

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ И
МАТЕМАТИКИ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

Кафедра Радиоэлектроники

**Исследование свойств полупроводниковых
диодов и транзисторов**

**Методические указания к лабораторным работам по курсу
«Электротехника и электроника», ч.2 - Электроника.**

Москва — 2008

Составитель: доцент, канд.техн.наук. АНДРЕЕВСКАЯ Т.М., зав.кафедрой, профессор, д.т.н. МУХИН С.В.

Исследование свойств полупроводниковых диодов и транзисторов. Метод. указания к лабораторным работам по курсу «Электротехника и электроника», часть 2, "Электроника" /Моск. гос. ин-т электроники и математики; Сост. Т.М.Андреевская, С.В.Мухин. М., 2008. с. 30. Илл.20.

Даны методические указания и задания для подготовки и проведения лабораторных работ при изучении курса “Электротехника и электроника”, ч.2, Электроника. Предназначены для студентов специальности 200800 и 200300, могут быть использованы для аналогичных курсов других специальностей.

Общие указания

1. Перед началом цикла лабораторных занятий на кафедре «Радиоэлектроника» каждый студент обязан ознакомиться с **правилами техники безопасности** и в дальнейшем их исполнять. При выполнении работы необходимо быть внимательным, сосредоточенным и аккуратным. В лаборатории необходимо соблюдать тишину. Разговоры, связанные с выполнением работы, допускаются только в полголоса. Во время выполнения работы хождение без дела по лаборатории запрещено. Входить и выходить из нее следует только с разрешения преподавателя. Не разрешается оставлять без присмотра включенную установку. При возникновении каких-либо неясностей при выполнении работы следует обратиться за разъяснением к преподавателю или лаборанту. Запрещается проводить эксперименты, не связанные с заданием на выполняемую по плану работу. **При обнаружении каких-либо неисправностей в установке, а также при появлении запаха горелых проводов или задымления, работа немедленно прекращается, установка выключается, об этом немедленно сообщается лаборанту и преподавателю, под руководством которых немедленно приступают к тушению возгорания. При несчастном случае с Вами или Вашим товарищем немедленно сообщите преподавателю.**
2. К работе в лаборатории допускаются студенты, выполнившие задания и представившие отчет по предварительной подготовке и получившие допуск преподавателя к экспериментальной части.
3. Соединительные провода и кабели для приборов выдаются лаборантом при получении бригадой допуска к работе под пропуск и сдаются ему после завершения работы.
4. Перед выполнением работы №1 следует изучить раздел «Описание лабораторного стенда и измерительных приборов ...» и получить по нему **зачет**.
5. Отчеты выполняются **каждым** студентом и должен содержать:
 - а) название работы;
 - б) материал по предварительной подготовке к работе, если таковая предусмотрена;
 - в) название соответствующего пункта задания;
 - г) схему каждого эксперимента и запись параметров схемы и сигналов на ее входе;
 - д) таблицы и графики снятых данных; зарисовки осциллограмм. Все полученные данные, в том числе и на осциллограммах, должны быть выражены в соответствующих единицах или в определенном масштабе (B , A , $G\mu$, c);
 - е) по каждому эксперименту должны быть представлены выводы или комментарии к полученным результатам.
6. Работа выполняется **бригадой, состоящей не более чем из двух студентов**, один из которых является «старшим по бригаде». Он контролирует выполнение эксперимента, наблюдает за порядком на рабочем месте и за выполнением правил техники безопасности.

Работа №1.

Исследование свойств полупроводникового выпрямительного диода

Цель работы – получение статической вольтамперной характеристики полупроводникового выпрямительного диода, изучение влияния величины и типа нагрузки при работе диода в режиме выпрямителя.

Краткие теоретические сведения.

Основой полупроводникового диода является электрический $p-n$ -переход.

ВАХ идеального $p-n$ -перехода определяется соотношением:

$$i = I_S [\exp(u / m\varphi_T) - 1], \quad (1.1)$$

где I_S - обратный (тепловой) ток, φ_T - температурный потенциал, пропорциональный температуре перехода, при комнатной температуре $\varphi_T \approx 0,025B$. Величина m зависит от материала перехода. Для германиевых диодов $m = 1 \dots 1,5$, для кремниевых $m = 2 \dots 2,5$.

Обычно напряжение на реальном диоде на доли вольта больше, чем в идеальном из-за так называемого объемного сопротивления базы r_B , с учетом которого ВАХ диода можно записать в виде

$$i = I_S [\exp(u - ir_B) / m\varphi_T - 1]. \quad (1.2)$$

В любой точке A нелинейной ВАХ можно найти величину статического сопротивления как $r_{ст} = U_A / I_A$, а также производную, которая характеризует дифференциальное сопротивление. Дифференцируя соотношение (1) для некоторой точки A на ВАХ имеем

$$r_{диф,A} = m\varphi_T / (I_A + I_S). \quad (1.3)$$

Здесь I_A – величина постоянного тока в рассматриваемой точке.

Дифференциальное сопротивление описывает модель диода при заданном постоянном напряжении и малом сигнале как

$$u = U_A + i \cdot r_{диф},$$

где U_A – напряжение в заданной точке ВАХ (смещение). Для выпрямительного диода в режиме большого сигнала используют для всей прямой ветви модель в виде источника напряжения с внутренним сопротивлением $r_{пр,диф}$, а для обратной ветви в виде источника тока с внутренним сопротивлением $r_{обр,диф}$ (кусочно-линейная модель).

Кусочно-линейная модель диода основана на конечных значениях дифференциальных сопротивлений прямой и обратной ветвей ВАХ диода. На рис.1.1 показано графическое определение параметров кусочно-линейной модели для заданных точек (A_1, A_2) на прямой и обратной ветвях и соответствующие им модели диода. При этом для прямой ветви $u_{пр} = i_{пр} r_{диф,пр} + U_0$, а для обратной $i_{обр} = u_{обр} / r_{диф,обр} + I_0$.

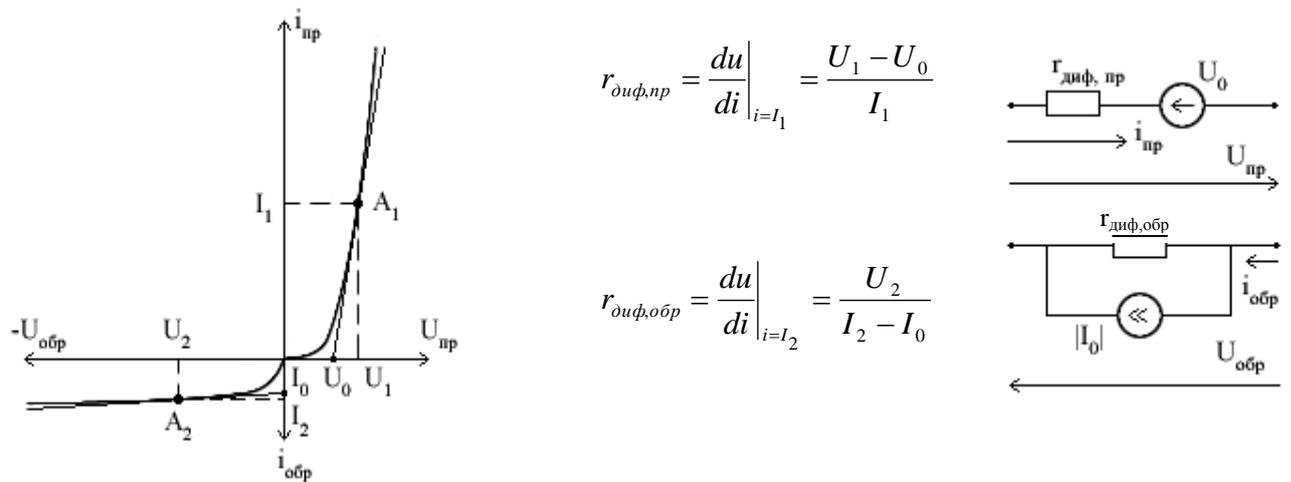


Рис.1.1.

Простейшая схема с полупроводниковым диодом приведена на рис.1.2. Здесь e источник ЭДС с внутренним сопротивлением R_e (на схеме не показано). С помощью этой схемы можно экспериментально получить ВАХ диода, подключив в качестве e источник постоянной ЭДС E .

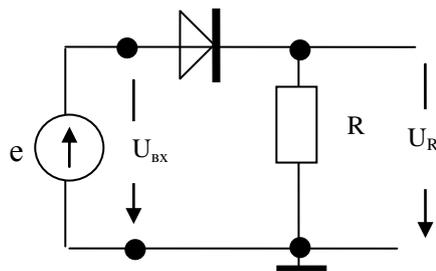


Рис.1.2.

Изменяя величину и полярность E при заданной величине резистора, можно измерить напряжение на резисторе, а ток и напряжение на диоде рассчитать по формулам: $U_D = U_{вх} - U_R$, $I_D = U_R / R$.

При исследовании работы диода в простейшей схеме выпрямителя на вход подается гармоническое напряжение $e(t) = E_m \cos \omega_0 t$, где E_m – амплитуда. При положительной полуволне этого напряжения диод открыт, на нем и на резисторе возникает положительная полуволна напряжения. При отрицательной полуволне входного напряжения диод закрыт, ток равен нулю, и напряжение на резисторе также равно нулю. Таким образом, на нагрузке напряжение имеет характер усеченных косинусоидальных импульсов, среднее значение которых за период определяет величину выпрямленного напряжения $U_{R,0}$. Для кусочно-линейной модели при соблюдении неравенств

$$r_{пр,диф} \ll R, \quad U_{m,вх} \gg U_0 \tag{1.4}$$

эта величина примерно равна $U_{m,вх} / \pi$.

При подключении параллельно резистору R емкости C в схеме имеют место процессы заряда емкости через открытый диод с малым сопротивлением и ее разряда через резистор R при закрытом диоде. Диод открыт, когда

$u_D(t) = u_{ex}(t) - u_R(t) > U_0$. Если дифференциальное сопротивление диода в открытом состоянии много меньше сопротивления резистора, что в выпрямительных схемах обычно выполняется, время заряда емкости значительно меньше времени ее разряда. На рис.1.3 показаны осциллограммы, соответствующие работе диода в выпрямителе с резистивно-емкостной нагрузкой в установившемся режиме.

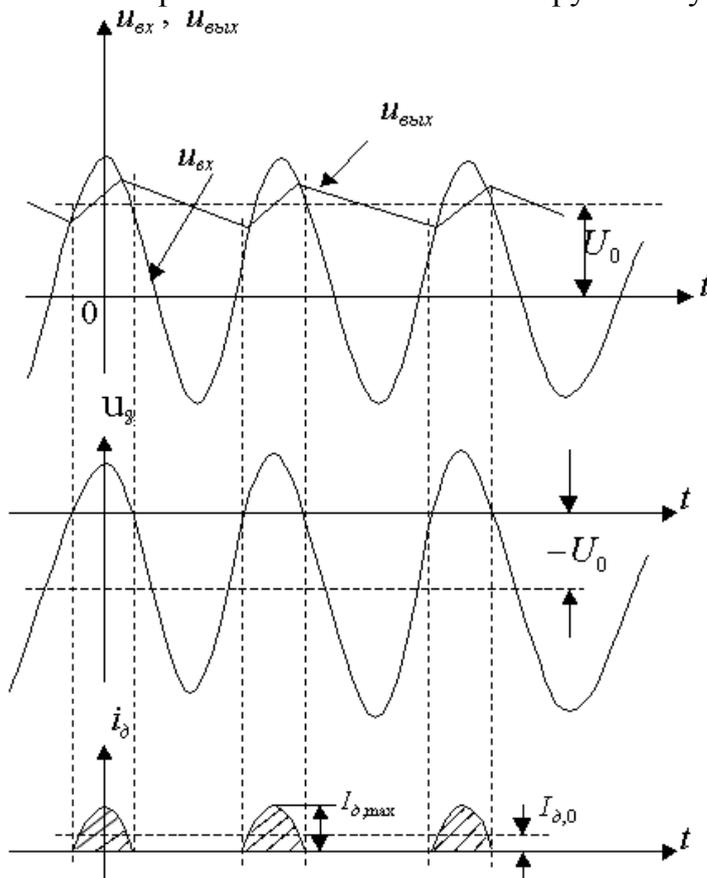


Рис.1.3

Величина выпрямленного напряжения при выполнении неравенств (1.4) близка к амплитуде входного напряжения $U_{m,ВХ}$ и амплитуда пульсаций определяется здесь величинами емкости C и резистора R . Чем больше постоянная времени RC , тем меньше амплитуда пульсаций. Емкость и сопротивление в схеме выполняют роль фильтра нижних частот, пропускающего только постоянную составляющую тока диода.

Предварительная подготовка.

1. Построить графики ВАХ идеального $p-n$ -перехода на кремниевой основе, приняв $T=293^{\circ}\text{K}$, $\varphi_T = 0,025\text{В}$, $I_S=50$ мкА, $m=2,5$, а также ВАХ диода Д20 (см. Приложение 1). Определить сопротивление r_{δ} диода.

2. Определить параметры линейной модели диода для $U_{пр}=1\text{В}$, $U_{обр}=10\text{В}$.

3. Выбрать величину сопротивления нагрузки R , подключаемой последовательно с диодом из условия $R \geq 10r_{\delta,пр}$. Построить внешнюю ВАХ схемы $I(U_{ex})$.

4. Построить осциллограммы тока через диод и сопротивление R , а также напряжений на них, при подаче гармонического сигнала с амплитудой 5В и нуле-

вом постоянном смещении. Определить амплитуды импульсов тока и напряжений в схеме рис.1.2 при положительной и отрицательной полярностях сигнала. Определить уровень выпрямленного напряжения.

5. Определить постоянные времени цепей заряда и разряда. Построить примерные осциллограммы тока и напряжений в схеме, если частота гармонического воздействия составляет 500 Гц, а емкость C принимает значения 1, 10 и 50 мкФ.

Задание на эксперимент.

1. Собрать схему рис.1.2. В качестве источника E подключить регулируемый источник постоянного напряжения (-6...+6) В на блоке источников СЛАУ. В качестве нагрузки подключить резистор $R=20$ Ом.

2. Изменяя величину положительного напряжения источника E , измерять напряжения $U_{вх}$ и U_R и записывать их в таблицу. Заполнить расчетные столбцы таблицы и построить график прямой ветви ВАХ.

$U_{вх}, В$	$U_R, В$	$U_D=U_{вх}-U_R, В$	$I_D=U_R/R, мА$	$I_D, мА$ (теорет)

3. Вместо резистора с номиналом 20 Ом включить резистор с номиналом 1 Мом. В качестве ЭДС E подключить источник -6,3 В. Измерить напряжение на входе схемы и на резисторе. Заполнить строку таблицы. Повторить эксперимент для источника -12 В. Построить график обратной ветви ВАХ диода. Определить параметры линейной модели прямого и обратного участков ВАХ диода.

4. Исследовать работу полупроводникового диода при переменном напряжении на входе. $R=20$ Ом.

Подключить ко входу схемы генератор Г6-46, установив гармонический сигнал с амплитудой 5 В и частотой 500 Гц. Входное напряжение схемы подать на первый вход осциллографа, а выходное – на второй. Подключить также к выходу вольтметр постоянного напряжения. Зарисовать осциллограммы напряжений, измерить и записать их амплитуды. Измерить и записать постоянное напряжение $U_{R,0}$.

5. Параллельно резистору R подключить одну из емкостей $C3, C4, C5$ из блока 01: $C3=1$ мкФ, $C4=10$ мкФ, $C5=50$ мкФ.

В каждом опыте вольтметром измерить и записать постоянное напряжение на выходе схемы $U_{R,0}$. Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений с учетом измеренного постоянного напряжения. Определить амплитуду пульсаций выходного напряжения.

Повторить эксперимент для $R=100$ Ом.

6. Оформить отчет по работе.

Контрольные вопросы.

1. В чем заключается сходство и различие ВАХ диода и идеального $p-n$ -перехода?
2. Как с помощью ВАХ $p-n$ -перехода и ВАХ диода определить r_{σ} ?
3. Как определяется статическое и дифференциальное сопротивление диода?

4. Показать зависимость статического сопротивления диода от протекающего через него тока.
5. Показать зависимость динамического сопротивления диода от протекающего через него тока.
6. Кусочно-линейные модели диода. Параметры.
7. Понятие «идеального диода».
8. Назначение емкости в простейшей схеме выпрямителя.
9. Выбор сопротивления и емкости нагрузки в простейшем выпрямителе.

Работа №2.

Усилительный каскад на биполярном транзисторе с общим эмиттером (ОЭ)

Цель работы: построение динамических проходных характеристик (ДПХ) биполярного транзистора с общим эмиттером. Определение режима работы транзистора для линейного усиления, определение основных внутренних и внешних параметров транзистора с ОЭ и усилительного каскада.

Краткие теоретические сведения.

Простейшая схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОЭ представлена на рис.2.1

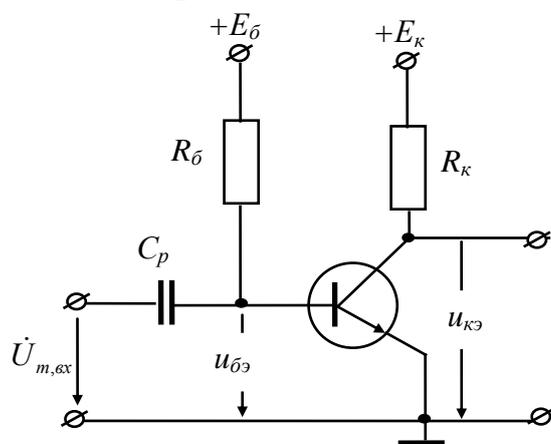


Рис.2.1

Для задания правильного режима работы транзистора в усилителе служит так называемая динамическая проходная характеристика (ДПХ), связывающая выходной ток с входным напряжением транзистора $i_k(u_{бэ})$. Если нагрузкой транзистора является активное сопротивление, то в качестве ДПХ можно использовать и зависимость выходного напряжения от входного $u_{кэ}(u_{бэ})$.

Если для данного транзистора имеются справочные данные о входных и выходных ВАХ (см. рис.2.2), то ДПХ можно построить графически, используя уравнение, составленное для выходного контура схемы по 2-му закону Кирхгофа:

$$E_k = i_k R_k + u_{кэ}. \quad (2.1)$$

Это линейное уравнение может быть графически отражено на выходных характеристиках транзистора с ОЭ (утолщенная линия на рис.2.2,б).

Точки пересечения семейства выходных ВАХ транзистора с линией нагрузки дают совокупность мгновенных значений выходных тока и напряжения в данном каскаде. Для построения ДПХ удобно составить таблицу, в которой записываются координаты точек пересечения линии нагрузки и выходных ВАХ транзистора, по которым легко построить графики ДПХ. Примерный вид этих графиков показан на рис.2.3,а и 2.3,б.

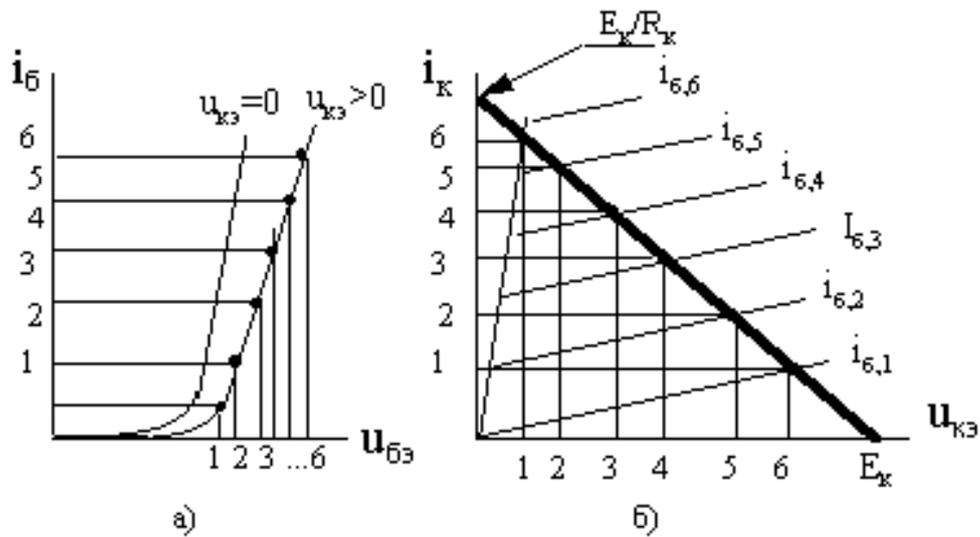


Рис.2.2

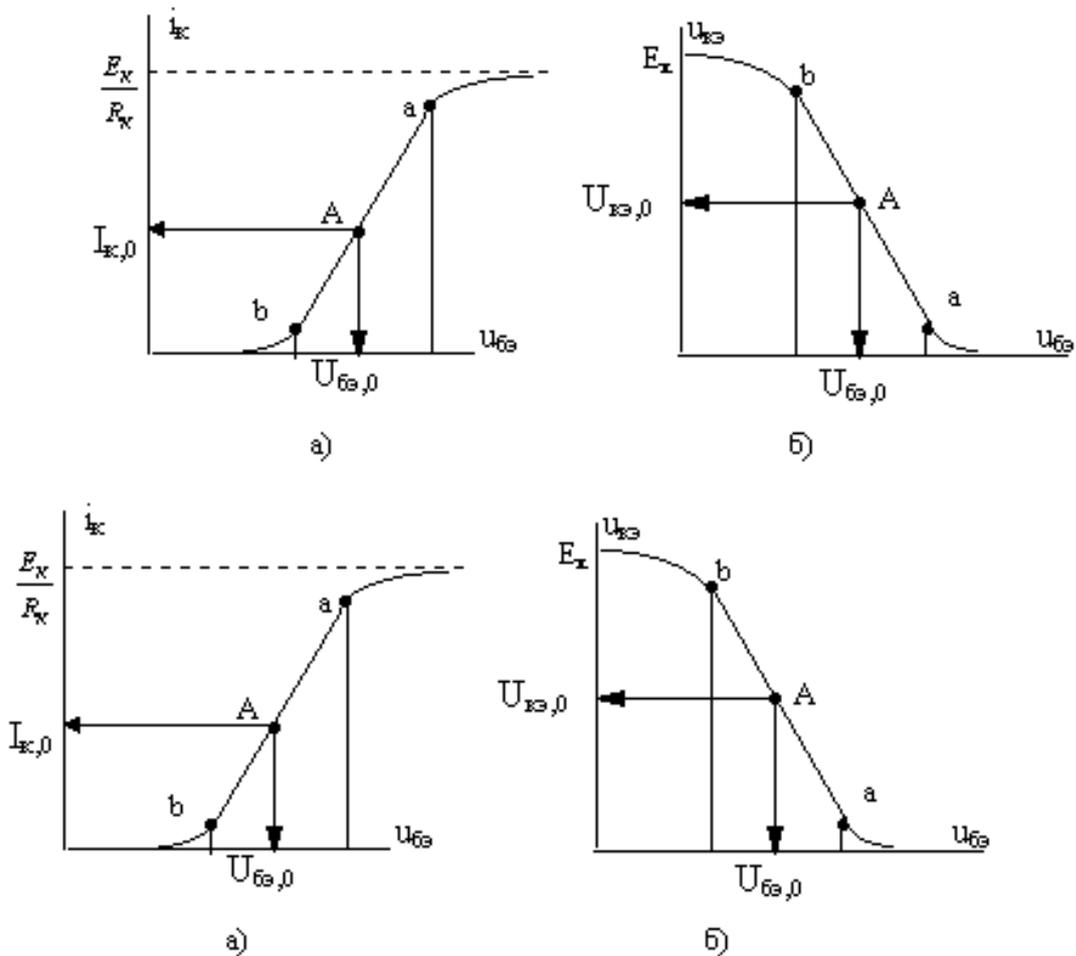


Рис.2.3

Для определения режима работы транзистора на участке ДПХ с наибольшей крутизной отмечается линейный участок (точки a , b), определяющий рабочую точку «А» и диапазон изменения входных и выходных переменных: $\Delta u_{бэ} = U_{бэ,a} - U_{бэ,b}$ и $\Delta u_{кэ} = U_{кэ,a} - U_{кэ,b}$. Рабочая точка характеризуется значениями $I_{к,0}$, $U_{бэ,0}$ и соответствующими им $U_{кэ,0}$ и $I_{б,0}$. Величина $U_{бэ,0}$ обычно называется напряжением смещения и обозначается $E_{см}$. При усилении знакопеременных сигналов, например гармонических колебаний, рабочая точка выбирается

на середине линейного участка, а амплитуда входного сигнала не должна быть больше, чем $\Delta u_{\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}}/2$. Величина $S = \Delta i_{\bar{\kappa}}/\Delta u_{\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}}|_A$ называется крутизной ДПХ в рабочей точке.

При гармоническом сигнале на входе $U_{m,\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}} \cos \omega t$ амплитуда коллекторного тока $I_{m,\bar{\kappa}}$ пропорциональна наклону (крутизне S) линейного участка ДПХ и амплитуде входного сигнала $U_{m,\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}}$, то есть $I_{m,\bar{\kappa}} = S U_{m,\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}}$, а амплитуда изменения напряжения на резисторе $R_{\bar{\kappa}}$ равна $I_{m,\bar{\kappa}} R_{\bar{\kappa}}$. При этом мгновенное напряжение на коллекторе определяется как

$$u_{\bar{\kappa}\bar{\varepsilon}} = E_{\bar{\kappa}} - I_{m,\bar{\kappa}} R_{\bar{\kappa}} \cos(\omega t), \quad (2.4)$$

а переменная составляющая выходного напряжения равна:

$$u_{\text{вых}}(t) = -I_{m,\bar{\kappa}} R_{\bar{\kappa}} \cos(\omega t),$$

откуда амплитуда выходного напряжения определяется как

$$U_{m,\text{вых}} = U_{m,\text{вх}} S R_{\bar{\kappa}},$$

фаза же выходного напряжения отличается от фазы входного напряжения на 180° .

Таким образом, коэффициент передачи по напряжению каскада, определенный из графического анализа, равен

$$K = -S R_{\bar{\kappa}}. \quad (2.3)$$

Для определения его основных параметров и характеристик в режиме линейного усиления проводится анализ схемы по переменному току. Транзистор заменяется активным линейным четырехполюсником с внутренними h -параметрами. Для определения h -параметров используется система уравнения:

$$\begin{cases} \Delta u_{\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}} = h_{11,\bar{\varepsilon}} \Delta i_{\bar{\sigma}} + h_{12,\bar{\varepsilon}} \Delta u_{\bar{\kappa}\bar{\varepsilon}} \\ \Delta i_{\bar{\kappa}} = h_{21,\bar{\varepsilon}} \Delta i_{\bar{\sigma}} + h_{22,\bar{\varepsilon}} \Delta u_{\bar{\kappa}\bar{\varepsilon}} \end{cases} \quad (2.4)$$

Параметры системы определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} h_{11,\bar{\varepsilon}} &= \Delta u_{\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}} / \Delta i_{\bar{\sigma}} && \text{при } \Delta u_{\bar{\kappa}\bar{\varepsilon}} = 0, \\ h_{12,\bar{\varepsilon}} &= \Delta u_{\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}} / \Delta u_{\bar{\kappa}\bar{\varepsilon}} && \text{при } \Delta i_{\bar{\sigma}} = 0, \\ h_{21,\bar{\varepsilon}} &= \Delta i_{\bar{\kappa}} / \Delta i_{\bar{\sigma}} && \text{при } \Delta u_{\bar{\kappa}\bar{\varepsilon}} = 0, \\ h_{22,\bar{\varepsilon}} &= \Delta i_{\bar{\kappa}} / \Delta u_{\bar{\kappa}\bar{\varepsilon}} && \text{при } \Delta i_{\bar{\sigma}} = 0. \end{aligned}$$

Транзисторы с ОЭ характеризуются сравнительно слабой зависимостью входных характеристик от напряжения коллектор-эмиттер, поэтому часто принимают $h_{12,\bar{\varepsilon}} \approx 0$.

В соответствии с уравнениями (2.4) транзистор, работающий в линейном режиме, заменяется эквивалентной схемой для амплитуд токов и напряжений (выделенный пунктиром участок на рис.2.4), где приняты обозначения: $r_{\bar{\sigma}\bar{\varepsilon}} = h_{11,\bar{\varepsilon}}$ - входное сопротивление транзистора с ОЭ, $\beta = h_{21,\bar{\varepsilon}}$ - коэффициент передачи базового тока в коллекторную цепь, $r_{\bar{\kappa}\bar{\varepsilon}} = 1/h_{22,\bar{\varepsilon}}$ - выходное сопротивление транзистора с ОЭ.

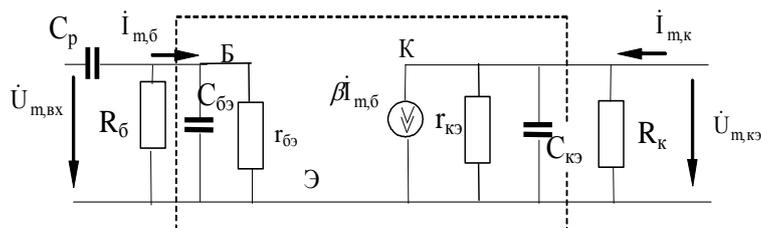


Рис.2.4

Полная эквивалентная схема на рис.2.4 включает в себя внешние элементы схемы, а также входную и выходную емкости транзистора, отражающие инерционные свойства транзистора. Источники питания здесь не показаны, так как из-за малых их внутренних сопротивлений, они не влияют на протекание переменных токов.

В области средних частот (полоса частот усилителя) влиянием емкостей транзистора и емкостей внешней схемы пренебрегают. Коэффициент усиления по напряжению в этой полосе частот определится как

$$K_{оэ} = U_{m,кэ} / U_{m,вх} = -\beta(r_{кэ} \parallel R_k) / (r_{бэ} \parallel R_b).$$

Здесь и далее знак « \parallel » означает параллельное соединений сопротивлений.

Учитывая часто выполняющиеся неравенства $R_b \gg r_{бэ}$, $R_k \ll r_{кэ}$, получаем

$$K_{оэ} \approx -\beta R_k / r_{бэ} = -SR_k,$$

что соответствует выражению для коэффициента усиления, полученному из графического анализа.

Собственные входное и выходное сопротивления каскада в области средних частот будут равны соответственно

$$R_{вх,0} = r_{бэ} \parallel R_b, \quad R_{вых,0} = R_k \parallel r_{кэ} \approx R_k.$$

В области нижних частот коэффициент усиления будет уменьшаться из-за наличия разделительной емкости, сопротивление которой $Z_C(\omega) = 1/\omega C_p$ на низких частотах увеличивается (вплоть до бесконечности на постоянном токе), что влечет за собой уменьшение напряжения на базе транзистора. Частота, на которой коэффициент передачи уменьшается в $\sqrt{2}$ раз, называется граничной частотой. Нижняя граничная частота определяется как $f_{гр,н} = 1/2\pi C_p (R_{вх} + R_{ист})$, $R_{ист}$ – выходное сопротивление источника входного сигнала.

Граничная частота в области верхних частот определяется постоянными времени цепочек из параллельно соединенных емкостей и сопротивлений: $\tau_{в,вх} = C_{бэ} R_{вх}$ и $\tau_{в,вых} = C_{кэ} R_{вых}$ причем $C_{бэ} \approx K_0 C_k$, $C_{бэ} \approx C_k$, C_k – емкость база-коллектор, обычно приводимая в справочниках. Сама же верхняя граничная частота определяется минимальным значением из $1/(2\pi \tau_{в,вх})$ и $1/(2\pi \tau_{в,вых})$.

Предварительная подготовка к работе.

1. Построить ДПХ каскада на транзисторе КТ315 для $E_k = 6,3 В$, $R_k = 470 Ом$. (Характеристики транзистора даны в приложении).
2. Выбрать рабочую точку транзистора и определить максимальную амплитуду входного сигнала для обеспечения линейного режима усиления.
3. В выбранной рабочей точке рассчитать h -параметры транзистора. Построить эквивалентную схему усилителя. Определить коэффициенты усиления по напряжению и току.
4. Графически, а затем по эквивалентной схеме, определить коэффициенты передачи усилителя по напряжению и току. Сравнить полученные результаты.
5. По эквивалентной схеме определить собственные входное и выходное сопротивления усилителя в области средних частот, граничные частоты, если $C_p = 0,1 мкФ$, $C_k = 7 пФ$, входная емкость осциллографа составляет 50 пФ.

Задание на эксперимент..

1.Собрать схему усилителя (рис.2.1), используя блоки 01,05 СЛАУ. Питание цепи коллектора осуществляется от источника постоянного напряжения +6,3 В, питание цепи базы - от источника регулируемого напряжения (-6V... +6V).

Параметры элементов схемы: транзистор КТ315, $R_6=R_2=6.2$ Ком, $R_K=R_4=470$ Ом, $C_p=C_2=0.1$ мкФ. (**Цифровые индексы соответствуют индексам элементов соответствующего блока СЛАУ**).

Измерить и записать точное значение напряжения E_K .

2. Изменяя постоянное напряжение смещения на базе $U_{6э}$ с помощью регулируемого источника напряжения E_6 , снять зависимость $U_{кэ}(U_{6э})$. Постоянные напряжения $U_{кэ}$ и $U_{6э}$ измерять цифровым вольтметром, который следует попеременно подключать к базе и коллектору транзистора. Примерный диапазон изменения напряжения на базе составляет (+0,4...+ 1,0) вольт. Соответствующий диапазон изменения напряжения на коллекторе составляет (E_K ...0) вольт. Отметить напряжение на базе, соответствующее моменту отпириания транзистора. Результаты измерений свести в таблицу 1:

Таблица 1

$U_{6э}, В$	$U_{кэ}, В$	$I_K=(E_K-U_{кэ})/R_K, мА$

3. Построить графики динамических проходных характеристик (ДПХ) каскада: $U_{кэ}(U_{6э})$ и $I_K(U_{6э})$. На графиках отметить рабочую точку, соответствующую линейному режиму усиления. Записать данные статического режима (параметры рабочей точки). Определить по ДПХ максимально возможную амплитуду входного сигнала $U_{m,вх,макс}$ и коэффициент усиления по напряжению. Сравнить с результатами предварительного расчета.

4. Установить выбранную рабочую точку, убедиться в том, что значение постоянного напряжения на коллекторе соответствует выбранной рабочей точке. К входным зажимам каскада подключить генератор колебаний звукового диапазона и один из каналов осциллографа. Второй канал осциллографа подключить к выходным зажимам каскада. Установить на входе гармонический сигнал с частотой $20 \div 50$ КГц и амплитудой, несколько меньшей $U_{m,вх,макс}$. Измерить амплитуду выходного сигнала. Убедиться в инвертирующем свойстве каскада с ОЭ и линейности его работы. Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений, отметить на них амплитуды. Рассчитать коэффициент усиления по напряжению. Сравнить с расчетным.

5. Поддерживая постоянной амплитуду напряжения на входе усилителя, измерять амплитуду и фазу выходного напряжения при изменении частоты входного сигнала сначала вниз от установленной ранее частоты, затем вверх. Изменение частоты производить до тех пор, пока амплитуда напряжения на выходе усилителя не упадет в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с максимальной. Записать значения нижней и верхней граничных частот. Рассчитать выходную емкость транзистора по формуле $C_{кэ} = 10^{12} / 2\pi f_{зр,в} R_K$ Пф, где $f_{зр,в}$ - граничная частота, полученная в эксперименте.

Если не удастся экспериментально определить верхнюю граничную частоту, подключить к коллектору конденсатор с емкостью 1000 пФ. Определить верхнюю граничную частоту. Емкость $C_{кэ}$ определится как $C_{кэ} = C'_{кэ} - 1000 \text{ пФ}$, где $C'_{кэ} = 10^{12} / 2\pi f'_{зр,в} R_k$.

6. Изменяя амплитуду входного сигнала от 5 мВ до $\sim 2 \dots 3 U_{m,вх,макс}$, снять и построить график амплитудной характеристики каскада $U_{m,вых}(U_{m,вх})$. Рассчитать коэффициент передачи на линейном участке амплитудной характеристики. Сравнить со значением, полученным в п.п. 3 и 4.

7 Установить $U_{m,вх} > U_{m,вх,макс}$. Зарисовать осциллограммы выходного напряжения.

8 Сместить рабочую точку в область нижнего нелинейного участка ДПХ $I_k(U_{бэ})$. Изменить амплитуду входного напряжения так, чтобы был использован весь линейный участок ДПХ. Зарисовать осциллограммы. Объяснить полученный результат.

Повторить п.9, сместив рабочую точку в область верхнего нелинейного участка ДПХ.

9. Оформить отчет.

Контрольные вопросы:

1. Объяснить назначение всех элементов каскада.
2. Что называется динамической проходной характеристикой, как ее получить графически и экспериментально?
3. Как определяется рабочая точка? Какова связь режима работы каскада с положением рабочей точки?
4. Как по ДПХ определить коэффициент усиления каскада?
5. Как экспериментально и по ДПХ построить амплитудную характеристику каскада? Какие параметры каскада она определяет?
6. Что такое нелинейные искажения усилителя? Объяснить связь положения рабочей точки и амплитуды входного сигнала с нелинейными искажениями.
7. Объяснить поведение АЧХ в области нижних частот. Какие параметры транзистора могут быть определены с помощью АЧХ в области нижних частот?
8. Объяснить поведение АЧХ каскада в области верхних частот. Какие параметры транзистора могут быть определены с помощью этой характеристики?
9. Что такое частотные искажения сигнала, как они проявляются?

Работа №3.

Усилительный каскад на биполярном транзисторе с общим коллектором

Цель работы: Исследование свойств усилителя при включении биполярного транзистора с общим коллектором (каскад ОК). Сравнительный анализ с каскадом ОЭ.

Краткие теоретические сведения.

В каскаде с общим коллектором (ОК) нагрузка подключается между эмиттером транзистора и земляной шиной, при этом сопротивление, определяющее режим выходной цепи по постоянному току, ставится в эмиттерную цепь. Коллектор непосредственно подсоединяется к плюсу источника питания. На рис.3.1 изображена принципиальная схема каскада с ОК, а на рис.3.2 – схема для переменных токов.

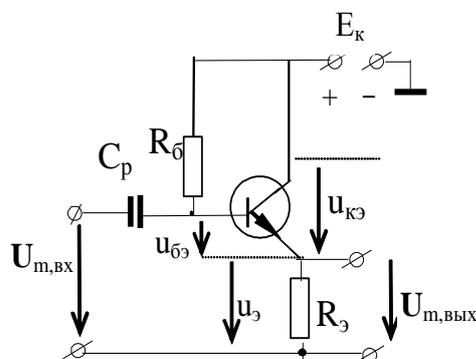


Рис.3.1

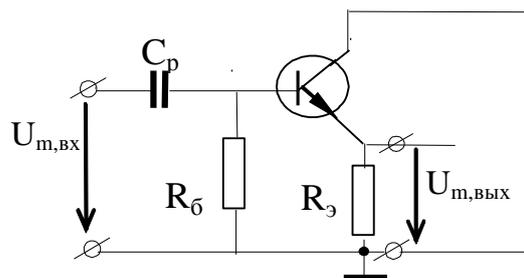


Рис.3.2

При достаточно малом внутреннем сопротивлении источника питания можно считать, что коллектор транзистора по переменному току практически имеет потенциал земли, т.е. транзистор для переменного тока включен по схеме с общим коллектором. Это и отражено на схеме каскада для переменных токов, представленной на рис.3.2.

Транзистор с ОК может быть представлен в виде линейного активного четырехполюсника в окрестности рабочей точки через h_k -параметры, соответствующие включению его с общим коллектором (рис. 3.3).

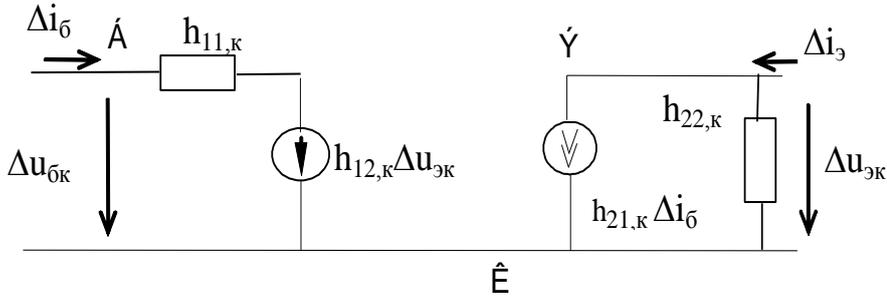


Рис.3.3

Уравнения, описывающие транзистор с ОК с помощью его собственных h -параметров, имеют вид:

$$\begin{cases} \Delta u_{\delta k} = h_{11,\delta} \Delta i_{\delta} + h_{12,\delta} \Delta u_{\varepsilon\delta} \\ \Delta i_{\varepsilon} = h_{21,\delta} \Delta i_{\delta} + h_{22,\delta} \Delta u_{\varepsilon\delta} \end{cases}, \quad (3.1)$$

На рис.3.4 показана видоизмененная эквивалентная схема включения транзистора с ОК, где явно просматривается транзистор с ОЭ.

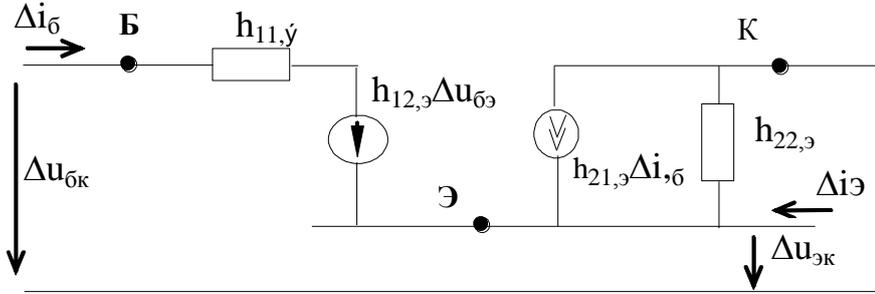


Рис.3.4

Соответствующие параметры транзистора с ОБ можно легко рассчитать, если известны h_{ε} -параметры транзистора с ОЭ. Осуществляя опыты ХХ и КЗ, получаем для $\Delta u_{к\varepsilon} = 0$:

$$h_{11,\delta} = \frac{\Delta u_{\delta k}}{\Delta i_{\delta}} = h_{11,\varepsilon} = r_{\delta\varepsilon},$$

$$h_{21,\delta} = \frac{\Delta i_{\varepsilon}}{\Delta i_{\delta}} = \frac{(\Delta i_{\kappa} + h_{21,\varepsilon} \Delta i_{\delta})}{\Delta i_{\delta}} = 1 + \beta,$$

для $\Delta i_{\delta} = 0$:

$$h_{12,\delta} = \frac{\Delta u_{\delta\varepsilon}}{\Delta u_{\kappa\varepsilon}} = \frac{(-h_{12,\varepsilon} \Delta u_{\kappa\varepsilon} + \Delta u_{\kappa\varepsilon})}{\Delta u_{\kappa\varepsilon}} = 1 - h_{12,\varepsilon} \cong 1,$$

$$h_{22,\delta} = \frac{\Delta i_{\varepsilon}}{\Delta u_{\varepsilon k}} = h_{22,\varepsilon}.$$

Для определения рабочей точки транзистора следует провести графическое или экспериментальное построение его ДПХ $i_{\varepsilon}(u_{\delta})$. Предполагается известной ДПХ транзистора с ОЭ.

В активном режиме работы транзистора всегда выполняется неравенство $i_{\kappa} \gg i_{\delta}$, а ток эмиттера представляет собой сумму коллекторного и базового токов,

поэтому можно считать $i_э \approx i_к$, и при равных значениях $E_к$, $R_к$ и $R_э$ состояние транзистора графически можно представить той же линией нагрузки, что и для каскада с ОЭ. Поскольку напряжение

$$u_б = u_{бэ} + u_{эк} = u_{бэ} + i_э R_э,$$

то для построения ДПХ каскада с ОК достаточно к каждой абсциссе точек графика ДПХ каскада с ОЭ добавить величину, равную $i_э R_э$.

Смещение, максимальные амплитуды входного и выходного сигналов для данного каскада примерно равны половине напряжения источника питания, а коэффициент передачи по напряжению каскада с ОК немного меньше единицы, что позволяет назвать данный усилительный каскад повторителем напряжения. Обычно такой каскад называют эмиттерным повторителем.

Эквивалентная схема усилительного каскада с ОК в области средних частот с учетом выходного сопротивления источника сигнала и нагрузки

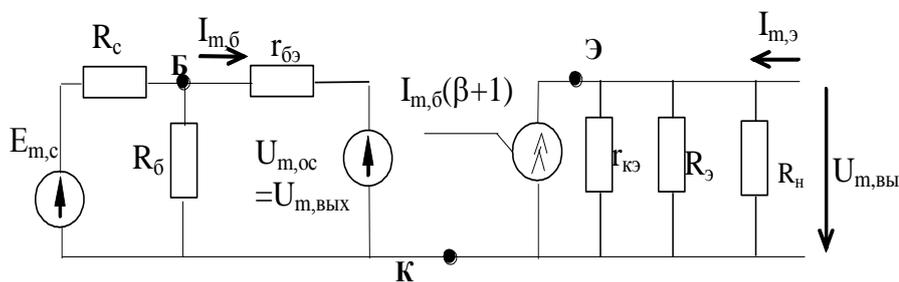


Рис.3.5

представлена в виде рис.3.5, где транзистор представлен своими $h_к$ -параметрами в принятых ранее обозначениях. Величина $h_{12,б}=1$ обуславливает глубокую (100%-ную) отрицательную обратную связь, что отражено на схеме источником напряжения с амплитудой $U_{m,вык}$ направленного встречно по отношению к источнику входного сигнала усилителя.

Внешние параметры каскада определяются аналогично тому, как это делалось для каскада с ОЭ, но с учетом отрицательной обратной связи. Из схемы рис.3.5 получаем:

- коэффициент передачи по напряжению в области средних частот

$$K_{OK} = \frac{U_{m,вык}}{E_{m,c}} = \frac{(\beta + 1)(R_э \parallel R_н)}{R_c + r_{бэ} + (\beta + 1)(R_э \parallel R_н)}.$$

Или с учетом того, что обычно $\beta \gg 1$, $R_c \ll r_{бэ}$, $R_н \gg R_э$

$$K_{OK} = \beta R_э / r_{бэ} (1 + SR_э) \approx SR_э / (1 + SR_э).$$

- входное сопротивление

$$R_{вх,OK} = (R_б \parallel r_{бэ}) + (\beta + 1)(r_{кэ} \parallel R_э \parallel R_н).$$

Или

$$R_{вх,OK} \approx r_{бэ} (1 + SR_э).$$

- выходное сопротивление

$$R_{вых,OK} = \frac{R_{вых,ОЭ}}{1 + K_{ОЭ}} = \frac{(r_{кэ} \parallel R_э)}{1 + S(r_{кэ} \parallel R_э)} \cong \frac{1}{S}. \quad (3.6)$$

Таким образом, входное сопротивление каскада с общим коллектором много больше входного сопротивления каскада с общим эмиттером. Выходное же сопротивление каскада с ОК много меньше входного сопротивления каскада с ОЭ.

Благодаря большому входному и малому выходному сопротивлениям каскад с ОК имеет широкую полосу пропускания (примерно в SR_3 раз большую, чем каскад с ОЭ).

Предварительная подготовка к работе.

1. Нарисовать принципиальную схему каскада с ОК.
2. Используя данные работы №2 построить ДПХ каскада с ОК на транзисторе КТ315 для $E_k=6,3$ В, $R_3=110$ Ом.
3. Выбрать рабочую точку транзистора и определить максимальную амплитуду входного сигнала для обеспечения линейного режима работы транзистора.
4. По ДПХ определить коэффициент передачи каскада ОК по напряжению и току. Определить коэффициент передачи каскада с ОЭ, если бы R_k равнялось бы 110 Ом. Сравнить $K_{ок}$ и $K_{оэ}$.
5. В выбранной рабочей точке определить h_k -параметры транзистора через h_3 -параметры транзистора с ОЭ.
6. По эквивалентной схеме определить коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления транзистора и усилителя, нижнюю и верхнюю граничную частоты.

Выполнение работы.

1. Собрать схему рис.3.6.

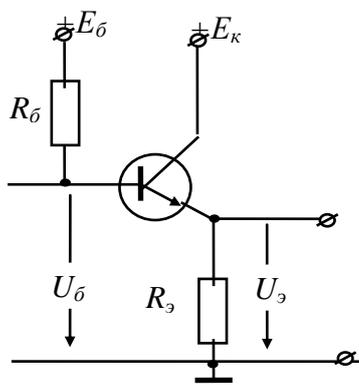


Рис.3.6

Параметры элементов схемы: транзистор КТ315, $R_6=R_2=6.2$ Ком, $R_3= R_5+ R_6=110$ Ом.

2. Изменяя постоянное напряжение на базе U_6 с помощью регулируемого источника напряжения E_6 , снять ДПХ каскада в виде зависимости $U_3(U_6)$. Примерный диапазон изменения напряжений на базе и эмиттере составляет $0...+E_k$. Если не удастся измерить весь диапазон ДПХ от отсечки до насыщения, дополнить этот диапазон графически.

3. Построить график ДПХ каскада, отметить рабочую точку, соответствующую линейному режиму. Записать данные статического режима (параметры рабо-

чей точки). Определить по ДПХ максимально возможную амплитуду входного сигнала $U_{т,вх,макс}$, рассчитать коэффициент усиления по напряжению.

4. Установить выбранную рабочую точку, убедиться в том, что значения постоянных напряжений на базе и эмиттере соответствуют выбранной рабочей точке. К входным зажимам каскада через емкость $C2=0,1$ мкФ подключить генератор Г6-46 и один из каналов осциллографа. Второй канал осциллографа подключить к выходным зажимам каскада. Установить на входе гармонический сигнал с частотой 50 кГц и амплитудой, несколько меньшей $U_{т,вх,макс}$. Измерить амплитуду выходного сигнала, рассчитать коэффициент усиления по напряжению. Сравнить с расчетным. Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений с указанием на них соответствующих амплитуд.

5. Изменяя частоту входного сигнала построить АЧХ и определить граничные частоты. По значениям граничных частот определить входное и выходное сопротивление транзистора с ОК. Провести сравнительный анализ с аналогичными параметрами каскада с ОЭ.

6. Оформить отчет.

Контрольные вопросы:

1. Объяснить назначение всех элементов каскада с ОК .
2. Как определяется рабочая точка каскада с ОК ?
3. Какова связь внутренних h-параметров транзистора, включенного по схемам ОЭ и ОК?
4. Какова связь ДПХ каскада с ОЭ и каскада с ОК ?
5. Как экспериментально и по ДПХ построить амплитудную характеристику каскада? Какие параметры каскада она определяет?
6. Коэффициенты усиления каскада по напряжению и току.
7. Входное сопротивление каскада ОК.
8. Выходное сопротивление каскада ОК.
9. Применение каскада ОК.
10. Объяснить различия в полосах пропускания каскадов с ОЭ и ОК.

Работа №4.

Усилительный каскад на биполярном транзисторе с общей базой

Цель работы: Исследование усилительных свойств биполярного транзистора с общей базой. Сравнительный анализ с каскадами ОЭ и ОК.

Краткие теоретические сведения.

В усилительном каскаде с общей базой (ОБ) общим (нулевым) электродом транзистора для переменных составляющих токов и напряжений является база, т.е. источник входного сигнала действует между эмиттером и базой, а нагрузка включается между коллектором и базой (см. рис.4.1).

Принципиальная схема каскада только для переменных составляющих токов и напряжений представлена на рис.4.2 .

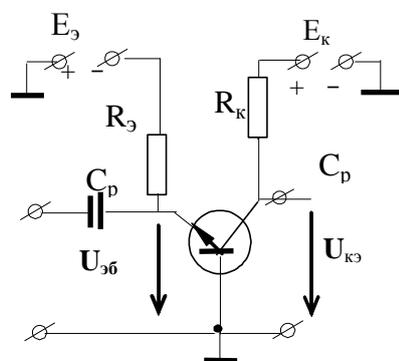


Рис.4.1

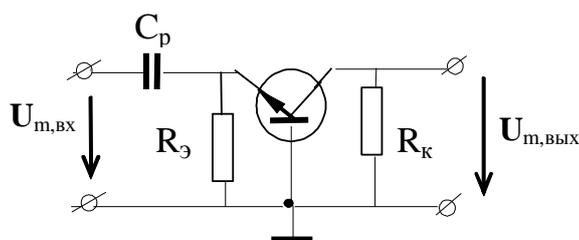


Рис.4.2

Для построения линейной схемы замещения транзистора с ОБ можно использовать линейную модель в виде четырехполюсника с h_{δ} -параметрами.. Система уравнений при этом имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta u_{\text{эб}} &= h_{11,\text{Б}} \Delta i_{\text{э}} + h_{12,\text{Б}} \Delta u_{\text{кб}}, \\ \Delta i_{\text{к}} &= h_{12,\text{Б}} \Delta i_{\text{э}} + h_{22,\text{Б}} \Delta u_{\text{кб}}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

На рис.4.3 показана схема замещения транзистора ОБ, позволяющая выразить h_{δ} -параметры через h_{γ} -параметры.

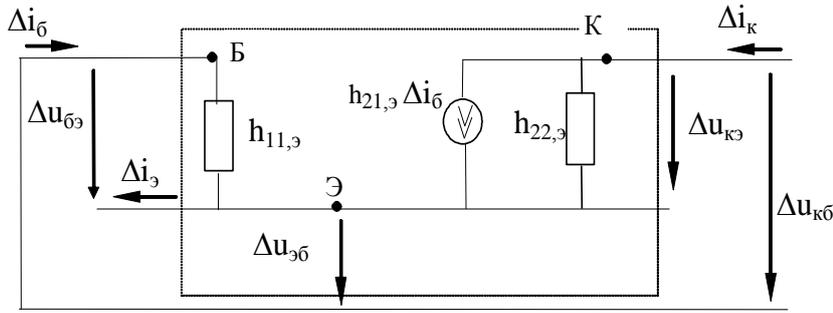


Рис.4.3

С помощью опытов холостого хода на входе ($\Delta i_э=0$) и короткого замыкания на выходе ($\Delta u_{кэ}=0$), получают следующие соотношения:

$$h_{11,б} = \frac{\Delta u_{эб}}{\Delta i_э} = \frac{h_{11,э}}{1 + h_{21,э} - h_{22,э} h_{11,э}} \approx \frac{h_{11,э}}{h_{21,э} + 1},$$

$$h_{12,б} = \frac{\Delta u_{эб}}{\Delta u_{кб}} = \frac{\Delta u_{эб}}{\frac{h_{21,э} \Delta i_б}{h_{22,э}} + \Delta u_{эб}} = \frac{1}{1 + \frac{h_{21,э}}{h_{11,э} h_{22,э}}},$$

$$h_{21,б} = h_{21,э} / (h_{21,э} + 1) = \alpha,$$

$$h_{22,б} = \frac{\Delta i_к}{\Delta u_{кб}} \approx \frac{h_{22,э}}{(h_{21,э} + h_{11,э} h_{22,э})}.$$

Из этих соотношений видно, что входное сопротивление транзистора ОБ в $\sim \beta$ раз меньше входного сопротивления транзистора с ОЭ, а выходное сопротивление, напротив, значительно больше. Параметр обратной связи еще меньше соответствующего параметра транзистора с ОЭ; коэффициент передачи по току равен $\alpha \approx 1$, что позволяет называть транзистор с общей базой токовым повторителем. Благодаря высокому выходному сопротивлению транзистор с ОБ используют в схемах генераторов (источников) стабильного тока.

Эквивалентная схема усилителя с ОБ в области средних частот представлена на рис.4.4.

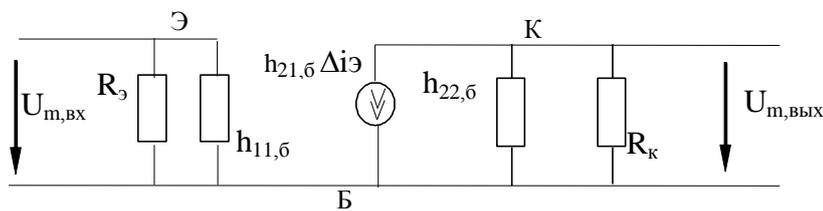


Рис.4.4

Учитывая неравенства $h_{11,б} \ll R_э$, $R_к \ll h_{22,б}$, получаем следующее выражение для коэффициента усиления по напряжению:

$$K_{макс} = \frac{h_{21,б} R_к}{h_{11,б}} = \frac{\alpha(1 + \beta)}{r_{бэ}} R_к \approx \beta R_к, \quad (4.2)$$

где S – крутизна ДПХ транзистора с ОБ (и ОЭ) в рабочей точке. Фаза выходного напряжения здесь совпадает с фазой входного напряжения. Рабочая точка в этой схеме определяется теми же значениями токов и напряжений, что и в схеме с ОЭ, поскольку в обеих схемах входной переменной является напряжение промежутка эмиттер-база, а выходной – ток коллектора.

Входное сопротивление каскада с ОБ определяется параметром $h_{11,б}$, а выходное – сопротивлением R_k .

Что касается полосы частот усилителя, то она зависит от постоянных времени каскада в области низких и высоких частот. Поскольку входное сопротивление здесь меньше входного сопротивления каскада с ОЭ, то будет выше нижняя граничная частота. Верхняя граничная частота здесь примерно такая же, как в каскаде с ОЭ.

Предварительная подготовка к работе.

1. Нарисовать принципиальную схему каскада с ОБ.
2. Построить ДПХ каскада на транзисторе КТ315 для $E_k = 6,3$ В, $R_k = 470$ Ом, выбрать рабочую точку.
3. Определить коэффициенты передачи по напряжению и току.
4. Определить $h_{б}$ -параметры транзистора с ОБ через известные h -параметры транзистора с ОЭ.
5. По эквивалентной схеме определить коэффициент усиления по напряжению и току, входное и выходное сопротивления транзистора и усилителя.
6. Рассчитать максимальную амплитуду входного сигнала $U_{m,ex,max}$ с учетом добавочного сопротивления $R_{доб} = 510$ Ом, включаемого последовательно с источником сигнала.

Выполнение работы.

1. Собрать схему рис.4.5

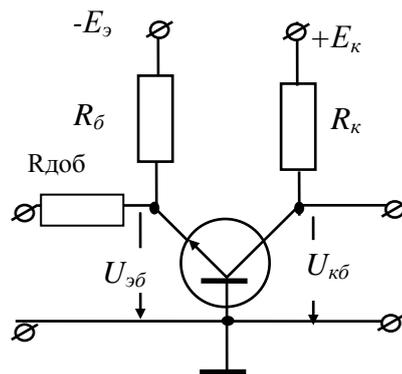


Рис.4.5

Параметры элементов схемы: транзистор КТ315, $R_k = R_4 = 470$ Ом, $R_{доб} = 510$ Ом.

2. Снять ДПХ. Выбрать и установить рабочую точку транзистора для работы каскада в линейном режиме.

3. Подключить через разделительный конденсатор $C_p = 0,068$ мкФ (взять из магазина емкостей) к входу каскада генератор Г6-46 в режиме гармонических ко-

лебаний с частотой 50 КГц и амплитудой $U_{m,ex} \leq U_{m,ex,max}$. Убедиться в том, что каскад работает в линейном режиме. Зарисовать осциллограммы входного напряжения, напряжения на промежутке эмиттер-база и выходного напряжения, отметив их амплитуды. Определить амплитуду коллекторного тока.

Определить собственный коэффициент передачи каскада по напряжению $K_{об} = \frac{U_{m,вых}}{U_{m,эб}}$. По измеренным амплитудам $U_{m,ex}$ и $U_{m,эб}$ рассчитать входное сопротивление каскада с ОБ.

4. Изменяя частоту входного сигнала снять и построить АЧХ каскада, определить граничные частоты. Рассчитать входное сопротивление и выходную емкость схемы.

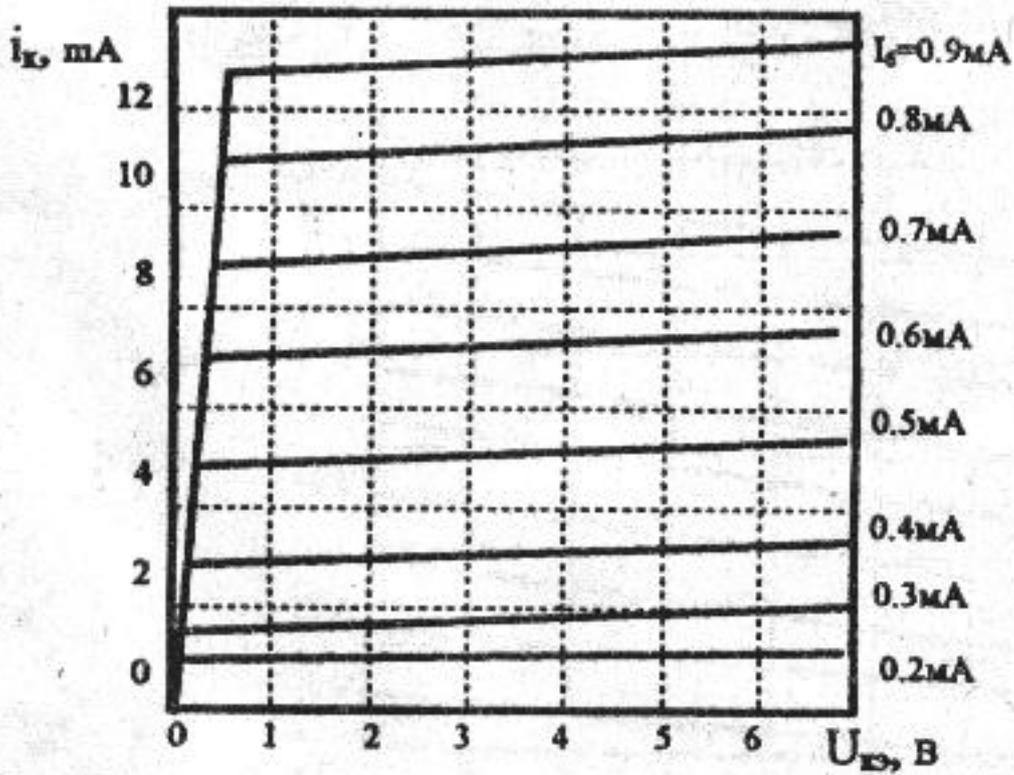
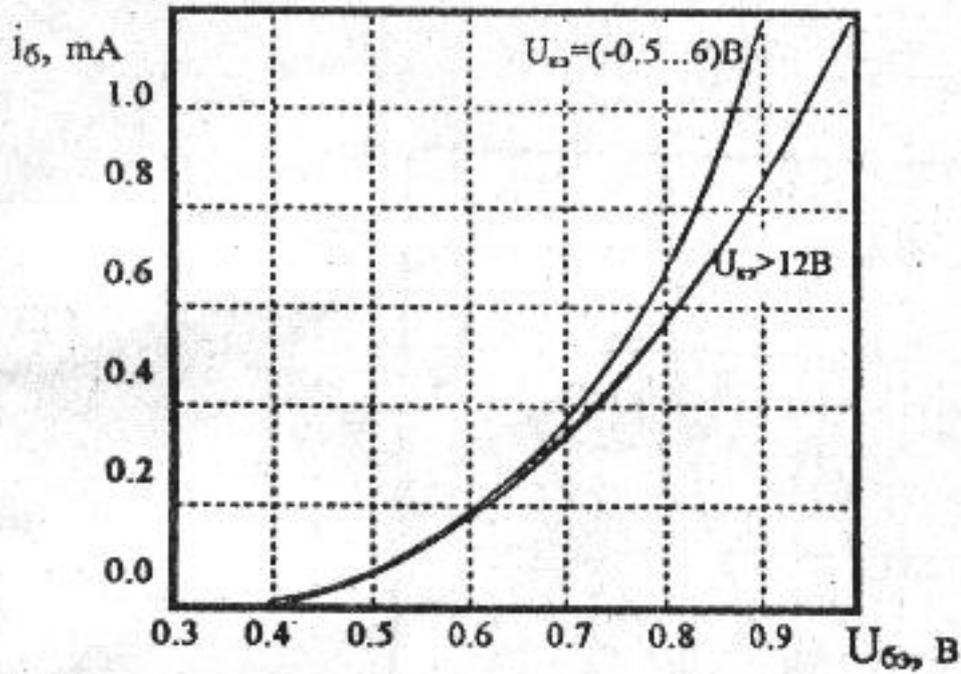
5. Оформит отчет.

Контрольные вопросы.

1. h -параметры транзистора с ОБ. Способы определения.
2. Как определяется рабочая точка каскада с ОБ? Какова связь ДПХ каскада с ОЭ и каскада с ОБ?
3. Основные параметры каскада с ОБ, их связь с аналогичными параметрами каскада с ОЭ.
4. Объяснить различия в полосах пропускания каскадов с ОБ и ОЭ.
5. Дать объяснения названиям каскаду с ОБ как токового повторителя.
6. Области применения каскада с ОБ.

Приложение 1

Характеристики транзистора КТ-315



Оглавление

Общие указания.....	3
Работа №1. Исследование свойств полупроводникового выпрямительного диода	4
Работа №2. Усилительный каскад на биполярном транзисторе с общим эмиттером (ОЭ).....	9
Работа №3. Усилительный каскад на биполярном транзисторе с общим коллектором	15
Работа №4. Усилительный каскад на биполярном транзисторе с общей базой	20

Учебное издание

Исследование свойств полупроводниковых диодов и транзисторов

Составители: АНДРЕЕВСКАЯ Татьяна Михайловна,
МУХИН Сергей Владимирович

Редактор Е.С.Резникова
Технический редактор О.Г.Завьялова

Подписано в печать 15.09.2008
Формат 60X84/16. Бумага офсетная №2. Ризография. Усл. -печ.л. 1.9.
Услю-изд.л.1,7. Изд.№82. Тираж 50 экз., Заказ 136

Московский государственный институт электроники и математики. 109028,
Москва, Б.Трехсвятительский пер., 3/12.

Отдел оперативной полиграфии Московского государственного института
электроники и математики.
113054, Москва, ул. М.Пионерская, 12.