток эмиттера

$$I_E = I_K + I_B$$

$$I_E = 0,0005 + 0,000005 = 0,000505 \text{ А} = 0,505 \text{ мА}$$

Ответ:  $U_K = 9 \text{ В}$ ;  $I_B = 0,005 \text{ мА}$ ;  $I_K = 0,5 \text{ мА}$ ;  $I_E = 0,505 \text{ мА}$

#### Раздел 4. «Биполярные транзисторы»

4.1. По входным и выходным ВАХ найти h-параметры транзистора как четырехполюсника для схемы с ОЭ.

#### Задача 31.

Пользуясь справочными данными, приведите семейство входных и выходных характеристик транзистора КТ603В в схеме с

ОЭ. В качестве независимых переменных используйте входное и выходное напряжение. Поясните поведение входных и выходных характеристик транзистора.

По справочнику установите максимально допустимые параметры транзистора: постоянный ток коллектора  $I_{K \max}$ ; напряжение коллектор–эмиттер  $U_{КЭ \max}$ ; мощность рассеиваемую коллектором транзистора  $P_{K \max}$ . На семейство выходных характеристик нанесите границы области допустимых режимов работы. Задайтесь положением рабочей точки и, пользуясь характеристиками, рассчитайте для нее значения h-параметров транзистора. На основании полученных числовых значений параметров рассчитайте параметры Т-образной эквивалентной схемы транзистора и изобразите ее.

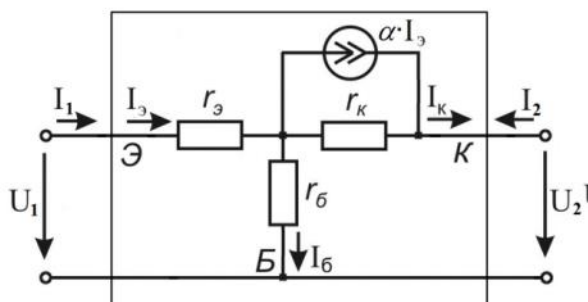


Рисунок 2 – Эквивалентная схема биполярного транзистора с общей базой

По данным справочника [1]

Постоянный ток коллектора  $I_{K \max} = 300 \text{ мА}$   
 Напряжение коллектор–эмиттер  $U_{КЭ \max} = 15 \text{ В};$   
 Мощность рассеиваемую коллектором транзистора  
 $P_{K \max} = 0,5 \text{ Вт}$ .

Определим область допустимых режимов на семействе выходных характеристик транзистора. Кривую допустимой мощности строим по выражению

$$I_K = \frac{P_{Kmax}}{U_{KЭ}}$$

1. Определяем выходную проводимость транзистора

$$h_{22э}$$

На линейном участке выходных характеристик (рис.4) выбираем рабочую точку

$$\Delta I_{\delta} = 0,5 \text{ mA}$$

$$U_{KЭ} = 3 \text{ В}$$

$$I_{\delta} = 2,5 \text{ mA}$$

$$h_{22э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KЭ}} \right|_{I_{\delta} = const}$$

Примем  $\Delta U_{KЭ} = 1 \text{ В}$ . По графику  $\Delta I_K = 4 \text{ mA} = 0,004 \text{ A}$

$$h_{22э} = \left. \frac{0,004}{1} \right|_{I_{\delta} = 2,5 \text{ mA}} = 0,004 \text{ См}$$

2. Определяем коэффициент передачи тока в схеме с ОЭ

$$h_{21э}$$

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I'_K}{I_{\delta 3} - I_{\delta 1}} \right|_{U_{KЭ} = const}$$

$$I_{\delta 3} - I_{\delta 1} = 2\Delta I_{\delta} = 1 \text{ mA} = 0,001 \text{ A}$$

По выходным характеристикам (рис.7) определяем

$$\Delta I'_K = 37 \text{ mA} = 0,037 \text{ A}$$

$$h_{21э} = \left. \frac{0,037}{0,001} \right|_{U_{KЭ} = 3 \text{ В}} = 37$$

3. Определяем входное сопротивление в схеме с ОЭ

$$h_{11э}$$

На входных характеристиках транзистора с ОЭ (рис. 3) выбираем

рабочую точку.

$$I_{\delta} = 2,5 \text{ mA}$$

$$U_{БЭ} = 0,92 \text{ В}$$

При  $\Delta I_{\delta} = 0,5 \text{ mA}$  по входной характеристике  $\Delta U_{БЭ} = 0,08 \text{ В}$

$$h_{11\delta} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{\delta}} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}}$$

$$h_{11\delta} = \left. \frac{0,08}{0,0005} \right|_{U_{КЭ} = 5 \text{ В}} = 160 \text{ Ом}$$

Определить коэффициент обратной связи по напряжению

$h_{12\delta}$ , не предоставляется возможным, так как присутствует

только одна входная характеристика при  $U_{КЭ} = 5 \text{ В}$ .

Рассчитаем параметры Т-образной схемы эквивалентной схемы транзистора.

Дифференциальное сопротивление

$$r_{\delta} = \frac{\varphi_T}{I_{Э0}}$$

$\varphi_T = 26 \text{ мВ} = 0,026 \text{ В}$  - тепловой потенциал при  $T=300$

К,

$I_{Э0}$  - ток эмиттера транзистора в рабочей точке,

$$I_{Э0} \approx I_{К0} = 106 \text{ mA} = 0,106 \text{ A}$$

$$r_{\delta} = \frac{0,026}{0,106} = 0,24 \text{ Ом}$$

$$r_{\delta}^* = \frac{1}{h_{22\delta}}$$

$$r_{\delta}^* = \frac{1}{0,004 \text{ См}} = 250 \text{ Ом}$$

$$\beta = h_{21\delta} = 37$$

$$r_{\sigma} = h_{11\varepsilon} - (1 + h_{21\varepsilon}) \cdot r_{\varepsilon}$$

$$r_{\sigma} = 160 - (1 + 37) \cdot 0,24 = 151 \text{ Ом}$$

$$h_{12\varepsilon} = r_{\varepsilon} \cdot h_{22\varepsilon}$$

$$h_{12\varepsilon} = 0,24 \cdot 0,004 = 0,00096$$

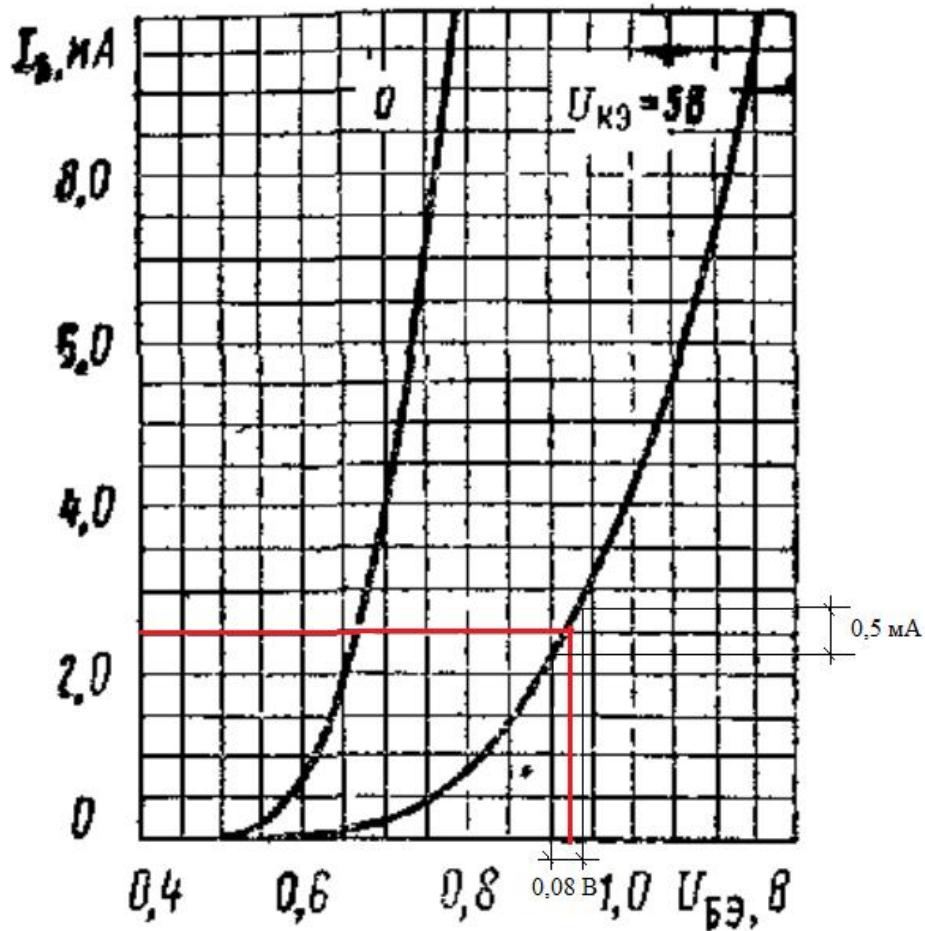


Рисунок 3 - Входные характеристики транзистора КТ603В

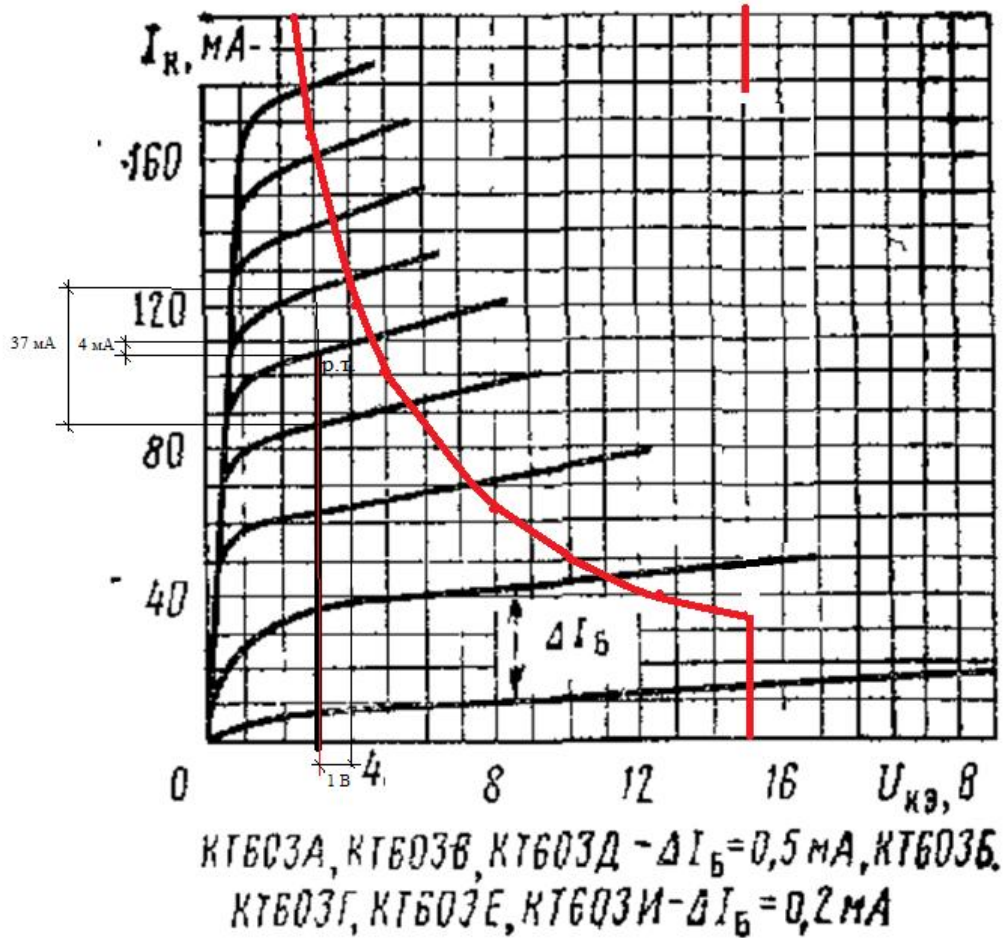


Рисунок 4 - Выходные характеристики транзистора КТ603В

Выходной ВАХ транзистора называется зависимость коллекторного тока от напряжения между коллектором и эмиттером, снятая при неизменном токе базы. Эта зависимость является нелинейной и может быть разбита на ряд участков. На большей части характеристик при  $U_{кэ} \geq U_{кэ,н}$  ток коллектора почти не зависит от напряжения  $U_{кэ}$  (пологий участок характеристик). На пологом участке выходных характеристик транзистор может характеризоваться как прибор со свойствами управляемого источника тока, т. е. источника тока  $I_K$ . значение которого можно изменять путем изменения тока  $I_B$ . Небольшой наклон

пологого участка выходной характеристики обусловлен тем, что при увеличении напряжения  $U_{кэ}$  увеличивается напряжение на коллекторном переходе и расширяется двойной электрический слой коллекторного перехода, что приводит к уменьшению толщины базы. На крутом участке выходных характеристик транзистора при уменьшении  $U_{кэ}$  уменьшается напряжение на коллекторном переходе  $U_{кб}$ , и при  $U_{кэ} = U_{кэ,н} = U_{бэ}$  напряжение  $U_{кб}$  изменяет свой знак. При дальнейшем уменьшении  $U_{кэ}$  до нуля к коллекторному переходу приложено прямое напряжение. Навстречу току дырок из эмиттера в коллектор начинается противоположное движение основных носителей (дырок) из коллектора в базу. В результате коллекторный ток при таком уменьшении  $U_{кэ}$  резко падает. Крутой участок выходных характеристик транзистора характеризуется потерей транзистором свойств усилительного элемента, эта часть характеристик используется в импульсной технике при реализации ключевого режима транзистора.

Входные характеристики транзистора — зависимостей тока базы от напряжения между базой и эмиттером: при постоянном напряжении  $U_{кэ}$ . При  $U_{кэ} = 0$  оба перехода в транзисторе работают при прямом напряжении, токи коллектора и эмиттера суммируются в базе. Входная характеристика в этом режиме представляет собой ВАХ двух р-п-переходов, включенных параллельно. При  $U_{кэ} > U_{кэ,н}$  на коллекторном переходе появляется обратное напряжение, на эмиттерном — сохраняется прямое. Ток базы в этом режиме, обусловленный процессом

рекомбинации неосновных носителей в базе, равен разности эмиттерного и коллекторного токов. Входная характеристика транзистора в этом режиме строится по прямой ветви ВАХ эмиттерного перехода, но значения тока уменьшаются на коэффициент  $(1-a)$ , показывающий, что ток базы — это лишь рекомбинационная составляющая эмиттерного тока.

**4.2.** Найти физические и  $h$ -параметры транзистора как четырехполюсника для схемы с ОЭ, используя  $h$ -параметры для схемы с ОБ.

#### Задача 41.

Привести и описать эквивалентные схемы биполярного транзистора для малого сигнала с ОБ и с ОЭ (Т-образные схемы замещения в физических параметрах).

Определить внутренние физические параметры  $r_b$ ,  $r_e$ ,  $r_k$ ,  $r_k^*$  и коэффициенты передачи по току  $\alpha$  и  $\beta$  Т-образных эквивалентных схем с ОБ и с ОЭ транзистора, если известны его  $h$ -параметры как активного линейного четырехполюсника, включенного по схеме с ОБ.

Вариант	$h$ - параметры для схемы с ОБ			
	$h_{11б}$ , Ом	$h_{12б}$	$h_{21б}$	$h_{22б}$ , См
41	40	$6,0 \cdot 10^{-4}$	- 0,97	$2 \cdot 10^{-6}$

Указанные в таблице  $h$ -параметры для схемы с ОБ пересчитать в  $h$ -параметры для схемы с ОЭ.

Решение



1)

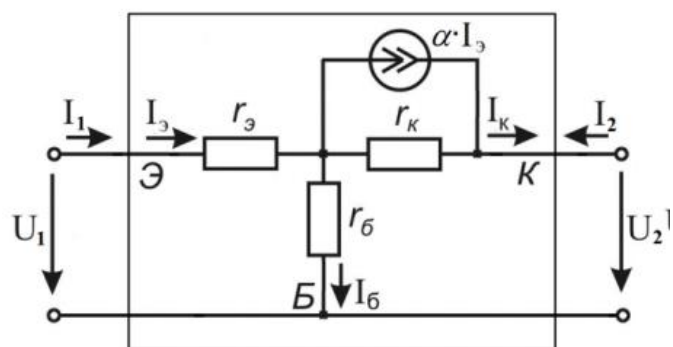


Рисунок 5 - Эквивалентная схема биполярного транзистора с общей базой

Область эмиттера – самая низкоомная область, так как насыщена примесями. За ней по пути тока идет открытый эмиттерный переход так же обладающий низким сопротивлением. Эти области отражаются довольно малым сопротивлением  $r$ . Далее по пути тока расположена область тонкой базы, в которой примесей мало и, следовательно, ее сопротивление заметнее. И, наконец, ток входит в коллектор, по пути носители проходят закрытый коллекторный переход, да и сама коллекторная область достаточно высокоомная. Отражается это сопротивлением  $r_k$  10000 – 100000 Ом. Для усиления сигнала схему дополняют генератором тока  $\alpha I_{\text{э}}$ .

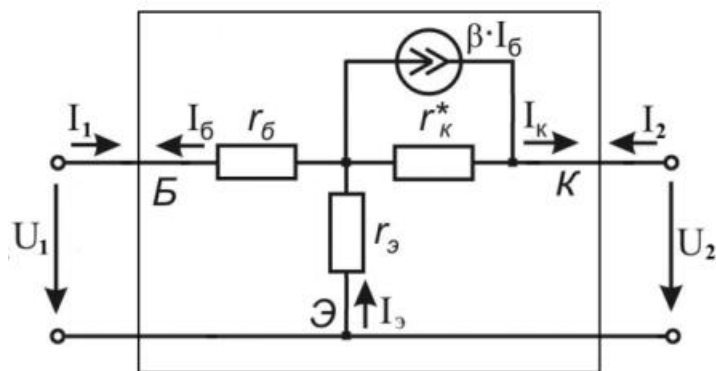


Рисунок 6 - Эквивалентная схема биполярного транзистора с общим эмиттером

Особенностью работы БТ в режиме общего эмиттера являются большие коэффициенты усиления как по току, так и по напряжению. Важной особенностью такого включения является инвертирование фазы выходного сигнала на 180 градусов, а также низкое выходное сопротивление и высокое входное. Источник сигнала подключается к базе, поэтому через транзистор протекает большой ток эмиттер-коллектор.

## 2) Физические параметры транзистора с ОБ

$$\beta = \frac{|h_{21\delta}|}{1 - |h_{21\delta}|}$$

$$\beta = \frac{0,97}{1 - 0,97} = 32,3$$

$$r_э = h_{11\delta} - \frac{(1 + h_{21\delta}) \cdot h_{12\delta}}{h_{22\delta}}$$

$$r_э = 40 - \frac{(1 - 0,97) \cdot 6 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-6}} = 31 \text{ Ом}$$

$$r_б = \frac{h_{12\delta}}{h_{22\delta}}$$

$$r_{\delta} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-6}} = 200 \text{ Ом}$$

$$r_{x(\delta)} = \frac{1}{h_{22\delta}}$$

$$r_{x(\delta)} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-6}} = 0,5 \cdot 10^6 \text{ Ом}$$

$$\alpha = -h_{21\delta}$$

$$\alpha = 0,97$$

3)  $h$ -параметры для схемы с ОЭ:

$$h_{11\varepsilon} = \frac{h_{11\delta}}{1 + h_{12\delta}}$$

$$h_{11\varepsilon} = \frac{40}{1 - 0,97} = 2333 \text{ Ом}$$

$$h_{12\varepsilon} = \frac{h_{11\delta} \cdot h_{22\delta}}{1 + h_{21\delta}} - h_{12\delta}$$

$$h_{12\varepsilon} = \frac{40 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,97} - 6 \cdot 10^{-4} = 2,1 \cdot 10^{-3}$$

$$h_{21\varepsilon} = -\frac{h_{21\delta}}{1 + h_{21\delta}}$$

$$h_{21\varepsilon} = \frac{0,97}{1 - 0,97} = 32,3$$

$$h_{22\varepsilon} = \frac{h_{22\delta}}{1 + h_{21\delta}}$$

$$h_{22\varepsilon} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,97} = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ См}$$

Физические параметры транзистора с ОЭ

$$\beta = h_{12\varepsilon}$$

$$\beta = 2,1 \cdot 10^{-3}$$

$$r_3 = \frac{h_{123}}{h_{223}}$$

$$r_3 = \frac{2,1 \cdot 10^{-3}}{6,7 \cdot 10^{-5}} = 31 \text{ Ом}$$

$$r_k = \frac{(h_{213} + 1)(1 - h_{123})}{h_{223}}$$

$$r_k = \frac{(32,3 + 1)(1 - 2,1 \cdot 10^{-3})}{6,7 \cdot 10^{-5}} = 4,96 \cdot 10^5 \text{ Ом}$$

$$\alpha = \frac{h_{213}}{1 + h_{223}}$$

$$\alpha = \frac{32,3}{1 + 6,7 \cdot 10^{-5}} = 32,298$$

4.3. Рассчитать частотные свойства транзистора.

Рассчитайте модуль  $|h_{213}|$  и фазу  $\varphi_{h_{213}}$  коэффициента передачи по току транзистора в схеме с ОЭ на частоте  $f$ .

Дано:

$$f_{h_{213}} = 20 \text{ МГц} = 2 \cdot 10^7 \text{ Гц}$$

$$f = 110 \text{ кГц}$$

$$\alpha = 0,965$$

Найти:  $|h_{213}|$  - ?;  $\varphi_{h_{213}}$  - ?

Решение:

Статический коэффициент передачи по току для включения с ОЭ

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

$$\beta = \frac{0,965}{1 - 0,965} = 27,6$$

Предельная частота коэффициента передачи по току для включения с ОЭ

$$f_{h_{21\beta}} = \frac{f_{h_{21\beta}}}{1 + \beta}$$

$$f_{h_{21\beta}} = \frac{2 \cdot 10^7}{1 + 27,6} = 7,0 \cdot 10^5 \text{ Гц} = 700 \text{ кГц}$$

Модуль коэффициента передачи по току в схеме с ОЭ

$$|h_{21\beta}| = \frac{\beta}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{h_{21\beta}}}\right)^2}}$$

$$|h_{21\beta}| = \frac{27,6}{\sqrt{1 + \left(\frac{110}{700}\right)^2}} = 27,3$$

Фаза коэффициента передачи по току в схеме с ОЭ

$$\varphi_{h_{21\beta}} = \arctg\left(\frac{f}{f_{h_{21\beta}}}\right)$$

$$\varphi_{h_{21\beta}} = \arctg\left(\frac{110}{700}\right) = 8,9^\circ$$

### Список использованных источников

1. Транзисторы для аппаратуры широкого применения. Б.Л. Перельман. Справочник. 1981 г. – 652 с.