

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

Ферганский политехнический институт

КАФЕДРА «ЭМЭ»

РЕФЕРАТ

ПО ПРЕДМЕТУ:

**научно-исследовательские
работы студентов**

НА ТЕМУ:

**Полупроводниковые
электронные устройства и
приборы, и их параметры**

ВЫПОЛНИЛ:

**СТ.ГР. 56-05 ЭМЭ
Шерстнёв Антон**

ПРИНЯЛ:

Исроилов Г.

ФЕРГАНА – 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Из истории изобретения транзистора	3
БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ	4
1. Устройство и принцип действия.....	4
2 Схемы включения биполярных транзисторов	9
3 Статические характеристики биполярных транзисторов	9
3.1 Характеристики транзистора, включенного по схеме ОБ	10
3.2 Характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ:	10
4 Основные параметры	12
5 Режимы работы биполярных транзисторов	14
6 Область применения	14
7 Простейший усилительный каскад на биполярном транзисторе.....	14
8 Расчет электрических цепей с биполярными транзисторами	16

Из истории изобретения транзистора

В декабре 1947 г. Бардин и Браттейн — два исследователя фирмы «Белл» (США) занимались изучением распределения потенциала вокруг точечного контакта германиевого СВЧ-детектора с целью повышения его надежности и чувствительности. В ходе этих исследований было обнаружено, что при расстоянии между точечными контактами порядка 10—12 микрон оказывается возможным управлять током через один из контактов с помощью тока через второй контакт. Степень управления — коэффициент усиления по току — сильно зависела от материала зондов и «формовки» при пропускании импульсов тока через один из контактов. В среднем величина коэффициента усиления по току составляла около 2,5. Таким образом, этот эффект лег в основу полупроводникового прибора, получившего название точечно-контактного транзистора, или транзистора типа «А». Научной основой изобретения были интереснейшие явления в полупроводниках: проводимость, обусловленная носителями тока двух знаков — электронами и дырками; инжекция носителей через электронно-дырочный (р-п-) переход; диффузия и рекомбинация неравновесных электронов и дырок. Это открытие стало началом нового этапа развития физики твердого тела, создающего основы полупроводниковой электроники.

Первая публикация об этом открытии появилась в журнале «Physical Review» в июле 1948 г., и этот год стал считаться годом изобретения транзистора. Авторы — изобретатели биполярного транзистора Уильям Шокли, Джон Бардин и Уолтер Браттейн в 1956 году были удостоены Нобелевской премии, а их детище — транзистор — начал свое триумфальное шествие по миру.

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

1. Устройство и принцип действия

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор, состоящий из трех областей с чередующимися типами электропроводности и пригодный для усиления мощности.

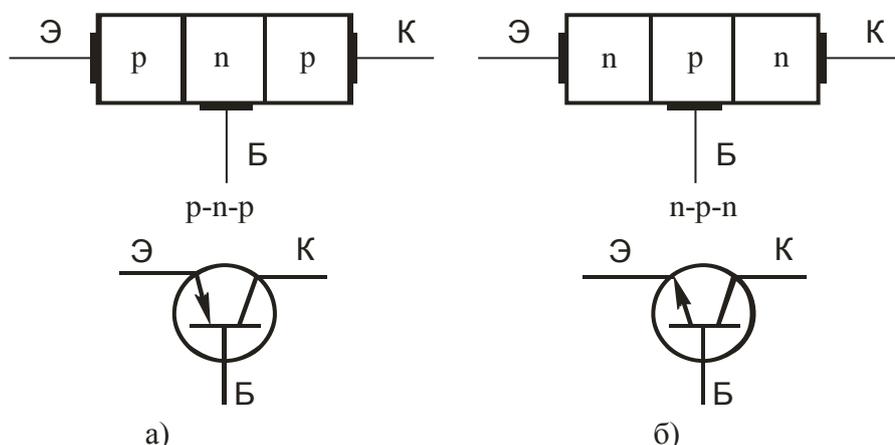
Выпускаемые в настоящее время биполярные транзисторы можно классифицировать по следующим признакам:

- по материалу: германиевые и кремниевые;
- по виду проводимости областей: типа p-n-p и n-p-n;
- по мощности: малой ($P_{\max} \leq 0,3\text{Вт}$), средней ($P_{\max} \leq 1,5\text{Вт}$) и большой мощности ($P_{\max} > 1,5\text{Вт}$);
- по частоте: низкочастотные, среднечастотные, высокочастотные и СВЧ.

В биполярных транзисторах ток определяется движением носителей заряда двух типов: электронов и дырок (или основными и неосновными). Отсюда их название – биполярные.

В настоящее время изготавливаются и применяются исключительно транзисторы с плоскостными p-n- переходами.

Устройство плоскостного биполярного транзистора показано схематично на рис. 1.



Он представляет собой пластинку германия или кремния, в которой созданы три области с различной электропроводностью. У транзистора типа n-p-n средняя область имеет дырочную, а крайние области – электронную электропроводность.

Транзисторы типа p-n-p имеют среднюю область с электронной, а крайние области с дырочной электропроводностью.

Средняя область транзистора называется базой, одна крайняя область – эмиттером, другая – коллектором. Таким образом в транзисторе имеются два p-n- перехода: эмиттерный – между эмиттером и базой и коллекторный – между базой и коллектором. Площадь эмиттерного перехода меньше площади коллекторного перехода.

Эмиттером называется область транзистора назначением которой является инжекция носителей заряда в базу. Коллектором называют область, назначением которой является экстракция носителей заряда из базы. Базой является область, в которую инжектируются эмиттером неосновные для этой области носители заряда.

Концентрация основных носителей заряда в эмиттере во много раз больше концентрации основных носителей заряда в базе, а их концентрация в коллекторе несколько меньше концентрации в эмиттере. Поэтому проводимость эмиттера на несколько порядков выше проводимости базы, а проводимость коллектора несколько меньше проводимости эмиттера.

От базы, эмиттера и коллектора сделаны выводы. В зависимости от того, какой из выводов является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК).

Входная, или управляющая, цепь служит для управления работой транзистора. В выходной, или управляемой, цепи получают усиленные колебания. Источник усиливаемых колебаний включается во входную цепь, а в выходную включается нагрузка.

Рассмотрим принцип действия транзистора на примере транзистора р-п-р –типа, включенного по схеме с общей базой (рис.2).

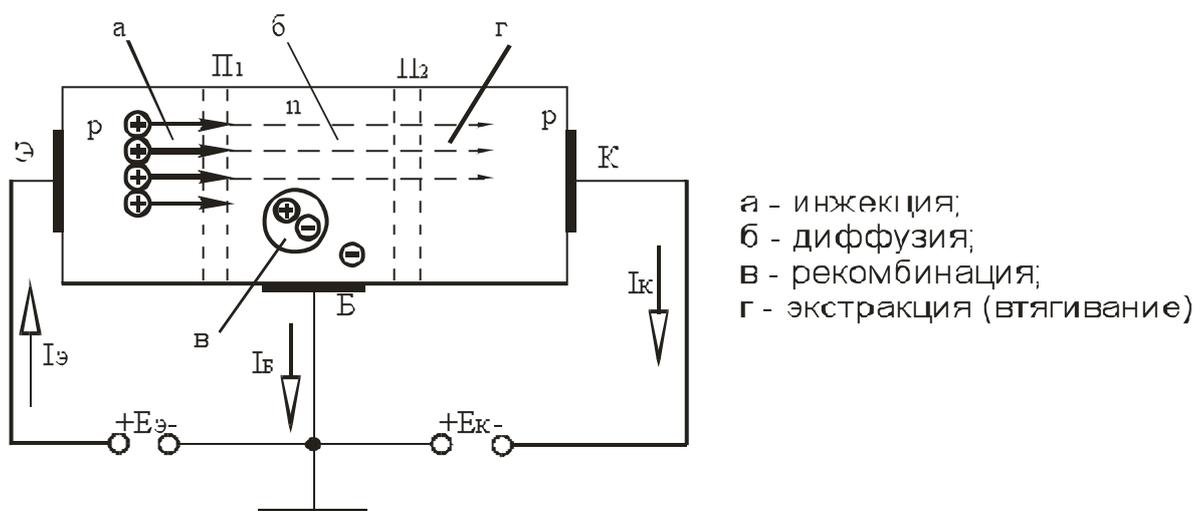


Рисунок 2. – Принцип действия биполярного транзистора (р-п-р- типа)

Внешние напряжения двух источников питания $EЭ$ и $Eк$ подключают к транзистору таким образом, чтобы обеспечивалось смещение эмиттерного перехода П1 в прямом направлении (прямое напряжение), а коллекторного перехода П2 – в обратном направлении (обратное напряжение).

Если к коллекторному переходу приложено обратное напряжение, а цепь эмиттера разомкнута, то в цепи коллектора протекает небольшой обратный ток $Iк0$ (единицы микроампер). Этот ток возникает под действием обратного напряжения и создается направленным перемещением неосновных носителей заряда дырок базы и электронов коллектора через коллекторный переход. Обратный ток протекает по цепи: $+Eк$, база-коллектор, $-Eк$. Величина обратного тока коллектора не зависит от напряжения на коллекторе, но зависит от температуры полупроводника.

При включении в цепь эмиттера постоянного напряжения $EЭ$ в прямом направлении потенциальный барьер эмиттерного перехода понижается. Начинается инжектирование (впрыскивание) дырок в базу.

Внешнее напряжение, приложенное к транзистору, оказывается приложенным в основном к переходам П1 и П2, т.к. они имеют большое

сопротивление по сравнению с сопротивлением базовой, эмиттерной и коллекторной областей. Поэтому инжектированные в базу дырки перемещаются в ней посредством диффузии. При этом дырки рекомбинируют с электронами базы. Поскольку концентрация носителей в базе значительно меньше, чем в эмиттере, то рекомбинируют очень немногие дырки. При малой толщине базы почти все дырки будут доходить до коллекторного перехода П2. На место рекомбинированных электронов в базу поступают электроны от источника питания E_k . Дырки, рекомбинировавшие с электронами в базе, создают ток базы I_B .

Под действием обратного напряжения E_k потенциальный барьер коллекторного перехода повышается, толщина перехода П2 увеличивается. Но потенциальный барьер коллекторного перехода не создает препятствия для прохождения через него дырок. Вошедшие в область коллекторного перехода дырки попадают в сильное ускоряющее поле, созданное на переходе коллекторным напряжением, и экстрагируются (втягиваются) коллектором, создавая коллекторный ток I_k . Коллекторный ток протекает по цепи: $+E_k$, база-коллектор, $-E_k$.

Таким образом, в транзисторе протекает три тока: ток эмиттера, коллектора и базы.

В проводе, являющемся выводом базы, токи эмиттера и коллектора направлены встречно. Следовательно, ток базы равен разности токов эмиттера и коллектора: $I_B = I_E - I_k$.

Физические процессы в транзисторе типа n-p-n протекают аналогично процессам в транзисторе типа p-n-p.

Полный ток эмиттера I_E определяется количеством инжектированных эмиттером основных носителей заряда. Основная часть этих носителей заряда достигая коллектора, создает коллекторный ток I_k . Незначительная часть инжектированных в базу носителей заряда рекомбинируют в базе, создавая ток базы I_B . Следовательно, ток эмиттера разделяется на токи базы и коллектора, т.е. $I_E = I_B + I_k$.

Ток эмиттера является входным током, ток коллектора – выходным. Выходной ток составляет часть входного, т.е.

$$\Delta I_{\text{К}} = \alpha \Delta I_{\text{Э}}, \quad (4.1)$$

где α - коэффициент передачи тока для схемы ОБ;

$$\alpha = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Э}}}.$$

Поскольку выходной ток меньше входного, то коэффициент $\alpha < 1$. Он показывает, какая часть инжектированных в базу носителей заряда достигает коллектора. Обычно величина α составляет $0,95 \div 0,995$.

В схеме с общим эмиттером выходным током является ток коллектора, а входным – ток базы. Коэффициент усиления по току для схемы ОЭ:

$$\beta = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}}, \quad (4.2)$$

$$\text{но } \Delta I_{\text{Б}} = \Delta I_{\text{Э}} - \Delta I_{\text{К}} = \Delta I_{\text{Э}} - \alpha \Delta I_{\text{Э}} = \Delta I_{\text{Э}}(1 - \alpha),$$

тогда

$$\beta = \frac{\alpha \Delta I_{\text{Э}}}{\Delta I_{\text{Э}}(1 - \alpha)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (4.3)$$

Следовательно, коэффициент усиления по току для схемы ОЭ составляет десятки единиц.

Выходной ток транзистора зависит от входного тока. Поэтому транзистор- прибор, управляемый током.

Изменения тока эмиттера, вызванные изменением напряжения эмиттерного перехода, полностью передаются в коллекторную цепь, вызывая изменение тока коллектора. А т.к. напряжение источника коллекторного питания $E_{\text{К}}$ значительно больше, чем эмиттерного $E_{\text{Э}}$, то и мощность, потребляемая в цепи коллектора $P_{\text{К}}$, будет значительно больше мощности в цепи эмиттера $P_{\text{Э}}$. Таким образом, обеспечивается возможность управления большой мощностью в коллекторной цепи транзистора малой мощностью, затрачиваемой в эмиттерной цепи, т.е. имеет место усиление мощности.

2 Схемы включения биполярных транзисторов

В электрическую цепь транзистор включают таким образом, что один из его выводов (электрод) является входным, второй – выходным, а третий – общим для входной и выходной цепей. В зависимости от того, какой электрод является общим, различают три схемы включения транзисторов: ОБ, ОЭ и ОК. Эти схемы для транзистора типа р-п-р приведены на рис. 3. Для транзистора п-р-п в схемах включения изменяются лишь полярности напряжений и направление токов. При любой схеме включения транзистора (в активном режиме) полярность включения источников питания должна быть выбрана так, чтобы эмиттерный переход был включен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном.

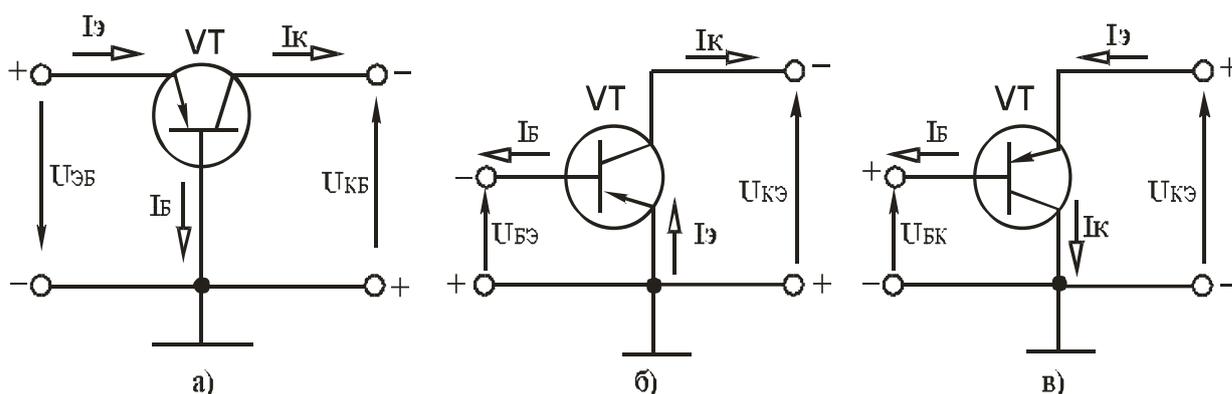


Рисунок 3 – Схемы включения биполярных транзисторов: а) ОБ; б) ОЭ; в) ОК

3 Статические характеристики биполярных транзисторов

Статическим режимом работы транзистора называется режим при отсутствии нагрузки в выходной цепи.

Статическими характеристиками транзисторов называют графически выраженные зависимости напряжения и тока входной цепи (входные ВАХ) и выходной цепи (выходные ВАХ). Вид характеристик зависит от способа включения транзистора.

3.1 Характеристики транзистора, включенного по схеме ОБ

Входной характеристикой является зависимость:

$I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}})$ при $U_{\text{КБ}} = \text{const}$ (рис. 4.4, а).

Выходной характеристикой является зависимость:

$I_{\text{К}} = f(U_{\text{КБ}})$ при $I_{\text{Э}} = \text{const}$ (рис. 4.4, б).

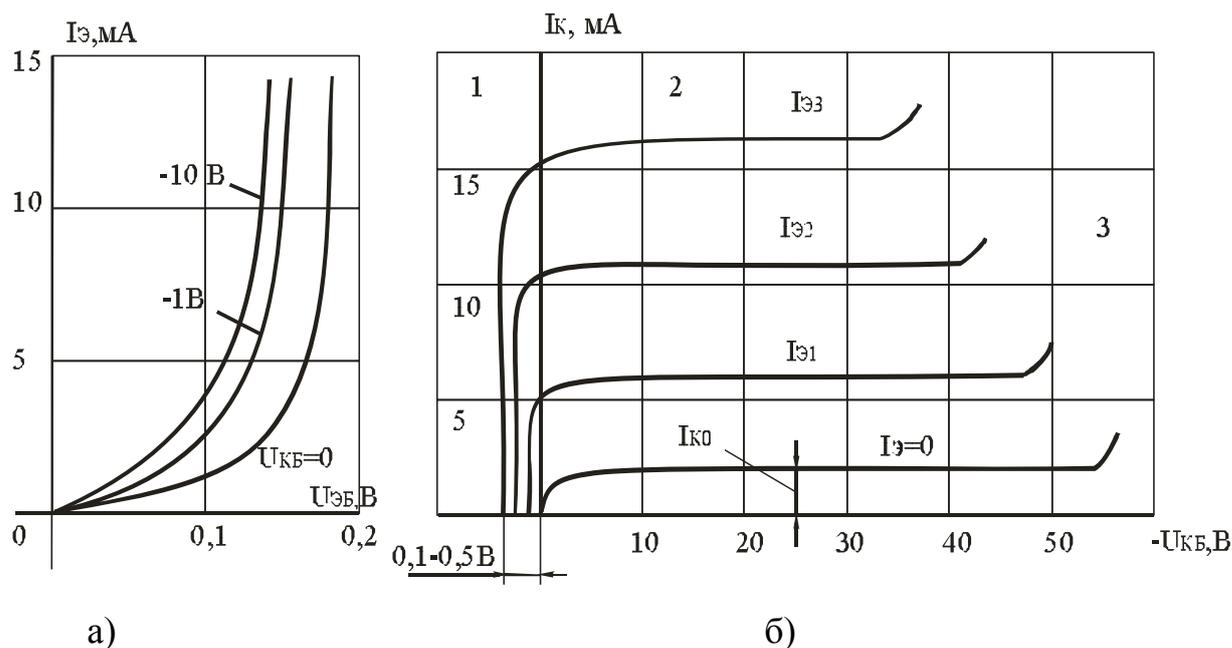


Рисунок 4 – Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме ОБ

Выходные ВАХ имеют три характерные области: 1 – сильная зависимость $I_{\text{К}}$ от $U_{\text{КБ}}$ (нелинейная начальная область); 2 – слабая зависимость $I_{\text{К}}$ от $U_{\text{КБ}}$ (линейная область); 3 – пробой коллекторного перехода.

Особенностью характеристик в области 2 является их небольшой подъем при увеличении напряжения $U_{\text{КБ}}$.

3.2 Характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ:

Входной характеристикой является зависимость:

$I_B = f(U_{БЭ})$ при $U_{КЭ} = \text{const}$ (рис. 5, б).

Выходной характеристикой является зависимость:

$I_K = f(U_{КЭ})$ при $I_B = \text{const}$ (рис. 5, а).

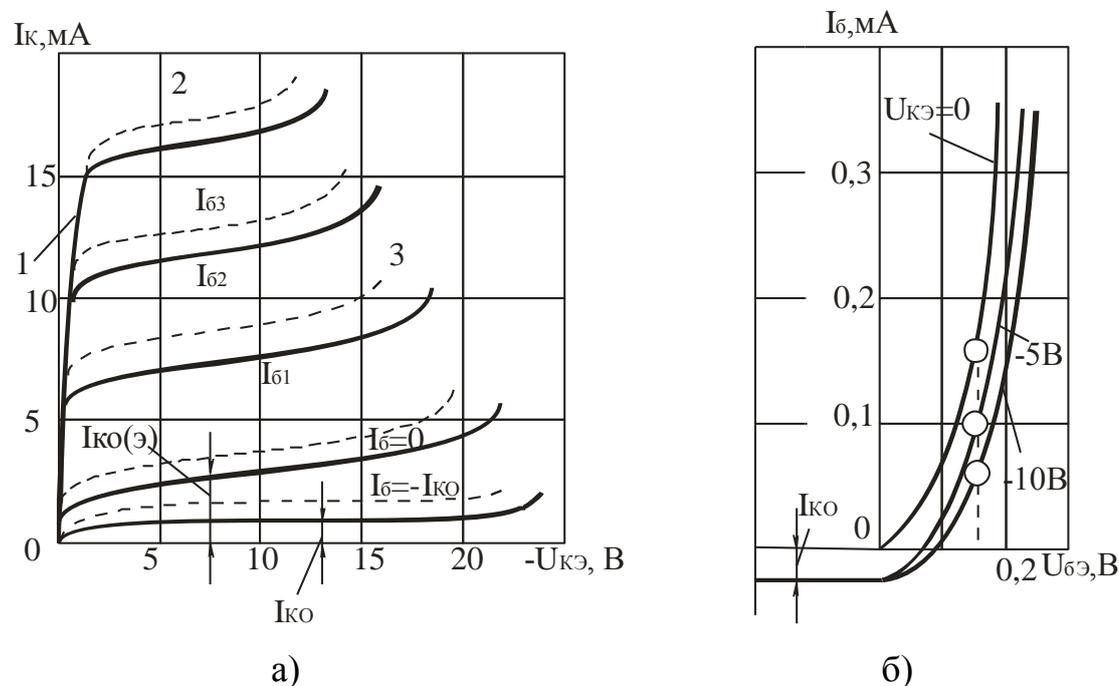


Рисунок 5 – Статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме ОЭ

Транзистор в схеме ОЭ дает усиление по току. Коэффициент усиления

по току в схеме ОЭ: $\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)}$. Если коэффициент α для транзисторов $\alpha = 0,9 \div 0,99$, то коэффициент $\beta = 9 \div 99$. Это является важнейшим преимуществом включения транзистора по схеме ОЭ, чем, в частности, определяется более широкое практическое применение этой схемы включения по сравнению со схемой ОБ.

Из принципа действия транзистора известно, что через вывод базы протекают во встречном направлении две составляющие тока (рис. 6): обратный ток коллекторного перехода $I_{К0}$ и часть тока эмиттера $(1-\alpha)I_E$. В связи с этим нулевое значение тока базы ($I_B = 0$) определяется равенством

указанных составляющих токов, т.е. $(1 - \alpha)I_{\text{Э}} = I_{\text{КО}}$. Нулевому входному току соответствуют ток эмиттера $I_{\text{Э}} = I_{\text{КО}} / (1 - \alpha) = (1 + \beta)I_{\text{КО}}$ и ток коллектора $I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{КО}} = \frac{\alpha I_{\text{КО}}}{(1 - \alpha)} + I_{\text{КО}} = (1 - \beta)I_{\text{КО}}$. Иными словами, при нулевом токе базы ($I_{\text{Б}} = 0$) через транзистор в схеме ОЭ протекает ток, называемый начальным или сквозным током $I_{\text{КО}}(\text{Э})$ и равным $(1 + \beta)I_{\text{КО}}$.

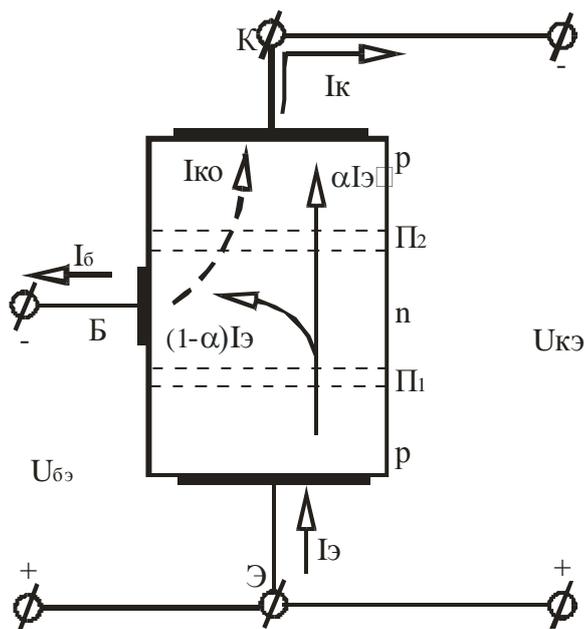


Рисунок 6 – Схема включения транзистора с общим эмиттером (схема ОЭ)

4 Основные параметры

Для анализа и расчета цепей с биполярными транзисторами используют так называемые h – параметры транзистора, включенного по схеме ОЭ.

Электрическое состояние транзистора, включенного по схеме ОЭ, характеризуется величинами $I_{\text{Б}}$, $I_{\text{БЭ}}$, $I_{\text{К}}$, $U_{\text{КЭ}}$.

В систему h – параметров входят следующие величины:

1. Входное сопротивление

$$h_{11} = \Delta U_1 / \Delta I_1 \text{ при } U_2 = \text{const.} \quad (4.4)$$

представляет собой сопротивление транзистора переменному входному току при котором замыкание на выходе, т.е. при отсутствии выходного переменного напряжения.

2. Коэффициент обратной связи по напряжению:

$$h_{12} = \Delta U_1 / \Delta U_2 \text{ при } I_1 = \text{const.} \quad (4.5)$$

показывает, какая доля входного переменного напряжения передается на вход транзистора вследствие обратной связи в нем.

3. Коэффициент усиления по току (коэффициент передачи тока):

$$h_{21} = \Delta I_2 / \Delta I_1 \text{ при } U_2 = \text{const.} \quad (4.6)$$

показывает усиление переменного тока транзистором в режиме работы без нагрузки.

4. Выходная проводимость:

$$h_{22} = \Delta I_2 / \Delta U_2 \text{ при } I_1 = \text{const.} \quad (4.7)$$

представляет собой проводимость для переменного тока между выходными зажимами транзистора.

Выходное сопротивление $R_{\text{вых}} = 1/h_{22}$.

Для схемы с общим эмиттером справедливы следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{БЭ}} &= h_{11Э} \Delta I_{\text{Б}} + h_{12Э} \Delta U_{\text{КЭ}}, \\ \Delta I_{\text{К}} &= h_{21Э} \Delta I_{\text{Б}} + h_{22Э} \Delta U_{\text{КЭ}}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

где

$$h_{11Э} = \Delta U_{\text{БЭ}} / \Delta I_{\text{Б}} \text{ при } U_{\text{КЭ}} = \text{const};$$

$$h_{12Э} = \Delta U_{\text{БЭ}} / \Delta U_{\text{КЭ}} \text{ при } I_{\text{Б}} = \text{const};$$

$$h_{21Э} = \Delta I_{\text{К}} / \Delta I_{\text{Б}} \text{ при } U_{\text{КЭ}} = \text{const};$$

$$h_{22Э} = \Delta I_{\text{К}} / \Delta U_{\text{К}} \text{ при } I_{\text{Б}} = \text{const}.$$

Для предотвращения перегрева коллекторного перехода необходимо, чтобы мощность, выделяемая в нем при прохождении коллекторного тока, не превышала некоторой максимальной величины:

$$P_{\text{К}} = I_{\text{К}} U_{\text{КЭ}} \leq P_{\text{Кmax}}. \quad (4.9)$$

Кроме того, существуют ограничения по коллекторному напряжению:

$$U_{КЭ} \leq U_{КЭ\max}$$

и коллекторному току:

$$I_K \leq I_{K\max}$$

5 Режимы работы биполярных транзисторов

Транзистор может работать в трех режимах в зависимости от напряжения на его переходах. При работе в активном режиме на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном – обратное.

Режим отсечки, или запираения, достигается подачей обратного напряжения на оба перехода (оба р-п- перехода закрыты).

Если же на обоих переходах напряжение прямое (оба р-п- перехода открыты), то транзистор работает в режиме насыщения.

В режиме отсечки и режиме насыщения управление транзистором почти отсутствует. В активном режиме такое управление осуществляется наиболее эффективно, причем транзистор может выполнять функции активного элемента электрической схемы (усиление, генерирование и т.п.).

6 Область применения

Биполярные транзисторы являются полупроводниковыми приборами универсального назначения и широко применяются в различных усилителях, генераторах, в импульсных и ключевых устройствах.

7 Простейший усилительный каскад на биполярном транзисторе

Наибольшее применение находит схема включения транзистора по схеме с общим эмиттером (рис. 7)

Основными элементами схемы являются источник питания E_k , управляемый элемент – транзистор V_T и резистор R_k . Эти элементы образуют главную (выходную) цепь усилительного каскада, в которой за счет

протекания управляемого тока создается усиленное переменное напряжение на выходе схемы.

Остальные элементы выполняют вспомогательную роль. Конденсатор C_p является разделительным. При отсутствии этого конденсатора в цепи источника входного сигнала создавался бы постоянный ток от источника питания E_k .

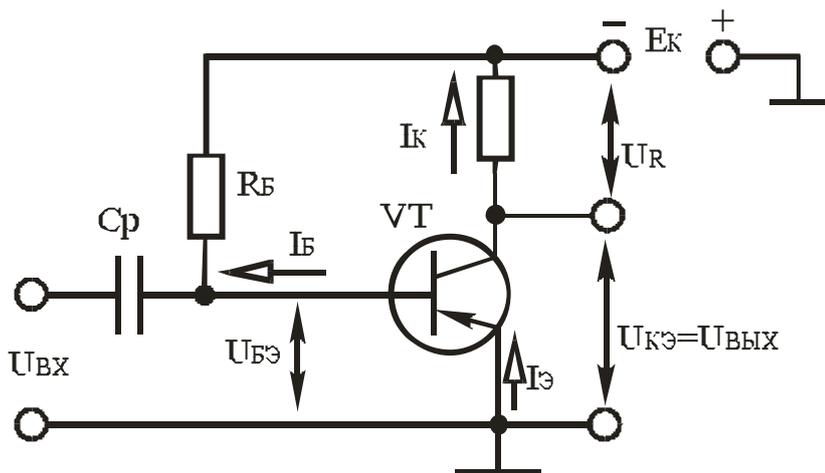


Рисунок 7 – Схема простейшего усилительного каскада на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером

Резистор R_B , включенный в цепь базы, обеспечивает работу транзистора в режиме покоя, т.е. в отсутствие входного сигнала. Режим покоя обеспечивается током базы покоя $I_B \approx E_k/R_B$.

С помощью резистора R_k создается выходное напряжение, т.е. R_k выполняет функцию создания изменяющегося напряжения в выходной цепи за счет протекания в ней тока, управляемого по цепи базы.

Для коллекторной цепи усилительного каскада можно записать следующее уравнение электрического состояния:

$$E_k = U_{кэ} + I_k R_k, \quad (4.10)$$

т.е сумма падения напряжения на резисторе R_k и напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$ транзистора всегда равна постоянной величине – ЭДС источника питания E_k .

Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения E_k в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения сопротивления управляемого элемента (транзистора) по закону, задаваемого входным сигналом.

При подаче на вход усилительного каскада переменного напряжения $u_{вх}$ в базовой цепи транзистора создается переменная составляющая тока $I_{Б\sim}$, а значит ток базы будет изменяться. Изменение тока базы приводит к изменению значения тока коллектора ($I_K = \beta I_B$), а значит, к изменению значений напряжений на сопротивлении R_k и $U_{кэ}$. Усилительные способности обусловлены тем, что изменение значений тока коллектора в β раз больше, чем тока базы.

8 Расчет электрических цепей с биполярными транзисторами

Для коллекторной цепи усилительного каскада (рис. 7) в соответствии со вторым законом Кирхгофа справедливо уравнение (4.10).

Вольт – амперная характеристика коллекторного резистора R_K является линейной, а вольт – амперные характеристики транзистора представляют собой нелинейные коллекторные характеристики транзистора (рис. 5, а), включенного по схеме ОЭ.

Расчет такой нелинейной цепи, т.е определение I_K , $U_{RК}$ и $U_{КЭ}$ для различных значений токов базы I_B и сопротивлений резистора R_K можно провести графически. Для этого на семействе коллекторных характеристик (рис. 5, а) необходимо провести из точки E_K на оси абсцисс вольт – амперную характеристику резистора R_K , удовлетворяющую уравнению:

$$U_{кэ} = E_k - R_k I_k. \quad (4.11)$$

Эту характеристику строят по двум точкам:

$U_{кэ} = E_k$ при $I_k = 0$ на оси абсцисс и $I_k = E_k/R_k$ при $U_{кэ} = 0$ на оси ординат. Построенную таким образом ВАХ коллекторного резистора R_k называют линией нагрузки. Точки пересечения ее с коллекторными характеристиками дают графическое решение уравнения (4.11) для данного сопротивления R_k и различных значений тока базы I_B . По этим точкам можно определить коллекторный ток I_k , одинаковый для транзистора и резистора R_k , а также напряжение $U_{кэ}$ и $U_{рк}$.

Точка пересечения линии нагрузки с одной из статических ВАХ называется рабочей точкой транзистора. Изменяя I_B , можно перемещать ее по нагрузочной прямой. Начальное положение этой точки при отсутствии входного переменного сигнала называют точкой покоя – T_0 .

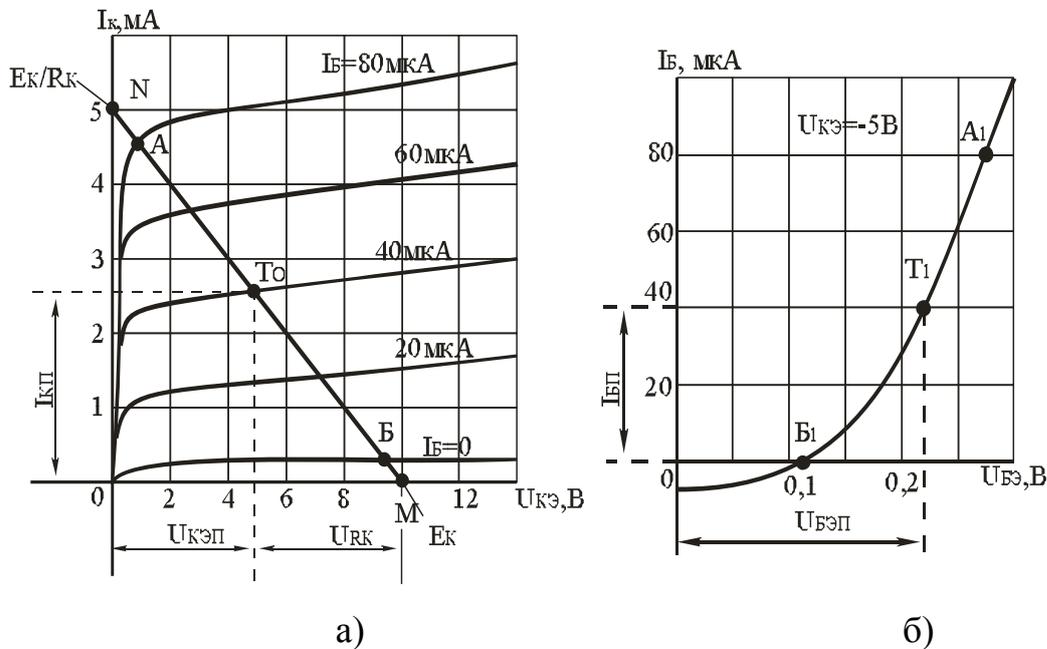


Рисунок 8 – Графоаналитический расчет рабочего режима транзистора при помощи выходных и входной характеристики.

Точка покоя (рабочая точка) T_0 определяет ток $I_{кп}$ и напряжение $U_{кэп}$ в режиме покоя. По этим значениям можно найти мощность $P_{кп}$, выделяющуюся в транзисторе в режиме покоя, которая не должна превышать предельной мощности $P_{к\ max}$, являющейся одним из параметров транзистора:

$$P_{кп} = I_{кп} \cdot U_{кэп} \leq P_{к\ max}. \quad (4.12)$$

В справочниках обычно не приводится семейство входных характеристик, а даются лишь характеристики для $U_{КЭ} = 0$ и для некоторого $U_{КЭ} > 0$.

Входные характеристики для различных $U_{КЭ}$, превышающих $1В$, располагаются очень близко друг к другу. Поэтому расчет входных токов и напряжений можно приближенно делать по входной характеристике при $U_{КЭ} > 0$, взятой из справочника.

На эту кривую переносятся точки А, T_0 и Б выходной рабочей характеристики, и получаются точки А1, Т1 и Б1 (рис. 4.8, б). Рабочая точка Т1 определяет постоянное напряжение базы УБЭП и постоянной ток базы ИБП.

Сопротивление резистора R_B (обеспечивает работу транзистора в режиме покоя), через который от источника E_K будет подаваться постоянное напряжение на базу:

$$R_B = \frac{E_K - U_{БЭП}}{I_{БП}}. \quad (4.13)$$

В активном (усилительном) режиме точка покоя транзистора T_0 находится примерно посередине участка линии нагрузки АБ, а рабочая точка не выходит за пределы участка АБ.