

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО** **ТРАНЗИСТОРА В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ**

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, **ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ ВЫПОЛНЕНИЯ**

Целью выполнения лабораторной работы является формирование практических навыков расчета параметров биполярных транзисторов и других элементов, при включении транзистора в схему с общим эмиттером (ОЭ).

Основными задачами выполнения лабораторной работы являются:

1. расчет параметров транзистора и требуемых элементов схемы;
2. моделирование схемы, для подтверждения результатов расчета параметров биполярных транзисторов.

Результатами работы являются:

- уравнения для определения $I_{Э}$, I_K , $U_{K-Э}$, параметров транзистора и требуемых элементов схемы;
- схема электрической цепи с полученными, по показаниям приборов, значениями токов и напряжений;
- подготовленный отчет.

Необходимое оборудование для выполнения лабораторной работы:

- персональный компьютер с программным обеспечением Micro-Cap.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Общие сведения о биполярных транзисторах

Транзисторы – это полупроводниковые приборы, пригодные для усиления мощности и имеющие три вывода или больше. В транзисторах может быть разное число переходов между областями с различной электропроводностью. Наиболее распространены транзисторы с двумя $n-p$ – переходами, называемые **биполярными**, так как их работа основана на использовании носителей заряда обоих знаков.

Устройство плоскостного биполярного транзистора показано схематически на рис. 54.

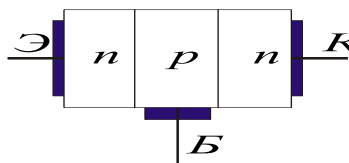


Рис. 54. Устройство плоскостного биполярного транзистора

Транзистор представляет собой пластину германия, или кремния, или другого полупроводника, в которой созданы три области с различной электропроводностью. Для примера взят транзистор типа $n-p-n$, имеющий среднюю область с дырочной, а две крайние области – с электронной электропроводностью. Широкое применение находят транзисторы типа $p-n-p$, в которых дырочной электропроводностью обладают две крайние области, а средняя имеет электронную электропроводность.

Средняя область транзистора называется **базой**, одна крайняя область – **эмиттером**, другая – **коллектором**. Таким образом, в транзисторе имеются два $n-p$ – перехода: **эмиттерный** – между эмиттером и базой и **коллекторный** – между базой и коллектором. Расстояние между ними должно быть очень малым, не более единиц микрометров, т.е. область базы должна быть очень тонкой. Это является условием хорошей работы транзистора. Кроме того, концентрация примесей в базе всегда значительно меньше, чем в

коллекторе и эмиттере. От базы, эмиттера и коллектора сделаны выводы.

Для величин, относящихся к базе, эмиттеру и коллектору, применяют в качестве индексов буквы «б», «э» и «к». Токи в проводах базы, эмиттера и коллектора обозначают соответственно i_b , i_e , i_k . Напряжения между электродами обозначают двойными индексами, например напряжение между базой и эмиттером $U_{б-э}$, между коллектором и базой $U_{к-б}$. На условном графическом обозначении (рис. 55) транзисторов $p-n-p$ и $n-p-n$ стрелка показывает условное (от плюса к минусу) направление тока в проводе эмиттера при прямом напряжении на эмиттерном переходе.

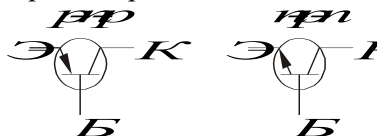


Рис. 55. Условное графическое обозначение транзисторов

Транзистор может работать в трех режимах в зависимости от напряжения на его переходах.

Активный режим – напряжение на эмиттерном переходе прямое, а на коллекторном – обратное.

Режим отсечки (запирания) – обратное напряжение подано на оба перехода.

Режим насыщения – на обоих переходах прямое напряжение.

Основным является активный режим. Он используется в большинстве усилителей и генераторов. Режимы отсечки и насыщения характерны для импульсной работы транзистора.

В схемах с транзисторами обычно образуются две цепи: **входная** (управляющая) – в нее включают источник усиливаемых сигналов и **выходная** (управляемая) – в нее включается нагрузка.

Принцип действия $n-p-n$ транзистора

Рассмотрим принцип работы транзистора, на примере $n-p-n$ транзистора в режиме без нагрузки, когда включены только источники постоянных питающих напряжений E_1 и E_2 (рис. 56).

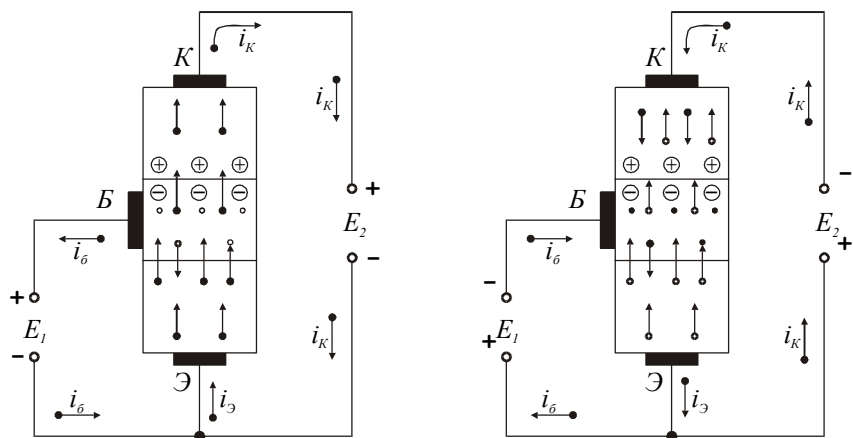


Рис. 56. Схема включения $n-p-n$ и $p-n-p$ транзистора без нагрузки

Полярность их такова, что на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном – обратное. Поэтому сопротивление эмиттерного перехода мало и для получения нормального тока в этом переходе достаточно напряжения E_1 в десятые доли вольта. Сопротивление коллекторного перехода велико, и напряжение E_2 обычно составляет единицы или десятки вольт. Из схемы на рис. 56 видно, что напряжения между электродами транзистора связаны простой зависимостью $U_{K-Э} = U_{K-Б} + U_{Б-Э}$.

При работе транзистора в активном режиме обычно всегда $U_{Б-Э} \ll U_{K-Б}$ и, следовательно, $U_{K-Э} \approx U_{K-Б}$.

Вольт–амперная характеристика эмиттерного перехода представляет собой характеристику полупроводникового диода при прямом токе, а вольт–амперная характеристика коллекторного перехода подобна характеристике диода при обратном токе.

Принцип работы транзистора заключается в том, что прямое напряжение эмиттерного перехода, т.е. участка база – эмиттер ($U_{Б-Э}$), существенно влияет на токи эмиттера и коллектора. Чем больше это напряжение, тем больше токи эмиттера и коллектора. При этом изменения тока коллектора лишь незначительно меньше изменений тока эмиттера. Таким образом, напряжение $U_{Б-Э}$, т.е. входное

напряжение, управляет током коллектора. Усиление электрических колебаний с помощью транзистора основано именно на этом явлении.

Физические процессы в транзисторе происходят следующим образом. При увеличении прямого входного напряжения $U_{б-э}$ понижается потенциальный барьер в эмиттерном переходе и соответственно возрастает ток через этот переход – ток эмиттера $i_э$. Электроны этого тока инжектируются из эмиттера в базу и благодаря диффузии проникают сквозь базу в коллекторный переход, увеличивая ток коллектора. Т.к. коллекторный переход работает при обратном напряжении, то в этом переходе возникают объемные заряды, показанные на рисунке кружками со знаками «+» и «-». Между ними возникает электрическое поле. Оно способствует продвижению (экстракции) через коллекторный переход электронов, пришедших сюда из эмиттера, т.е. втягивают электроны в область коллекторного перехода.

Если толщина базы достаточно мала и концентрация дырок в ней невелика, то большинство электронов, пройдя через базу, не успевает рекомбинировать с дырками базы и достигает коллекторного перехода. Лишь небольшая часть электронов рекомбинирует в базе с дырками. В результате рекомбинации возникает ток базы. В установившемся режиме число дырок в базе должно быть неизменным. Вследствие рекомбинации каждую секунду сколько-то дырок исчезает, но столько же новых дырок возникает за счет того, что из базы уходит в направлении к плюсу источника E_1 такое же число электронов. Иначе говоря, в базе не может накапливаться много электронов. Если некоторое число инжектированных в базу из эмиттера электронов не доходит до коллектора, а остается в базе, рекомбинируя с дырками, то точно такое же число электронов должно уходить из базы в виде тока $i_б$. Поскольку ток коллектора получается меньше тока эмиттера, то в соответствии с первым законом Кирхгофа всегда существует следующее соотношение между токами:

$$i_э = i_к + i_б .$$

Ток базы является бесполезным и даже вредным. Желательно, чтобы он был как можно меньше. Обычно i_b составляет малую долю (проценты) тока эмиттера, т. е. $i_b \gg i_c$, а следовательно, ток коллектора лишь незначительно меньше тока эмиттера и можно считать $i_b \approx i_c$. Именно для того, чтобы ток i_b был как можно меньше, базу делают очень тонкой и уменьшают в ней концентрацию примесей, которая определяет концентрацию дырок. Тогда меньшее число электронов будет рекомбинировать в базе с дырками.

Важное свойство транзистора – приблизительно линейная зависимость между его токами, т.е. все три тока транзистора изменяются почти пропорционально друг другу.

Подобные же процессы происходят в транзисторе типа $p-n-p$, но в нем меняются ролями электроны и дырки, а также изменяются полярности напряжений и направления токов (рис. 56). В транзисторе типа $p-n-p$ из эмиттера и базу инжектируются не электроны, а дырки, которые являются для базы неосновными носителями. С увеличением тока эмиттера больше таких дырок проникает через базу к коллекторному переходу. Это вызывает уменьшение его сопротивления и возрастание тока коллектора.

Работу транзистора можно наглядно представить с помощью потенциальной диаграммы, которая приведена на рис. 57 для транзистора типа $n-p-n$. Потенциал эмиттера принят за нулевой. В эмиттерном переходе имеется небольшой потенциальный барьер. Чем больше напряжение $U_{б-э}$, тем ниже этот барьер. Коллекторный переход имеет значительную разность потенциалов, ускоряющую электроны.

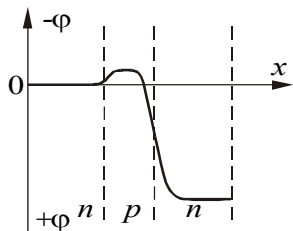


Рис. 57. Потенциальная диаграмма работы $n-p-n$ транзистора

Помимо рассмотренных основных физических процессов в транзисторах приходится учитывать еще ряд явлений.

Существенно влияет на работу транзисторов сопротивление базы $r_{б0}$, т.е. сопротивление, которое база оказывает току базы i_b (ноль в индексе здесь означает, что данная величина относится к постоянному току.) Этот ток протекает к выводу базы в направлении, перпендикулярном направлению эмиттер–коллектор. Так как база очень тонкая, то в направлении от эмиттера к коллектору, т.е. для тока i_k ее сопротивление очень мало и не принимается во внимание. А в направлении к выводу базы сопротивление базы $r_{б0}$ (его называют поперечным) достигает сотен Ом, т.к. в этом направлении база аналогична очень тонкому проводнику. Напряжение на эмиттерном переходе всегда меньше, чем напряжение $U_{б-э}$ между выводами базы и эмиттера, т.к. часть подводимого напряжения теряется на сопротивлении базы. С учетом сопротивления $r_{б0}$ можно изобразить эквивалентную схему транзистора для постоянного тока (рис. 58).

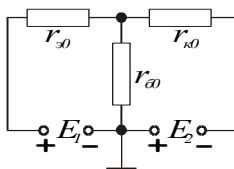


Рис. 58. Эквивалентная схема транзистора для постоянного тока

На рис. 58, $r_{э0}$ – сопротивление эмиттера, в которое входят сопротивление эмиттерного перехода и эмиттерной области. Значение $r_{э0}$ у маломощных транзисторов достигает десятков Ом, поскольку напряжение на эмиттерном переходе не превышает десятых долей вольта, а ток эмиттера в таких транзисторах составляет единицы миллиампер. У более мощных транзисторов больше и $r_{э0}$ соответственно меньше. Сопротивление $r_{э0}$ определяется формулой (в Омах) $r_{э0} \approx 25/i_{э}$, где ток $i_{э}$ выражается в миллиамперах.

Сопротивление коллектора $r_{к0}$ представляет собой практически сопротивление коллекторного перехода и составляет единицы и

десятки кОм. В него входит также сопротивление коллекторной области, но оно сравнительно мало и им можно пренебречь.

Рассмотренная эквивалентная схема является весьма приближенной, т.к. на самом деле эмиттер, база и коллектор имеют между собой контакт не в одной точке, а во множестве точек по всей площади переходов. Тем не менее, эта схема может применяться для рассмотрения многих процессов в транзисторе.

При повышении напряжения на коллекторном переходе в нем происходит лавинное размножение носителей заряда, из-за ударной ионизации. Это явление и туннельный эффект способны вызвать **электрический пробой**, который при возрастании тока может перейти в **тепловой пробой перехода**. Электрический и тепловой пробой коллекторного перехода в транзисторе происходит в основном так же, как и в диоде. Но в транзисторе при чрезмерном коллекторном токе может возникать тепловой пробой без предварительного электрического пробоя, т.е. без повышения напряжения на коллекторном переходе до пробивного. Это явление, связанное с перегревом коллекторного перехода называется **вторичным пробоем**.

Изменение напряжений на коллекторном и эмиттерном переходах сопровождается изменением толщины этих переходов. В результате изменяется толщина базы. Такое явление называют **модуляцией толщины базы**. Его особенно надо учитывать при повышении напряжения коллектор–база, т.к. тогда толщина коллекторного перехода возрастает, а толщина базы уменьшается.

При очень тонкой базе может произойти **эффект смыкания** («прокол» базы) – соединение коллекторного перехода с эмиттерным. В этом случае область базы исчезает, и транзистор перестает нормально работать.

При увеличении инжекции носителей из эмиттера в базу происходит накопление неосновных носителей заряда в базе, т.е. увеличение концентрации и суммарного заряда этих носителей. И, наоборот, при уменьшении инжекции происходит уменьшение концентрации и суммарного заряда неосновных носителей в базе. Этот

процесс называют **рассасыванием неосновных носителей заряда в базе**.

Рассмотрим соотношения между токами в транзисторе. Ток эмиттера управляется напряжением на эмиттерном переходе, но до коллектора доходит несколько меньший ток, который можно назвать **управляемым коллекторным током** $i_{к.упр.}$. Часть инжектированных из эмиттера в базу носителей рекомбинирует, поэтому $i_{к.упр.} = \alpha i_{э}$, где α – **коэффициент передачи тока эмиттера**, являющийся основным параметром транзистора. При нормальных токах он может иметь значения от 0,950 до 0,998. Чем слабее рекомбинация инжектированных носителей в базе, тем ближе α к 1.

Через коллекторный переход всегда проходит очень небольшой (не более единиц микроампер) **неуправляемый обратный ток** $i_{к0}$ (рис. 59). Этот ток называют еще начальным током коллектора. Он неуправляем потому, что не проходит через эмиттерный переход. Таким образом, полный коллекторный ток:

$$i_k = \alpha i_{э} + i_{к0} \quad (2)$$

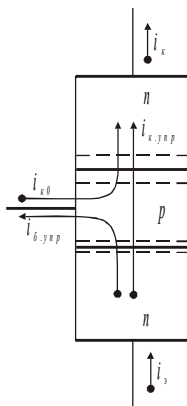


Рис. 59. Направления токов в транзисторе

Во многих случаях $i_{э} > i_{к0}$ и поэтому можно считать, что $i_{к} \approx \alpha i_{э}$.

Преобразуем формулу (2): $i_{э} = i_{э} + i_{к}$, $i_{к} = \alpha(i_{э} + i_{к}) + i_{к0}$.

Выразим: $i_{к} = i_{э}\alpha/(1-\alpha) + i_{к0}/(1-\alpha)$.

Обозначим $\alpha/(1-\alpha)=\beta$ и $i_{\kappa 0}/(1-\alpha)=i_{\kappa-э 0}$ тогда

$$i_{\kappa} = \beta i_{\sigma} + i_{\kappa-э 0} \quad (3)$$

здесь β – **коэффициент передачи тока базы** и составляет несколько десятков.

Например, если $\alpha=0,95$, $\beta=\alpha/(1-\alpha)=0,95/(1-0,95)=19$, а если $\alpha=0,99$, то $\beta=0,99/(1-0,99)=99$.

Т. е. при увеличении α на $0,04$, β увеличился в пять раз.

Выразим α через β : $\alpha = \beta/(1+\beta)$

Следует заметить, что коэффициент α не является строго постоянным. Он зависит от режима работы транзистора, в частности от тока эмиттера. При малых и больших токах α уменьшается, а при некотором среднем значении тока достигает максимума. В пределах рабочих значений тока эмиттера изменяется сравнительно мало.

Коэффициент β изменяется в зависимости от режима работы транзистора гораздо больше, нежели коэффициент α . При некотором среднем значении тока эмиттера коэффициент β максимален, а при меньших и больших токах он снижается, причем иногда в несколько раз.

Ток $i_{\kappa-э 0}$ называют **начальным сквозным током**, т.к. он протекает сквозь весь транзистор (через три его области и через оба $n-p$ – перехода) в том случае, если $i_{\sigma}=0$, т.е. оборван провод базы. Из (3) при $i_{\sigma}=0$ получаем $i_{\kappa}=i_{\kappa-э 0}$. Сквозной ток составляет десятки или сотни микроампер и значительно превосходит начальный ток коллектора $i_{\kappa 0}$.

$i_{\kappa-э 0}=i_{\kappa 0}/(1-\alpha)$ или $i_{\kappa-э 0}=(\beta+1)i_{\kappa 0}$, а т.к. $\beta \gg 1$, то $i_{\kappa-э 0} \approx \beta i_{\kappa 0}$.

Сравнительно большой ток $i_{\kappa-э 0}$ объясняется тем, что некоторая часть напряжения $U_{\kappa-э}$, приложена к эмиттерному переходу в качестве прямого напряжения. Вследствие этого возрастает ток эмиттера, а он в данном случае и является сквозным током.

При значительном повышении напряжения $U_{к-э}$, ток $i_{к-э0}$ резко возрастает и происходит электрический пробой.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

На выполнение лабораторной работы отводится 3 академических часа.

Порядок выполнения:

1. Изучить краткий теоретический материал.
2. Произвести расчет параметров транзистора и требуемых элементов схемы.
3. Собрать схему электрической цепи и определить требуемые значения токов и напряжений.
4. Оформить отчет.
5. Защитить выполненную работу у преподавателя.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Схема включения транзистора для всех вариантов имеет вид, показанный на рис. 60.

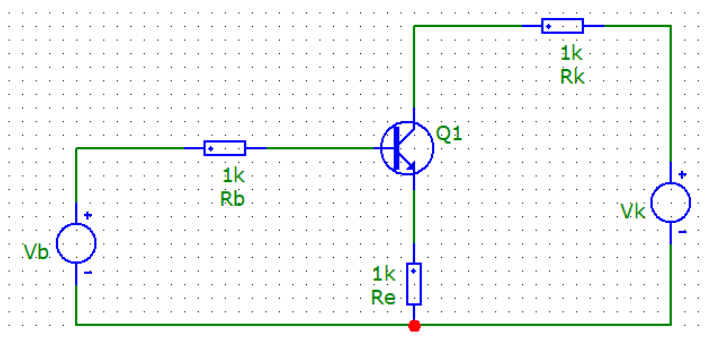


Рис. 60. Схема включения транзистора

Номиналы элементов, входящих в схему для каждого варианта различны.

В схеме на рис. 60. в качестве биполярного транзистора используется элемент *NPN* из группы *Analog Primitives – Active Devices*.

Его параметры можно изменить, вызвав соответствующее окно двойным кликом мыши.

Для определения параметров транзистора используются следующие расчетные формулы:

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

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta};$$

$$I_K = \alpha I_{\text{э}} + I_{\text{кб0}};$$

$$I_{\text{э}} = I_K + I_{\text{б}};$$

$$I_{\text{кэ0}} = (\beta + 1) I_{\text{кб0}};$$

$$\alpha = \frac{I_K - I_{\text{кб0}}}{I_{\text{э}}};$$

$$\beta = \frac{I_K - I_{\text{кэ0}}}{I_{\text{б}}};$$

где β – статический коэффициент усиления по току ([коэффициент передачи тока базы](#)) для схемы ОЭ;

α – статический коэффициент усиления по току ([коэффициент передачи тока эмиттера](#)) для схемы ОБ;

I_K – ток коллектора;

$I_{\text{э}}$ – ток эмиттера;

$I_{\text{б}}$ – ток базы;

$I_{\text{кб0}}$ – начальный ток коллектора (неуправляемый обратный ток);

$I_{\text{кэ0}}$ – начальный сквозной ток.

Кроме основных формул, для входного и выходного контура можно использовать [законы Кирхгофа](#). Например, для выходного контура схемы, изображенной на рис. 60, можно составить уравнение

$$V_K = U_{K-\text{э}} + R_K I_K + R_E I_{\text{э}}.$$

Для всех вариантов используются одинаковые значения:

$$U_{\text{б-э}} = 0,7 \text{ В}, I_{\text{б}} = 40 \text{ мкА}, I_{\text{кб0}} = 0.$$

С учетом полученных значений параметров элементов произвести моделирование схемы и определить значения токов в цепях включения транзистора и напряжений между выводами транзистора.

ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

<i>N</i>	α	β	R_K (кОм)	R_E (кОм)	R_B (кОм)	$V_K(B)$	$V_B(B)$
1	?	85	3	1	?	15	10
2	0,987	?	2	?	60	16	8
3	?	80	2	1	?	14	8
4	?	100	3	2	?	25	15
5	0,976	?	3	?	50	15	8
6	?	90	2	?	40	20	12
7	0,956	?	5	8	?	22	14
8	?	120	3	1	?	20	6
9	0,988	?	2	?	60	20	8
10	?	100	1	?	40	15	8
11	0,978	?	2	4	?	13	10
12	?	95	4	3	?	30	14
13	0,998	?	1	?	87	25	5
14	?	120	2	?	50	25	7
15	0,986	?	4	3	?	22	10

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В какой области биполярного транзистора самая низкая концентрация примеси?
2. Площадь какого перехода больше: эмиттерного или коллекторного?
3. Какие режимы работы биполярного транзистора вам известны?
4. Каково соотношение между токами в транзисторе?
5. Что предпринимается для уменьшения тока базы?
6. Какие явления способны вызвать электрический пробой коллекторного перехода?
7. Что называется вторичным пробоем коллекторного перехода?
8. В каком случае может возникнуть модуляция толщины базы?

ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Номер варианта студенту выдается преподавателем. Отчет на защиту предоставляется в печатном виде.

Структура отчета (на отдельном листе(-ах)):

- титульный лист;
- цели и задачи работы;
- формулировка задания (вариант);
- расчетные формулы для определения параметров транзистора и других элементов схемы;
- схема исследования транзистора с указанием значений токов и напряжений;
- выводы.