

## ТРЕХСЛОЙНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСИЛИТЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ (ТРАНЗИСТОРЫ)

Усилительные элементы в электронике занимают особое место потому, что они позволяют восстанавливать энергию сигнала, которая неизбежно уменьшается при сложных процедурах обработки сигналов. Под процедурами обработки подразумеваются процессы, связанные с получением сигналов, их передачей по линиям связи и приёмом. Примерами усилительных элементов являются радиолампы и транзисторы. Сейчас радиолампы применяются редко, в основном в устройствах, использующих высокие напряжения, например, выходные каскады мощных радиопередатчиков, работающих при напряжениях в сотни и тысячи вольт.

Существуют и другие усилительные устройства: электромашинные усилители, магнитные усилители, усилители на приборах с отрицательным сопротивлением, но они по целому ряду параметров абсолютно не могут составить конкуренцию ни радиолампам, ни, тем более, транзисторам. К параметрам, выделяющим транзисторные устройства из остальных, относятся геометрические размеры и вес, экономичность, быстродействие.

Указанные параметры определяют широчайшее внедрение твердотельной электроники, основой которой являются транзисторы, буквально во все сферы человеческой деятельности.

**Принцип усиления транзистора.** Транзистор представляет собой полупроводниковую структуру, в которой имеются три чередующихся по типу проводимости области. Это либо транзистор p-n-p типа, либо

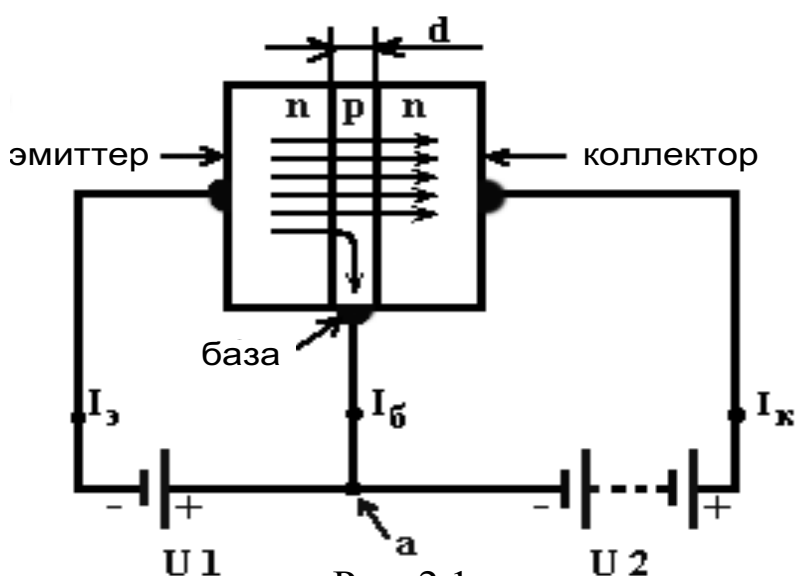


Рис. 2.1

транзистор n-p-n типа. Буквой «р» обозначаются области с дырочной проводимостью, буквой «n» области с электронной проводимостью.

Физические процессы, протекающие в этих двух структурах, аналогичны. Структура транзистора типа n-p-n с подключенными к ней

источниками тока представлена на рис. 2.1.

В реальном транзисторе каждая область имеет свое название – эмиттер, база и коллектор – так, как показано на рисунке.

Эти три области образуют два р-п перехода: переход эмиттер – база и переход коллектор – база. Так как база участвует в обоих переходах, назовем для краткости эти переходы соответственно эмиттерным и коллекторным.

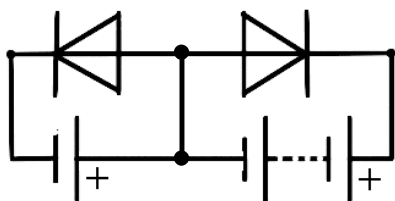


Рис. 2.2

Источники питания (эмиттерный  $U_1$  и коллекторный  $U_2$ ) подключены к транзисторной структуре таким образом, что эмиттерный переход оказывается открытым, а коллекторный переход закрытым. Формально это соответствует двум диодам, включенным так, как показано на рис. 2.2.

Очевидно, что структура на рис. 2.2 не может усиливать сигналы, а транзисторная структура на рис. 2.1 является, как ниже будет показано, усилителем. Усилительные свойства в транзисторе возникают вследствие того, что р-п переходы в ней взаимодействуют. Взаимодействие возникает потому, что толщина базы делается много меньше, чем длина свободного пробега носителя заряда в полупроводниковом материале базы, т. е.

$$d \ll \lambda, \quad (1)$$

где  $d$  – толщина базы,  $\lambda$  – длина свободного пробега носителя.

В нашем случае под длиной свободного пробега носителя понимается среднестатистическое расстояние, которое проходит носитель от момента вхождения в базу до того момента, когда он столкнется с носителем противоположного знака. Такой процесс называется рекомбинацией.

Выполнение условия (1) означает, что большая часть носителей, которые поступают в область базы через открытый эмиттерный переход, будет проходить базу насквозь, попадать под действие коллекторного источника тока и образовывать коллекторный ток.

Отметим, что эмиттерный переход делается несимметричным – концентрация электронов в эмиттере значительно больше концентрации дырок в базе и ток основных носителей через открытый переход является практически током электронов из эмиттера в базу. Малая часть поступивших носителей в области базы будет рекомбинировать с основными носителями в этой области, каждый акт рекомбинации дает импульс тока в базовом проводе, образуя, таким образом, базовый ток. Эта малая часть в современных транзисторах составляет доли процента от числа носителей, поступивших в область базы через эмиттерный переход в виде эмиттерного тока (это показано стрелками на рис. 1).

Достигается это за счет уменьшения толщины базы (до долей микрона), малой концентрации примесей в области базы для снижения вероятности рекомбинации и чистоты исходного кристалла. Но даже при очень малом базовом токе разорвать базовый провод нельзя, так как исчезнет открывающий потенциал на эмиттерном переходе, прекратится инжекция носителей в базу, и прекратится коллекторный ток.

Таким образом, манипуляция малым базовым током управляет гораздо большим коллекторным током, в чем уже проявляется возможность усиления, и уравнение (1) можно назвать основным уравнением транзистора, определяющим его усилительные свойства.

Любой усилитель должен прежде всего усиливать мощность сигнала. Потом эта мощность техническими приемами может быть представлена как усиленное напряжение или усиленный ток, но если нет усиления по мощности, то нет усилителя. То есть обязательное условие усиления

$$K = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} > 1,$$

где  $K$  – коэффициент усиления,  $P_{\text{вых}}$  – мощность на выходе усилителя,  $P_{\text{вх}}$  – мощность на входе усилителя.

Рассмотрим распределение мощностей в структуре на рис. 1. Входной мощностью будем считать мощность в цепи эмиттер – база, она обеспечивается источником  $U_1$ , выходной мощностью будем считать мощность в цепи коллектор – база, обеспечиваемую источником  $U_2$ . Эти мощности выделяются на эмиттерном и коллекторном переходах в виде тепла. Других мест для выделения мощности в данной схеме не существует, если не считать внутренние сопротивления источников тока, которые в данной задаче можно не рассматривать. Выразим входную и выходную мощности через токи и сопротивления соответствующих p-n переходов:

$$P_{\text{вых}} = I_K^2 R_{\text{кб}}; \quad P_{\text{вх}} = I_{\text{э}}^2 R_{\text{эб}}.$$

Тогда коэффициент усиления

$$K = \frac{I_K^2 R_{\text{кб}}}{I_{\text{э}}^2 R_{\text{эб}}}.$$

Для токов в точке «а» на рис. 1 запишем из закона Кирхгофа:

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

Из условия (1) имеем:

$$I_{\text{б}} \ll I_K; \quad I_{\text{э}} \approx I_K. \quad (2)$$

Сокращая токи и учитывая, что сопротивление закрытого коллекторного перехода много больше сопротивления открытого эмиттерного перехода, получим:

$$K = R_{кб}/R_{эб} \gg 1.$$

Теперь понятно, почему схема на рис. 2.2 не является усилителем, – там р-п переходы работают независимо друг от друга, в каждом из них протекают свойственные им физические процессы, среди которых принципа усиления не содержится.

Вернемся к структуре, изображенной на рис. 2.1. Усиленная мощность, выделяющаяся в виде тепла на р-п переходе, еще не является решением задачи по созданию усилителя. Необходимо эту мощность или хотя бы часть ее вывести наружу. Делается это простым приемом – в цепь коллектора включается резистор так, как показано на рис. 2.3.

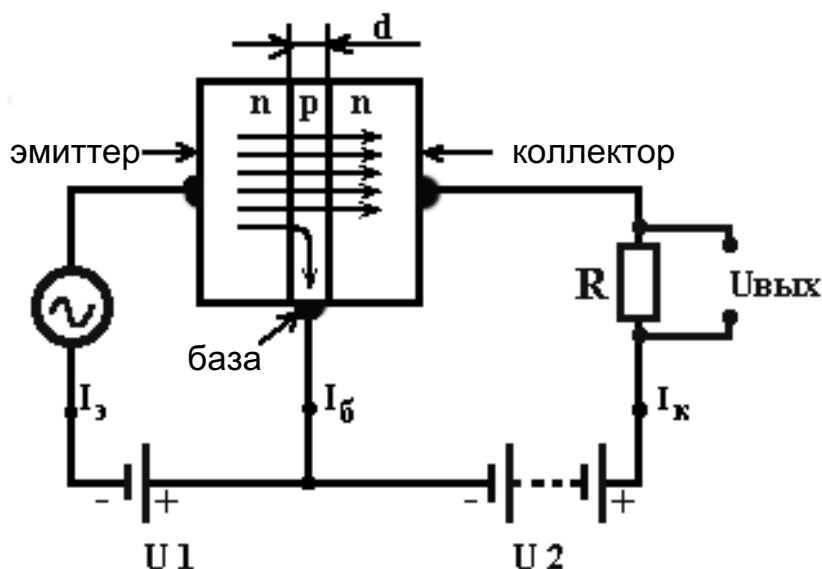


Рис. 2.3

Этот резистор может быть достаточно большим, так как включается в цепь, в которой уже есть большое сопротивление закрытого коллекторного перехода. Падение напряжения на этом резисторе и есть полезный выходной сигнал  $U_{\text{вых}}$ , с которым можно дальше работать. Очень часто нужно усиливать переменный сигнал, тогда источник переменного сигнала можно включить в разрыв эмиттерного провода, но при этом нужно следить за тем, чтобы суммарное напряжение между эмиттером и базой не меняло знака, иначе нарушится работа транзистора. Еще чаще на практике используют включение источника сигнала в базовую цепь. Поскольку ток базы может быть очень малым, то слабый источник сигнала влияет на разность потенциалов база – эмиттер, управляя инжекцией носителей и большим током

коллектора. Выходное напряжение при этом может быть в десятки раз больше напряжения источника сигнала.

На электрических схемах транзисторы изображаются так, как показано на рис. 2.4. Стрелка эмиттера рисуется по направлению сквозного тока через структуру.

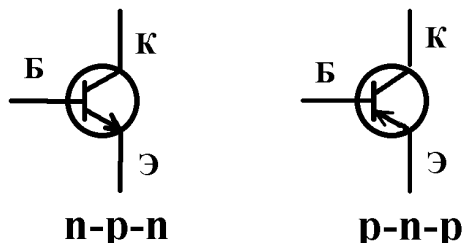


Рис. 2.4

В настоящее время гораздо чаще используются транзисторы со структурой n-p-n, но выпускается и довольно широкий ассортимент p-n-p транзисторов. Одновременное использование в приборах двух типов транзисторных структур позволяет в ряде случаев уменьшить количество элементов в схеме, повысить качество и надежность приборов. Одна из причин того, что предпочтение отдается n-p-n структурам, заключается в большей подвижности электронов по сравнению с подвижностью дырок.

Основным полупроводниковым материалом для изготовления транзисторов на сегодняшний день является кремний.

**Схемы включения транзистора.** Транзистор имеет три вывода и в практических схемах может использоваться в трех различных включениях. Эти три схемы носят названия: схема с общей базой, схема с общим эмиттером и схема с общим коллектором. Общим электродом называется тот электрод, который является общим для входного сигнала, выходного сигнала и источника питания. Физические процессы внутри транзистора не зависят от схемы включения. Эти три схемы показаны на рис. 2.5.

На этих схемах входное напряжение, даже если оно содержит переменную составляющую, всегда в сумме должно сохранять тот знак, который необходим для нормальной работы транзистора, то есть эмиттерный переход должен быть открыт, а коллекторный переход должен быть закрыт.

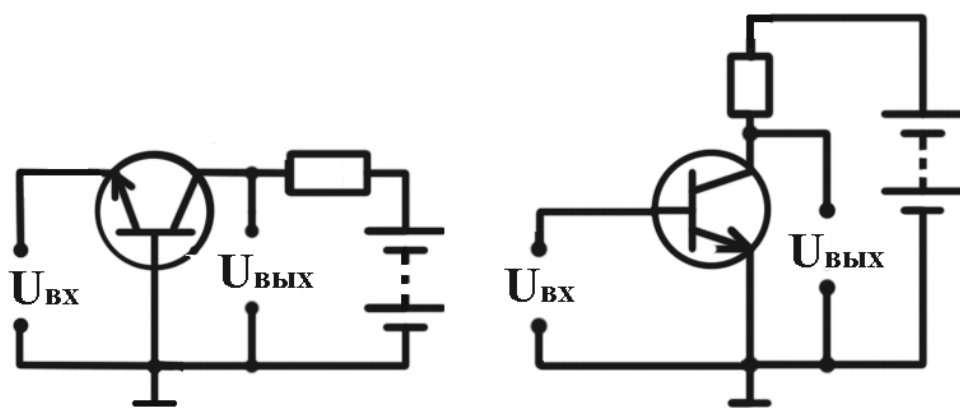


Схема с общей базой

Схема с общим эмиттером

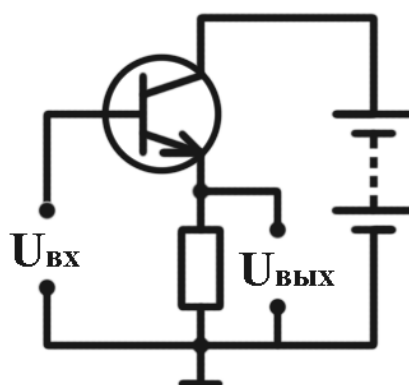


Схема с общим коллектором

Рис. 2.5

Основные требования, которые предъявляются к почти любому усилителю, можно сформулировать следующим образом:

1. Возможно больший коэффициент усиления.
2. Возможно большее входное сопротивление.
3. Возможно меньшее выходное сопротивление.
4. Возможно большая рабочая частота.

По степени соответствия этим требованиям приведенные на рис. 2.5 схемы по частоте практического применения располагаются в следующем порядке: на первом месте стоит схема включения транзистора с общим эмиттером, на втором месте – схема с общим коллектором, на третьем месте – схема с общей базой.

Поскольку пути постоянного и переменного электрических токов могут быть различны, то один и тот же транзистор может быть по постоянному току включен, например, по схеме с общим эмиттером, а по переменному току по схеме с общей базой. Такой прием употребляется в схемах LC-генераторов высокой частоты.

**Описание экспериментального макета.** В данной работе изучается усилительный каскад на транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером. Схема макета приведена на рис. 2.6.

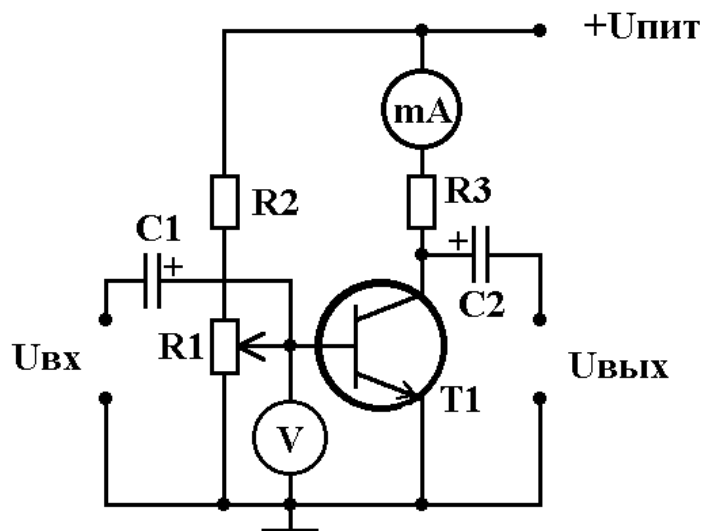


Рис. 2.6

Резисторы  $R1$  и  $R2$  предназначены для начальной установки постоянного напряжения на базе. С этим напряжением будет складываться переменное напряжение сигнала  $U_{вх}$ . Постоянное напряжение можно регулировать с помощью переменного резистора  $R1$  и измерять встроенным в макет вольтметром. В реальных усилителях этот резистор всегда ставится постоянным, но в нашем случае переменный резистор нужен для того, чтобы иметь возможность снять передаточную характеристику усилительного каскада. Передаточной (или проходной) характеристикой называется зависимость выходного параметра (в нашем случае это ток коллектора, измеряется встроенным в макет миллиамперметром) от входного параметра (в нашем случае это напряжение эмиттер – база). Входной переменный сигнал подается на базу через конденсатор  $C1$ , выходной же усиленный сигнал снимается с коллектора транзистора также через конденсатор  $C2$ . Если усилитель предназначен для усиления звуковых частот, то конденсаторы  $C1$  и  $C2$  должны иметь большую емкость, т.е. на практике это электролитические конденсаторы, у которых необходимо соблюдать полярность.

Наличие источника питания само собой разумеется, поэтому на схемах он часто не изображается, обозначается только точка, куда он подключен (на нашей схеме это точка  $+U_{пит}$ ), второй, минусовый, провод источника подключается к общему проводу схемы (если другое специально не оговорено).

## **Практические задания**

1. Снять передаточную характеристику исследуемого транзисторного каскада. Для этого воспользоваться резистором R1 и встроенными в макет измерительными приборами – вольтметром и миллиамперметром.
2. Построить график передаточной характеристики. Из полученного графика определить коэффициент усиления по напряжению для линейного участка графика.
3. Выставить величину коллекторного тока приблизительно на середину линейного участка. Подать на вход схемы сигнал от синусоидального генератора (1000 Гц), на выход подключить осциллограф. Величиной входного сигнала добиться неискаженной синусоиды на выходе и определить коэффициент усиления. Сравнить его со значением, полученным в пункте 2.
4. Меняя резистором R1 постоянное напряжение на базе, пронаблюдать на осциллографе и зарисовать искажение синусоиды верхней и нижней частями передаточной характеристики.

## **Контрольные вопросы**

1. Какое соотношение лежит в основе усилительных свойств транзистора?
2. Что нужно изменить в исследуемой схеме, если вместо транзистора со структурой n-p-n использовать транзистор p-n-p?
3. Как соотносятся фазы входного и выходного напряжений в исследуемой схеме?
4. Каков будет общий коэффициент усиления усилителя, состоящего из трех таких же, как изучаемый, каскадов усиления?