

1. Основные сведения об электронике и полупроводниках.

Электроника – это наука о формировании потоков электронов и управления ими с помощью внешнего электрического воздействия с целью получения определённого полезного эффекта.

Различают: промышленную электронику, где потоки электронов используются для передачи и преобразования значительного количества энергии, и информационную электронику, где потоки электронов используются для обработки и хранения информации.

В процессе проведения лабораторных работ на протяжении двух семестров будут на практике изучаться в основном устройства информационной электроники. Электроника, выполняющая функции управления различными самолётными устройствами электроавтоматики получила название авиационной электроники. Основу современной электроники составляют полупроводниковые вещества, которые по своей электропроводности занимают промежуточное место между проводниками и изоляторами. Электропроводность полупроводника под воздействием внешнего электрического поля может изменяться в широких пределах.

Полупроводники – это твёрдые тела с правильной кристаллической решеткой (германий, кремний, теллур, арсенид галлия, сульфид кадмия и др.). В авиационной электронике в качестве полупроводника используют четырёхвалентный кремний, который не теряет своих свойств в широком диапазоне температур от -60°C до $+125^{\circ}\text{C}$. В кристалле полупроводника имеются свободные электроны, преодолевшие притяжение ядра атома. Оставшаяся часть атома получила название дырки. Дырка заряжена положительно. Если к кристаллу приложить напряжение, то по нему потечёт ток. Направление движения дырки принято считать за направление электрического тока. Это явление принято считать собственной проводимостью. Увеличить величину тока можно путём внесения в полупроводник примеси пятивалентного фосфора или трёхвалентного бора. Внесение в полупроводник примеси называется легированием.

Если в четырёхвалентный кремний внести примесь пятивалентного фосфора, то его пятый электрон легко отрывается и становится свободным. При этом атом примеси становится положительно заряженным ионом и называется донором. Донор не является носителем тока, так как связан с кристаллической решеткой полупроводника, то есть он неподвижен. Чем больше примеси, тем больше свободных электронов в полупроводнике. Общее количество свободных электронов равно суммарному количеству доноров и дырок. Основным носителем тока является электрон, дырка - не

основной носитель тока. Такой тип примесной проводимости называется проводимостью типа n.

Если в четырёхвалентный кремний внести примесь трёхвалентного бора, то его атом захватывает электрон из атома четырёхвалентного кремния, что приводит к образованию дырок. При этом атом примеси становится отрицательно заряженным ионом и называется акцептором. Акцептор не является носителем тока, так как связан с кристаллической решеткой полупроводника, то есть он неподвижен. Общее количество дырок равно суммарному количеству электронов и акцепторов. Основным носителем тока является дырка, электрон – не основной носитель тока. Такой тип примесной проводимости называется проводимостью типа p.

Если механически соединить полупроводники n и p типов, то образуется тонкий (0,1-1,0) мкм электронно-дырочный переход. Физические процессы, протекающие в p-n – переходе, лежат, в основе всех полупроводниковых приборов. Из полупроводника n типа электроны диффундируют в полупроводниках p типа, а дырки диффундируют из полупроводника p типа в полупроводник n типа, где происходит их частичная рекомбинация. В результате в полупроводнике n типа образуется приграничный слой, объединённый основными носителями заряда (электронами) и заряженный положительно за счёт доноров. Аналогично в полупроводнике p типа образуется приграничный слой, объединённый основными носителями заряда (дырками) и заряженный отрицательно за счёт акцепторов (рис 2.1).

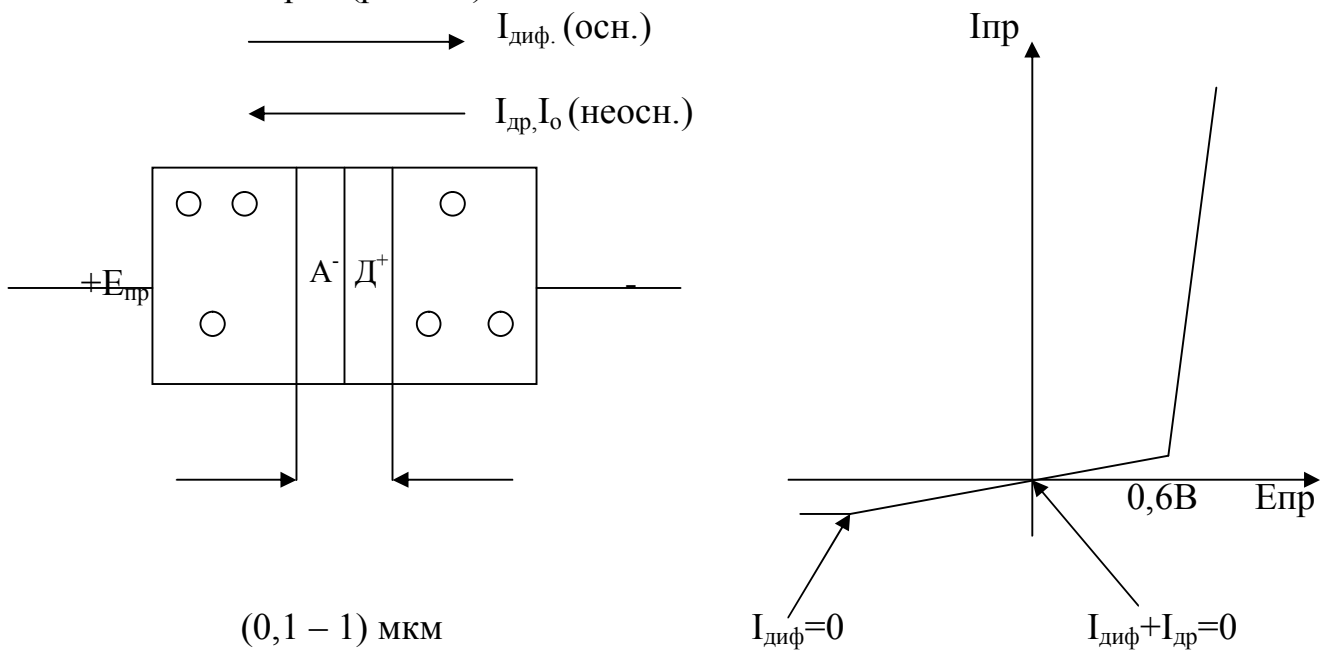


РИС. 2.1. ВАХ диодного перехода.

Движение основных носителей называется диффузионным током ($I_{диф}$).

Вместе с тем, также и не основные носители перемещаются сквозь электронно-дырочный переход, создавая дрейфовый ток (I_0). При отсутствии внешнего поля (равновесное состояние) $I_{диф} + I_0 = 0$. Электронно-дырочный переход является потенциальный барьером для не основных носителей.

Если к р - слою приложить внешнее положительное напряжение, то под его воздействием дырки потекут через электронно-дырочный переход в п-область, где встречаются с большим числом электронов и рекомбинируют. Аналогичный процесс будет происходить с электронами, перемещающимися из области п в область р.

При $E_{пр} > 0,6$ В этот процесс будет резко возрастет. Это пропускное состояние.

Если поменять полярность приложенного напряжения, то наступит оттягивание основных носителей, их поток уменьшится, а затем прекратится. Это наступит тогда, когда напряжение достигнет величины контактной разности р-п — перехода ($I_{диф} = 0$). При дальнейшем увеличении напряжения через переход потечет только ток I_0 .

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 "ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ВАХ ПОЛУПРОВОДНИКОНД БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ"

3.1. Цель работы

Изучение физических основ работы биполярных транзисторов и их параметров.

Экспериментальное определение входных и выходных ВАХ. Определение п-параметров и крутизны транзисторов по экспериментальным ВАХ.

3.2. Основные сведения

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя рп-переходами и тремя выводами (база, эмиттер, коллектор). По типу электропроводности различают рпн и рпр - транзисторы. На практике применяют транзисторы того и другого вида функции их схожи, они зеркально повторяют друг друга. Однако, в рпр - транзисторе носителями заряда являются и в основном дырки, а в рпн- транзисторе - электроны. Т.к. масса дырки превосходит массу электрона примерно в две тысячи раз, то рпн-транзисторы превосходят р-п-р - транзисторы по быстродействию. Транзисторы могут быть включены тремя различными способами: по схеме с общей базой, общим эмиттером, общим коллектором, в зависимости от того,

какой электрод является общим. Чаще транзистор используется в схеме с общим эмиттером как наиболее универсальной и дающей наибольшее усиление по напряжению и мощности. Физические процессы в транзисторе можно рассмотреть на примере n-p-n- структуры. Процессы в pnp в структурах аналогичны (рис. 3.1).

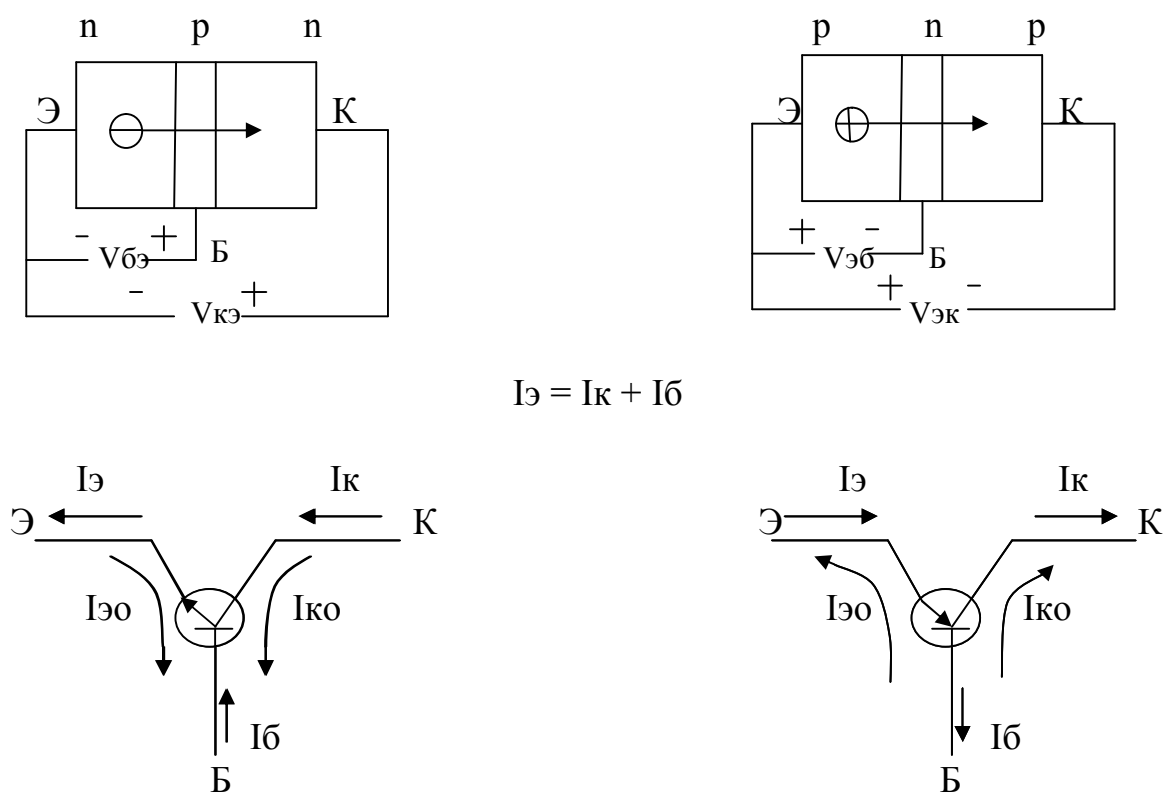
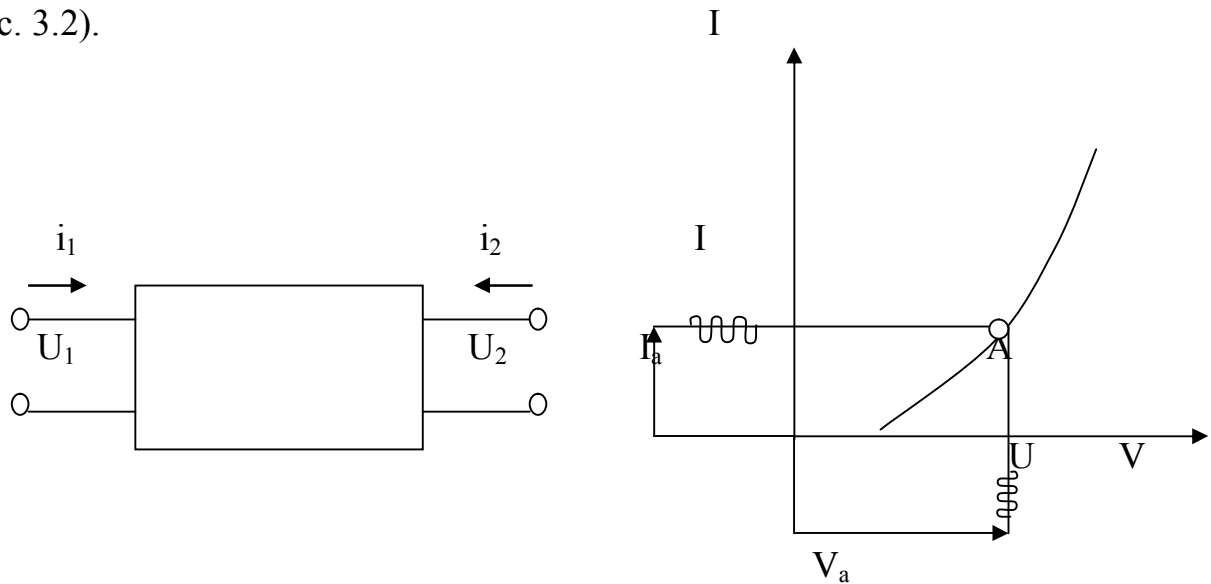


Рис. 3.1 Физические процессы в биполярном транзисторе

На левом p-n- переходе имеет место прямое (пропускное) смещение, а на правом - обратное ($V_{\text{кэ}} > V_{\text{бэ}}$). Электроны из левой (инжектирующей) n- области, называемой эмиттером, диффундируют в среднюю p- область, называемую базой. В нормальном случае они бы там рекомбинировали. Но база настолько узка, что электроны успевают ее проскочить без рекомбинации с дырками. Таким образом, удается добиться того, чтобы электроны попали в правую p-область и поступали на электрод. Различные роли обеих p- областей, которые без

приложенного к ним напряжения совершенно равноправны, являются следствием того, что к правой n - области приложено положительное, а к левой отрицательное напряжение. При этом имеются две цепи тока: базовая и коллекторная. В базовой цепи в ток вносят вклад только те электроны, которые успеют рекомбинировать в p - слое. С другой стороны, в ток через pn - переход вносят вклад не только электроны, но и дырки. Это означает, что из базы в эмиттер поступает поток дырок, способный создать большой ток. Сократить поток дырок из базовой цепи в эмиттер можно путем более слабого легирования слоя p , т.е. уменьшая количество трехвалентного бора. В этом случае путем небольшого изменения тока в базовой цепи можно получить значительное изменение тока в коллекторной цепи.

Транзистор можно рассматривать как активный четырехполюсник (рис. 3.2).



Если $U = 0$, то $V_a = \text{Const}$

Если $i = 0$, то $I_a = \text{Const}$

Рис. 3.2. Активный четырёхполюсник и его параметры.

Активным называется четырехполюсник, способный усиливать сигналы по мощности за счет энергии источника питания.

Транзистор – это нелинейный элемент и для того, чтобы его можно было рассматривать

в качестве линейного, амплитуды переменных напряжений, приложенных к нему, должны быть достаточно малы (рис.3.2).

Из четырех взаимосвязанных величин напряжений и токов можно выбрать любую пару в качестве независимых параметров. При этом возможны шесть вариантов. Обычно принимают в качестве независимых i_1 и i_2

$$U_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot U_2$$

$$I_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot U_2$$

Если положить $U_2 = 0$ ($V_2 = \text{const}$), то $h_{11} = \frac{U_1}{i_1}$ (3.1)

Входное сопротивление в режиме к.з. на выходе [Ом]: $h_{21} = \frac{I_2}{i_1}$ (3.2)

Коэффициент передачи тока в режиме к.з. на выходе [б/р]

Если положить $I_1 = 0$ ($I_1 = \text{const}$), то: $h_{12} = \frac{U_1}{U_2}$ (3.3)

Коэффициент обратной связи в режиме х.х. на входе [б/р]: $h_{22} = \frac{i_2}{U_2}$ (3.4)

Выходная проводимость в режиме х.х. на входе [I/Ом]

При экспериментальном определении h – параметров можно использовать схемы, применяемые для снятия статических характеристик (Рис. 3.3 и 3.4).

Зависимость тока коллектора от напряжения $V_{бэ}$ определяется выражением Эберса - Молла:

$$I_k = I_{эо} \cdot (l^{\frac{V_{бэ}}{2V_r}} + 1)$$

т.к. $V_{бэ} \gg V_r$, единицей можно пренебречь $I_k = I_{эо} \cdot l^{\frac{V_{бэ}}{2V_r}}$ (3.5)

-Рекомендуемый масштаб по оси $V_{бэ}$: $m_v = \frac{V_{бэ}}{a_v} = 5 \frac{мВ}{мм}$

Рекомендуемый масштаб по оси $I_б$: $m_i = \frac{I}{a_i} = 0,01 \frac{мА}{мм}$,

Где A_v, A_i – отрезки чертежа.

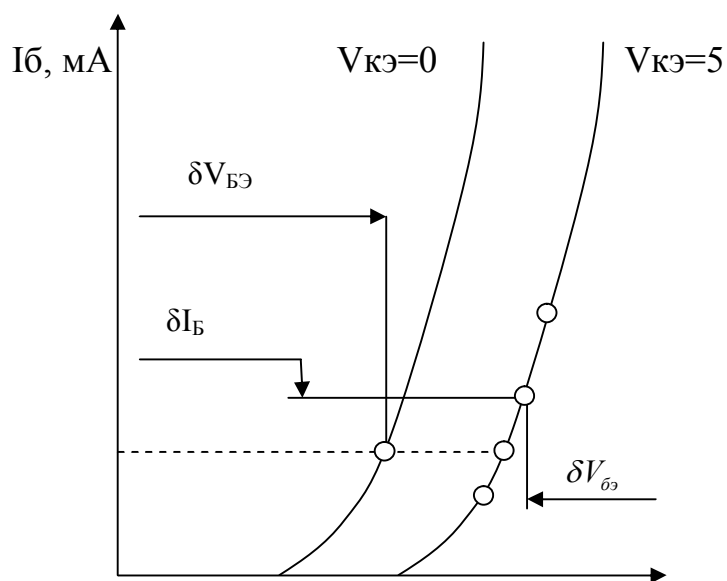


Рис. 3.3. Входные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

Рекомендуемый масштаб по оси $V_{кэ}$: $m_v = \frac{V_{кэ}}{a_v} = 100 \frac{мВ}{мм}$

Рекомендуемый масштаб по оси I_k : $m_i = \frac{I_k}{a_i} = 0,5 \frac{мА}{мм}$

Где a_v , a_i - отрезки чертежа.

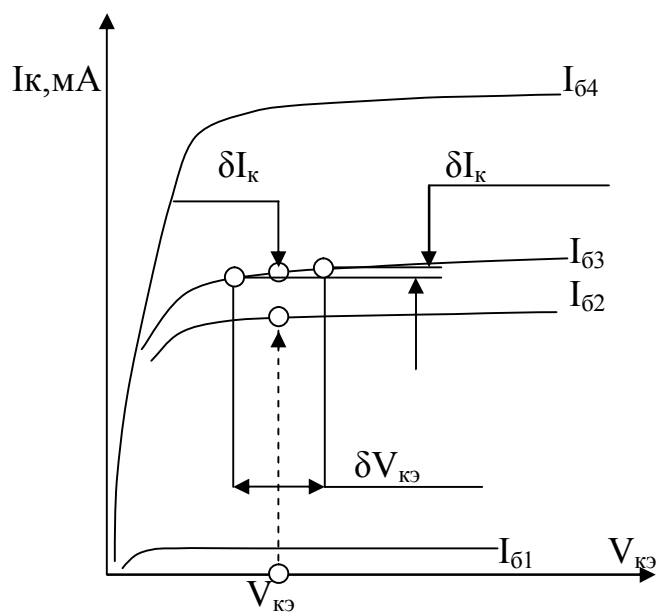


Рис. 3.4. Выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

$V_r = \frac{k * T}{q}$ – термический потенциал;

$K = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$ – постоянная Больцмана;

$Q = 1,6 \cdot 10^{-19} Кл$ – заряд электрона.

Крутизна ВАХ эмиттерного перехода $I_{\bar{\sigma}} = f(V_{\bar{\sigma}})$ пропорциональна крутизне функции Эберса-Молла, причём эта пропорциональность сохраняется только в линейной зоне работы транзистора, когда эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный - в обратном. Поэтому непосредственно пользоваться выражением (3.5.) нельзя. Еак как в линейной зоне сохраняется пропорциональность между крутизной ВАХ эмиттерного перехода и крутизной функции Эберса-Молла, то $h_{21-\bar{\sigma}} = \beta = \delta I_k / \delta I_B \approx \text{const}$. При переходе в режим насыщения, когда оба перехода транзистора смещены в прямом направлении, большим приращением тока базы будут соответствовать меньшие приращения тока коллектора. Т.е. коэффициент β начинает резко падать.

Наклон характеристики Эберса-Молла называют крутизной (S)

$$S = \frac{d}{dV_{\bar{\sigma}}} \left[I_{\bar{\sigma}0} \cdot l^{\frac{V_{\bar{\sigma}}}{2V_r}} \right] = I_{\bar{\sigma}0} \cdot l^{\frac{V_{\bar{\sigma}}}{2V_r}} \cdot \frac{1}{2V_r} = \frac{I_k}{2V_r}$$

Таким образом, крутизна пропорциональна коллекторному току и не зависит от индивидуальных свойств транзистора. Поэтому для её определения не требуется измерений.

Из выражений (3.1) и (3.2) для схемы с общим эмиттером можно получить выражение для крутизны.

$$S = \frac{\Delta I_k}{\Delta V_{\bar{\sigma}}} \Big|_{V_{k\bar{\sigma}} = \text{const}} = \frac{\Delta I_k * \Delta I_{\bar{\sigma}}}{\Delta V_{\bar{\sigma}} * \Delta I_{\bar{\sigma}}} \Big|_{V_{k\bar{\sigma}} = \text{const}}$$

$$S = \frac{h_{21-\bar{\sigma}}}{h_{11-\bar{\sigma}}} \Big|_{V_{k\bar{\sigma}} = \text{const}}$$

Лабораторное задание

1. Собрать схему для снятия семейства входных характеристик транзистора в соответствии с рис. 3.5 или 3.6.
2. Установить величину напряжения $V_{кэ}=0$ В.
3. Задавая значения тока $I_{уст}$ в соответствии с табл. 3.1, определить значения $V_{эб}$.
4. Вычислить значения токов базы $I_B=I_{уст}-V_{эб}/R_v$, где $R_v=20$ кОм (внутреннее сопротивление вольтметра).
5. Установить $V_{кэ}=5$ В и повторить п.п. 3 и 4.
6. По полученным данным построить входные ВАХ транзистора, руководствуясь рис. 3.3.
7. Собрать схему для снятия семейства выходных характеристик в соответствии с рис. 3.7. или 3.8.
8. Последовательно задавая значения тока базы и напряжения $V_{кэ}$ в соответствии с табл. 3.2, снять семейство выходных характеристик.
9. По полученным данным построить семейство выходных характеристик, руководствуясь рис. 3.4.
10. По полученным характеристикам определить h-параметры и крутизну для заданных преподавателем значений $V_{кэ}$ и I_B . Сравнить результаты, полученные в соответствии с выражениями 3.6. и 3.7.

Содержание отчёта

1. Принципиальные схемы проводимых опытов.
2. Заполненные таблицы.
3. Входные и выходные ВАХ транзисторов.
4. Расчёт h-параметров. Расчёт крутизны двумя способам

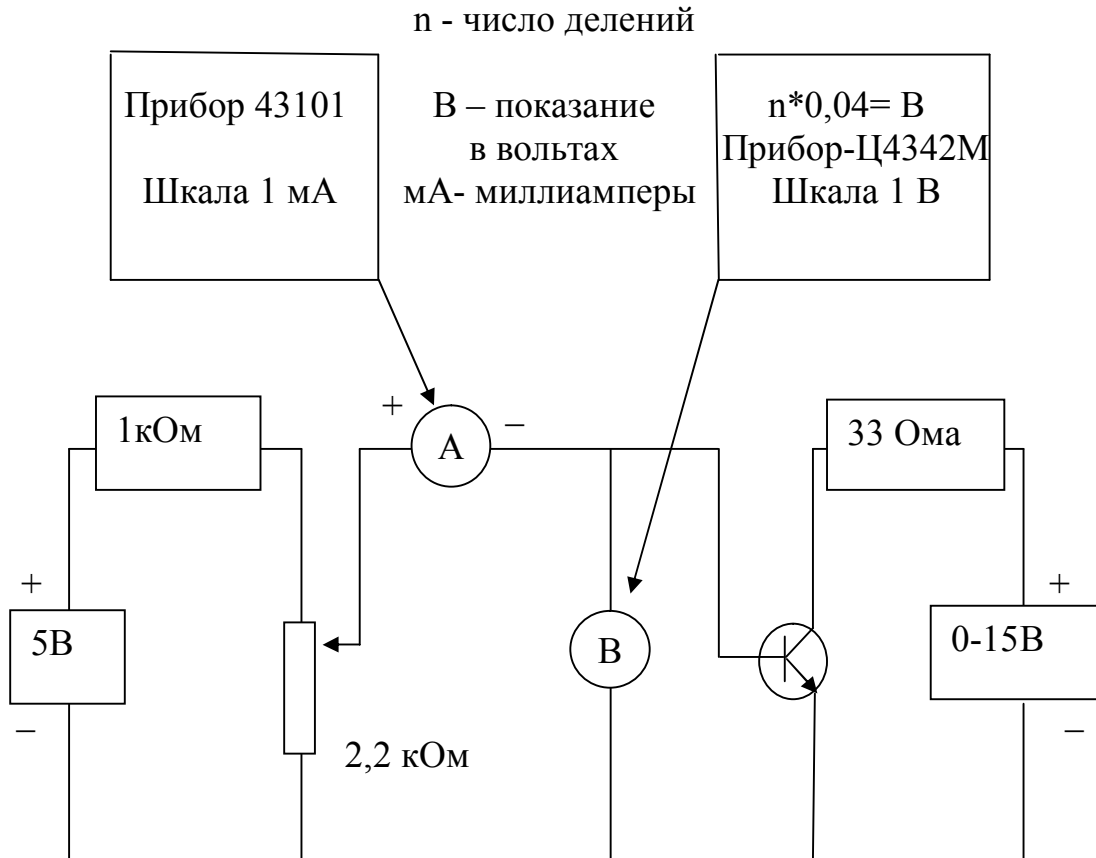


Рис 3.5. Схема для снятия входных данных ВАХ при транзистора

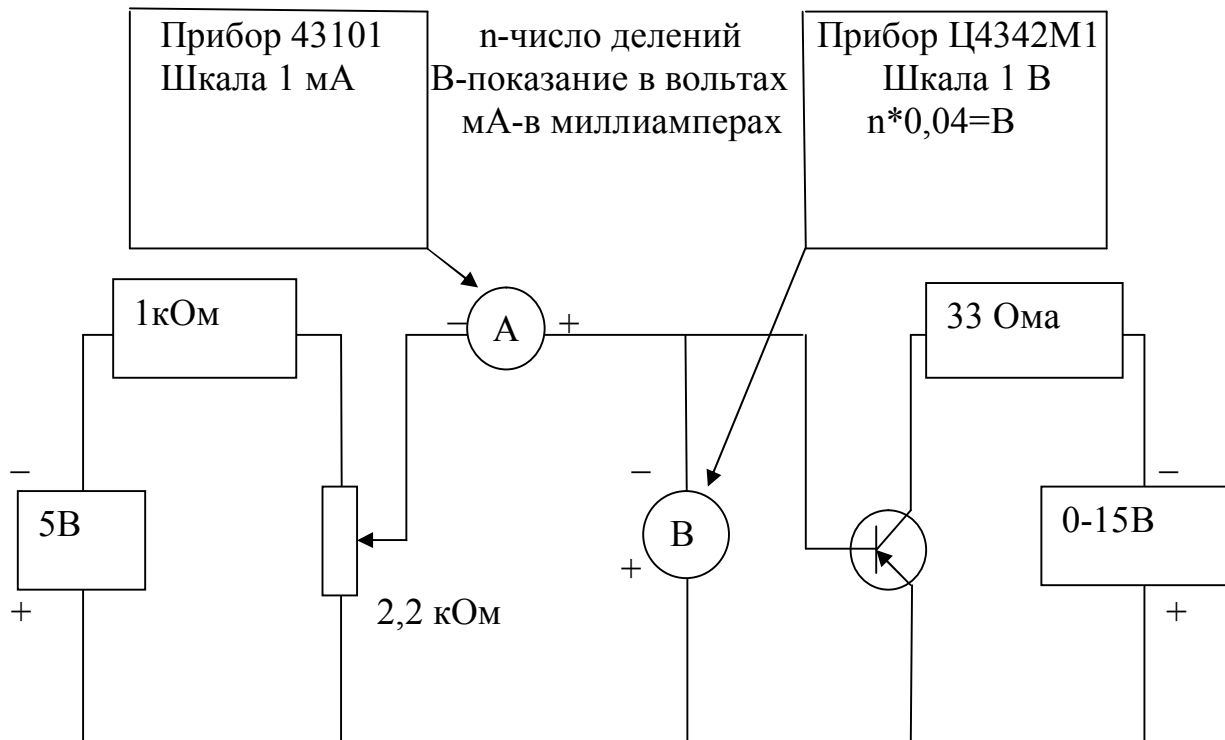


Рис 3.6. Схема для снятия входных данных ВАХ rnp транзистора.

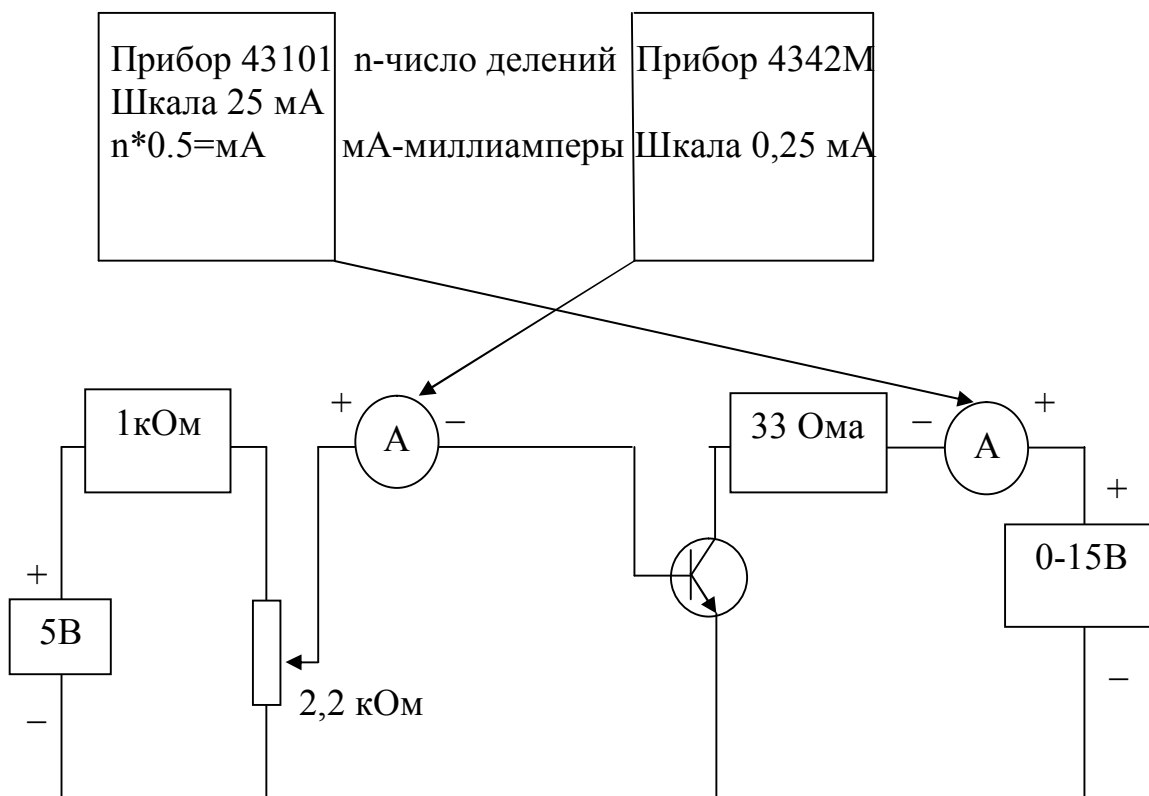


Рис. 3.7. Схема для снятия выходных ВАХ при транзистора

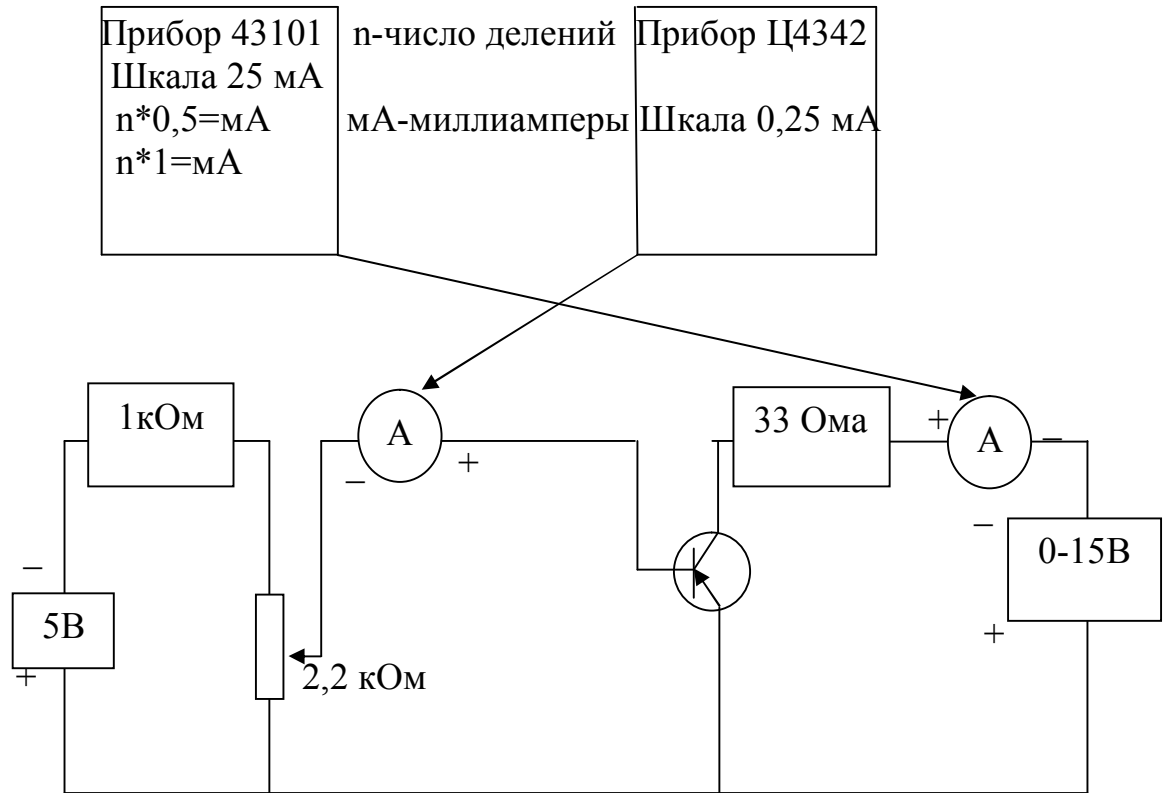


Рис 3.8 Схема для снятия выходных ВАХ n-p-n транзистора

Таблица 3.1.

$$I_{\sigma} = f(V_{\sigma\varepsilon})$$

Iуст., мА		0,05	0,1	0,15	0,25	0,5	1,0
Vбэ	Vкэ=0	0,60	0,64	0,68	0,70	0,72	0,74
	Vкэ=5	0,68	0,70	0,72	0,73	0,75	0,76
Iб	Vкэ=0	0,020	0,068	0,116	0,215	0,464	0,963
	Vкэ=5	0,016	0,065	0,114	0,214	0,463	0,962

$$I_{\bar{6}} = I_{уст} - \frac{V_{\bar{6}\bar{3}}}{R_v}, \text{ где } R_v = 20 \text{ кОм (сопротивление вольтметра)}$$

$$I_K = f(V_{кэ})$$

Таблица 3.2.

$V_{кэ}, \text{ В}$	2,2	5	8	12	15
$I_{\bar{6}}, \text{ мА}$					
0,05	0,45	3,10	5,96	9,96	12,81
0,10	2,4	2,5	2,8	2,8	3,0
0,15	0,16	1,35	4,06	7,62	10,26
0,20	2,8	5,0	5,4	6,0	6,5
0,25	0,16	0,47	2,31	5,8	7,85
0,30	2,8	6,2	7,8	8,5	9,6
0,35	0,16	0,47	0,70	3,82	5,88
0,40	2,8	6,2	10,0	11,2	12,5
0,45	0,16	0,47	0,70	2,15	4,05
0,50	2,8	6,2	10,0	13,5	15,0

3.5. Контрольные вопросы

1. Что такое промышленная и информационная электроника?
2. Каково качественное отличие электропроводности металлов, изоляторов и полупроводников?
3. Что такое диффузионные, дрейфовые токи и каково их соотношение в равновесном, пропускном и запирающем состоянии?
4. Что такое основные и неосновные носители и их динамические свойства?
5. Какова величина и каково направление тока в pn переходе в зависимости от приложенного напряжения?

6. Объясните, почему транзистор называется биполярным?
7. Почему с помощью малых токов базы возможно линейное управление большими коллекторными токами?
8. Покажите направления токов основных носителей, протекающих через транзистор, и укажите их взаимосвязь.
9. Укажите направление токов неосновных носителей, протекающих через транзистор.
10. Почему h – параметры являются дифференциальными?
11. Укажите входные и выходные параметры транзистора, включенного по схеме с общей базой и с общим эмиттером.
12. Что такое нагрузочная прямая транзистора?
13. Что такое крутизна и как её можно определить без эксперимента?
14. Укажите зависимости значения параметра $h_{21-э}$ от режима работы транзистора.
15. Как определить дифференциальное входное и выходное сопротивление транзистора?

Iуст., мА		0,05	0,1	0,15	0,25	0,5	1,0
Vбэ	Vкэ=0	0,60	0,64	0,68	0,70	0,72	0,74
	Vкэ=5	0,68	0,70	0,72	0,73	0,75	0,76
Iб	Vкэ=0	0,020	0,068	0,116	0,215	0,464	0,963
	Vкэ=5	0,016	0,065	0,114	0,214	0,463	0,962

$$I_{\bar{\sigma}} = I_{уст} - \frac{V_{\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}}}{R_v}, \text{ где сопротивление вольтметра } R_v = 20 \text{ кОм}$$

Для Vк = 0:

$$I_{\bar{\sigma}} = 0,05 - \frac{0,60}{20} \approx 0,020$$

$$I_{\bar{\sigma}} = 0,10 - \frac{0,64}{20} \approx 0,068$$

$$I_{\bar{\sigma}} = 0,15 - \frac{0,68}{20} \approx 0,116$$

$$I_{\bar{\sigma}} = 0,25 - \frac{0,70}{20} \approx 0,215$$

$$I_{\bar{\sigma}} = 0,50 - \frac{0,72}{20} \approx 0,464$$

$$I_{\bar{\sigma}} = 1,00 - \frac{0,74}{20} \approx 0,963$$

Для Vк = 5 В:

$$I_{\bar{\sigma}} = 0,05 - \frac{0,68}{20} \approx 0,016$$

$$I_{\bar{\sigma}} = 0,10 - \frac{0,70}{20} \approx 0,065$$

$$I_{\bar{\sigma}} = 0,15 - \frac{0,72}{20} \approx 0,114$$

$$I_{\bar{\sigma}} = 0,25 - \frac{0,73}{20} \approx 0,214$$

$$I_{\bar{\sigma}} = 0,50 - \frac{0,75}{20} \approx 0,463$$

$$I_{\bar{\sigma}} = 1,00 - \frac{0,76}{20} \approx 0,962$$

Входные хар-ки транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

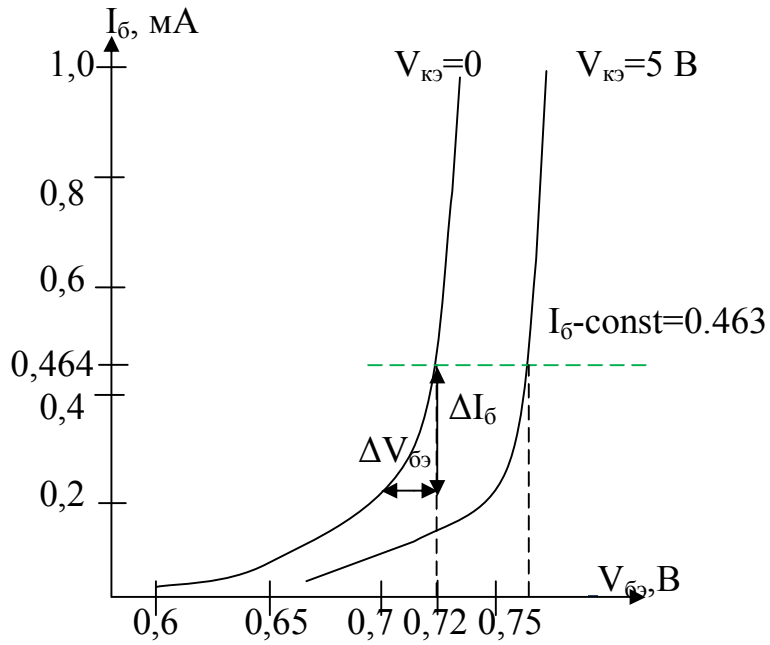
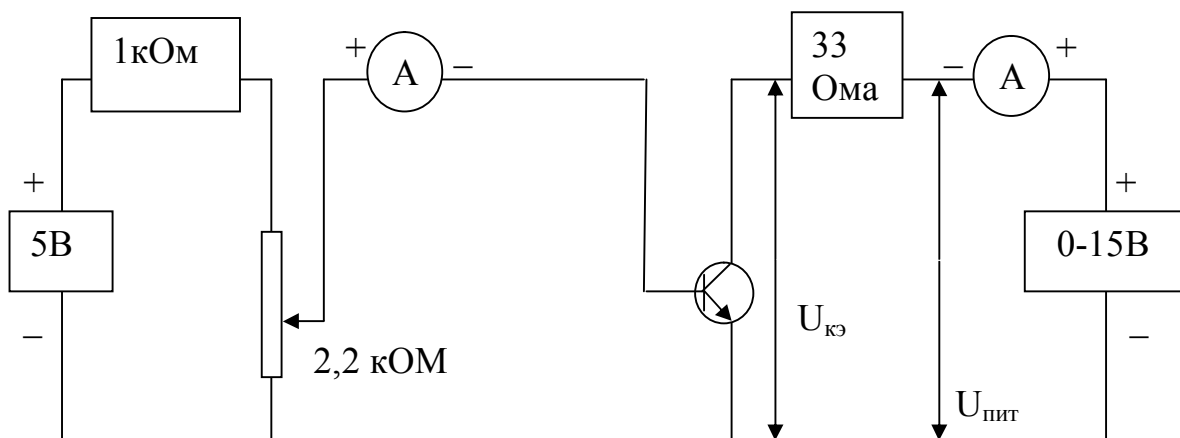


Схема для снятия выходных характеристик n-p-n – типа.



I_6, mA \diagdown $V_{кэ}, \text{В}$	2,2	5	8	12	15
0,05	0,45 2,4	3,10 2,5	5,96 2,8	9,96 2,8	12,81 3,0
0,10	0,16 2,8	1,35 5,0	4,06 5,4	7,62 6,0	10,26 6,5
0,15	0,16 2,8	0,47 6,2	2,31 7,8	5,8 8,5	7,85 9,6
0,20	0,16 2,8	0,47 6,2	0,70 10,0	3,82 11,2	5,88 12,5
0,25	0,16 2,8	0,47 6,2	0,70 10,0	2,15 13,5	4,05 15,0

Определение h-параметров и крутизны:

1. h_{11} - входное сопротивление: определяется по одной входной ВАХ

$$h_{11} = \frac{\Delta V_{бэ}}{\Delta I_{б}} = \frac{0,72 - 0,070}{0,464 - 0,215} \approx 80,3, \text{ при } V_{кэ} = 0$$

2. h_{12} – коэффициент обратной связи по напряжению:
определяется по двум входным ВАХ.

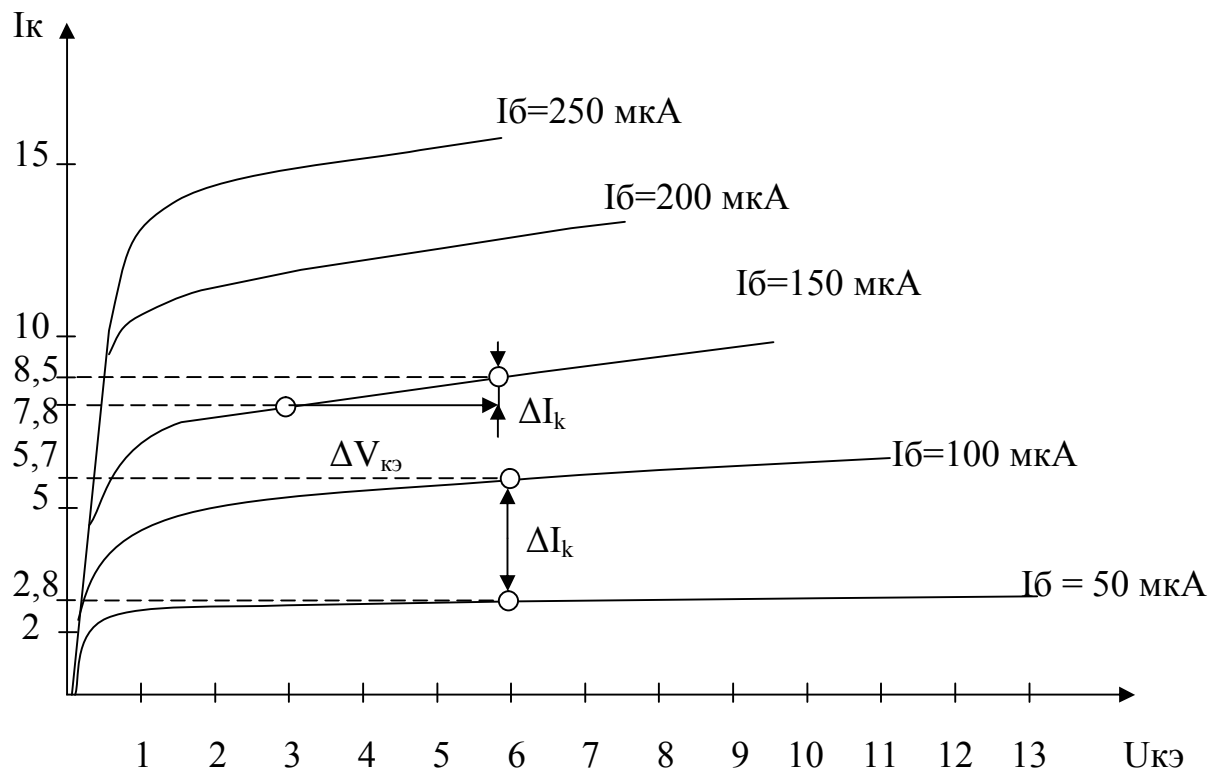
$$h_{12} = \frac{\Delta V_{бэ}}{\Delta V_{кэ}} = \frac{0,75 - 0,72}{5 - 0} \approx 0,006, \text{ при } I_6 = 0,463 \text{ mA}$$

3. h_{21} – коэффициент передачи тока:
определяется по двум выходным ВАХ.

$$h_{21} = \beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_{б}} = \frac{5,7 - 2,8}{0,10 - 0,05} \approx 58, \text{ при } V_{кэ} = 6 \text{ В}$$

4. h_{22} – выходная проводимость:
определяется по одной выходной ВАХ.

$$h_{22} = \frac{\Delta I_k}{\Delta V_{кэ}} = \frac{(8,5 - 7,8) * 10^{-3}}{5,80 - 2,31} \approx 2 * 10^{-4}, \text{ при } I_6 = 150 \text{ мкА}$$



Вывод: построены входные и выходные характеристики VT (оэ), рассчитаны h-параметры.