

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА**

**Физический факультет  
Практикум кафедры физики колебаний**

**Описание задачи**

**ЧАСТОТНЫЕ И ПЕРЕХОДНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНЫХ  
ТРАНЗИСТОРОВ**

**Составитель: Сенаторов К.Я.  
Новая редакция: Николаева Е.П.**

**Москва, 2012**

# ЧАСТОТНЫЕ И ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Биполярный транзистор – полупроводниковый усилительный прибор с двумя взаимодействующими р-п - переходами.

Полупроводниковая структура биполярного транзистора содержит три слоя, составляющие единый монокристалл полупроводника. Полупроводниковые слои различаются типом проводимости (п-слой с электронной проводимостью, р-слой с дырочной проводимостью). В структуре транзистора области р- и п-типов проводимости чередуются. Эти области образуют два р-п-перехода. Одна из крайних областей называется эмиттером, другая - коллектором, а средняя область называется базой. В зависимости от чередования типа проводимости областей (п- или р-типов) транзисторы бывают п-р-п - типа и р-п-р - типа.

Схематическая структура биполярного транзистора р-п-р - типа и распределение токов в нем представлены на рис. 1.1.

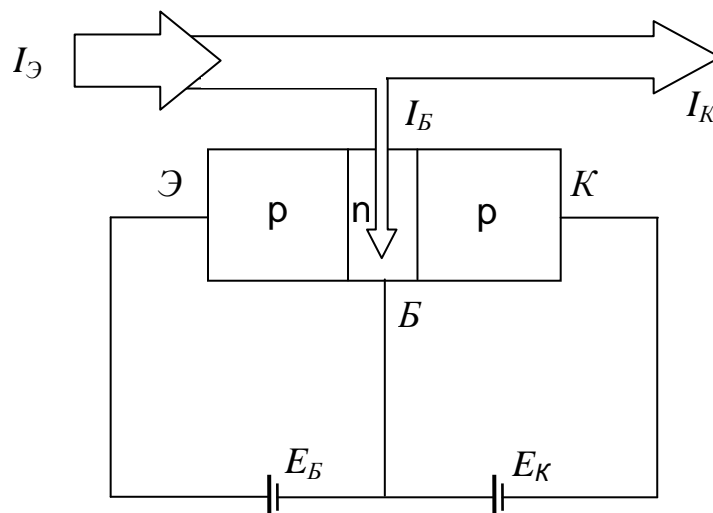


Рис.1.1

Передача и усиление электрических сигналов транзисторами определяется процессами инжекции в базу со стороны эмиттера дырок и электронов, их диффузией и дрейфом в области базы и процессом их собирания коллектором.

Эмиттерный p-n - переход смещен в прямом направлении, через него в область базы инжектируются неосновные для базы носители. Носители диффундируют через базу и за вычетом рекомбинировавших в ней доходят до коллекторного p-n - перехода, смещенного в обратном направлении. Эти носители, являющиеся для области коллектора уже основными носителями, целиком втягиваются в него.

В биполярных транзисторах базовая область очень тонкая (~1 мкм) и время жизни неосновных носителей в базе достаточно велико. Поэтому большая часть неосновных носителей, диффундирующих в базе, достигает коллектора. Вследствие этого, ток рекомбинации мал по сравнению с током эмиттера и током коллектора.

Транзистор является активным четырехполюсником. Из трёх выводов транзистора на один подаётся входной сигнал, со второго – снимается выходной сигнал, а третий вывод является общим для входной и выходной цепи. Схемы включения транзисторов получили своё название в зависимости от того, какой из выводов транзисторов будет являться общим – с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК).

Отношение коллекторного тока  $I_K$  к эмиттерному току  $I_{\text{Э}}$ , (точнее отношение их приращений) называется коэффициентом передачи эмиттерного тока в схеме с общей базой (ОБ) и является одним из основных параметров транзистора

$$\alpha = \frac{I_K}{I_{\text{Э}}} \quad (1)$$

Для современных транзисторов  $\alpha > 0.9 \div 0.99$ .

Поскольку для узла токов (см. рис. 1.1) выполняются соотношения  $I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}$  ( $I_{\text{Б}}$  – ток в цепи базы транзистора) и  $I_{\text{Э}} = I_{\text{К}}/\alpha$ , постольку отсюда следует

$$I_{\text{К}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_{\text{Б}} = \beta I_{\text{Б}} \quad (2)$$

Величину  $\beta = \alpha/(1 - \alpha)$  называют коэффициентом усиления по току в схеме с общим эмиттером (ОЭ). В этом случае входным током является ток базы  $I_{\text{Б}}$ , а выходным током – ток коллектора  $I_{\text{К}}$ . Современные транзисторы имеют значение величины  $\beta$  порядка  $10 \div 10^2$  и более. Чем ближе  $\alpha$  к 1 (то есть, чем менее интенсивен процесс рекомбинации в базовой области), тем больше значение  $\beta$ .

Полученные соотношения для приращений токов хорошо соблюдаются только для медленно изменяющихся токов. Коэффициенты усиления  $\alpha$ ,  $\beta$  зависят от скорости изменения входного тока. Если входной ток меняется по гармоническому закону, то коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  – функции частоты. Инерционные свойства электронных приборов обуславливаются конечностью пролетного времени частиц, образующих ток в приборе, и наличием резервуаров энергии в виде емкостей обедненных слоев р-п - переходов. При прохождении тока через транзистор в его базовой области происходят два физических процесса: диффузия носителей заряда и их рекомбинация. В зависимости от способа управления входным током инерционные свойства транзистора определяются либо процессом диффузии, либо процессом рекомбинации.

Рассмотрим схему включения транзистора с ОБ, в которой входной ток – ток эмиттера, а выходной ток – ток коллектора.

Будем считать, что соотношение между концентрациями основных носителей в соответствующих областях таково, что электронным током через эмиттерный переход можно пренебречь, а ток базы образуется только за счет рекомбинации.

Предположим, что задаваемый извне ток эмиттера  $I_{\text{Э}}$  получил мгновенное приращение на величину  $\Delta I_{\text{Э}}$ . До этого момента ток  $I_{\text{Э}}$  был постоянным, и ему соответствовало определенное распределение концентрации неосновных носителей в базовой области (рис. 1.2, кривая 1). 0 и W - координаты границ базовой области. Задание ступеньки тока  $\Delta I_{\text{Э}}$  соответствует тому, что на эмиттерном переходе концентрация и градиент концентрации изменяются скачком (рис. 1.2, кривая 2). При этом градиент концентрации неосновных носителей у коллекторного перехода в начальный момент времени остается прежним, и коллекторный ток поэтому не претерпевает изменений.

Поскольку после скачка входного тока он продолжает поддерживаться постоянным, то и во все последующие после скачка моменты времени градиент концентрации неосновных носителей у эмиттерного перехода не меняется. Изменившийся градиент приводит к тому, что в базовую область начинает втекать большее количество дырок, которые, заполняя базовую область, с течением времени постепенно увеличивают градиент

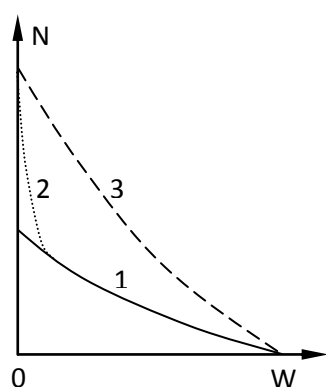


Рис.1.2

концентрации неосновных носителей у коллекторной границы базы, в результате чего происходит установление нового значения тока коллектора (рис. 1.2, кривая 3).

Таким образом, инерционность нарастания тока коллектора (при мгновенном скачке тока эмиттера) обусловлена диффузионным характером движения неосновных носителей в области базы.

Если ток эмиттера изменяется по гармоническому закону с амплитудой, обеспечивающей линейную зависимость между токами транзистора, то при повышении частоты переменная составляющая коллекторного тока уменьшается, так как градиент концентрации неосновных носителей у коллекторного перехода не успевает следовать за градиентом концентрации неосновных

носителей у эмиттерного перехода. Частоту  $\omega_{кр}$ , при которой переменная составляющая коллекторного тока становится в  $\sqrt{2}$  раз меньше своего максимального значения на низких частотах, называют критической частотой транзистора в схеме с общей базой.

Качественно рассмотрение частотных свойств транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ) проводится при тех же предположениях о концентрации основных носителей, хорошо отражающих особенности реальных процессов. При этих условиях использование тока базового контакта в качестве входного тока имеет характерную черту: для поступающих в базу электронов нет "стока" в соседние области, и они расходуются только на рекомбинацию с дырками, "втекающими" из эмиттерной области (обратным током коллекторного перехода пренебрегаем).

Предположим, что в какой-то момент времени под действием внешнего источника ток базы  $I_B$  скачком изменился на малую величину  $\Delta I_B$ , то есть, в базу вводят электроны. Тогда для компенсации их объемного заряда из эмиттерной области в базу поступят дырки. Увеличение концентрации дырок и электронов в базе вызовет увеличение скорости их рекомбинации, что обусловит увеличение притока дырок из эмиттерной области. Увеличение притока дырок будет происходить до тех пор, пока эмиттерный ток не достигнет такого значения, при котором убыль дырок за счет рекомбинации и ухода в коллекторную область не будет компенсирована извне.

Частотные свойства транзисторов в схеме с общей базой определяются диффузионным характером движения носителей в базовой области, а в схеме с общим эмиттером - процессом рекомбинаций носителей.

Целью задачи является экспериментальное измерение и изучение переходных характеристик биполярных транзисторов.

## 2. ТЕОРИЯ

Наиболее важными характеристиками линейных электрических цепей и различных электронных приборов, работающих в линейном режиме, являются переходные и частотные характеристики.

Переходная характеристика представляет собой отклик линейной системы на ступенчатое изменение сигнала на входе системы. Она описывают процесс установления сигнала  $h(t)$  на выходе линейной система с течением времени после подачи на вход единичного импульса.

Частотные характеристики (амплитудно-частотная и фазочастотная)  $\alpha(j\omega)$  являются характеристиками работы линейных систем в стационарных режимах при различных частотах  $\omega$  гармонических сигналов на их входе.

Оба подхода к исследованию свойств линейных систем с учетом инерционности процессов передачи сигналов от входа системы на ее выход (процессов диффузии заряда через базу и накопления и исчезновения зарядов в емкостях р-п - переходов) являются эквивалентными. А именно, выражения для частотных  $\alpha(j\omega)$  и переходных  $h(t)$  характеристик связаны между собой преобразованием Лапласа [1].

Биполярные транзисторы могут быть отнесены к линейным системам при следующих условиях:

1. Концентрация избыточных неосновных носителей, вводимых в базу через эмиттерный переход, должна быть много меньше концентрации основных носителей в базе. Это условие позволяет пренебречь влиянием электрического поля на движение неосновных носителей заряда в базе по сравнению с процессом диффузии.
2. На входе биполярного транзистора должен быть задан ток. Это устраняет влияние нелинейности вольт-амперной характеристики эмиттерного перехода на задаваемый ток

инжекции носителей в базу.

3. На выходе транзистора должно быть в хорошем приближении выполнено условие короткого замыкания (КЗ):  $R_n \ll R_{эфф}$ . Это условие позволяет в чистом виде выделить зависимость между выходным и входным токами. Если же условие КЗ не выполнено, то выходной ток при определенных условиях может сильно зависеть от характера и величины нагрузки.

Коэффициент передачи по току плоскостного транзистора при коротком замыкании на выходе и при включении транзистора по схеме с общей базой дается выражением [1]:

$$\alpha(\omega) = \frac{\tilde{I}_{вых}}{\tilde{I}_{вх}} = \operatorname{sech} \left( \frac{W_0}{L_p} \cdot \sqrt{1 + j\omega\tau_p} \right) \quad (3)$$

где  $W_0$  – толщина базового слоя,  $L_p$  – диффузионная длина дырок в  $n$ -материале базы,  $\tau_p$  – время жизни дырок в области базы,  $\omega$  – частота сигнала,  $\tilde{I}_{вых}$  – комплексная амплитуда плотности тока выходного сигнала при коротком замыкании на выходе,  $\tilde{I}_{вх}$  – комплексная амплитуда плотности входного тока,  $\operatorname{sech} x = 1/\operatorname{ch} x$ .

Соотношение (3) получено при рассмотрении диффузионного движения дырок в базовой области при учете эффекта рекомбинации [1]. Считается, что полный ток через переходы является током дырок, а электронный базовый ток идет только на рекомбинацию.

Упростим (3) используя связь между переходной характеристикой линейного четырехполюсника  $h(t)$  и его коэффициентом передачи (по Лапласу) [1]

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}} \quad (4)$$

Для переходной характеристики приближенно получим [1]

$$h(t) = \alpha_0(1 - e^{-\omega_0 t}) \quad (5)$$



Из (4) видно, что  $\omega_0$  является условной граничной частотой, на которой  $|\alpha| = 0.7\alpha_0$  (т.е.  $\omega_0 \equiv \omega_{кр}$ ). С другой стороны, значение граничной частоты  $\omega_0$  можно найти также и из переходной характеристики, определив интервал времени  $t^*$ , при котором

$$h(t^*) = \alpha_0(1 - e^{-1}) = 0.63\alpha_0 \quad (\text{при этом } \omega_0 = 1/t^*)$$

Аналогичным путем, используя (3), можно получить приближенное выражение для переходной характеристики и соответствующего ей коэффициента передачи по току для того же плоскостного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

$$h(t^*) = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} (1 - e^{-t/\tau_p}) \quad (6)$$

$$\beta \approx \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} \cdot \frac{1}{1 + j\omega\tau_p} \quad (7)$$

Из (4) - (7) следует, что условная граничная частота  $\omega_0$  может быть экспериментально определена как по амплитудно-частотной, так и по переходной характеристикам.

Существование зависимости коэффициента усиления по току  $\alpha$  или  $\beta$  от частоты связано с двумя принципиально различными физическими причинами:

- а) процессами диффузии и рекомбинации движущихся от эмиттера к коллектору неосновных носителей в базе;
- б) совокупным влиянием емкостей р-п – переходов транзистора

Рассмотрим более подробно механизмы, ограничивающие высокочастотный предел работы транзистора для подключения с ОБ.

У биполярных транзисторов с малыми площадями коллекторных переходов и относительно большим расстоянием между эмиттером и коллектором (широкой базой) критическая

частота  $\omega_0$  определяется, в основном, скоростью диффузионного процесса. Это характерно для "сплавных" транзисторов.

Биполярные транзисторы, изготавливаемые с помощью планарно-эпитаксиальных технологий, имеют очень тонкие базовые слои. У таких приборов решающее влияние на ход амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных (ФЧХ) характеристик  $\alpha(j\omega)$  оказывают величины емкостей коллекторных переходов и сопротивлений базовых слоев.

Как известно, в области p-n - переходов образуются двойные обедненные слои, в которых нет подвижных носителей заряда.

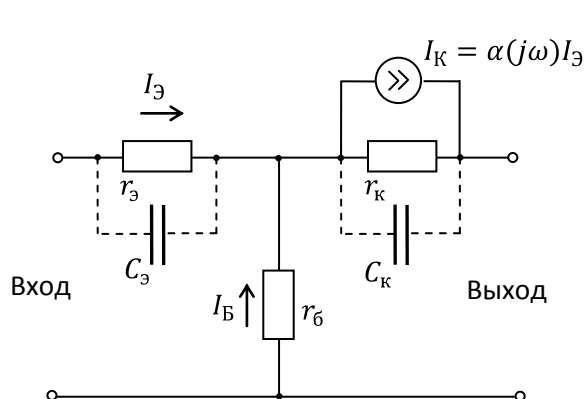


Рис. 2.1

Эти слои образуют конденсаторы. В T-образной эквивалентной схеме транзистора это отражается введением емкостей  $C_э$  и  $C_к$  (см. рис. 2.1). В схеме с ОБ символ  $\alpha(j\omega)$  характеризует частотную зависимость эффектов переноса

заряда через базу.  $C_э$  – емкость обедненного слоя эмиттерного перехода.  $C_к$  – емкость обедненного слоя коллекторного перехода.

Из этих двух емкостей наибольшее влияние оказывает емкость  $C_к$ , так как она включена параллельно большому сопротивлению  $r_к$ . Емкость  $C_э$  шунтирована малым сопротивлением, включенным в прямом направлении эмиттерного перехода.

При условии короткого замыкания на выходе постоянная времени коллекторной цепи  $C_к r_б$  определяет наивысшую критическую частоту прибора (если частотная зависимость  $\alpha(j\omega)$  не ограничит ее раньше):

$$\omega_0 = \frac{1}{C_к r_б} \quad (8)$$

Влияние емкости  $C_k$  на частотную характеристику биполярного транзистора, работающего в усилителе тем заметнее, чем больше сопротивление нагрузки в цепи коллектора.

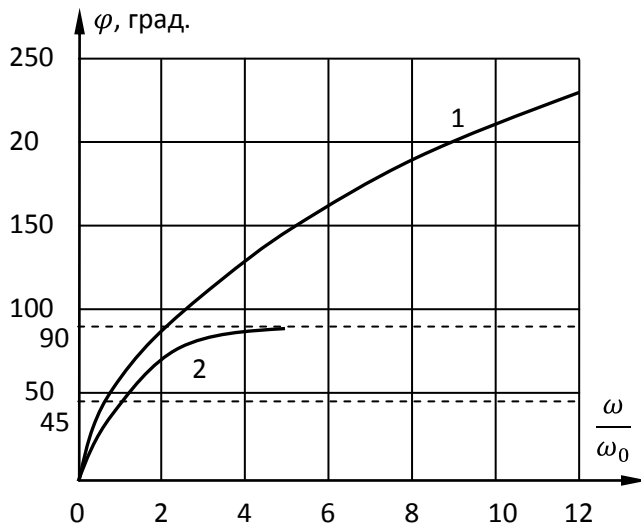


Рис. 2.2

На рис. 2.2 представлены расчетные ФЧХ: кривая 1 соответствует выражению (3), полученному при рассмотрении диффузионного движения дырок в базовой области; кривая 2 соответствует зависимости фазы коэффициента передачи от частоты для интегрирующего RC-звена.

### 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК. УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ

В биполярных транзисторах входной и выходной токи связаны линейными зависимостями (1) и (2). Поэтому в качестве генератора исходного сигнала, вводимого в транзистор через эмиттерный или базовый контакты, следует применить "генератор тока". Генератор тока строго определяется как идеальный генератор, обеспечивающий требуемый ток в исследуемом приборе независимо от значения комплексного сопротивления  $r$  цепи, в которой задан этот ток. Ясно, что на практике это условие строго не выполняется; однако его легко выполнить в хорошем для практики приближении, подключая сигнал генератора напряжения к входу транзистора через сопротивление  $R_2$

достаточно большое по сравнению с входным  $r_{вх}$ , то есть  $R_2 \gg r_{вх}$ .

В нашем случае сопротивлением нагрузки будет входное сопротивление транзистора, которое в схеме с общим эмиттером достигает десятков кОм. Поэтому стандартные источники сигналов, имеющие небольшое внутреннее сопротивление, должны подключаться к входу транзистора через омические сопротивления, величина которых, по крайней мере, на порядок превышает соответствующее входное сопротивление транзистора.

Принципиальные схемы для измерений частотных свойств биполярных транзисторов показаны на рис. 3.1 а, б. В задаче используются транзисторы р-п-р - типа.

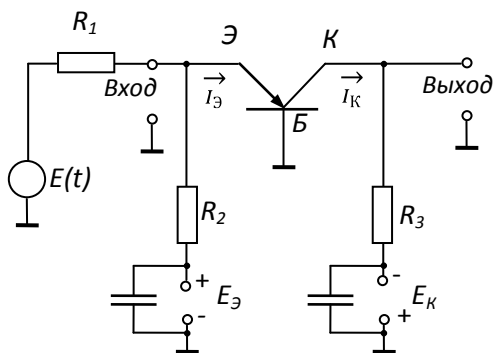


Рис. 3.1а. Схема с общей базой.

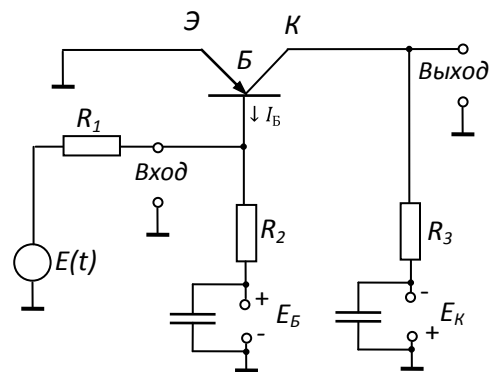


Рис. 3.1б. Схема с общим эмиттером.

Необходимо создать режим питания биполярного транзистора, обеспечивающий линейную зависимость между входным и выходным переменными токами. Для этого необходимо соблюдать условия достаточной малости переменного сигнала на входе и выходе транзистора. Это накладывает дополнительные ограничения на величины  $R_1$  и  $R_3$ . Выбор рабочей точки (постоянный ток эмиттера  $I_{Э0}$  и постоянное напряжение на коллекторе), осуществляют следующим образом.

Выходной переменный ток транзистора необходимо наблюдать при условии короткого замыкания на его выходе. Выходное сопротивление биполярных транзисторов  $r_{вых}$  велико (порядка

сотен кОм), поэтому подключение к его выходу омической нагрузки  $R_3$ , величина которой много меньше выходного сопротивления транзистора  $r_{вых}$ , обеспечивает с хорошей точностью условия короткого замыкания на выходе, и напряжение на этой нагрузке будет линейно связано со значением входного тока.

Ток  $I_{Э0}$  должен быть прямым током (т.е. эмиттерный переход смещен в прямом направлении), а источник коллекторного напряжения  $E_K$  должен подключаться так, чтобы коллекторный контакт имел отрицательный потенциал относительно контакта базы (т.е. коллекторный переход смещен в обратном направлении). Для задания тока  $I_{Э0}$  источник э.д.с. следует подключить к эмиттерному контакту через сопротивление  $R_2$ , величина которого должна быть много больше, чем входное сопротивление транзистора на постоянном токе в схеме с общей базой. При выполнении этого условия ток  $I_{Э0}$  с хорошей степенью точности определяется из соотношения

$$I_{Э0} = \frac{E_{Э}}{R_2}, \quad \text{где } R_2 \gg r_{вх}$$

Источник коллекторного смещения подключается к контакту коллектора через сопротивление  $R_3$ .

Значение  $E_K$  выбирается из следующих соображений. Выходные характеристики транзистора представляют собой семейство зависимостей тока коллектора  $I_K$  от напряжения  $U_K$  для различных значений тока эмиттера  $I_{Э0}$ . Нагрузочная прямая

$$U_K = E_K - R_3 I_K$$

определяется параметрами  $R_3$  и  $E_K$ . Для работы транзистора в режиме линейного усиления рабочая точка выбирается примерно на середине нагрузочной прямой.

Поскольку  $I_K \approx I_{Э}$ , то  $U_K \approx E_K - R_3 I_{Э}$ .

Определив  $R_3$  (из условия  $R_3 \ll r_{вых}$ ), получим

$$E_K \approx U_K + R_3 I_K$$

причем в правой части все величины известны.

Итак, расчет параметров схемы для создания режима работы транзистора, соответствующего определенной рабочей точке, производится с использованием соотношений:

$$I_{Э0} = \frac{E_{Э}}{R_2}, \quad E_K \approx U_K + R_3 I_K$$

причем  $R_2 \gg r_{вх}$  ( $r_{вх} \sim 10$  Ом),  $R_3 \ll r_{вых}$  ( $r_{вых} \sim 100$  кОм).

Значение сопротивления  $R_1$  (рис. 3.1), обеспечивающего задание переменной составляющей тока эмиттера, определяется из следующих соображений. Амплитуду переменной составляющей следует брать такой величины, чтобы она была примерно на порядок меньше постоянной составляющей тока эмиттера и одновременно обеспечивала сохранение отрицательного потенциала на коллекторном контакте в любой момент времени.

Расчет параметров схемы с общим эмиттером использует те же соображения. Поскольку в данном случае входным током является ток базы, а в паспорте транзистора рабочая точка определяется заданием тока эмиттера и напряжением коллектора, то для установления рабочей точки в такой схеме следовало бы рассчитать ток покоя базового контакта с помощью статических характеристик транзистора. Однако при небольших токах эмиттера можно считать, что  $I_K = I_{Э} - I_B \approx \alpha I_{Э}$ , где  $\alpha$  – статический коэффициент передачи по току.

Схема установки для экспериментального изучения частотных свойств транзистора позволяет снимать как частотные  $\alpha(\omega)$ , так и переходные  $h(t)$  характеристики транзисторов при включении их по схеме с общей базой или общим эмиттером. На рис. 3.2. приведена блок-схема установки. Для получения частотных характеристик используется генератор гармонических сигналов (ГГС) на входе и осциллограф на выходе схем. Для наблюдений переходных

характеристик используется генератор прямоугольных импульсов (ГПИ) на входе и осциллограф на выходе схем. Прямоугольный импульс положительной полярности подается в эмиттерную цепь исследуемого транзистора для получения переходных характеристик при включении транзистора по схеме с общей базой.

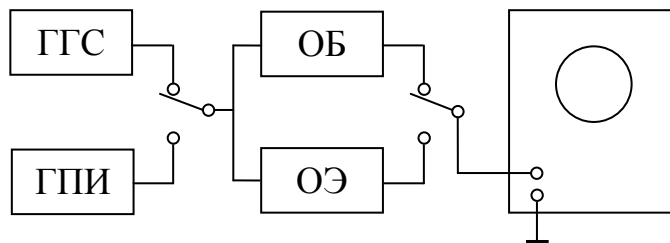


Рис. 3.2

Отрицательный прямоугольный импульс используется для создания отрицательного перепада тока в цепи базы исследуемого транзистора

для получения переходных характеристик при включении транзистора по схеме с общим эмиттером.

## 4. УПРАЖНЕНИЯ

**Упражнение 1. Снятие частотных характеристик биполярных транзисторов при включении их по схеме с общей базой и общим эмиттером.**

Снимается зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты при постоянной амплитуде сигнала на входе.

1.1. Включить транзистор в исследуемую схему (с общей базой, общим эмиттером).

1.2. Установить необходимый режим работы ( $I_{Э0}$ ,  $U_{К0}$ ) или ( $I_{Б0}$ ,  $U_{К0}$ ). В задаче такой режим обеспечивается при  $E_K \sim 10$  В и  $E_Э$  ( $E_Б$ )  $\sim 10$  В.

1.3. Подать на вход исследуемой цепи сигнал от генератора синусоидальных сигналов.

1.4. Выход цепи подключить к осциллографу.

1.5. Проверить выполнение неравенств  $\Delta I_{\text{Э}} \ll I_{\text{Э0}}$  и  $\Delta I_{\text{Б}} \ll I_{\text{Б0}}$ . При выбранных параметрах схем это условие выполняется при амплитуде гармонического сигнала, подаваемого на вход системы  $\leq 1$  В.

1.6. При выполнении измерений следует следить за постоянством амплитуды входного сигнала при изменении его частоты.

1.7. Снять частотные характеристики для трех транзисторов в двух схемах включения, построить графические зависимости и определить критические частоты  $f_{\text{кр}}$ .

1.8. Подключить параллельно нагрузке  $R_3$  конденсатор  $C$ , величина которого сравнима с величиной  $C_k$  в схеме с общей базой для используемого транзистора.

1.9. Снять несколько точек АЧХ в окрестности  $f_{\text{кр}}$  и нанести их на график, полученный в п. 1.7.

**Упражнение 2. Снятие переходных характеристик транзисторов при включении их по схеме с общей базой и общим эмиттером.**

Переходные характеристики транзисторов наблюдаются на осциллографе.

2.1. Установить рабочую точку исследуемого транзистора (см.п. 1.2).

2.2. Подать на вход исследуемой цепи сигнал необходимой полярности от генератора прямоугольных импульсов.

2.3. Выход цепи подключить к осциллографу.

2.4. Проверить выполнение неравенств, указанных в п. 1.5, учитывая значение амплитуды импульсов напряжения, подаваемых на вход цепи от генератора импульсов.



2.5. Измерить длительность переходного процесса, наблюдаемого в цепи коллектора исследуемых транзисторов в двух схемах включения. Рассчитать критические частоты транзисторов для этих двух схем.

2.6. Сравнить значения критической частоты транзистора, полученные двумя способами.

2.7. Сравнить переходную характеристику транзистора в схеме с ОБ, с переходной характеристикой, полученной при подсоединении конденсатора  $C$  к нагрузке  $R_3$ .

### **Упражнение 3. Снятие фазо-частотных характеристик биполярного транзистора в схеме с общей базой.**

Для этих измерений нужно использовать оба луча осциллографа.

3.1. Для исследования ФЧХ выбрать самый "низкочастотный" (по АЧХ) транзистор.

3.2. Включить транзистор в схему с общей базой.

3.3. Установить необходимый режим работы прибора.

3.4. Подать на вход исследуемой схемы синусоидальный сигнал. Этот же сигнал подвести к входу одного из каналов осциллографа.

3.5. Выходной сигнал с нагрузки  $R_3$  подать на вход другого канала осциллографа.

3.6. Меняя частоту сигнала, наблюдать сдвиг фаз между синусоидами в первом и втором каналах осциллографа.

3.7. Построить график ФЧХ, сняв ее в диапазоне до  $4f_{кр}$ .

3.8. Сравнить полученную ФЧХ с теоретической кривой 1 на рис. 2.2.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Миддлбрук Р. Д. Введение в теорию транзисторов. М.. Атомиздат, 1960 г.
2. Степаненко М. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.."Энергия". 1973 г.
3. Ржевкин К. С. Физические принципы действия полупроводниковых приборов. Изд-во МГУ, 1977 г.
4. Кузнецов Ю.И., Логгинов А.С. Митрофанов В.П. Усилители и РС-генераторы низкой частоты на транзисторах и интегральных схемах. Изд-во МГУ. 2009г.