

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ**  
**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)**  
**Кафедра МНЭ**

**ОТЧЕТ**

**по практической работе №4**  
**по дисциплине «ОМиПМЭК»**

**Тема: «Схемотехническое моделирование интегрального биполярного транзистора»**

Студент гр. 9206

\_\_\_\_\_

Краснокутский Д. С.  
Дорошенко С. В.  
Ремеле В. Е.

Преподаватель

\_\_\_\_\_

Рындин Е. А.

Санкт-Петербург

2023

### Цель работы.

Расчет и построение семейства выходных ВАХ интегрального биполярного транзистора на основе модели Эберса-Молла и исходных данных, указанных в варианте задания.

### Основные теоретические положения.

Биполярный транзистор – прибор, состоящий из трех полупроводниковых областей с чередующимся типом проводимости с двумя р-п-переходами, пригодный для усиления, генерации и переключения электрических сигналов.

Биполярные транзисторы бывают с n-p-n и с p-n-p структурой (рисунок 1).

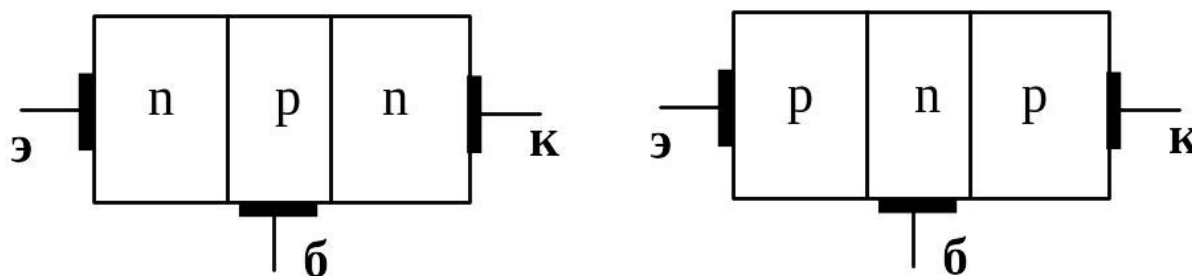


Рисунок 1 – Структура n-p-n и p-n-p транзисторов

Более детально структура биполярного транзистора.

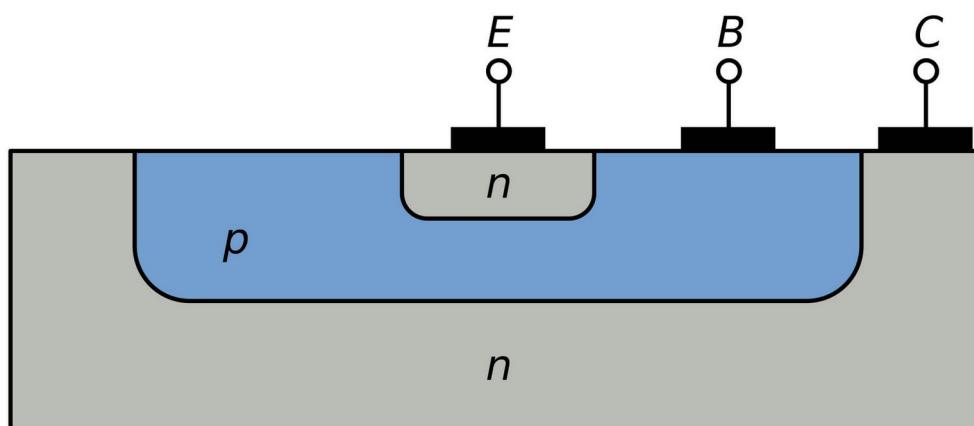


Рисунок 2 – Планарная структура биполярного транзистор n-p-n типа

Совершенно аналогично выглядит и транзистор p-n-p типа.

Транзистор изготавливают посредством легирования подложки нужными типами примесей в определенной последовательности: сначала коллектор, затем формируется базовая область, после чего формируется эмиттерная область. При этом профиль легирования имеет вид.

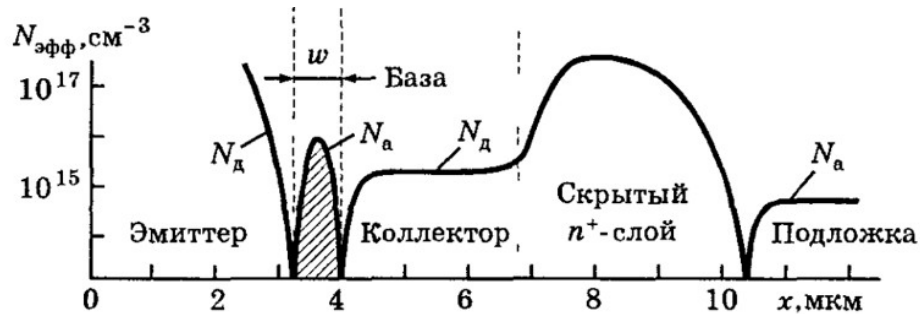


Рисунок 3 – Профиль легирования n-p-n транзистора

Рассмотрим принцип действия биполярного транзистора. Биполярный транзистор можно представить, как два последовательных p-n перехода, при подаче напряжения на транзистор переход БЭ открывается, из-за чего происходит инжекция носителей заряда из эмиттера в базу. Поскольку инжектированные носители заряда не являются основным в базе они частично рекомбинируют с носителями заряда в базе, но из-за малой толщины база число актов рекомбинации мало и рекомбинационный ток мал. Затем инжектированные в базу носители продвигаются к коллектору вследствие градиента концентрации, т.к переход КБ смещен в обратном направлении. Эти носители и составляют коллекторный ток.

Стоит отметить что выделяют четыре режима работы транзистора:

### 1. Нормальный

В нормальном режиме работы база-эмиттерный переход подключен прямо, а база-коллекторный обратно. В этом режиме работают подавляющее большинство транзисторов.

### 2. Инверсный

База-эмиттерный переход подключен обратно, а база-коллекторный прямо.

### 3. Насыщения

Оба перехода смещены прямо.

### 4. Отсечки

Оба перехода смещены обратно.

Биполярный транзистор может быть включен тремя различными способами:

#### 1. С общей базой

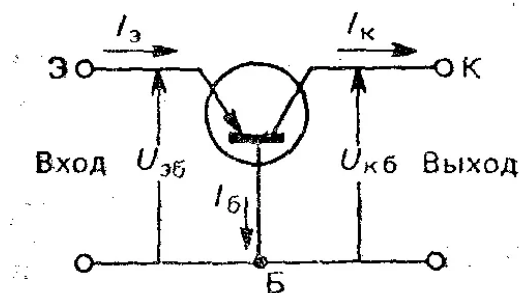


Рисунок 4 – Схема включения с общей базой

Схема с общей базой обладает малым входным сопротивлением (десятки Ом), т.к. входная цепь представляет собой БЭ-переход транзистора. У подобной схемы включения очень хорошие частотные свойства и хорошая термостабильность, однако ценой этому является отсутствие какого-либо усиления по току.

#### 2. С общим коллектором

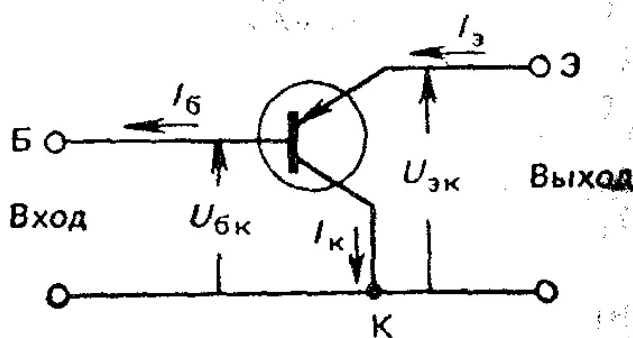


Рисунок 5 – Схема включения с общим коллектором

Схема включения с общим коллектором обладает наибольшим входным сопротивлением т.к. входная цепь – это закрытый переход КБ, также

она обладает низким выходным сопротивлением, а также высоким коэффициентом усиления. Однако у схемы есть и недостаток – она не усиливает напряжение.

### 3. С общим эмиттером

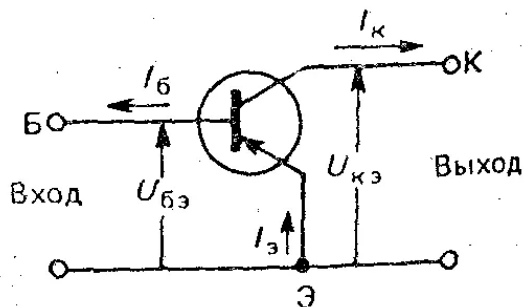


Рисунок 6 – Схемы включения с общим эмиттером

Эта схема наиболее популярна в связи с тем, что она позволяет достичь наибольшего усиления по мощности. Также эта схема обладает большим входным сопротивлением чем схема с общей базой. Но у схемы есть недостатки – у нее плохие температурные и частотные свойства.

Важнейшими характеристиками транзистора являются семейства проходных и выходных характеристик. Каждой схеме включения соответствует свое семейство выходных и проходных характеристик:

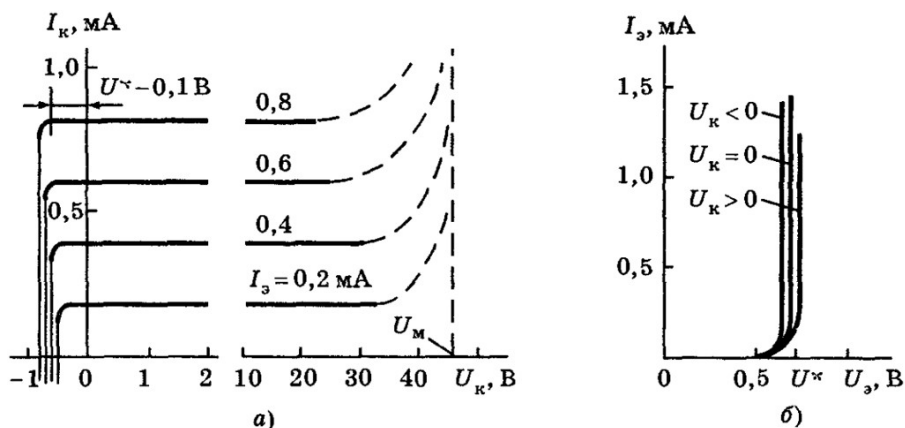


Рисунок 7 – Проходные и выходные характеристики биполярного транзистора в схеме с общей базой» (а- выходные, б – проходные).

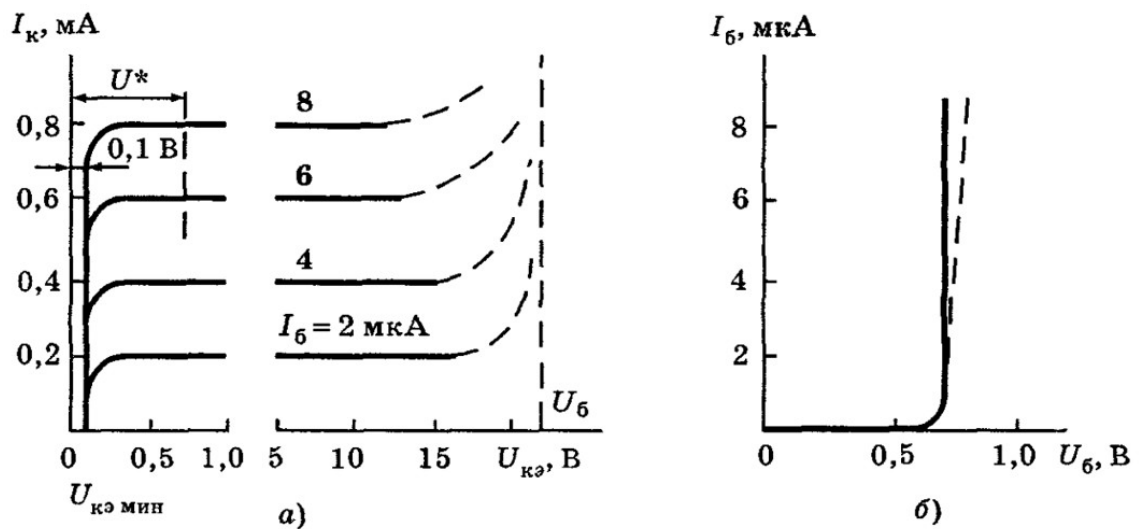


Рисунок 8 – Проходные и выходные характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером (а- выходные, б – проходные).

Помимо этого, транзистор обладает несколькими важными статическими параметрами, выделим три наиболее важных из них, которые будут использоваться в дальнейшем:

1. Коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha = \frac{I_k}{I_э}$
2. Коэффициент передачи тока базы  $\beta = \frac{I_k}{I_б}$

При моделировании биполярного транзистора можно пользоваться различными моделями разной степени сложности. Наиболее простой и при этом сравнительно точной является модель Эберса-Молла. Рассмотрим эту модель подробнее. В модели Эберса-Молла биполярный транзистор представляется в виде эквивалентной схемы.

В модели Эберса—Молла используется большинство допущений классической теории Шокли идеализированного полупроводникового диода: малость поперечных размеров по сравнению с продольными (перпендикулярными плоскостям  $p$ - $n$  переходов), однородность легирования областей базы и эмиттера, низкий уровень инжекции, пренебрежение токами генерации—рекомбинации носителей заряда в  $p$ - $n$  переходах и диффузионный механизм токов неосновных носителей. Дополнительными допущениями являются:

- эквипотенциальность базы в плоскостях  $p-n$  переходов;
- постоянство нормального и инверсного коэффициентов передачи тока

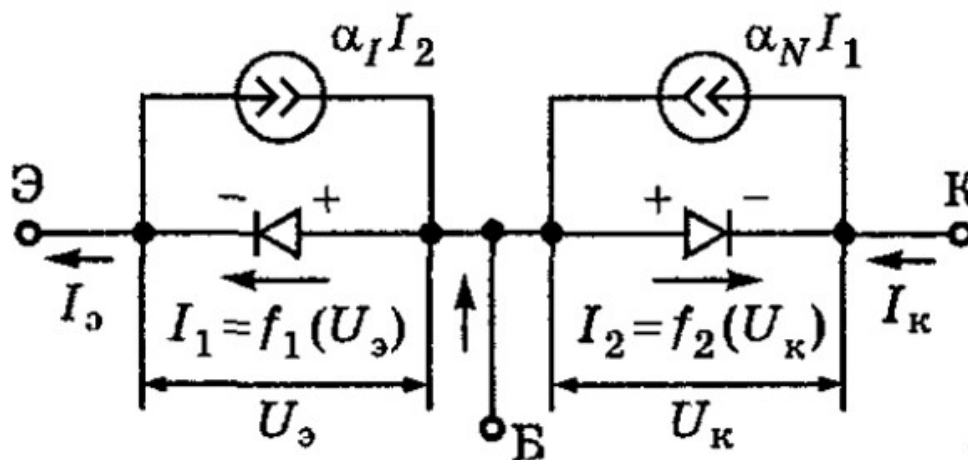


Рисунок 9 – Модель Эберса-Молла

Модель Эберса-Молла в таком виде не учитывает переходные процессы, протекающие в транзисторе, в случае же если нужно учитывать переходные процессы необходимо рассматривать эквивалентную схему с конденсаторами. Ограничимся статическими зависимостями и получим при помощи этой модели семейство проходных и выходных характеристик.

По законам Кирхгофа:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}$$

$$I_{\text{э}} = I_1 - a_I I_2$$

$$I_{\text{к}} = a_N I_1 - I_2$$

Тогда используя выражение для тока диода  $I = \exp \frac{U}{\varphi_T}$ :

$$I_1 = I'_{\text{э}0} \exp \left( \frac{U_{\text{э}}}{\varphi_T} - 1 \right)$$

$$I_2 = I'_{\text{к}0} \exp \left( \frac{U_{\text{к}}}{\varphi_T} - 1 \right)$$

Где  $I'_{\text{э}0} = -I_1$  с другой стороны  $I_2 = a_N I_1$ , тогда  $I_{\text{э}0} = I_1 - a_I I_2 = (1 - a_I a_N) I_1$

$$I_{\text{э}0} = (1 - a_I a_N) I'_{\text{э}0}$$

Окончательно имеем:  $I'_{\text{э}0} = \frac{I_{\text{э}0}}{1 - a_I a_N}$  и  $I'_{\text{к}0} = \frac{I_{\text{к}0}}{1 - a_I a_N}$

В схеме с общей базой  $I_{вых} = I_k = f(I_э, U_k)$

$$I_k = a_N I'_{э0} \exp\left(\frac{U_э}{\phi_T} - 1\right) - I'_{k0} \exp\left(\frac{U_э}{\phi_T} - 1\right)$$

$$I_k = a_N I_э - I_2 + a_I a_N I_2$$

$$I_k = a_N I_э - I_{k0} \exp\left(\frac{U_э}{\phi_T} - 1\right)$$

Такая модель широко используется при моделировании различных схем, устройств. Эквивалентная модель “подгоняется” под эксперимент и с необходимой точностью позволяет предсказать поведение той или иной схемы, включающей в себя транзисторы. Вычислительная работа небольшая, скорость моделирования высокая.

### Полученное техническое задание.

Таблица 1 – Параметры биполярного транзистора

$\alpha_N$	$U_k, В$	$I_{k0}, А$	$I_э, мА$
0,85	-0,5 – 3	$1 \times 10^{-8}$	0 – 4

Для выполнения расчетов напишем код в среде Matlab.

```
clear all;
close all;
clc;

aN=0.85;
Uk=[-0.5:0.01:3];
Ik0=1e-8;
Ie=[0:1e-3:4e-3];

kB=1.38e-23;
T=300;
q=1.6e-19;
ft=kB*T/q;
```



```

for j=1:length(Ie)
    for i=1:length(Uk)
        Ik(i,j)=aN*Ie(j)-Ik0*(exp(-Uk(i)/ft)-1);
    end
end

plot(Uk,Ik.*(1e3),'LineWidth',2);
xlabel('Collector voltage, V','FontSize', 14)
ylabel('Collector current, mA','FontSize', 14)
grid on
ylim([-0.5 max(max(Ik.*(1e3)))*1.1])
legend('I_e=0mA','I_e=1mA','I_e=2mA','I_e=3mA','I_e=4mA')
print(gcf,'-djpeg','VAH')

```

В результате выполнения программы получим выходную характеристику.

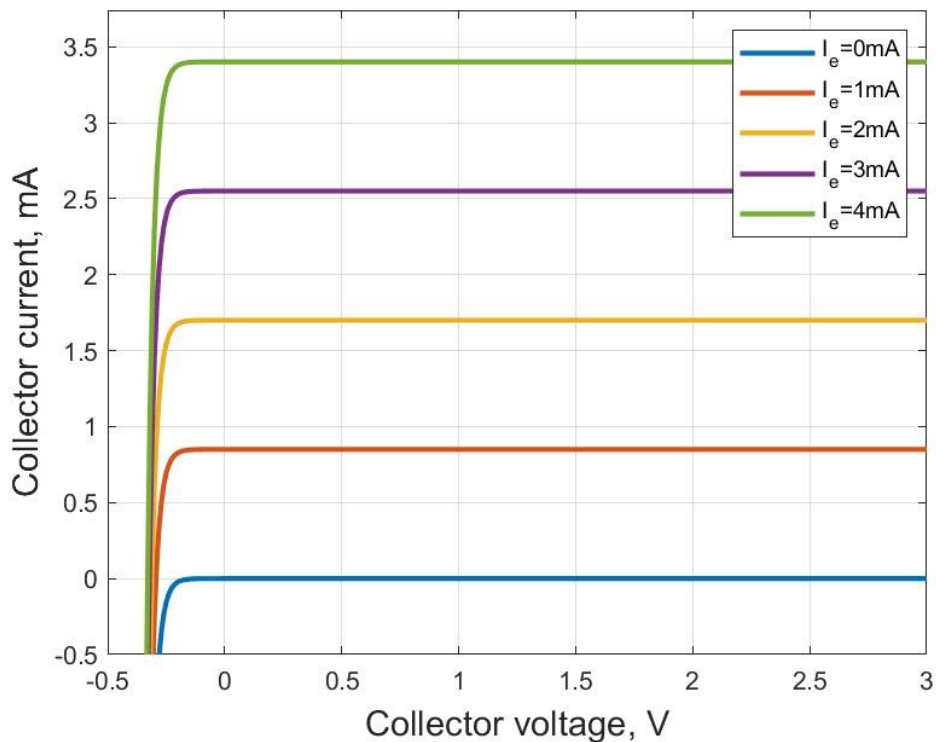


Рисунок 10 – Выходная характеристика биполярного транзистора в схеме с общей базой

### Вывод.

В ходе данной практической работы было проведено моделирование интегрального биполярного транзистора в схеме с общей базой. В качестве модели была выбрана модель Эберса-Молла. Для расчета выходных характеристик использовалась программа, написанная в среде MatLab.

Результатом работы программы является график семейства выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общей базой.

Анализ результатов показывает, что данная модель является достаточно компактной и точной. Модель может быть изменена под определенные результаты эксперименты. Скорость расчетов очень высокая и затраты на оперативную память минимальные, что позволяет применять такие модели в схемах, где транзисторов достаточно большое количество.