

ТРАНЗИСТОР

В данной лабораторной работе снимаются характеристики транзистора, вычисляются его параметры, наблюдается усиление переменного сигнала усилителем на транзисторе.

Физические процессы в транзисторе и его устройство

Рассмотрим *биполярный* транзистор, т. е. полупроводниковый прибор с двумя *p-n*-переходами, для работы которого существенно участие в создании тока носителей заряда *обоих* знаков.

Устройство транзистора показано на рис. 1. Он представляет собой пластинку германия или другого полупроводника, в кото-

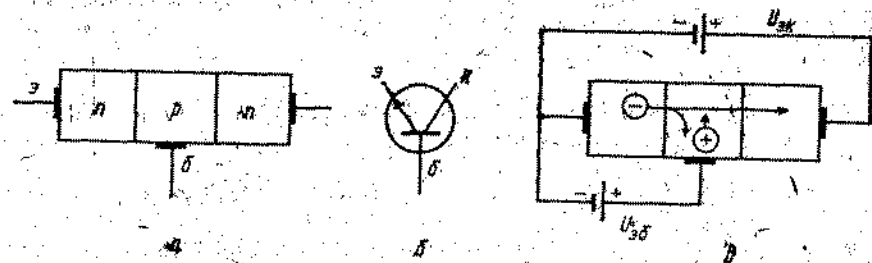


Рис. 1. Устройство (а), обозначение (б), схема включения (в) транзистора *n-p-n*-типа

рой созданы три области с различной электропроводностью. Транзистор типа *n-p-n* имеет среднюю область с дырочной электропроводностью, а две крайние области — с электронной электропроводностью. Средняя область называется базой, одна крайняя область — эмиттером, другая — коллектором. Расстояние между *p-n*-переходами должно быть очень малым, не более единиц микрон, т. е. область базы должна быть очень тонкой.

Рассмотрим, что будет происходить в транзисторе при подключении к нему внешних напряжений. Обычно к эмиттерному переходу подключают напряжение, являющееся прямым для основных носителей заряда областей, прилегающих к этому переходу, а к коллекторному переходу — обратное напряжение. При таком включении транзистора ток между эмиттером и базой  $I_э$  будет в основном состоять из электронов, движущихся из эмиттера в базу. Дырки из базы в эмиттер проникают также легко — для них эмиттерный переход также включен в прямом направлении. Но концентрацию дырок в базе делают значительно меньше концентрации свободных электронов в области эмиттера. Поэтому током дырок из базы в область эмиттера можно пренебречь.

Часть электронов, проходя через базовую область, рекомбинирует там с дырками, однако большая часть их диффундирует

сквозь узкую базовую область и попадает в поле коллекторного перехода, который для них открыт. Таким образом, ток коллектора практически равен току эмиттера, отличаясь от него на небольшую долю вследствие рекомбинации части электронов в базовой области.

Так как часть дырок в базе рекомбинирует с электронами, пришедшими из эмиттера, то для их восполнения в базе образуются новые дырки (вследствие ухода лишних электронов из базы во внешнюю цепь). Таким образом, ток базы можно считать состоящим из дырок, как бы приходящих из внешней цепи.

Назначением эмиттера является инжекция (выпуск, впрыскивание, но не эмиссия в обычном понимании этого термина) носителей заряда в базу. База — это область, в которую инжектируются эмиттером неосновные для нее носители заряда. Коллектор — область, назначением которой является экстракция (прием, поглощение) носителей заряда из базы.

Между рассмотренными токами в соответствии с законом Кирхгофа выполняется соотношение

$$I_э = I_к + I_б. \quad (1)$$

Аналогичное соотношение выполняется и для приращений токов:

$$\Delta I_э = \Delta I_к + \Delta I_б. \quad (2)$$

Работу транзистора иллюстрирует потенциальная диаграмма (рис. 2). Потенциал эмиттера принят за нулевой. В эмиттерном переходе, хотя он и включен в прямом направлении для электронов (основных носителей заряда в эмиттерной области), все-таки есть небольшой потенциальный барьер. Высотой этого барьера можно управлять, меняя напряжение между базой и эмиттером. Поле в области коллектора для электронов является ускоряющим.

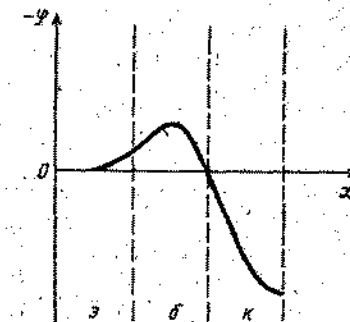


Рис. 2. Изменение потенциала между эмиттером и коллектором

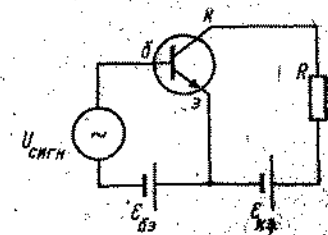


Рис. 3. Схема включения транзистора с общим эмиттером

Характеристика транзистора. Зависимость между токами и напряжениями, действующими в транзисторе, имеет сложный характер. Ее удобно описывать графически в виде характеристик.

Рассмотрим одну из основных схем включения транзистора — схему с общим эмиттером (рис. 3). Входное напряжение  $U_{\text{вх}}$ , которое необходимо усилить, подается на участок база—эмиттер. На базу подается также напряжение смещения  $U_{\text{бз}}$ . При этом в цепи базы протекает некоторый ток, т. е. входное сопротивление транзистора получается сравнительно небольшим. Цепь коллектора (выходная цепь) питается от источника  $\mathcal{E}_{\text{кз}}$ . Для получения усиленного выходного напряжения в эту цепь включена нагрузка. Статические характеристики снимаются на постоянном токе.

В качестве входных характеристик для описанной схемы можно рассматривать зависимость

$$I_6(U_{\text{бз}}) \text{ при } U_{\text{кз}} = \text{const}, \quad (3)$$

а выходных — зависимость

$$I_{\text{к}}(U_{\text{кз}}) \text{ при } I_6 = \text{const}. \quad (4)$$

Семейства указанных характеристик изображены на рис. 4 ( $U_{\text{кз1}} < U_{\text{кз2}}, I_{\text{б1}} < I_{\text{б2}} < I_{\text{б3}}$ ).

Входные и выходные характеристики транзистора имеют тесную связь с вольт-амперной характеристикой полупроводникового диода. Действительно, входные характеристики относятся к эмит-

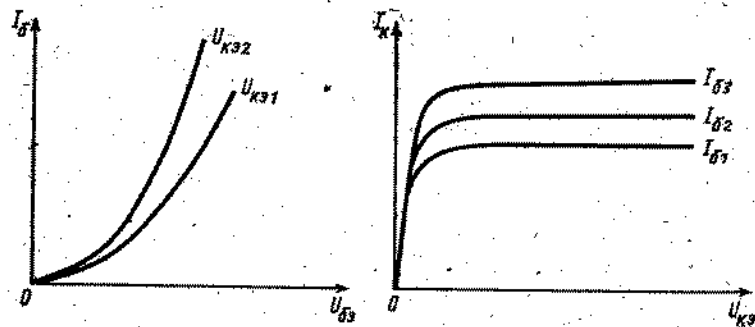


Рис. 4. Входные и выходные характеристики транзистора

терному переходу, который работает при прямом напряжении. Поэтому они подобны характеристике прямого тока диода. Выходные характеристики подобны характеристике обратного тока диода, так как отображают свойства коллекторного перехода, работающего при обратном напряжении (для основных носителей заряда).

По входным характеристикам можно определить входное сопротивление транзистора:

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{бз}}}{\Delta I_6} \text{ при } U_{\text{кз}} = \text{const}, \quad (5)$$

а по выходным — выходное сопротивление:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{кз}}}{\Delta I_{\text{к}}} \text{ при } I_6 = \text{const}. \quad (6)$$

Вычисленные таким образом величины  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{вых}}$  являются сопротивлениями транзистора по переменному току, т. е. такое сопротивление оказывает транзистор переменному току небольшой амплитуды сравнительно с постоянным током, текущим соответственно во входной и выходной цепях. Величины  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{вых}}$  используются при анализе работы транзистора в схемах усиления переменного тока или напряжения.

Одним из важнейших параметров транзистора является коэффициент усиления тока базы  $\beta$ , который определяется как отношение приращения тока коллектора к приращению тока базы при постоянной разности потенциалов между эмиттером и коллектором:

$$\beta = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_6} \text{ при } U_{\text{вк}} = \text{const}. \quad (7)$$

Так как основная часть тока эмиттера замыкается через цепь коллектора, коэффициент  $\beta$  всегда значительно больше единицы. У современных транзисторов  $\beta = 10 \div 300$ .

Усиление напряжения с помощью транзистора. При любой схеме включения транзистора в качестве усилителя электрический ток имеется как в выходной цепи, так и во входной. Это позволяет говорить об усилителе на транзисторе как об усилителе тока. Но входной ток транзистора связан с выходным напряжением (для схемы с общим эмиттером ток базы связан с напряжением, действующим между базой и эмиттером, через входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$ ). Поэтому можно воспользоваться этой связью и говорить об усилении напряжения. А с точки зрения физики явления следует иметь в виду, что выходной ток, т. е. ток, протекающий через нагрузку и определяющий усиление, зависит от высоты потенциального барьера в области эмиттерного перехода, т. е. от напряжения, действующего между базой и эмиттером. Таким образом, схему с транзистором можно рассматривать и как усилитель тока, и как усилитель напряжения, и, естественно, как усилитель мощности.

Коэффициент усиления по напряжению схемы с транзистором приближенно можно вычислить следующим образом:

$$K = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_{\text{к}} R_{\text{н}}}{\Delta I_6 R_{\text{вх}}} = \beta \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вх}}}. \quad (8)$$

Эта простая формула справедлива лишь в небольшой области режимов работы транзистора. Более строгий расчет выполняется весьма сложным образом.

Как и в любом другом усилителе, коэффициент усиления транзисторного усилителя зависит от частоты сигнала и его амплитуды.

Описание экспериментальной установки. Изучение транзистора выполняется на установке, основным элементом которой является специальная монтажная панель (рис. 5). На ней размещены

транзистор VT типа МП37Б и некоторые другие элементы. Питание схемы осуществляется от источника постоянного напряжения 15 В. Ток, потребляемый схемой от источника, не более 5 мА. На панели есть специальные гнезда для подключения приборов, измеряющих ток и напряжение базы, ток и напряжение коллектора,

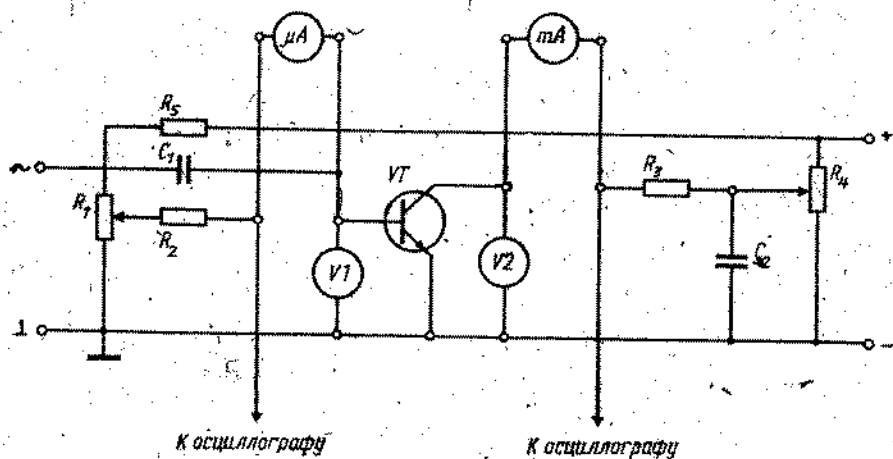


Рис. 5 Схема экспериментальной установки

гнезда для подачи на вход транзисторного усилителя сигнала от генератора переменного напряжения, гнезда для подключения осциллографа, чтобы наблюдать форму и величину этого сигнала на входе и выходе усилителя.

Величина постоянного напряжения на базе транзистора регулируется потенциометром  $R_1$ , а на коллекторе — потенциометром  $R_4$ . Резистор  $R_2$  играет вспомогательную роль, ограничивая величину базового тока транзистора и способствуя плавности регулировки базового напряжения. Резистор  $R_3$  при изучении усиления выполняет роль нагрузки. Резистор  $R_5$  уменьшает величину напряжения, подаваемого на потенциометр  $R_1$ . Конденсатор  $C_1$  позволяет подвести к базе транзистора переменный сигнал, не нарушая режима работы транзистора по постоянному току. Конденсатор  $C_2$  закорачивает на минус схемы один из концов нагрузочного резистора  $R_4$  (по переменному току). Величины элементов схемы:  $R_1 = R_4 = 6,8$  кОм,  $R_2 = 56$  кОм,  $R_3 = 1,1$  кОм,  $R_5 = 12$  кОм,  $C_1 = C_2 = 1$  мкФ.

Ток базы измеряется микроамперметром с пределом измерения 100 мкА, ток коллектора — миллиамперметром с пределом измерения 3 мА.

Напряжения на базе и на коллекторе измеряются ламповыми вольтметрами.

В качестве источника усиливаемого переменного сигнала используется генератор, с которого снимается напряжение с амплитудой не более 50 мВ на частоте 1000 Гц.

Визуально сигнал наблюдается на экране осциллографа.

Величина усиливаемого сигнала оценивается по вольтметру генератора, а величина усиленного сигнала — с помощью калиброванного входного делителя осциллографа.

#### Упражнение 1. СНЯТИЕ СЕМЕЙСТВА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА

Собрать схему в соответствии с рис. 5.

Ручки потенциометров  $R_1$  и  $R_4$  сначала должны быть установлены в крайнее положение против часовой стрелки, резистор  $R_3$  закоротить перемычкой. Установить пределы измерения приборов, исходя из того, что ожидаемые значения  $U_{кэ} = 10$  В,  $U_{бэ} = 0,2$  В,  $I_k = 2$  мА,  $I_б = 30$  мкА.

Подключить к схеме источник питания.

Установить ток базы  $I_б = 5$  мкА. Затем вращать ручку потенциометра  $R_4$  до появления коллекторного тока.

Если при этом ток базы изменится, то восстановить его первоначальное значение. Получившиеся при этом значения  $U_{кэ}$  и  $I_k$  занести в таблицу.

Снять зависимость  $I_k(U_{кэ})$  при  $I_б = 5$  мкА, увеличивая  $U_{кэ}$  с помощью потенциометра  $R_4$  и поддерживая  $I_б$  постоянным с помощью  $R_1$ . Результаты измерений занести в таблицу.

После этого аналогичным образом снять зависимость  $I_k(U_{кэ})$  при  $I_б = 10, 20, 30$  мкА. Результаты измерений занести в таблицы.

Закончив измерения, уменьшить напряжения и токи в схеме до минимума.

Построить графики зависимости  $I_k(U_{кэ})$  при  $I_б$  в качестве параметра.

Для использования транзистора в качестве усилителя переменного сигнала (упражнение 3) транзистор необходимо поставить в режим работы по постоянному току, обеспечивающий линейную связь между  $U_{кэ}$  и  $I_k$  (при этом искажения усиливаемого сигнала будут наименьшими). В связи с этим на графике, где изображено семейство выходных характеристик транзистора, определить точку, примерно соответствующую центру линейных участков характеристик. Пусть это будет точка с координатами  $U_{кэ} = U_{кэ}^*$ ,  $I_б = I_б^*$ .

Записать значения  $U_{кэ}^*$  и  $I_б^*$ . Считая, что в окрестности этой точки параметры транзистора практически неизменны, определить величину коэффициента усиления транзистора по току  $\beta$  (см. (7)) и величину выходного сопротивления транзистора  $R_{вых}$  (см. (6)).

## Упражнение 2. СНЯТИЕ ВХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА

С помощью потенциометра  $R_4$  установить  $U_{кз} = U_{кз}^*$ . Снять зависимость  $I_6(U_{бз})$ , занося результаты измерений  $I_6$  и  $U_{бз}$  в таблицу. При этом напряжение  $U_{бз}$  увеличивать с помощью потенциометра  $R_1$ , поддерживая  $U_{кз} = U_{кз}^*$ , с помощью потенциометра  $R_4$ . Закончив измерения, уменьшить напряжения и токи в схеме до минимума.

Построить графики зависимости  $I_6(U_{бз})$  при  $U_{кз} = U_{кз}^*$ . Для значения  $I_6 = I_6^*$  по наклону зависимости  $I_6(U_{бз})$  определить величину входного сопротивления транзистора  $R_{вх}$  (см. (5)).

## Упражнение 3. НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА УСИЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО СИГНАЛА С ПОМОЩЬЮ ТРАНЗИСТОРА

Зная величины  $\beta$  и  $R_{вх}$ , найденные в предыдущих упражнениях для определенного режима работы транзистора ( $U_{кз} = U_{кз}^*$ ,  $I_6 = I_6^*$ ), а также зная сопротивление резистора нагрузки  $R_n$  (см. на панели), можно вычислить величину коэффициента усиления транзисторного усилителя, в котором транзистор стоит в указанном режиме, а в качестве нагрузки стоит резистор  $R = R_n$ . Вычислить коэффициент усиления  $K$  (см. (8)).

Теперь определим, каков же на самом деле коэффициент усиления нашего усилителя.

Снять короткозамыкающую перемычку с резистора  $R_3$ .

С помощью потенциометров  $R_1$  и  $R_4$  установить режим работы транзистора, соответствующий выбранному по результатам предыдущих упражнений ( $U_{кз} = U_{кз}^*$ ,  $I_6 = I_6^*$ ). Вольтметр  $V_1$  исключить из схемы. Включить генератор, и с его выхода подать небольшое (около 10 мВ) напряжение частоты примерно 1 кГц на вход транзистора через конденсатор  $C_1$ .

Подключить к схеме в соответствии с рис. 5 осциллограф и на его экране получить изображение сигнала на входе транзисторного усилителя, а затем на выходе. Убедиться в том, что выходной сигнал сохранил свою гармоническую форму. Если же нет, то уменьшить величину входного сигнала.

Определить коэффициент усиления усилителя как отношение величин сигнала на его выходе и входе:

$$K_{\text{эсп}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$$

Закончив измерения, уменьшить напряжение и токи в схеме до минимума, выключить приборы и питание схемы.

Сравнить коэффициент усиления, определенный экспериментально, с коэффициентом усиления, найденным теоретически с использованием параметров  $\beta$  и  $R_{вх}$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой транзисторы  $n-p-n$ -типа?
2. Какую роль играют эмиттер, база и коллектор в транзисторе?
3. Почему базу транзистора делают тонкой?
4. Какие носители заряда являются основными и неосновными в эмиттерной, базовой и коллекторной областях транзистора?
5. Для каких носителей заряда коллекторный переход включается в обратном направлении?
6. Объяснить сходство между входными и выходными характеристиками транзистора, с одной стороны, и вольт-амперной характеристикой диода — с другой?
7. Как можно найти величины входного и выходного сопротивлений транзистора?
8. Как можно определить коэффициент усиления транзистора по току?
9. Какого порядка обычно бывают входное и выходное сопротивления транзистора?

## Литература

1. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 206.
2. Жеребцов И. П. Основы электротехники. Л.: Энергия, 1974, с. 86—94.

## Лабораторная работа 13

### УСИЛИТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ НА ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЕ

Рассматривается работа усилителя, построенного на интегральной микросхеме. Снимаются амплитудная, амплитудно-частотная и фазовая характеристики усилителя.

Усилитель на транзисторе. При проведении физических экспериментов часто возникает необходимость в усилении слабых электрических сигналов. Широкое применение получили усилители на транзисторах.

Рассмотрим, как работает усилитель на одном транзисторе, который имеет два  $n-p$ -перехода: эмиттерный — между эмиттером и базой, коллекторный — между базой и коллектором. Такие транзисторы называют биполярными, так как их работа основана на использовании носителей заряда обоих знаков.

Режим работы транзистора называют активным, если на эмиттерном переходе напряжение прямое, т. е. имеет полярность, соответствующую прямому току через этот переход, а на коллекторном переходе — обратному. Активный режим является основным и используется в большинстве усилителей.

В усилительные схемы транзистор включается как четырехполюсник, имеющий два входных и два выходных зажима. Так как транзистор имеет три вывода, один из них оказывается одновременно и входным и выходным, т. е. является общим.