

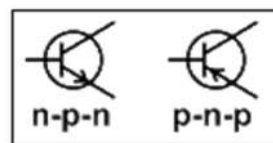
Расчёт транзисторного каскада на биполярном транзисторе

ТРАНЗИСТОР - полупроводниковый прибор для усиления, генерирования и преобразования электрических колебаний, выполненный на основе монокристаллического полупроводника (**Si** – кремния, или **Ge** - германия), содержащего не менее трёх областей с различной — электронной (**n**) и дырочной (**p**) — проводимостью. Изобретён в 1948 американцами У. Шокли, У. Браттейном и Дж. Бардином. По физической структуре и механизму управления током различают транзисторы биполярные (чаще называют просто транзисторами) и униполярные (чаще называют полевыми транзисторами). В первых, содержащих два, или более электронно-дырочных перехода, носителями заряда служат как электроны, так и дырки, во вторых — либо электроны, либо дырки. Термин «транзистор» нередко используют для обозначения портативных радиовещательных приёмников на полупроводниковых приборах.

Управление током в выходной цепи осуществляется за счёт изменения входного напряжения или тока. Небольшое изменение входных величин может приводить к существенно большему изменению выходного напряжения и тока. Это усилительное свойство транзисторов используется в аналоговой технике (аналоговые ТВ, радио, связь и т. п.).

Биполярный транзистор

Биполярный транзистор может быть **n-p-n** и **p-n-p** проводимости. Не заглядывая во внутренности транзистора, можно отметить разницу проводимостей лишь в полярности подключения в практических схемах источников питания, конденсаторов, диодов, которые входят в состав этих схем. На рисунке справа графически изображены **n-p-n** и **p-n-p** транзисторы. У транзистора три вывода. Если рассматривать транзистор как четырёхполюсник, то у него должно быть два входных и два выходных вывода. Следовательно, какой то из выводов должен быть общим, как для входной, так и для выходной цепи.



Различают схемы включения транзистора:

Схема включения транзистора с общим эмиттером – предназначена для усиления амплитуды входного сигнала по напряжению и по току. При этом входной сигнал, усиливаясь транзистором, инвертируется. Другими словами фаза выходного сигнала поворачивается на 180 градусов. Эта схема, является основной, для усиления сигналов разной амплитуды и формы. Входное сопротивление транзисторного каскада с ОЭ бывает от сотен Ом до единиц килоом, а выходное - от единиц до десятков килоом.

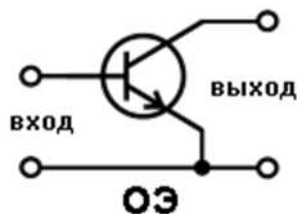
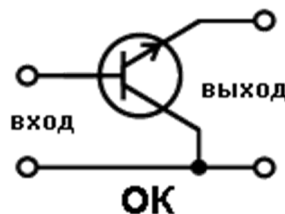
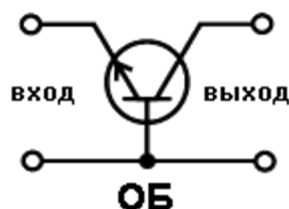


Схема включения транзистора с общим коллектором – предназначена для усиления амплитуды входного сигнала по току. Усиления по напряжению в такой схеме не происходит. Правильнее сказать, коэффициент усиления по напряжению даже меньше единицы. Входной сигнал транзистором не инвертируется.



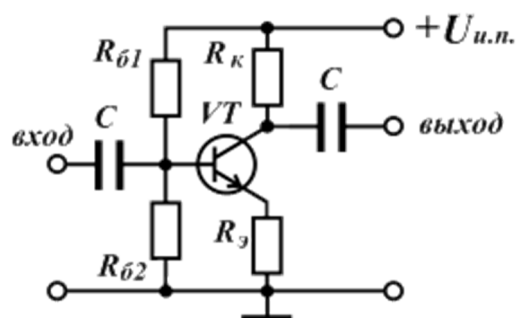
Входное сопротивление транзисторного каскада с ОК бывает от десятков до сотен килоом, а выходное в пределах сотни ом - единиц килоом. Благодаря тому, что в цепи эмиттера находится, как правило, нагрузочный резистор, схема обладает большим входным сопротивлением. Кроме того, благодаря усилению входного тока, она обладает высокой нагрузочной способностью. Эти свойства схемы с общим коллектором используются для согласования транзисторных каскадов - как "буферный каскад". Так как, входной сигнал, не усиливаясь по амплитуде "повторяется" на выходе, схему включения транзистора с общим коллектором ещё называют **Эмиттерный повторитель**.



Имеется ещё **Схема включения транзистора с общей базой**. Эта схема включения в теории есть, но в практике она реализуется очень тяжело. Такая схема включения используется в высокочастотной технике. Особенность её в том, что у неё низкое входное сопротивление, и согласовать такой каскад по входу сложно. Схема включения транзистора с общей базой - тема для теоретиков и экспериментаторов. На практике она встречается крайне редко. Объясняется это свойствами этой схемы включения: входное сопротивление - от единиц до десятков Ом, а выходное сопротивление - от сотен килоом до единиц мегаом. Такие специфические параметры - редкая потребность.

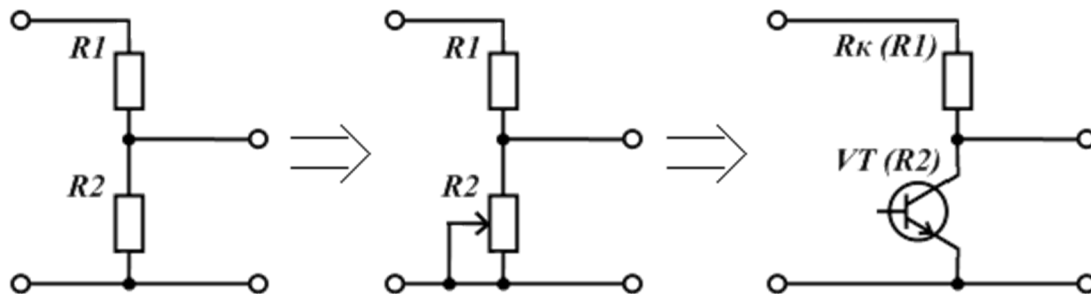
Биполярный транзистор может работать в ключевом и линейном (усилительном) режимах. Ключевой режим используется в различных схемах управления, логических схемах и др. В ключевом режиме, транзистор может находиться в двух рабочих состояниях - открытом (насыщенном) и закрытом (запертом) состоянии. Линейный (усилительный) режим используется в схемах усиления гармонических сигналов и требует поддержания транзистора в «наполовину» открытом, но не насыщенном состоянии.

Для изучения работы транзистора, мы рассмотрим схему включения транзистора с общим эмиттером, как наиболее важную схему включения. Схема изображена на рисунке. На схеме **VT** - собственно транзистор. Резисторы **R_{б1}** и **R_{б2}** - цепочка смещения транзистора, представляющая собой обыкновенный делитель напряжения. Именно эта цепь обеспечивает смещение транзистора в «рабочую точку» в режиме усиления гармонического сигнала без искажений. Резистор **R_к** - нагрузочный резистор транзисторного каскада, предназначен для подвода к коллектору транзистора электрического тока источника питания и его ограничения в режиме "открытого" транзистора. Резистор **R_э** - резистор обратной связи, по своей сути увеличивает входное сопротивление каскада, при этом, уменьшает усиление входного сигнала. Конденсаторы **C** выполняют функцию гальванической развязки от влияния внешних цепей.



Чтобы было понятнее, как работает биполярный транзистор, мы проведём аналогию с обычным делителем напряжения (см. рис. ниже). Для начала, резистор **R₂** делителя напряжения сделаем управляемым (переменным). Изменяя сопротивление этого резистора, от нуля до "бесконечно" большого значения, мы можем получить на выходе такого делителя напряжение от нуля до значения, подаваемого на его вход. А теперь, представим себе, что резистор **R₁** делителя

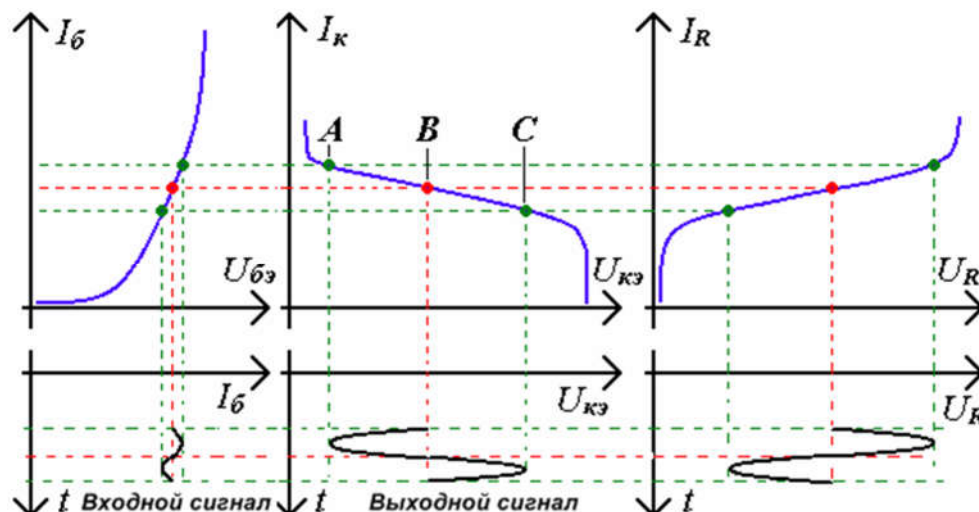
напряжения – это коллекторный резистор транзисторного каскада, а резистор R_2 делителя напряжения – это переход транзистора коллектор-эмиттер. При этом, подавая на базу транзистора управляющее воздействие в виде электрического тока, мы изменяем сопротивление перехода коллектор-эмиттер, тем самым меняем параметры делителя напряжения. Отличие от переменного резистора в том, что транзистор управляется слабым током. Именно так и работает биполярный транзистор. Вышеуказанное изображено на рисунке ниже:



Для работы транзистора в режиме усиления сигнала, без искажения последнего, необходимо обеспечить этот самый рабочий режим. Говорят о смещении базы транзистора. Грамотные специалисты тешат себя правилом: Транзистор управляется током – это аксиома. Но режим смещения транзистора устанавливается напряжением база-эмиттер, а не током – это реальность. И у того, кто не учитывает напряжение смещения, никакой усилитель работать не будет. Поэтому в расчётах его значение должно учитываться.

Итак, работа биполярного транзисторного каскада в режиме усиления происходит при определённом напряжении смещения на переходе база-эмиттер. Для кремниевого транзистора значение напряжения смещения лежит в пределах 0,6...0,7 вольт, для германиевого – 0,2...0,3 вольта. Зная об этом понятии, можно не только рассчитывать транзисторные каскады, но и проверять исправность любого транзисторного усилительного каскада. Достаточно мультиметром с высоким внутренним сопротивлением измерить напряжение смещения база-эмиттер транзистора. Если оно не соответствует 0,6...0,7 вольт для кремния, или 0,2...0,3 вольта для германия, тогда ищите неисправность именно здесь – либо неисправен транзистор, либо неисправны цепи смещения или развязки этого транзисторного каскада.

Вышеуказанное, изображено на графике – вольтамперной характеристике (ВАХ).



Иногда говорят, что выходная характеристика транзистора представлена на правом графике! Поясним, там всё правильно, а началось это с электронно-вакуумных ламп. Раньше вольтамперной характеристикой лампы считалось падение напряжения на анодном резисторе. Сейчас, продолжают измерять на коллекторном резисторе, а на графике приписывают буквы, обозначающие падение напряжения на транзисторе, в чём глубоко ошибаются. На левом графике $I_b - U_{бэ}$ представлена входная характеристика транзистора. На центральном графике $I_k - U_{кэ}$ представлена выходная вольтамперная характеристика транзистора. А на правом графике $I_R - U_R$ представлен вольтамперный график нагрузочного резистора R_k , который обычно выдают за вольтамперную характеристику самого транзистора.

На графике имеет место линейный участок, используемый для линейного усиления входного сигнала, ограниченный точками **A** и **C**. Средняя точка – **B**, является именно той точкой, в которой необходимо содержать транзистор, работающий в усилительном режиме. Этой точке соответствует определённое напряжение смещения, которое при расчётах обычно берут: 0,66 вольт для транзистора из кремния, или 0,26 вольт для транзистора из германия.

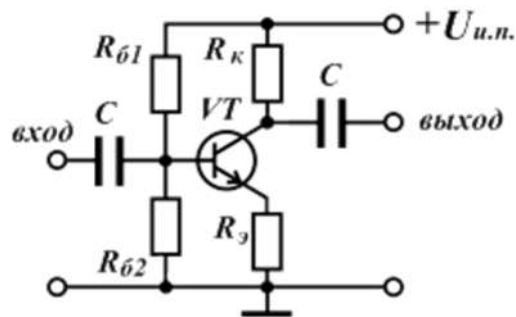
По вольтамперной характеристике транзистора мы видим следующее: при отсутствии, или малом напряжении смещения на переходе база-эмиттер транзистора, ток базы и ток коллектора отсутствуют. В этот момент на переходе коллектор-эмиттер падает всё напряжение источника питания. При дальнейшем повышении напряжения смещения база-эмиттер транзистора, транзистор начинает открываться, появляется ток базы и вместе с ним растёт ток коллектора. При достижении "рабочей области" в точке **C**, транзистор входит в линейный режим, который продолжается до точки **A**. При этом, падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер уменьшается, а на нагрузочном резисторе R_k , наоборот увеличивается. Точка **B** – рабочая точка смещения транзистора, - это такая точка, при которой на переходе коллектор - эмиттер транзистора, как правило, устанавливается падение напряжения равное ровно половине напряжения источника питания. Отрезок АЧХ от точки **C**, до точки **A** называют рабочей областью смещения. После точки **A**, ток базы и следовательно ток коллектора резко возрастают, транзистор полностью открывается - входит в насыщение. В этот момент, на переходе коллектор-эмиттер падает напряжение обусловленное структурой **n-p-n** переходов, которое приблизительно равно 0,2...1 вольт, в зависимости от типа транзистора. Всё остальное напряжение источника питания падает на сопротивлении нагрузки транзистора – резисторе R_k , который кроме того, ограничивает дальнейший рост тока коллектора.

По нижним "дополнительным" рисункам, мы видим, как изменяется напряжение на выходе транзистора в зависимости от подаваемого на вход сигнала. Выходное напряжение (падение напряжения на коллекторе) транзистора противофазно (на 180 градусов) к входному сигналу.

Расчёт транзисторного каскада с общим эмиттером (ОЭ)

Прежде чем перейти непосредственно к расчёту транзисторного каскада, обратим внимание на следующие требования и условия:

- Расчёт транзисторного каскада проводят, как правило, с конца (т.е. с выхода);
- Для расчёта транзисторного каскада нужно определить падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер транзистора в режиме покоя (когда отсутствует входной сигнал). Оно



выбирается таким, чтобы получить максимально неискаженный сигнал. В однотактной схеме транзисторного каскада работающего в режиме "А" это, как правило, половина значения напряжения источника питания;

- В эмиттерной цепи транзистора бежит два тока - ток коллектора (по пути коллектор-эмиттер) и ток базы (по пути база-эмиттер), но так как ток базы достаточно мал, им можно пренебречь и принять, что ток коллектора равен току эмиттера;

• Транзистор – усилительный элемент, поэтому справедливо будет заметить, что способность его усиливать сигналы должна выражаться какой-то величиной. Величина усиления выражается показателем, взятым из теории четырёхполюсников - коэффициент усиления тока базы в схеме включения с общим эмиттером (ОЭ) и обозначается он - h_{21} . Его значение приводится в справочниках для конкретных типов транзисторов, причём, обычно в справочниках приводится вилка (например: 50 – 200). Для расчётов обычно выбирают минимальное значение (из примера выбираем значение - 50);

- Коллекторное (R_k) и эмиттерное ($R_э$) сопротивления влияют на входное и выходное сопротивления транзисторного каскада. Можно считать, что входное сопротивление каскада $R_{вх} = R_э * h_{21}$, а выходное равно $R_{вых} = R_k$. Если Вам не важно входное сопротивление транзисторного каскада, то можно обойтись вовсе без резистора $R_э$;

- Номиналы резисторов R_k и $R_э$ ограничивают токи, протекающие через транзистор и рассеиваемую на транзисторе мощность.

Порядок и пример расчёта транзисторного каскада с ОЭ

Исходные данные:

Питающее напряжение $U_{и.п.} = 12$ В (указано на схеме или в задании)

Выбираем транзистор (указано на схеме или в задании), например:

Транзистор КТ315Г, для него:

$P_{max} = 150$ мВт; $I_{max} = 150$ мА; $h_{21} > 50$.

Принимаем $R_k = 10 * R_э$

Напряжение б-э рабочей точки транзистора принимаем $U_{бэ} = 0,66$ В или указанное в справочнике

Решение:

1. Определим максимальную статическую мощность, которая будет рассеиваться на транзисторе в моменты прохождения переменного сигнала, через

рабочую точку **B** статического режима транзистора. Она должна составлять значение, на 20 процентов меньше (коэффициент 0,8) максимальной мощности транзистора, указанной в справочнике.

Принимаем $P_{\text{рас.мах}} = 0,8 * P_{\text{мах}} = 0,8 * 150 \text{ мВт} = 120 \text{ мВт}$

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

$$I_{k0} = P_{\text{рас.мах}} / U_{kэ0} = P_{\text{рас.мах}} / (U_{\text{и.п.}} / 2) = 120 \text{ мВт} / (12 \text{ В} / 2) = 20 \text{ мА}.$$

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

$$(R_k + R_э) = (U_{\text{и.п.}} / 2) / I_{k0} = (12 \text{ В} / 2) / 20 \text{ мА} = 6 \text{ В} / 20 \text{ мА} = 300 \text{ Ом}.$$

Учитывая существующий ряд номиналов резисторов, а также то, что нами выбрано соотношение $R_k = 10 * R_э$, находим значения резисторов :

$$R_k = 270 \text{ Ом}; R_э = 27 \text{ Ом}.$$

4. Найдем напряжение на коллекторе транзистора без сигнала.

$$U_{k0} = (U_{kэ0} + I_{k0} * R_э) = (U_{\text{и.п.}} - I_{k0} * R_k) = (12 \text{ В} - 0,02 \text{ А} * 270 \text{ Ом}) = 6,6 \text{ В}.$$

5. Определим ток базы управления транзистором:

$$I_б = I_k / h_{21} = [U_{\text{и.п.}} / (R_k + R_э)] / h_{21} = [12 \text{ В} / (270 \text{ Ом} + 27 \text{ Ом})] / 50 = 0,8 \text{ мА}.$$

6. Полный базовый ток определяется напряжением смещения на базе, которое задается делителем напряжения R_{61}, R_{62} . Ток резистивного базового делителя должен быть на много больше (в 5-10 раз) тока управления базы $I_б$, чтобы последний не влиял на напряжение смещения. Выбираем ток делителя в 10 раз большим тока управления базы:

$$R_{61}, R_{62}: I_{\text{дел.}} = 10 * I_б = 10 * 0,8 \text{ мА} = 8,0 \text{ мА}.$$

Тогда полное сопротивление резисторов

$$R_{61} + R_{62} = U_{\text{и.п.}} / I_{\text{дел.}} = 12 \text{ В} / 0,008 \text{ А} = 1500 \text{ Ом}.$$

7. Найдём напряжение на эмиттере в режиме покоя (отсутствия сигнала). При расчете транзисторного каскада необходимо учитывать: напряжение база-эмиттер рабочего транзистора (кремниевого) не может превысить 0,7 вольт! Напряжение на эмиттере в режиме без входного сигнала примерно равно:

$$U_э = I_{k0} * R_э = 0,02 \text{ А} * 27 \text{ Ом} = 0,54 \text{ В},$$

где I_{k0} - ток покоя транзистора.

8. Определяем напряжение на базе

$$U_6 = U_3 + U_{63} = 0,54 \text{ В} + 0,66 \text{ В} = 1,2 \text{ В}$$

Отсюда, через формулу делителя напряжения находим:

$$R_{62} = (R_{61} + R_{62}) * U_6 / U_{и.п.} = 1500 \text{ Ом} * 1,2 \text{ В} / 12 \text{ В} = 150 \text{ Ом}$$

$$R_{61} = (R_{61} + R_{62}) - R_{62} = 1500 \text{ Ом} - 150 \text{ Ом} = 1350 \text{ Ом} = 1,35 \text{ кОм}.$$

По резисторному ряду, в связи с тем, что через резистор **R₆₁** течёт ещё и ток базы, выбираем резистор в сторону уменьшения: **R₆₁**=1,3 кОм.

9. Разделительные конденсаторы выбирают исходя из требуемой амплитудно-частотной характеристики (полосы пропускания) каскада. Для нормальной работы транзисторных каскадов на частотах до 1000 Гц необходимо выбирать конденсаторы номиналом не менее 5 мкФ.

На нижних частотах амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) каскада зависит от времени перезаряда разделительных конденсаторов через другие элементы каскада, в том числе и элементы соседних каскадов. Ёмкость должна быть такой, чтобы конденсаторы не успевали перезаряжаться. Входное сопротивление транзисторного каскада много больше выходного сопротивления. АЧХ каскада в области нижних частот определяется постоянной времени **t_н**=**R_{вх}*****C_{вх}**, где **R_{вх}**=**R_э*****h₂₁**, **C_{вх}** - разделительная входная емкость каскада. **C_{вых}** транзисторного каскада, это **C_{вх}** следующего каскада и рассчитывается она так же. Нижняя частота среза каскада (граничная частота среза АЧХ) **f_н**=**1/t_н**. Для качественного усиления, при конструировании транзисторного каскада необходимо выбирать, чтобы соотношение **1/t_н**=**1/(R_{вх}*C_{вх})**<<**f_н** в 30-100 раз для всех каскадов. При этом чем больше каскадов, тем больше должна быть разница. Каждый каскад со своим конденсатором добавляет свой спад АЧХ. Обычно, достаточно разделительной емкости 5,0 мкФ. Но последний каскад, через **C_{вых}** обычно нагружен низкоомным сопротивлением динамических головок, поэтому емкость увеличивают до 500,0-2000,0 мкФ, бывает и больше.

Спад АЧХ в области верхних частот определяется постоянной времени перезаряда **t_в**=**R_{вых}*****C_к**=**R_к****C_к**, где **C_к** - паразитная емкость коллекторного перехода (указывается в справочниках). Для звуковых частот, емкость коллекторного перехода незначительна, поэтому паразитной ёмкостью можно пренебречь.

Расчёт ключевого режима транзисторного каскада

Расчёт ключевого режима транзисторного каскада производится абсолютно так же, как и ранее проведённый расчёт усилительного каскада. Отличие заключается только в том, что ключевой режим предполагает два состояния транзистора в режиме покоя (без сигнала). Он, или закрыт (но не закорочен), или открыт (но не перенасыщен). При этом, рабочие точки "покоя", находятся за пределами точек А и С изображённых на ВАХ. Когда на схеме в состоянии без сигнала транзистор должен быть закрыт, необходимо из ранее изображённой схемы каскада удалить резистор **R₆₁**. Если же требуется, чтобы транзистор в состоянии покоя был открыт, необходимо в схеме каскада увеличить резистор **R₆₂** в 10 раз от расчётного значения, а в отдельных случаях, его можно удалить из схемы.

Расчёт транзисторного каскада окончен.

Требования к отчету

Отчет сдается на отдельных листах бумаги.

В отчете:

1. Задание (транзистор, напряжение питания схемы, ряд номиналов резисторов).
2. Параметры транзистора из справочника.
3. Схема транзисторного каскада. На схеме должны быть указаны номиналы и мощности резисторов условными знаками (см. п. 5 ниже).
4. Последовательный расчёт транзисторного каскада. Номинальные сопротивления резисторов выбираются по ряду E12 или E24 в соответствии с заданием.
5. Расчет мощности резисторов.