

Отчет по лабораторной работе №2
**Измерение статических характеристик биполярного
транзистора**

Выполнили студенты 440 группы
Есюнин Д.В., Есюнин М.В.

Нижний Новгород, 2019

1. Теоретическая часть

1.1. Введение

Принцип действия биполярного транзистора состоит в управлении током неосновных носителей заряда, инжектируемых эмиттерным $p - n$ переходом в базу и достигающих коллекторного $p - n$ перехода, включенного в запорном направлении.

Управление током, протекающим через транзистор, достигается при помощи изменения высоты энергетических барьеров $p - n$ переходов: прямосмещенного эмиттерного и обратносмещенного коллекторного. Биполярный транзистор является прибором, управляемым током – малый ток базы управляет большим током, протекающим из эмитера в коллектор.

1.2. Устройство биполярного транзистора

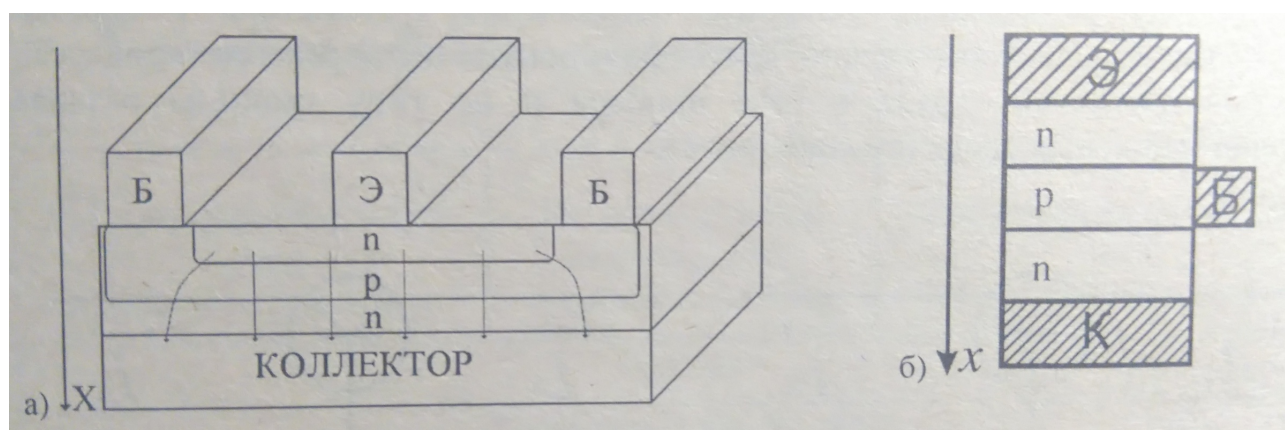


Рис. 1

Прибор представляет собой монокристалл, содержащий три полупроводниковых области с различным типом проводимости, которые образуют между собой два $p - n$ перехода, а с наружными металлическими электродами – омические контакты.

Как видно из рис. 1а ток, за исключением периферийных областей, течет перпендикулярно границам $p - n$ переходов. Обычно краевыми эффектами на периферии структуры пренебрегают, так как толщина слоя базы много меньше её латеральных размеров. Идеализированная одномерная структура транзистора представлена на рис. 1.

Отметим две принципиальные конструктивно-технологические особенности транзисторов:

- Малая толщина базы по сравнению с диффузионной длиной дырок L_p , являющихся в базе неосновными носителями.

- Относительно малая степень легирования материала базы примесными атомами по сравнению с эмиттером и коллектором.

1.2.1 Схема включения транзистора

Несмотря на то, что схема включения транзистора непосредственно не влияет на физику его работы, она определяет граничные условия на контактах. На рис. 6 приведены две схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ).

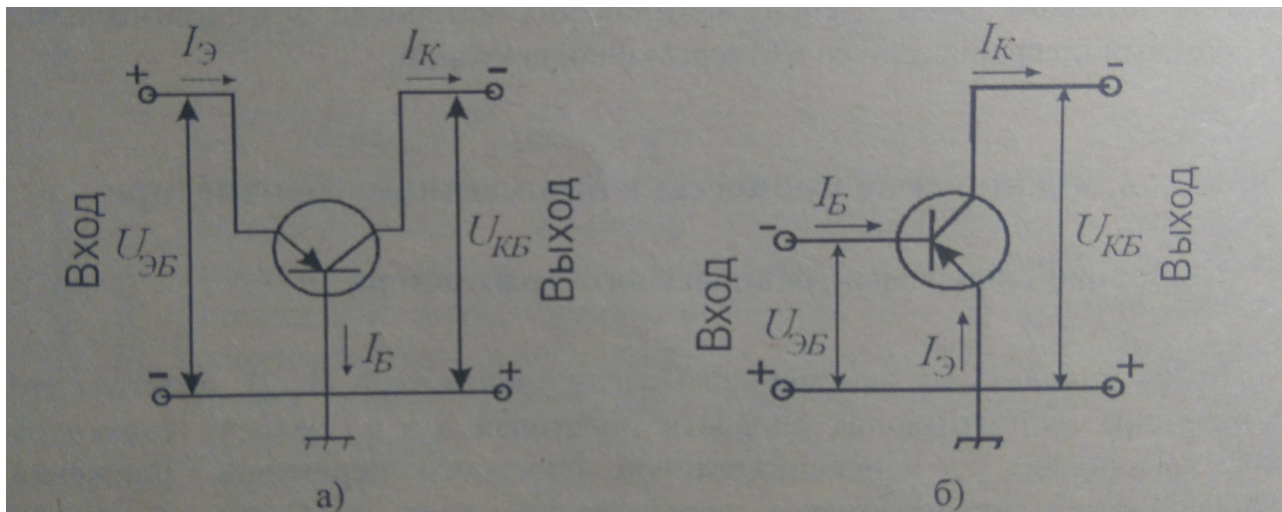


Рис. 2

1.2.2 Зонная диаграмма транзистора в активном режиме

Присоединим источники напряжения к клеммам транзистора. При нормальном включении, обеспечивающим активный режим, на эмиттерный переход должно быть подано прямое смещение, а на коллекторный переход обратное. На рис. 2 показано включение источников по схеме с общей базой при котором вывод базы является общим для обоих источников питания. При малом уровне инжекции (т.е. вброса электронов и дырок соответственно области p и n -типа) электрическое поле вне перехода равно нулю. Тогда на достаточном удалении от границ переходов носители находятся в состоянии термодинамического равновесия, а уровни Ферми располагаются относительно краев зон в соответствующих областях так же, как в равновесном транзисторе (рис. 46). На рис. 76 изображена зонная диаграмма транзистора в активном режиме работы. Перепад уровней Ферми в областях n -переходов соответствует приложенным к этим переходам напряжениям. Кроме того, приложенные напряжения приводят к трансформации зонной диаграммы.

- Эмиттерный переход, находящийся под прямым смещением, сужается, а высота потенциального барьера в переходе уменьшается на $e_0 U_{ЭБ}$;

- Обратнo-смещенный коллекторный переход расширяется, а высота потенциального барьера увеличивается на величину $e_0 U_{кб}$.

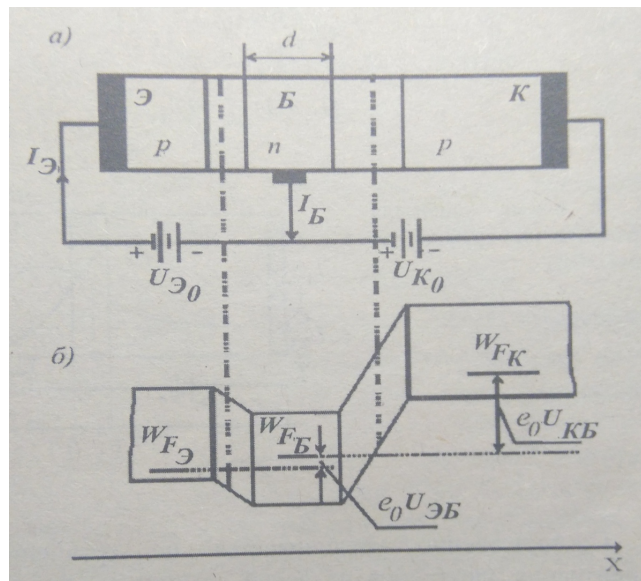


Рис. 3

2. Практическая часть

2.1. Измерение входной характеристики транзистора $I_б = f(U_б)$

Для измерения входной характеристики транзистора собрали схему № 1, изображенную на рис. (4). Сняли зависимость тока базового перехода от напряжения на нем.

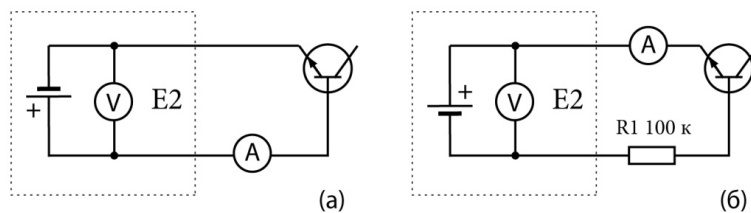


Рис. 4: Измерительная схема №1

$U_б, В$	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.1
$I_б, мА$	0	0	0.0024	0.017	0.062	190	274	1.75	2.7	3.6	4.6	5.54	6

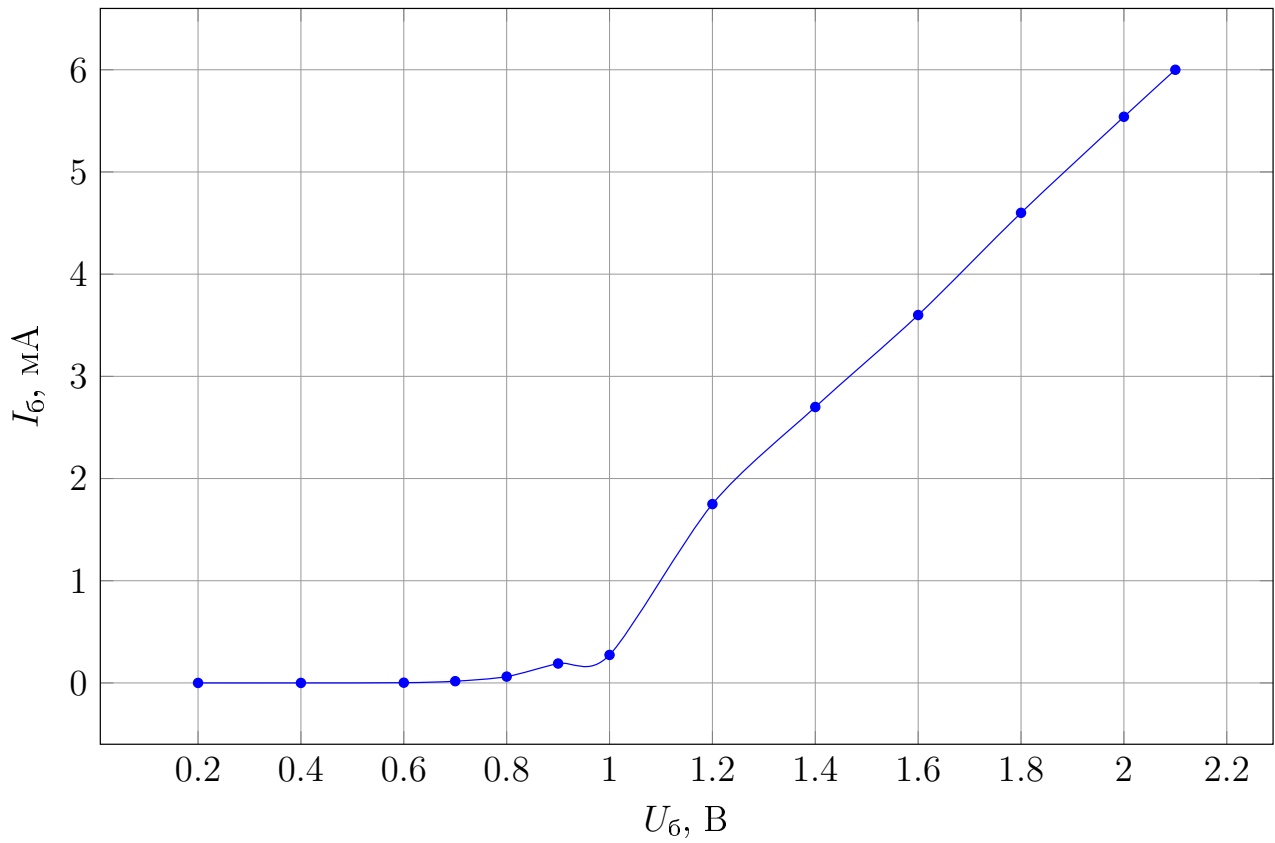


Рис. 5: входная характеристика транзистора $I_{\text{б}} = f(U_{\text{б}})$

2.2. Измерение переходных характеристик транзистора $I_{\text{к}} = f(U_{\text{б}})$

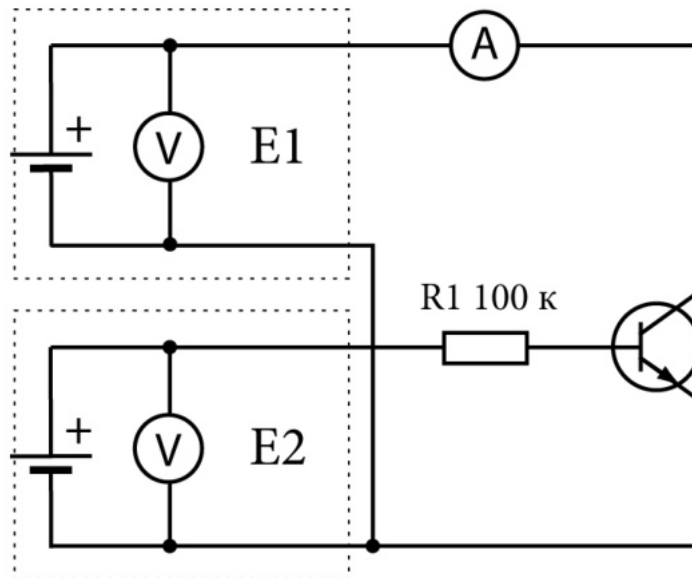
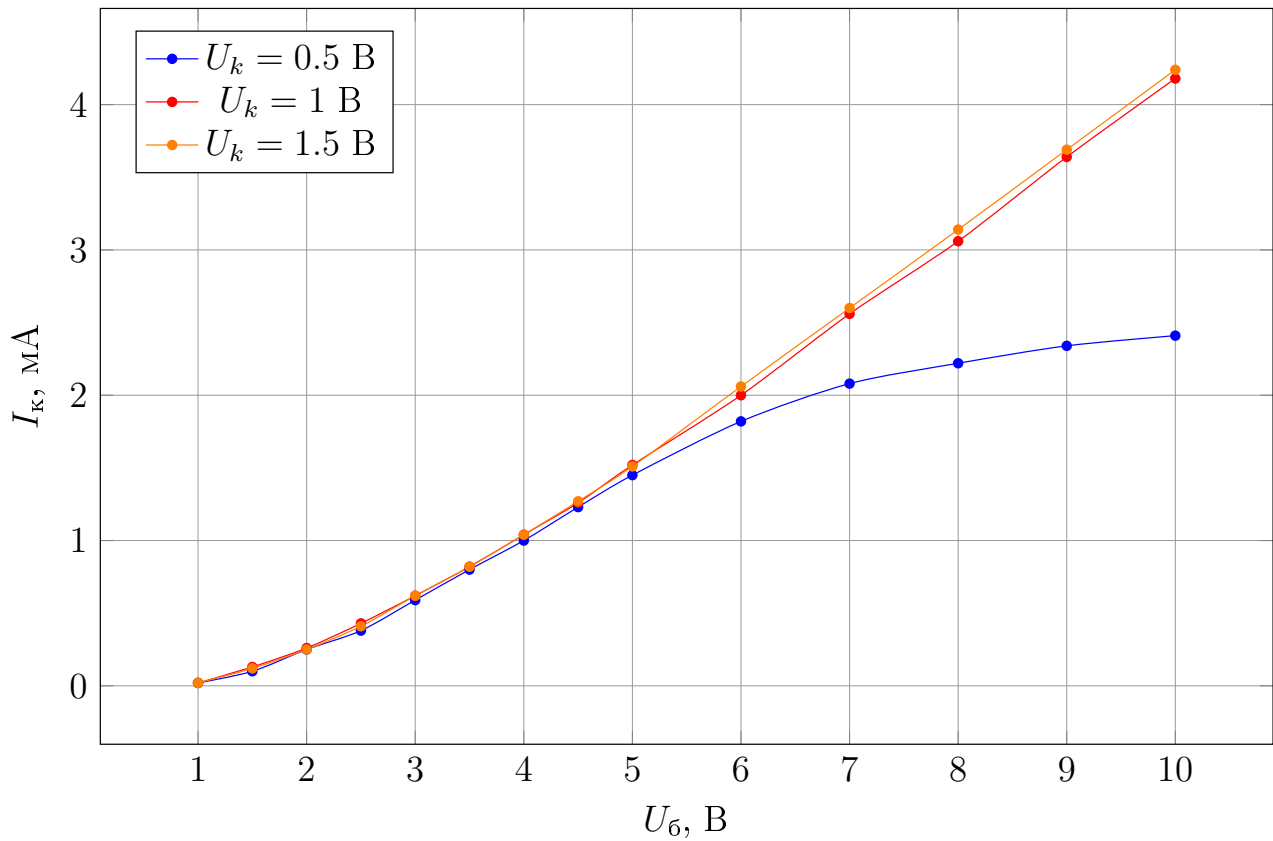


Рис. 6: Измерительная схема №2

Для выполнения этого задания собрали измерительную схему № 2 (6). Провели измерение семейства переходных характеристик при напряжениях на коллекторе транзистора 0,5 В, 1 В и 5 В.

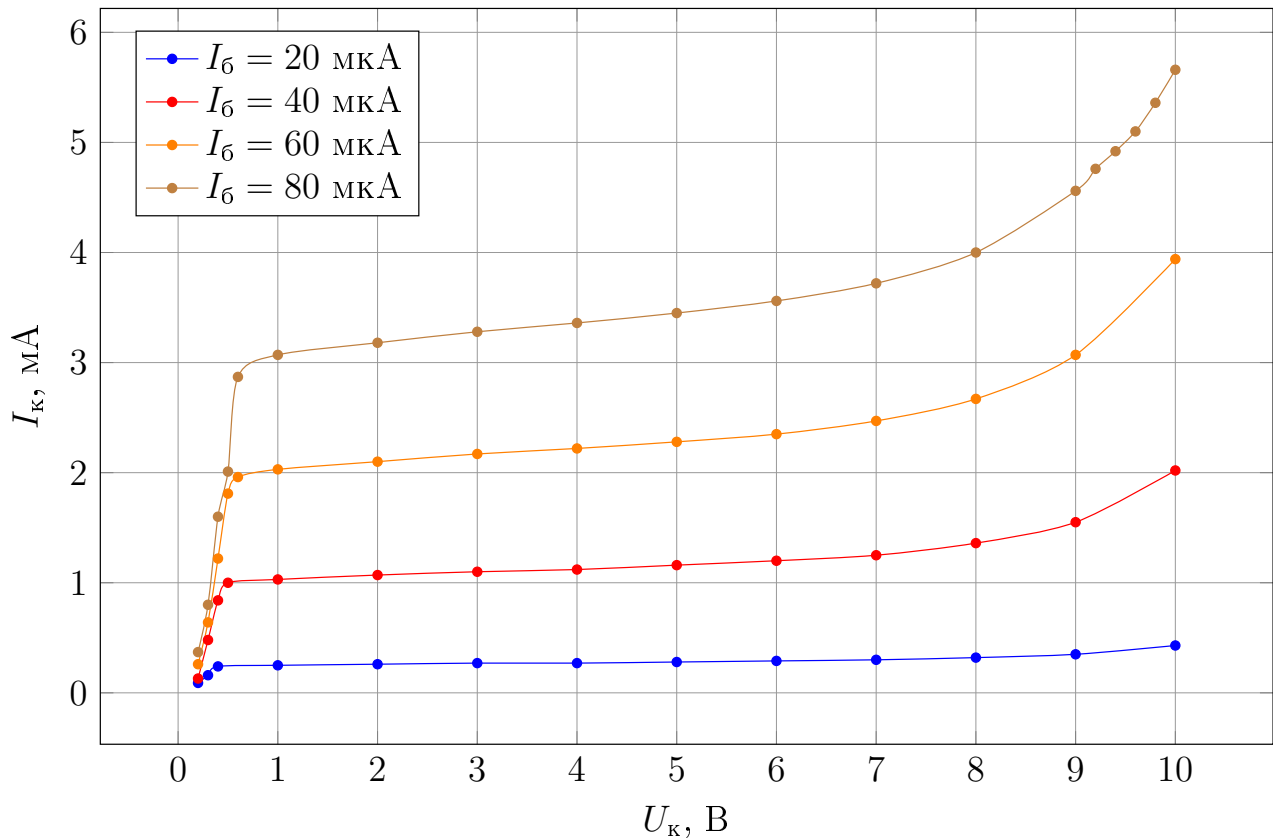
$U_k = 0.5 \text{ В}$		$U_k = 1 \text{ В}$		$U_k = 1.5 \text{ В}$	
$U_6, \text{ В}$	$I_k, \text{ мА}$	$U_6, \text{ В}$	$I_k, \text{ мА}$	$U_6, \text{ В}$	$I_k, \text{ мА}$
1	0.02	1	0.02	1	0.02
1.5	0.1	1.5	0.13	1.5	0.12
2	0.25	2	0.26	2	0.25
2.5	0.38	2.5	0.43	2.5	0.41
3	0.59	3	0.62	3	0.62
3.5	0.8	3.5	0.82	3.5	0.82
4	1	4	1.04	4	1.04
4.5	1.23	4.5	1.26	4.5	1.27
5	1.45	5	1.52	5	1.51
6	1.82	6	2	6	2.06
7	2.08	7	2.56	7	2.6
8	2.22	8	3.06	8	3.14
9	2.34	9	3.64	9	3.69
10	2.41	10	4.18	10	4.24

Рис. 7: переходная характеристика транзистора $I_k = f(U_6)$

2.3. Измерение выходных характеристик транзистора $I_k = f(U_k)$

Выполнение этого задания производится при включении транзистора по схеме №2 (6). Были проведены измерения семейства выходных характеристик при токах базы транзистора 20 мкА, 40 мкА, 60 мкА и 80 мкА.

$I_{\bar{6}} = 20 \text{ мкА}$		$I_{\bar{6}} = 40 \text{ мкА}$		$I_{\bar{6}} = 60 \text{ мкА}$		$I_{\bar{6}} = 80 \text{ мкА}$	
$U_{\text{к}}, \text{ В}$	$I_{\text{к}}, \text{ мА}$	$U_{\text{к}}, \text{ В}$	$I_{\text{к}}, \text{ мА}$	$U_{\text{к}}, \text{ В}$	$I_{\text{к}}, \text{ мА}$	$U_{\text{к}}, \text{ В}$	$I_{\text{к}}, \text{ мА}$
0.2	0.09	0.2	0.13	0.2	0.26	0.2	0.37
0.3	0.16	0.3	0.48	0.3	0.64	0.3	0.8
0.4	0.24	0.4	0.84	0.4	1.22	0.4	1.6
1	0.25	0.5	1	0.5	1.81	0.5	2.01
2	0.26	1	1.03	0.6	1.96	0.6	2.87
3	0.27	2	1.07	1	2.03	1	3.07
4	0.27	3	1.1	2	2.1	2	3.18
5	0.28	4	1.12	3	2.17	3	3.28
6	0.29	5	1.16	4	2.22	4	3.36
7	0.3	6	1.2	5	2.28	5	3.45
8	0.32	7	1.25	6	2.35	6	3.56
9	0.35	8	1.36	7	2.47	7	3.72
10	0.43	9	1.55	8	2.67	8	4
		10	2.02	9	3.07	9	4.56
				10	3.94	9.2	4.76
						9.4	4.92
						9.6	5.1
						9.8	5.36
						10	5.66

Рис. 8: выходная характеристика транзистора $I_K = f(U_K)$

2.4. Расчёт параметров транзистора

Рассмотренные в теоретической части эквивалентные схемы не являются единственно возможными. В литературе можно встретить множество других схем, в частности, П-образные схемы. С точки зрения схемотехники выбор конкретной схемы не имеет существенного значения. Достаточно представить транзистор в виде некоторого бесструктурного четырехполюсника, и задать связи между входными и выходными величинами.

В приближении малого сигнала 4-х полюсник является линейным и упомянутым связям соответствует система двух линейных уравнений. Естественно, что коэффициенты уравнений (параметры 4-х полюсника) зависят не только от физических свойств транзистора и режима, но также от его схемы включения и выбора каких-то двух величин из 4-х в качестве управляющих переменных.

Преимуществом такого подхода является устранение произвола, связанного с выбором той или иной эквивалентной схемы, т.к. величины параметров определяются непосредственно из уравнений транзистора.

Рассмотрим для иллюстрации определение h -параметров транзистора для включения с общим эмиттером. Для h -системы в качестве независимых (управляющих) переменных выбираются входной ток и выходное напряжение. В результате уравнения линейного 4-х

полюсника имеет вид:

$$\begin{aligned} U_{\text{BX}} &= h_{11}i_{\text{BX}} + h_{12}U_{\text{ВЫХ}}, \\ i_{\text{ВЫХ}} &= h_{21}i_{\text{BX}} + h_{22}U_{\text{ВЫХ}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Из (1) следует, что

$$\begin{aligned} h_{11} &= \left(\frac{U_{\text{BX}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \right) \bigg|_{i_{\text{ВЫХ}}=0} & h_{12} &= \left(\frac{U_{\text{BX}}}{i_{\text{ВЫХ}}} \right) \bigg|_{U_{\text{ВЫХ}}=0} \\ h_{21} &= \left(\frac{i_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВЫХ}}} \right) \bigg|_{U_{\text{ВЫХ}}=0} & h_{22} &= \left(\frac{i_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \right) \bigg|_{i_{\text{ВЫХ}}=0} \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно (4), h_{11} имеет смысл входного сопротивления 4-х полюсника при закороченном выходе; h_{12} – коэффициент обратной связи по напряжению, при разомкнутом входе; h_{21} – коэффициент усиления по току при закороченном выходе; h_{22} – выходная проводимость при разомкнутом входе. Для системы с ОЭ:

$$\begin{aligned} i_{\text{BX}} &= i_{\text{б}} & i_{\text{ВЫХ}} &= i_{\text{к}} \\ U_{\text{ВЫХ}} &= U_{\text{к}} + U_{\text{э}} = U_{\text{к}}^* \end{aligned} \quad (3)$$

Отсюда можно получить h -параметры через основные параметры транзистора:

$$\begin{aligned} h_{11} &= r_{\text{б}} + \frac{r_{\text{э}}}{1 - \alpha}, & h_{12} &= \frac{r_{\text{э}}}{2(1 - \alpha)r_{\text{к}}}, \\ h_{21} &= \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}, & h_{22} &= \frac{1}{(1 - \alpha)r_{\text{к}}} \end{aligned}$$

Формулы (3) служат в качестве исходных при измерениях h -параметров. Согласно (3) они определяются из опытов при условии короткого замыкания на выходе или холостого на входе. Поскольку выходная цепь в схеме с ОЭ является высокоомной, а входная, наоборот – низкоомной, указанные эксперименты не вызывают затруднений. Именно поэтому h -система наиболее удобна для схем с ОЭ и ОБ. Отметим, что величины h - одного и того же транзистора при различных схемах включения транзистора также различны.

h -параметры будем рассчитывать при $I_{\text{б}} = 40$ мкА, $U_{\text{к}} = 5$ В. Из прямой характеристики перехода база-эмиттер мы можем найти сопротивление базы $R_{\text{б}} = h_{11} = \frac{\Delta U_{\text{б}}}{\Delta I_{\text{б}}}$

$$\begin{aligned} h_{11} &= \left(\frac{U_{\text{б}}}{i_{\text{б}}} \right) \bigg|_{U_{\text{к}}=5 \text{ В}} = \frac{(2 - 1.2) \text{ В}}{(5.54 - 1.75) \text{ мА}} \approx 211 \text{ Ом} \\ h_{12} &= \left(\frac{U_{\text{б}}}{U_{\text{к}}} \right) \bigg|_{i_{\text{б}}=40 \text{ мкА}} = \frac{i_{\text{б}} \cdot R_{\text{б}}}{U_{\text{к}}} = \frac{40 \text{ мкА} \cdot 211 \text{ Ом}}{5 \text{ В}} \approx 0,042 \\ h_{21} &= \left(\frac{i_{\text{к}}}{i_{\text{б}}} \right) \bigg|_{U_{\text{к}}=5 \text{ В}} = \frac{1.16 \text{ мА}}{40 \text{ мкА}} = 29 \\ h_{22} &= \left(\frac{i_{\text{к}}}{U_{\text{к}}} \right) \bigg|_{i_{\text{б}}=40 \text{ мкА}} = \frac{1.16 \text{ мА}}{5 \text{ В}} = 0.23 \text{ Ом}^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

По результатам проведённых измерений были рассчитаны и построены зависимости коэффициента передачи тока от напряжения коллектора при токах коллектора 2 мА и 5 мА.

Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, уравнение (4) примет вид

$$\begin{aligned} h_{11} &= \left(\frac{U_6}{U_3} \right) \bigg|_{i_k=0} & h_{12} &= \left(\frac{U_k}{i_k} \right) \bigg|_{U_3=0} \\ h_{21} &= \left(\frac{i_3}{i_k} \right) \bigg|_{U_3=0} & h_{22} &= \left(\frac{i_3}{U_3} \right) \bigg|_{i_k=0} \end{aligned}$$

Коэффициент передачи по току для схемы с ОЭ

$$K_i(U_k) = \frac{i_k}{i_6} = \frac{\alpha}{\alpha - 1}, \text{ где } \alpha = \frac{i_k}{i_6 + i_k}$$

По результатам измерений, приведенных в предыдущем параграфе, были рассчитаны коэффициенты передачи тока при токе коллектора 2 мА и 4 мА.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{2 \text{ мА}}{60 \text{ мкА} + 2 \text{ мА}} = 0.971, K_1 = 332 \\ \alpha_2 &= \frac{4 \text{ мА}}{80 \text{ мкА} + 4 \text{ мА}} = 0.980, K_2 = 499 \end{aligned}$$

2.5. Измерение коэффициента усиления однокаскадного усилителя

В данном опыте была собрана схема однокаскадного усилителя (см. рис. 9) и произведено измерение его коэффициента усиления в зависимости от частоты входного сигнала. Амплитуда сигнала с генератора соответственно равна $A = 16,1 \text{ мВ}$, напряжение $U_1 = 6 \text{ В}$, $U_2 = 8,1 \text{ В}$, сила тока коллектора $I_k = 3,07 \text{ мА}$

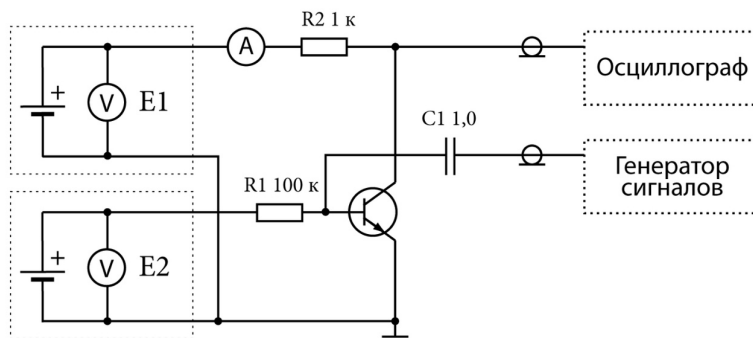


Рис. 9: Однокаскадный усилитель

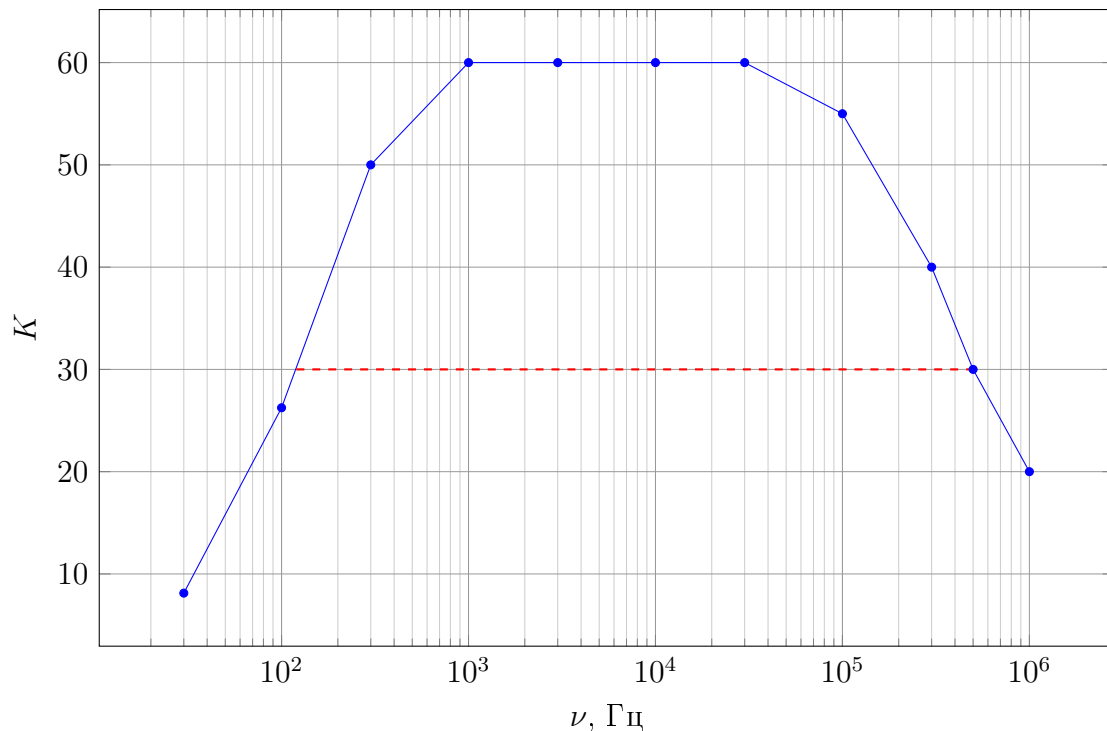


Рис. 10: Коэффициент усиления однокаскадного усилителя. Пунктиром отмечена высота, соответствующая уровню $\frac{1}{2}$ относительно максимума

Полосой пропускания будем считать ординаты $K(\nu)$, соответствующие уровню 0.5 от максимума функции $K(\nu)$. Получаем полосу:

$$\nu_{\min} = 120 \text{ Гц}, \quad \nu_{\max} = 500 \text{ кГц}$$

$$\nu_{\min} < \nu < \nu_{\max}$$

2.6. Измерение времени переключения транзистора

Используйте измерительную схему № 3(9). Установили для транзистора режим отсечки: напряжение $E_1 = 6 \text{ В}$, ток базы – ноль, при этом ток коллектора должен быть равен нулю, напряжение на коллекторе около 6 В. Подали с генератора прямоугольный сигнал «меандр» частотой 120...150 кГц, напряжением 2...3 В. Получите на осциллографе выходной сигнал. Подстройте уровень входного сигнала так, чтобы транзистор переключался из режима отсечки в режим насыщения $A = 8,1 \text{ мВ}$. Измерили зависимость времени переключения транзистора из режима отсечки в режим насыщения и из режима насыщения в режим отсечки от тока базы транзистора.

I_6 , мкА	$\tau_{0 \rightarrow H}$, мкс	$\tau_{H \rightarrow 0}$, мкс
0	2.5	1.5
6	2	1.5
22	1.5	1
52	1	1
100	0.7	1

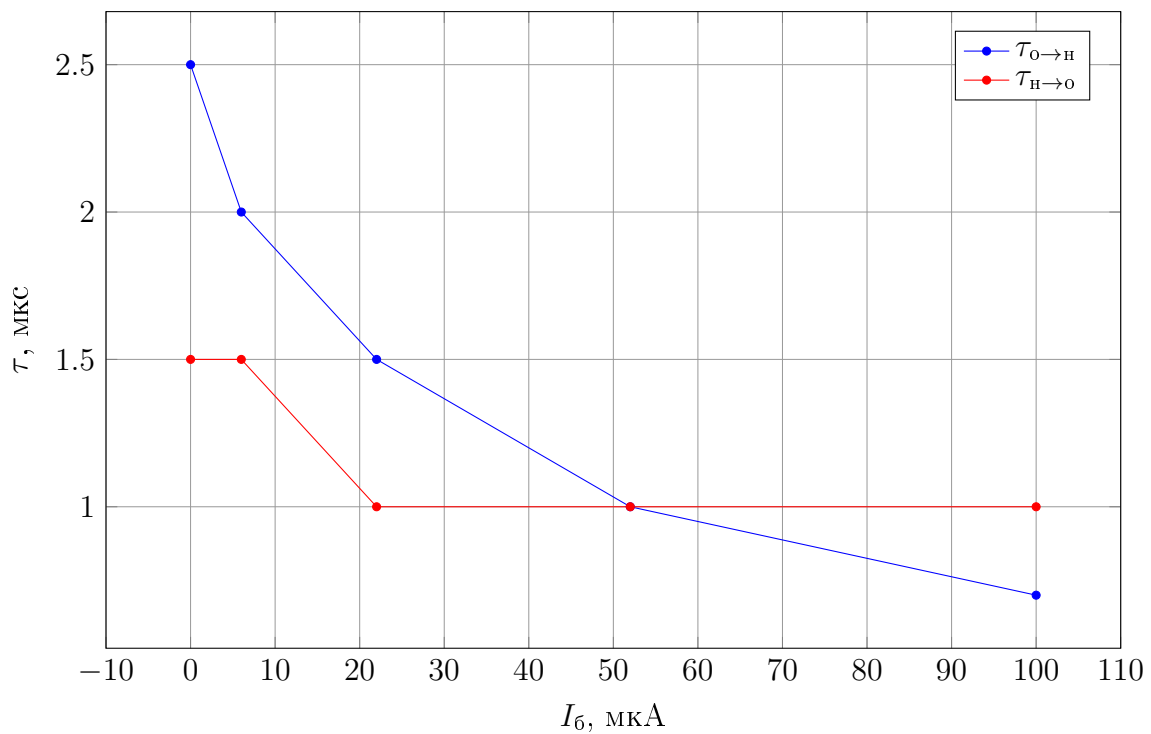


Рис. 11: Зависимость времени переключения транзистора от тока базы транзистора

3. Вывод

Были изучены некоторые элементы теории $p - n - p$ переходов, сняты экспериментальные данные, по которым построены входная, переходная и выходная характеристики транзистора. По результатам измерений ВАХ найдены: коэффициент передачи тока и времена переключения транзистора из режима насыщения в режим отсечки.