

- Транзистор
  - Биполярный транзистор
    - Принцип работы транзистора
      - Токи в транзисторе
    - Режимы работы биполярного транзистора
  - Цоколевка (распиновка) транзисторов
- Транзисторная схемотехника
  - Основные параметры включения транзистора
- Практическая работа №2

# Транзистор

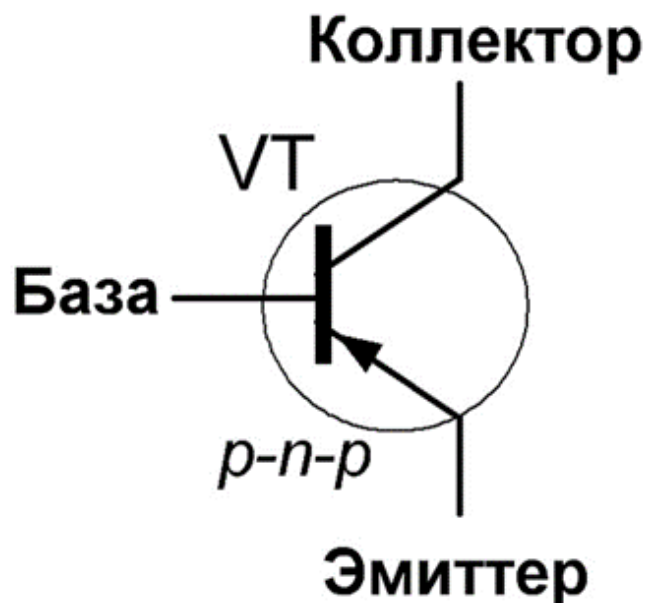
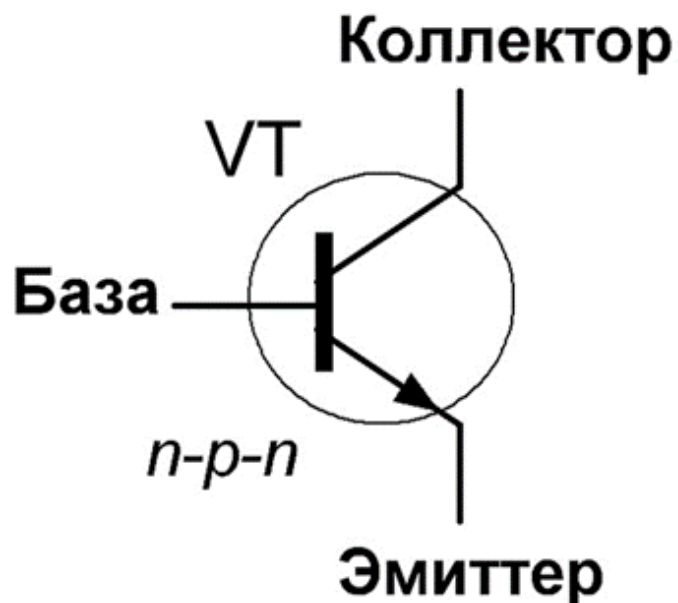
---

**Транзистор** (англ. transistor), полупроводниковый триод — радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала, обычно с тремя выводами, способный от небольшого входного сигнала управлять значительным током в выходной цепи, что позволяет использовать его для усиления, генерирования, коммутации и преобразования электрических сигналов.

## Биполярный транзистор

---

**Биполярный транзистор** - это тип транзистора, который использует как электроны (n), так и дырки (p) как носители заряда. В отличие от униполярного транзистора, такого как полевой транзистор (FET), который использует только один вид носителя заряда. Биполярный транзистор позволяет небольшому току, вводимому на одном из его выводов, управлять гораздо большим током, проходящим между выводами, делая устройство способным на усиление или переключение.



Биполярные транзисторы имеют три слоя полупроводников: эмиттер (Е), база (В) и коллектор (С). Эти слои образуют два р-п-перехода: между эмиттером и базой (эмиттер-база) и между базой и коллектором (база-коллектор).

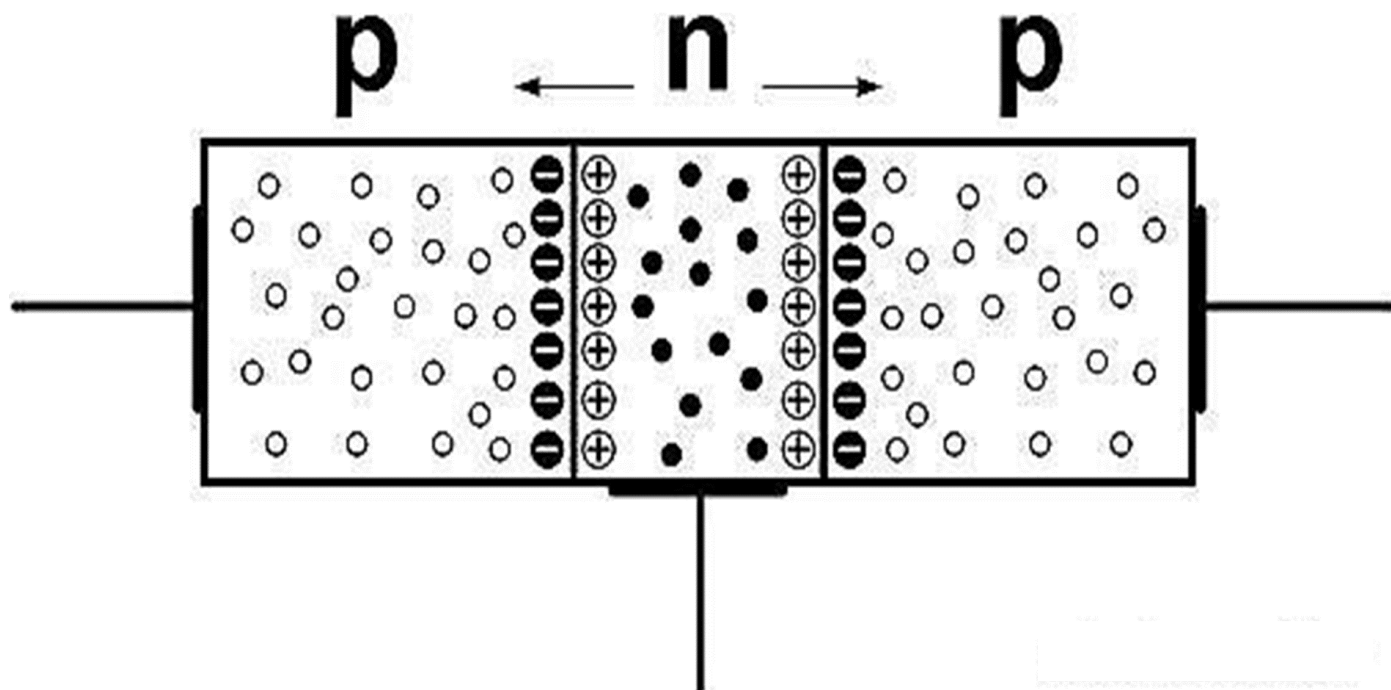
В транзисторе типа NPN (отрицательный-положительный-отрицательный), эмиттер обычно является N-типом полупроводника. Это означает, что эмиттер обеспечивает источник электронов для транзистора.

В транзисторах типа PNP (положительный-отрицательный-положительный) роль эмиттера выполняет слой Р-типа, и ток переносится дырками от эмиттера к базе.

Управление транзистором происходит через ток, который подается на базу.

## Принцип работы транзистора

Пример р-п-р транзистора:

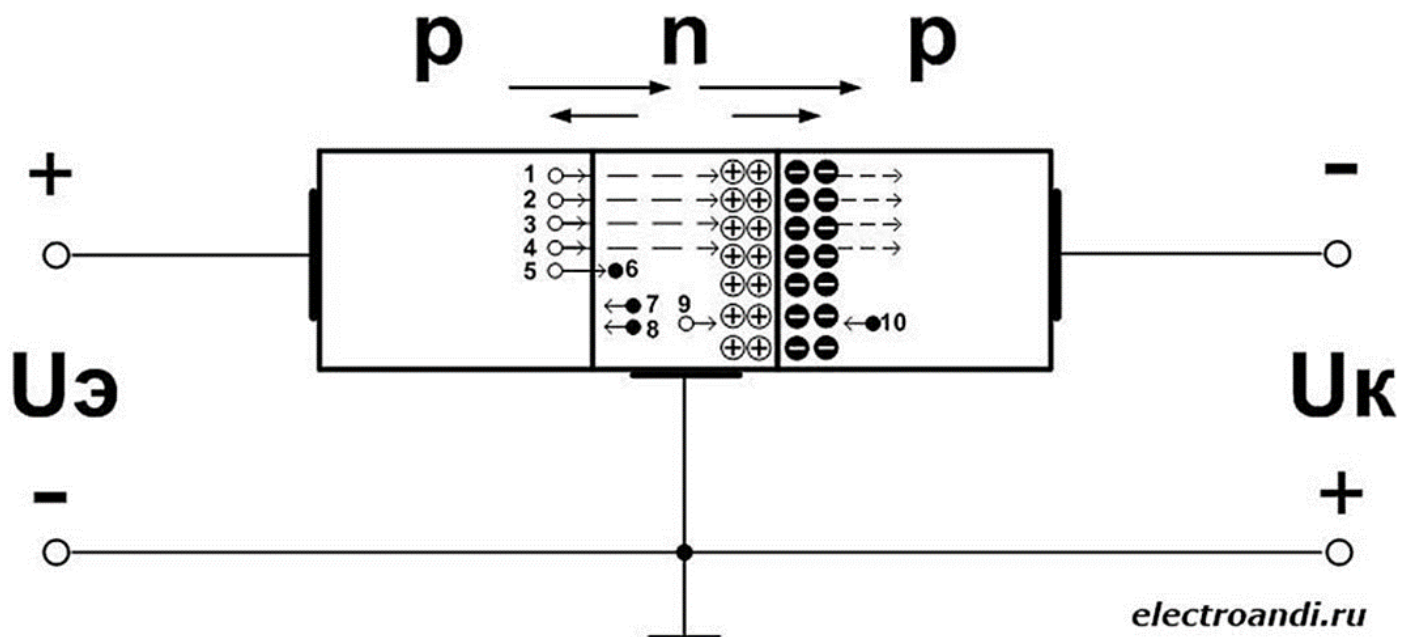


На картинке представлен один кристалл, как правило кремния, который состоит из трех слоев:

- Р-тип (Позитивный тип): В этой зоне атомы определенных примесей (например, бора) добавляются к кремнию, создавая "Р-тип" материал. Примеси добавляют дырки в кристаллическую структуру кремния, делая его Р-типом полупроводником.
- N-тип (Негативный тип): В этой зоне атомы других примесей (например, фосфора) добавляются к кремнию, создавая "N-тип" материал. Примеси добавляют лишние электроны в кристаллическую структуру, делая его N-типом полупроводником.
- База (или нейтральная зона): Эта зона находится между Р-типом и N-типом и является областью нейтрального кремния без добавленных примесей. База управляет током между Р-типом и N-типом, что позволяет управлять транзистором.

В отсутствие внешних напряжений, между слоями устанавливается разность потенциалов. На переходах устанавливаются потенциальные барьеры.

Чтобы ток пошел между слоями, т.е. чтобы транзистор заработал, **эмиттерный переход** ( граница между левым слоем р и центральным слоем n) должен быть смещен в одном направлении, а **коллекторный переход** (граница между центральным n и правым слоем р) должен быть смещен в обратном направлении.



Для такой работы необходимо два источника напряжения:  $U_{\text{э}}$  - напряжение подаваемое на эмиттер  $U_{\text{к}}$  - напряжение подаваемое на коллектор

$U_{\text{э}}$  подключается положительным полюсом к эмиттеру, а отрицательным к базе.  $U_{\text{к}}$  подключается отрицательным полюсом к коллектору, а положительным к базе. Если  $U_{\text{э}} < U_{\text{к}}$ , то через переходы начинают проходить основные носители, в эмиттере это дырки 1-5, а в базе электроны 7-8.

А так как количество дырок в эмиттере  $p$  больше, чем электронов в базе  $n$ , то эмиттерный ток в случае  $p$ - $n$ - $p$  перехода состоит в основном из дырок.

Эмиттерный ток - это сумма дырок эмиттера и электронов базы:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{э}p} + I_{\text{э}n}$$

Полезной является дырочная составляющая, электронную стараются сделать как можно меньше. И соотношение полезного дырочного тока к общему эмиттерному току стараются приблизить к единице:

$$\gamma = \frac{I_{\text{э}p}}{I_{\text{э}}}$$

- $\gamma$  - коэффициент инжекции

Пока дырки пересекают базовый слой они *рекомбинируют* (объединяются) с электронами находящимися там, например, как дырка 5 и электрон 6. А так как дырки поступают постоянно, они создают избыточный положительный заряд, поэтому, должны поступать и электроны, которые втягиваются через вывод базы и образуют базовый ток  $I_{\text{бр}}$ . Концентрация дырок в базе должна быть

приблизительно равна концентрации электронов, что обеспечивает электронейтральность базы.

Количество дырок дошедших до коллектора, меньше количество дырок вышедших из эмиттера на величину рекомбинировавших дырок в базе. То есть, ток коллектора отличается от тока эмиттера на величину тока базы

$$I_{\text{эп}} + I_{\text{кр}} + I_{\text{бр}}$$

Соотношение дырок дошедших до коллектора  $I_{\text{кр}}$  к дыркам вышедшим из эмиттера стараются довести до единицы, т.е. уменьшить потери дырок при переносе из эмиттера в коллектор:

$$\sigma = \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{эп}}}$$

- $\sigma$  - коэффициент переноса

Коллекторный ток транзистора состоит из дырочной составляющей  $I_{\text{кр}}$  и обратного тока коллектора  $I_{\text{ко}}$ .

$$I_{\text{к}} = I_{\text{кр}} + I_{\text{ко}}$$

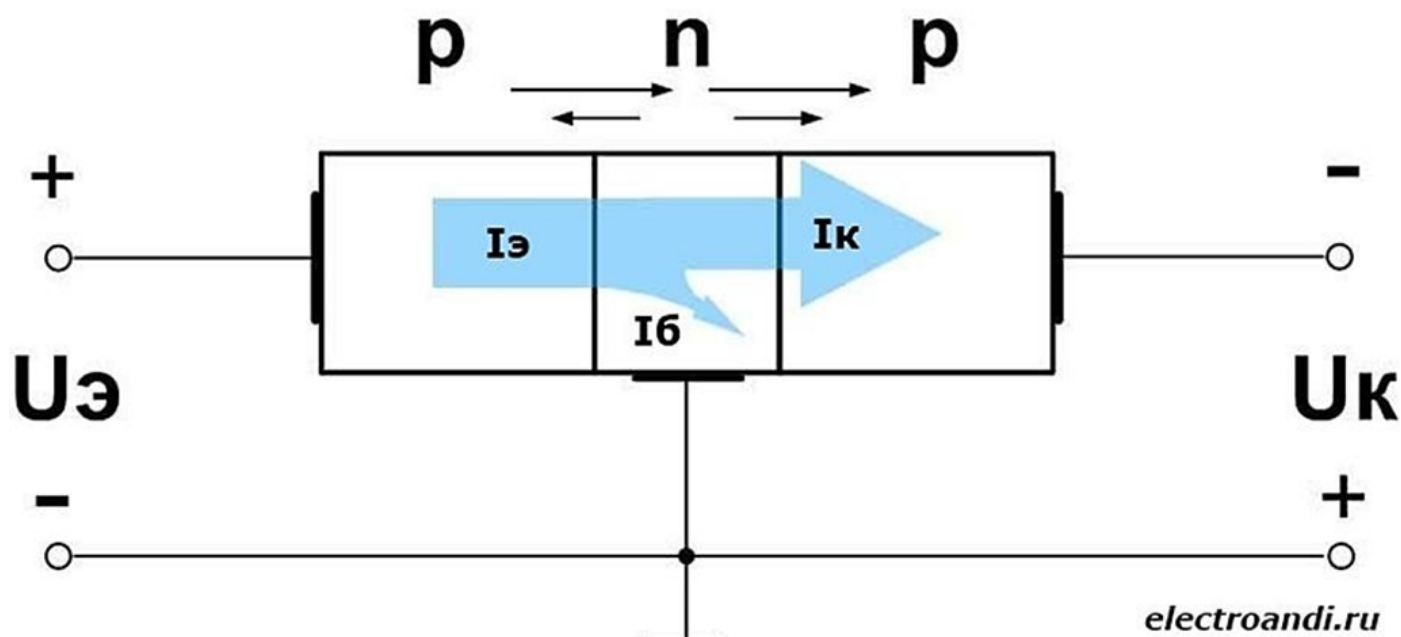
Обратный ток коллектора состоит из неосновных носителей дырки 9 и электрона 10 и возникает в результате обратного смещения коллекторного перехода.

Обратный ток зависит только от тепловыделения, поэтому его называют **тепловым током**. Чем меньше тепловой ток, тем качественнее транзистор.

Отношение коллекторного тока  $I_{\text{кр}}$  к эмиттерному току  $I_{\text{э}}$  называют **коэффициентом передачи тока  $\alpha$**

$$\alpha = \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{э}}}$$

**Токи в транзисторе**



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

$$I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}} + I_{\text{к0}}$$

- $I_{\text{к}}$  - сильный ток (между эмиттером и коллектором)
- $I_{\text{б}}$  - слабый (управляющий) ток (между базой и эмиттером)

Изменяя ток в цепи база – эмиттер, мы можем управлять выходным током коллектора.

Незначительное изменение тока базы, вызывает значительное изменение тока коллектора.

Коллекторный ток всегда больше тока базы в определенное количество раз. Отношение коллекторного тока к току базы называют **коэффициент усиления по току**  $h_{21\text{э}}$ .

$$h_{21\text{э}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}}$$

$$I_{\text{к}} = I_{\text{б}} \times h_{21\text{э}}$$

Коэффициенту усиления по току бывает от единиц до сотен в зависимости от транзистора.

## Режимы работы биполярного транзистора

1. Режим А (Amplification Mode - Режим усиления): Транзистор работает в режиме усиления сигнала. В этом режиме транзистор находится в активном состоянии на протяжении всего периода сигнала. Применяется в усилителях мощности, где необходимо усиление постоянного тока. Форма выходного напряжения будет практически полностью повторять форму входного.

- к.п.д. меньше 50%
- отсутствие искажений усиливаемого сигнала

2. Режим АВ является промежуточным между режимами А и В.

3. Режим В (Cutoff and Saturation Mode - Режим отсечки и насыщения):

Транзистор переходит в режим отсечки, когда сигнал отсутствует, и в режим насыщения при наличии сигнала. Используется в двухтактных усилителях мощности для экономии энергии в отсутствие сигнала.

- к.п.д. до 80%
- искажение синусоидального сигнала до полусинусоиды

4. Режим С (Class C Mode - Режим класса С): В этом режиме транзистор проводит ток только в течение части сигнального цикла. Часто применяется в автогенераторах и избирательных усилителях.

- к.п.д. до 100%
- наибольшее искажение сигнала

5. Режим D (Switching Mode - Режим коммутации): Транзистор переходит между состоянием открытия и закрытия для быстрой коммутации сигналов. Этот режим применяется в ключевых устройствах, таких как транзисторы MOSFET. Используют для усиления прямоугольных импульсов в цифровых схемах и компараторах.

## СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

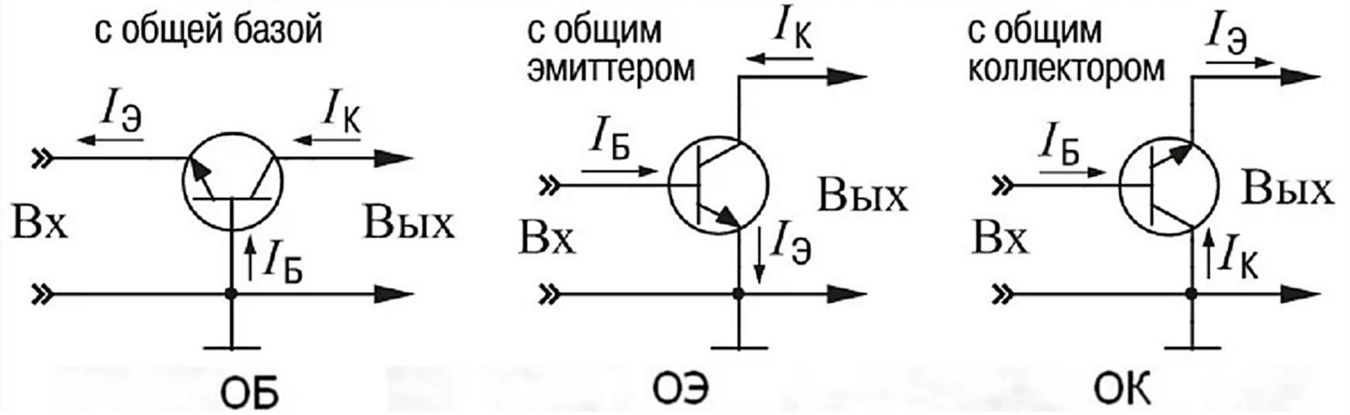


Схема включения

**с общей базой:**

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{к}}$$

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{э}}$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{эб}}$$

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{кб}}$$

Схема включения

**с общим эмиттером:**

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{к}}$$

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}}$$

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}$$

Схема включения

**с общим коллектором:**

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{э}}$$

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{бк}}$$

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{кэ}}$$

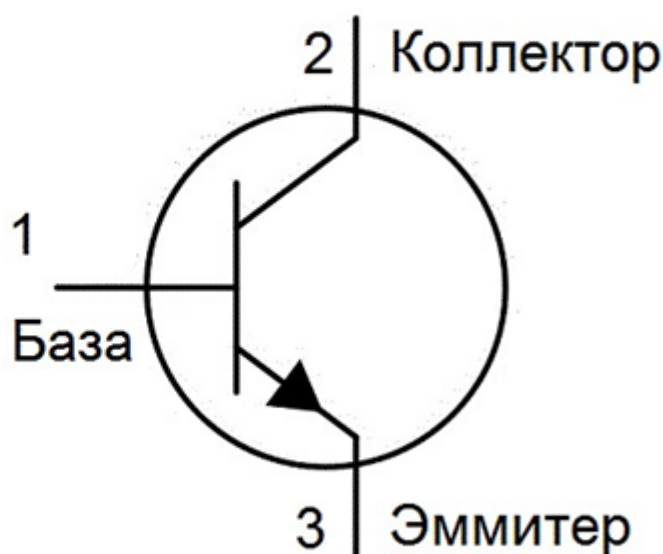
## Цоколевка (распиновка) транзисторов



TO-92













NPN



1 2 3

## Цоколевки биполярных транзисторов

 <p><b>п-р-п</b></p> <p>КТ342    КТ368 КТ399    КТ503 КТ645    КТ660 КТ680    КТ698 КТ3102    КТ3117</p> <p><b>р-н-р</b></p> <p>КТ203    КТ209 КТ313    КТ326 КТ363    КТ502 КТ681    КТ685 КТ686    КТ3107 КТ3126    КТ3128</p> <p><b>КБЗ</b></p>	 <p><b>п-р-п</b></p> <p>КТ601    КТ602 КТ604    КТ605 КТ611    КТ646 КТ683    КТ815 КТ817    КТ940 КТ961    КТ969 КТ972    КТ8131</p> <p><b>р-н-р</b></p> <p>КТ639    КТ644 КТ814    КТ816 КТ973    КТ8130 КТ9115</p> <p><b>ЭКБ</b></p>	 <p><b>п-р-п</b></p> <p>КТ829    КТ850 КТ854    КТ857 КТ858    КТ859 КТ863    КТ8108 КТ8109    КТ8110 КТ8116    КТ8118 КТ8120    КТ8121 КТ8123    КТ8124 КТ8136    КТ8138</p> <p><b>БКЗ</b></p> <p><b>р-н-р</b></p> <p>КТ851    КТ852 КТ853    КТ855</p>
 <p><b>КУ112А</b></p> <p>(Буква в кружочке обозначает год выпуска)</p> <p><b>КАУ</b></p>	 <p><b>р-н-р</b></p> <p>КТ626</p> <p><b>БКЗ</b></p>	 <p><b>п-р-п</b></p> <p>КТ716    КТ805 КТ819</p> <p><b>р-н-р</b></p> <p>КТ709    КТ712 КТ818    КТ835 КТ837</p> <p><b>ЭКБ</b></p>
 <p><b>п-р-п</b></p> <p>КТ325 КТ339</p> <p><b>р-н-р</b></p> <p>КТ3157</p> <p><b>КЗБ</b></p>	 <p><b>п-р-п</b></p> <p>КТ315 (Буква группы сбоку)</p> <p><b>р-н-р</b></p> <p>КТ361 (Буква группы посередине)</p> <p><b>ЭКБ</b></p>	 <p><b>КЦ407А</b></p>  <p><b>КЦ422</b></p>

# Транзисторная схемотехника

Транзистор управляется током – это аксиома!!!! Но, режим смещения транзистора устанавливается напряжением база-эмиттер, а не током – это реальность!!!

**Режим смещения транзистора** — это состояние, при котором биполярный транзистор находится в активном режиме работы, но без внешних сигналов, таких как входные сигналы или сигналы управления. Такое состояние называется статическим или постоянным смещением.

## Основные параметры включения транзистора

Параметры	с общей базой	с общим эмиттером	с общим коллектором
Коэффициенты передачи по току	0,6 — 0,95	Десятки — сотни	Больше, чем в схеме с ОБ
усиления по напряжению	Тысячи	Меньше, чем в схеме с ОБ	0,7 — 0,99
усиления по мощности	Менее чем на схеме с ОЭ	Большое (тысячи)	Меньше, чем в схеме с ОБ
Сопrotивление входное	Малое (единицы — десятки омов)	Большое (десятки — тысячи омов)	Большое (сотни килоомов)
Сопrotивление выходное	Большое (тысячи омов - единицы мегаомов)	Сотни омов, десятки килоомов	Единицы омов — десятки килоомов
Сдвиг фаз	0°	180°	0°

## Практическая работа №2

Расчет транзисторного каскада с общим эмиттером

## Дано:

- Марка транзистора = КТ503Е
- частота работы каскада  $f = 1000\text{Гц}$
- Структура транзистора = Кремний n-p-n
- Питающее напряжение  $U_{\text{и.п.}} = 10\text{В}$
- $P_{\text{max}} = 350(\text{мВт})$
- $I_{\text{max}} = 150(\text{мА})$
- $h_{21} = 100$  Сопротивление коллектора  $R_{\text{к}} = 10 \times R_{\text{э}}$  Напряжение база-эмиттер  $U_{\text{бэ}} = 0,66\text{В}$

## Решение:

1. Определим максимальную статическую мощность

$$P_{\text{рас.мах}} = 0.8 \times P_{\text{мах}} = 0.8 \times 350 \text{ мВт} = 280 \text{ мВт}$$

2. Определим ток коллектора в статическом режиме (без сигнала):

$$I_{\text{к0}} = \frac{\frac{280\text{мВт}}{10\text{В}}}{2} \approx 56 \text{ мА}$$

3. Учитывая, что на транзисторе в статическом режиме (без сигнала) падает половина напряжения питания, вторая половина напряжения питания будет падать на резисторах:

$$(R_{\text{к}} + R_{\text{э}}) = \frac{\left(\frac{U_{\text{и.п.}}}{2}\right)}{I_{\text{к0}}} = (10/2)/56\text{мА} = 5\text{В}/0,056\text{А} \approx 89\Omega$$

$$R_{\text{к}} = 80\Omega$$

$$R_{\text{э}} = 9\Omega$$

4. Найдем напряжение на коллекторе транзистора без сигнала

$$U_{\text{к0}} = (U_{\text{кэ0}} + I_{\text{к0}} \times R_{\text{э}}) = (U_{\text{и.п.}} - I_{\text{к0}} \times R_{\text{к}}) = 10\text{В} - 0,056\text{А} \cdot 80\Omega \approx 5.52\text{В}$$

5. Определим ток базы управления транзистором:

$$I_{\text{б}} = \frac{I_{\text{к}}}{h_{21}} = \frac{\left[\frac{U_{\text{и.п.}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{э}}}\right]}{h_{21}} = [10/89]/100 \approx 1.123\text{мА}$$

6. Полный базовый ток определяется напряжением смещения на базе, которое задается делителем напряжения R61, R62. Выбираем ток делителя в 10 раз большим тока управления базы:

$$R_{61}, R_{62} : I_{\text{дел.}} = 10 * I_6 \approx 11.23 \text{ мА}$$

Тогда полное сопротивление резисторов:

$$R_{61} + R_{62} = \frac{U_{\text{и.п.}}}{I_{\text{дел.}}} = 10 / 0.01123 \text{ А} \approx 890 \Omega$$

7. Найдём напряжение на эмиттере в режиме покоя:

$$U_3 = I_{\text{к0}} * R_3 = 0,056 \text{ А} * 9 \Omega \approx 0,504 \text{ В}$$

8. Определяем напряжение на базе:

$$U_6 = U_3 + U_{63} = 0,504 \text{ В} + 0,66 \text{ В} = 1,164 \text{ В}$$

Отсюда, через формулу делителя напряжения находим:

$$R_{62} = (R_{61} + R_{62}) * \frac{U_6}{U_{\text{и.п.}}} = 890 \Omega * 1,164 \text{ В} / 10 \text{ В} \approx 103.596 \Omega$$

$$R_{61} = (R_{61} + R_{62}) - R_{62} = 890 \Omega - 103,596 \Omega \approx 789.404 \Omega$$

В соответствии с резисторным рядом округляем до ближайшего значения показания резисторов:

- $R_{62} = 100 \Omega$
- $R_{61} = 750 \Omega$

9. Разделительные конденсаторы:

$$X_{cp} = 0.1 * R_{62} = 10 \Omega$$

$$X_{cp} = \frac{1}{2\pi f C_p} = 10 \Omega$$

$$X = \frac{1}{\frac{10}{6280}} \approx 15 \mu$$

Ближайшие значения электролитических конденсаторов:

C1 = 22 мкФ 10В C2 = 22 мкФ 10В - при условии, что последующий каскад идентичен

№ вар	Марка транзистора	структура	Питающее напряжение $U_{\text{и.п}}$	$P_{\text{max}}$ (мВт)	$I_{\text{max}}$ (мА)	$h_{21}$
1	КТ503Е	Кремний n-p-n	10	350	150	100

### Таблица ответов:

 $|P_{pac.max}$ 
$$(\text{MBT})|I_{\text{k}0}$$
$$(\text{MA})|U_{\text{k}0}$$
$$(B)|U_{\mathfrak{z}}$$
$$(B)|U_6$$
 $(B)|R_1$  $(\kappa\mathcal{O}_M)|_{R_2}$  $(\kappa\mathcal{O}_M)|_{R_3}$  $(\kappa\mathcal{O}_M)|_{R_4}$  $(\kappa \mathcal{O}_M)|C_1$  $(\text{MK}\Phi)|C_2$ 

Diagram of a 1D chain with 6 sites. The leftmost site is labeled  $(M\Phi)$  and contains a red dot. The other five sites are empty. The sites are connected by horizontal dashed lines.

-----|-----|-----|-----|-----|-----| | 280 | 56 | 5,52 | 0,504 | 1,164

| 0,750 | 0,100 | 0,009 | 0,08 | 15 | 15 |