

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный государственный
университет путей сообщения»

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь»

И.Ю.Антипина

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания по выполнению расчётно-графических
и контрольных работ

Хабаровск
Издательство ДВГУПС
2021

Введение

Курс «Физические основы электроники» является базовым для дисциплин «Электроника» и «Схемотехника», входящих в учебные планы студентов, обучающихся по специальности «Системы обеспечения движения поездов» и направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Дисциплина «Физические основы электроники» закладывают фундаментальные знания физики полупроводников, полупроводниковых приборов и их характеристик, принципов работы, построения и применения электронных схем и устройств.

Методические указания представляют набор задач, в которых охвачены физические процессы базовых элементов твердотельной электроники – диодов и транзисторов. Приведены методика решения задач и теоретический материал, в объеме, необходимом для выполнения контрольных заданий.

Целью методических указаний является получение знаний и практических навыков при расчете простейших электронных схем, которые позволят студентам технически грамотно использовать их при дальнейшем обучении и в будущей профессиональной деятельности.

Выбор варианта по последней цифре в шифре

В конце методички контрольные вопросы на зачет по ФОЭ

1. Физические процессы в диодах и стабилитронах

Задача 1.1

По исходным данным, приведенным в табл.1.1 и 1.2 определить ток в цепи, состоящей из источника напряжения E , резистора R и диода. Рабочая точка находится на прямой ветви диода. Привести схему.

Таблица 1.1

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Напряжение источника питания E , В	3	4	5	5	4	3	2	3	4	5
Сопротивление резистора R , Ом	6	8	10	6	8	10	5	5	8	8

Таблица 1.2

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Обратный ток насыщения диода I_0 , мкА	2	5	7	9	10	5	2	3	7	4
Температура $^{\circ}\text{K}$	300	200	200	300	200	300	300	300	200	200

Теоретические сведения

Диод – это полупроводниковый прибор, имеющий один р-п переход и два вывода. Одновременное существование в структурно-непрерывном полупроводнике п-и р-областей приводит к образованию перехода. Диффузия свободных носителей заряда – электронов и дырок – происходит как естественное следствие градиента концентрации этих зарядов. Рекомбинация диффундировавших электронов и дырок создает обеднённую область без подвижных носителей заряда. Неподвижные ионизированные атомы примеси в обеднённой области создают пространственный заряд и соответственно электрическое поле в этой области. Это поле вызывает ток дрейфа, который течет в направлении, обратном диффузионному. На переходе формируется потенциальный барьер (200мВ для германиевых и 600мВ для кремниевых диодов), препятствующий движению основных носителей через переход.

Если суммарный диффузионный ток равен суммарному току дрейфа, то наступает так называемое динамическое равновесие, при котором общий ток через переход равен нулю.

Приложенное к р-п-диоду внешнее напряжение нарушает и переопределяет равновесие. При прямом смещении потенциальный барьер снижается, и как следствие, дырки и электроны начинают диффундировать через пониженный барьер. Небольшие прямые напряжения (0,3В для германия и 0,7В для кремния) вызывают экспоненциальный рост тока. При прямом

включении сопротивление диода низкое – только несколько десятых долей ома. При обратном смещении приложенное напряжение добавляется к высоте потенциального барьера, делая диффузию основных носителей невозможной. Ток диффузии фактически снижается до нуля. Ток дрейфа при этом почти не изменяется, так как, зависит от числа неосновных носителей, попадающих за счет своих тепловых скоростей на р-п переход из р- и п-областей. Ток дрейфа – это небольшой ток (1мкА и менее), означающий большое сопротивление (мегаомы и более) диода при обратном смещении. Из выше изложенного можно сделать вывод, что диод обладает односторонней проводимостью.

Обратный ток через р-п переход – это нежелательны, паразитный ток. Его величину стараются уменьшить, совершенствуя технологию производства диодов.

Режим работы диода с нагрузкой называют рабочим режимом. Точку пересечения нагрузочной прямой (ВАХ активного сопротивления) и ВАХ диода называют рабочей точкой диода, в этой точке определяется величина тока, протекающего через схему.

Эффект электрического пробоя находит применение в полупроводниковых стабилитронах. Пробой – это резкое увеличение тока неосновных носителей при достижении напряжения определённого значения, называемого напряжением пробоя. Приборы, работающие в области электрического (туннельного или лавинного) пробоя называются стабилитронами, а напряжение пробоя — напряжением стабилизации. Под стабилизацией понимается постоянство выходного напряжения при изменении входного.

Решение

Задача решается графо–аналитическим методом.

Вольтамперная характеристика диода описывается следующим уравнением:

$$I = I_o \left(e^{\frac{q \cdot U}{kT}} - 1 \right), \text{ А}$$

где $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

I_o – обратный ток насыщения, мкА.

Используя заданное значение тока насыщения I_o и задавая напряжение диода $U = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3\text{В}$ строим вольт-амперную характеристику диода.

На этом же графике необходимо построить нагрузочную прямую, используя уравнение:

$$I = \frac{E - U}{R}$$

Нагрузочная прямая строится по двум точкам. Определим точки пересечения ее с осями координат: если $I = 0$, то $U = E$, если $U = 0$, то $I = \frac{E}{R}$.

Рабочая точка – точка пересечения вольтамперной характеристики диода с нагрузочной прямой и есть решение задачи.

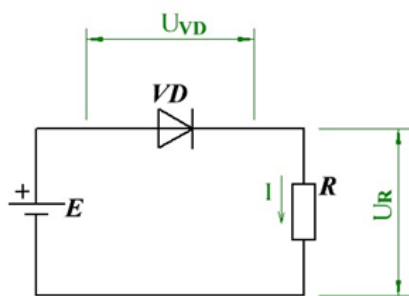
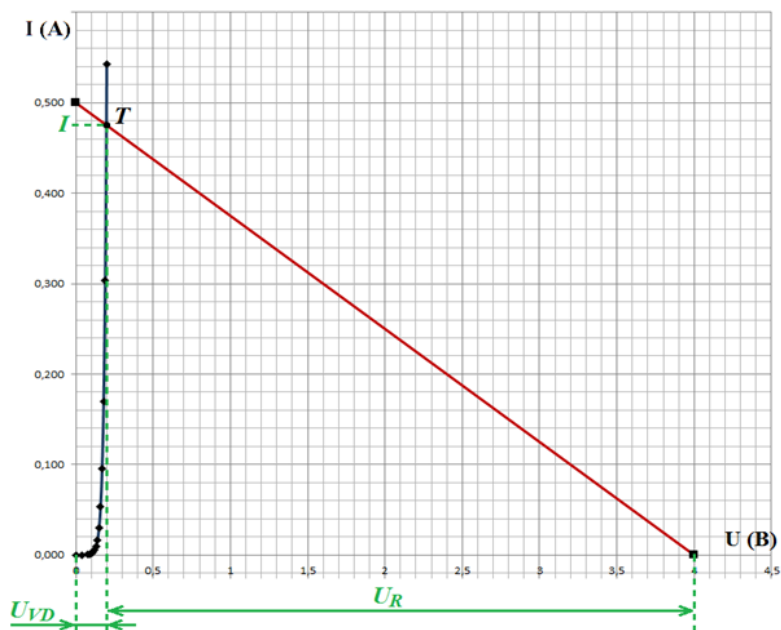


Рис.1.1 Схема включения диода с нагрузкой и построение нагрузочной прямой



Задача 1.2

По исходным данным, приведенным в табл.1.3, требуется определить недостающие параметры стабилизатора напряжения, схема которого приведена на рис.1.2.

Таблица 1.3

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Напряжение стабилизации $U_{ст}$, В	10	13	13	10	9	9	14	14	10	13
Ток стабилизации $I_{стmax}$, мА	30	20	25	20	18	30	35	20	35	30
Ток стабилизации $I_{стmin}$, мА	1	1	2	1	1	1	2	1	2	2
Сопротивление R_1 , кОм	1	*	1	*	0,5	*	1,5	*	0,8	*
Сопротивление R_2 , кОм	0,5	2,2	1	1	0,5	2	0,8	1	0,8	2,5
Напряжение E_{min} , В	*	16	*	18	*	15	*	17	*	18
Напряжение E_{max} , В	*	24	*	25	*	21	*	25	*	25

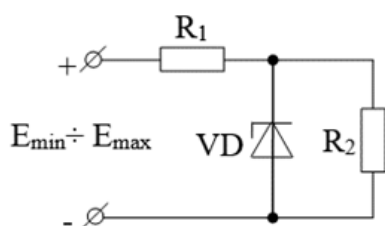


Рис.1.2 Схема параметрического стабилизатора напряжения

Теоретические сведения

Простейшая схема применения стабилитрона – это схема параметрического стабилизатора напряжения. Нагрузка (потребитель) включена параллельно стабилитрону. Поэтому в режиме стабилизации, когда напряжение на

стабилитроне почти постоянно, напряжение на нагрузке также неизменно. Поэтому все изменения входного напряжения при его нестабильности будут поглощаться ограничительным резистором.

Резистор R_1 (ограничительный резистор) задаёт ток через стабилитрон таким образом, чтобы величина тока была близка к среднему значению между $I_{ст.мин}$ и $I_{ст.макс}$. Такое значение тока называется номинальным током стабилизации.

При изменении входного напряжения ток через стабилитрон и падение напряжения на R_1 может изменяться, а напряжения на стабилитроне и на нагрузке останутся постоянными, исходя из вольтамперной характеристики стабилитрона. Стабилитрон поддерживает постоянство напряжения на выходе при изменении тока через него от $I_{ст.мин}$ до $I_{ст.макс}$

Решение

Для решения задачи необходимо использовать следующие соотношения:

$$R_1 = \frac{E_{ср} - U_{ст}}{I_{ср.ст} + I_n},$$

где I_n ток нагрузки:

$$I_n = \frac{U_{ст}}{R_2}, [A];$$

$U_{ст}$ - напряжение стабилизации, В;

R_2 – сопротивление нагрузки, Ом,

$E_{ср}$ – среднее напряжение источника:

$$E_{ср} = 0,5 \cdot (E_{max} + E_{min}), [B].$$

E_{max} – минимальное напряжение, E_{min} – максимальное напряжение.

Средней ток стабилизации $I_{ср.ст}$:

$$I_{ср.ст} = 0,5 \cdot (I_{ст.мин} + I_{ст.макс}), [mA].$$

2. Физические процессы в транзисторах

Задача 2.1

Рассчитать при каком входном напряжении $U_{вх}$ транзистор, приведенный в схеме на рис.2.1 будет находится:

а) в режиме насыщения;

б) в режиме отсечки;

в) в активном режиме.

Исходные данные приведены в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Сопротивление R_1 , кОм	10	10	20	30	20	10	10	10	20	20
Сопротивление R_2 , кОм	10	20	10	30	20	10	20	30	20	10

Сопротивление R3, кОм	1	2	3	2	1	3	1	3	3	1
Коэффициент передачи тока β	60	50	40	30	20	20	30	40	50	60

Таблица 2.2

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Напряжение источника E_k , В	-10	+15	-10	+12	+9	-10	+10	-15	+15	+15
Напряжение источника E , В	-10	+15	-10	+12	+9	-12	-3	+4	-2	-3
Пороговое напряжение $U_{пор}$, В	0	+0,6	-0,6	0	+0,6	0	0,6	-0,6	0	+0,6
Обратный ток $I_{ко}$, мкА	20	2	4	30	10	15	4	20	10	30

Теоретические сведения

Биполярный транзистор — полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих р-п перехода, три или более вывода и используемый для усиления мощности, тока или напряжения.

Конструктивно транзистор имеет несимметричную конструкцию в виде пластины монокристалла, по бокам которой находятся полупроводники, обладающие другим типом проводимости, чем средняя зона. Биполярные транзисторы могут иметь структуру как р-п-р, так и п-р-п. В п-р-п-транзисторах перенос заряда от эмиттера к

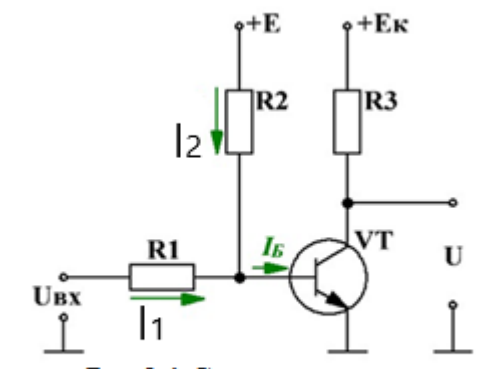


Рис.2.1 Схема включения транзистора

коллектору производится электронами, р-п-р-транзисторах - дырками. Подвижность электронов выше, поэтому транзисторы проводимости п-р-п имеют более высокое быстродействие.

Средняя область и вывод от нее называется базой. Область транзистора, из которой осуществляется инжекция носителей в базу называется эмиттером.

Область, в которую осуществляется экстракция носителей из базы называется коллектором. Соответствующее название носят и переходы. Из трех областей транзистора наиболее сильно легирован эмиттер, слабее всех - база. Среднелегированный коллектор имеет большие, чем остальные области размеры. В этом заключается конструктивная несимметричность эффективного транзистора, который можно определить, как транзистор с большим коэффициентом передачи тока и малым обратным током. Обратный ток коллекторного перехода не является полезным током, но его можно минимизировать подходящим выбором легирующих примесей, но невозможно уменьшить до нуля.

Существуют три основные схемы включения транзистора в зависимости от того какой вывод является общим для входной и выходной цепей: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК).

При любой схеме включения принцип работы транзистора остается неизменным. Включение транзисторов по различным схемам приводит лишь к смене входных и выходных величин.

Схема с ОЭ имеет большие коэффициенты передачи тока и напряжения и применяется наиболее часто. Наиболее редко применяется схема с ОБ из-за очень низкого входного сопротивления. Схема с ОК имеет наибольшее входное и наименьшее выходное сопротивления и находит применение как согласующий или буферный каскад в многокаскадных усилителях.

Переход между эмиттером и базой называют эмиттерным, между базой и коллектором – коллекторным. В зависимости от полярности прикладываемых напряжений к р-п переходам различают четыре режима работы биполярного транзистора:

- режим отсечки, в котором на оба перехода поданы обратные напряжения. В этом режиме через оба перехода проходят незначительные обратные токи, что эквивалентно большому сопротивлению. Транзистор находится в закрытом состоянии;

- режим насыщения, когда на оба перехода поданы прямые напряжения. Через оба перехода проходит большой прямой ток, что соответствует малому сопротивлению. Транзистор находится в открытом состоянии. Режимы отсечки и насыщения используются в цифровой и импульсной электронике (так называемый ключевой режим работы транзистора);

- активный режим, в котором на эмиттерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный – обратное. Этот режим используется в усилителях;

- инверсный режим, в котором на эмиттерный переход подается обратное напряжение, а на коллекторный – прямое. Из-за асимметричной структуры транзистора на практике не используется.

Решение

Для режима насыщения необходимо на вход ключа подать такое напряжение $U_{ВХ}$, при котором будет протекать ток:

$$I_0 \geq I_{\text{бнас}} = \frac{E_k}{\beta \cdot R_3}$$

Для режима отсечки необходимо обеспечить напряжение на базе:

$$U_B \leq U_{\text{пор}},$$

где $U_{\text{пор}}$ – пороговое напряжение транзистора (для германиевых транзисторов $U_{\text{пор}} \approx 0\text{В}$, для кремниевых $U_{\text{пор}} \approx 0,6\text{В}$).

Условие отсечки для п-р-п транзисторов:

$$U_B < U_{\text{пор}}.$$

Условие отсечки для р-п-р транзисторов:

$$U_B > -U_{\text{пор}}.$$

По исходным данным необходимо определить тип транзистора и материал

изготовления. Схему начертить с учетом типа проводимости транзистора (р-п-р или п-р-п) и учесть направление тока базы, так как его направление различно для разного типа проводимости транзистора.

В качестве примера рассмотрим ключ на германиевом транзисторе проводимости р-п-р. Для других вариантов необходимо учесть знак E_k , E и величину $U_{пор}$.

Условие насыщения транзистора для рассматриваемой схемы можно записать в виде:

$$I_6 = I_1 + I_2 = \frac{U_{BX}}{R_1} + \frac{E}{R_2} \geq \frac{E_k}{\beta \cdot R_3}$$

откуда получим:

$$U_{BX} \geq \frac{E_k \cdot R_1}{\beta \cdot R_3} - \frac{E \cdot R_1}{R_2}$$

Условие отсечки транзистора перепишем в виде:

$$U_6 = U_{BX} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + E \frac{R_1}{R_1 + R_2} - I_{ко} \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \leq 0,$$

откуда следует:

$$U_{BX} \geq -E \frac{R_1}{R_2} + R_1 \cdot I_{ко}$$

Условие активного режима:

$$E \frac{R_1}{R_2} - R_1 \cdot I_{ко} > U_{BX} > \frac{E_k \cdot R_1}{\beta \cdot R_3} - \frac{E \cdot R_1}{R_2}$$

Задача 2.2

Полевой транзистор с управляющим р-п переходом и каналом п-типа используется в цепи усилительного каскада, изображенного на рис.2.2. По исходным данным, приведенным в табл.2.3, определить: напряжение смещения затвор-исток $U_{зи}$, крутизну транзистора в рабочей точке S , сопротивление резистора в цепи истока R_1 , сопротивление нагрузки в цепи стока R_2 , напряжение сток-исток $U_{си}$.

Таблица 2.3

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Напряжение отсечки $U_{отс}$, В	3	2	4	4	2	2	1,5	3,5	2,5	2
Ток стока максимальный $I_{стmax}$, мА	10	10	15	15	6	10	4	12	8	5
Ток стока в рабочей точке I_c , мА	3	2	4	3	3	3	2	3	2	2
Коэффициент усиления K_u	10	15	15	10	10	8	10	10	15	8
Напряжение E_c , В	15	20	15	20	15	20	15	20	15	20

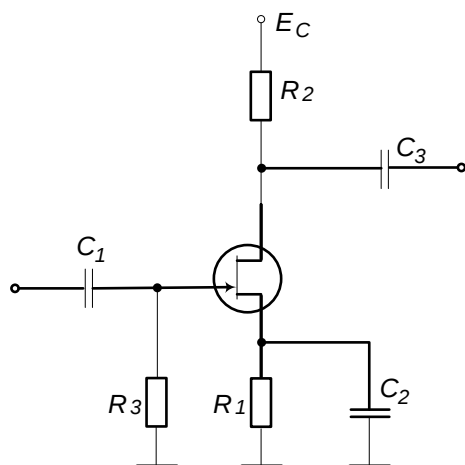


Рис.2.2. Схема усилительного каскада на полевом транзисторе

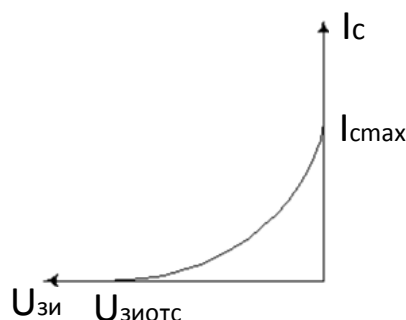


Рис.2.3 Стоко-затворная характеристика n-канального полевого транзистора

Теоретические сведения

Полевыми транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых управление током основных носителей заряда производится через токопроводящий канал, сопротивление которого управляется эл. полем.

Полевые транзисторы называются униполярными, так как в переносе тока у них участвуют только носители заряда одного типа электроны или дырки. Из-за отсутствия инжекции неосновных носителей и инерционного процесса их накопления униполярные транзисторы обладают повышенным быстродействием и низким уровнем шумов.

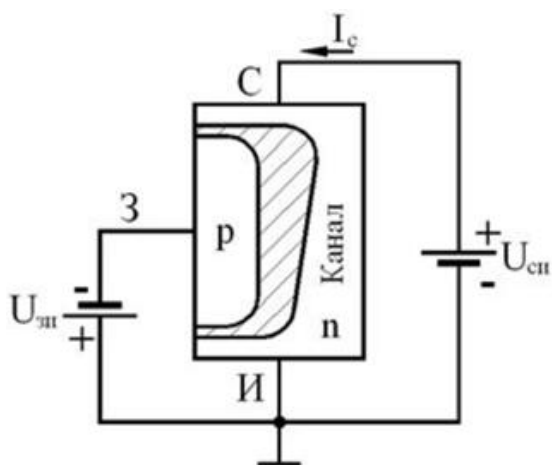


Рис.2.4 Схема включения полевого транзистора с каналом n-типа

Полевые транзисторы выполняются в виде пластины из полупроводникового материала с двумя p-n переходами и тремя выводами в каждой из областей с различными типами проводимости. Область с управляемым сечением называют каналом. Электрод, из которого в канал входят основные носители заряда называется истоком, соответственно, электрод принимающий носители заряда называется стоком. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, называют затвором. Регулирование величины тока, протекающего через транзистор, осуществляется внешним эл. полем.

Принцип действия полевого транзистора (рис.2.4) основан на том, что при изменении напряжения на затворе увеличивается ширина p-n перехода, следовательно, уменьшается сечение канала между стоком и истоком. Изменение ширины сечения канала приводит к увеличению его сопротивления,

следовательно, к уменьшению тока стока. При некотором напряжении на затворе канал почти перекрывается и ток стока I_c очень мал. Транзистор закрывается. Это напряжение затвора, при котором ток стока $I_c=0$ называют напряжением отсечки.

1) При напряжении $U_{зи}=0$ ширина р-п перехода минимальна, а ширина канала максимальна и ток стока будет максимальным.

2) При увеличении запирающего напряжения на затворе ширина р-п переходов увеличивается, а ширина канала и ток стока уменьшаются.

3) При достаточно больших напряжениях на затворе ширина р-п переходов может увеличиться настолько, что они сольются, ток стока станет равным нулю.

Полевой транзистор таким образом эквивалентен переменному резистору, сопротивление которого можно менять эл полем.

Необходимо отметить внутреннюю обратную связь в конструкции полевого транзистора. Ширина р-п перехода зависит не только от напряжения $U_{зи}$, а еще от тока I_c , протекающего через канал. Если $U_{си}$ больше нуля, то ток стока протекающий через канал, создает по длине последнего падение напряжения ($I_c R_{канала}$), которое оказывается запирающим для перехода затвор – канал. ($U_{зи} = U_z - U_{и}$, $U_z = \text{const}$, $U_{и} = I_c R_{канала}$). Это ведет к увеличению напряжения на затворе по модулю и соответственно к увеличению ширины запирающего слоя. Сечение канала уменьшается и ток стока тоже уменьшается.

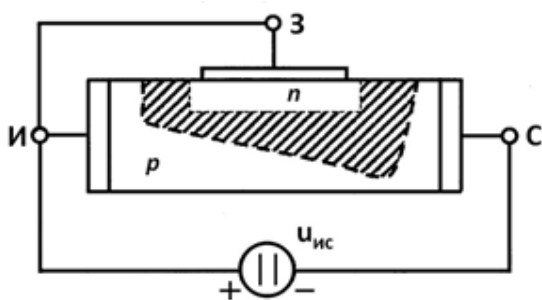


Рис. 2.5 Распределение потенциалов вдоль канала транзистора

Кроме этого, ток стока, протекая через канал, делает его не эквипотенциальным (то есть имеющий разные потенциалы). Так как к разным областям управляющего перехода прикладываются различные напряжения. В области истока будет действовать напряжение $U_{зи}$, а в области стока сумма двух напряжений $U_{си} + |U_{зи}|$. Поэтому толщина обедненного слоя неравномерна по

длине канала и увеличивается от истока к стоку (рис.2.5).

При малых значениях $U_{си}$ канал остается прежним, то есть транзистор ведет себя как линейное сопротивление.

По мере роста напряжения $U_{си}$ канал в области стока сужается настолько, что превращается в узкую горловину. Соответственно его сопротивление в этой области резко возрастает и ток стока уменьшается. При определенном токе стока наступает режим насыщения (изменение напряжения $U_{си}$ не вызывает изменения тока I_c).

Решение

Для полевого транзистора с встроенным каналом ток стока в рабочей точке определяется по формуле:

$$I_c = I_{c\max} \cdot \left(1 - \frac{|U_{зи}|}{U_{отс}}\right)^2,$$

где $I_{c\max}$ - максимальное значение тока стока, мА;

$U_{зи}$ - напряжение смещения затвор-исток, В;

$U_{отс}$ - напряжение отсечки, В.

Крутизна транзистора в рабочей точке:

$$S = S_{\max} \left(1 - \frac{|U_{зи}|}{U_{отс}}\right) = \frac{2\sqrt{I_c \cdot I_{c\max}}}{U_{отс}},$$

где $S_{\max}$ - максимальная крутизна:

$$S_{\max} = \frac{2I_{c\max}}{U_{отс}}$$

Сопротивление резистора в цепи истока

$$R_1 = \frac{|U_{зи}|}{I_c}$$

Сопротивление нагрузки в цепи стока R_2 можно найти из формулы:

$$K_U = S \cdot R_2$$

Напряжение сток-исток $U_{си}$:

$$U_{си} = E - I_c(R_1 + R_2)$$

3. Усилительный каскад на биполярном транзисторе

Задача 3.1

Транзистор включен в усилительный каскад по схеме с общим эмиттером. Каскад питается от одного источника напряжения E . Для подачи смещения в цепи базы используется гасящий резистор. Генератор входного сигнала подключен к базе транзистора через разделительный конденсатор. По исходным данным, приведенным в таблицах 3.1 и 3.2 и характеристикам транзистора требуется:

а) построить линию $P_{k\max}$;

б) по выходным характеристикам найти: постоянную составляющую тока коллектора $I_{ко}$; постоянную составляющую напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэо}$, амплитуду переменной составляющей тока коллектора I_{mk} ; амплитуду выходного напряжения $U_{mk}=U_{mkэ}$; коэффициент усиления по току K_i ; выходную мощность $P_{ВЫХ}$; мощность, рассеиваемую на нагрузке постоянной составляющей тока коллектора $P_{ко}$, полную потребляемую мощность в коллекторной цепи P_o ; КПД коллекторной цепи η . Проверить, не превышает ли мощность,

выделяемая на коллекторе в режиме покоя $P_{ко}$, максимально допустимую мощность P_{Kmax} ;

в) с помощью входной характеристики определить: напряжение смещения $U_{БЭ0}$; амплитуду входного сигнала $U_{mБЭ}$, входную мощность $P_{ВХ}$, коэффициент усиления по напряжению K_U и по мощности K_P , входное сопротивление каскада $R_{ВХ}$; сопротивление резистора R_B и ёмкость разделительного конденсатора C_P . Диапазон усиливаемых колебаний 80Гц-100кГц. Начертить схему усилительного каскада.

Таблица 3.1

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Напряжение источника питания E_K , В	9	12	14	16	18	17	15	13	11	9
Сопротивление резистора R , кОм	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3

Таблица 3.2

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Ток базы в режиме покоя $I_{Б0}$, мА	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
Амплитуда тока базы $I_{mБ}$, мА	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
Мощность, рассеиваемая коллектором P_{Kmax} , мВт	130	150	150	130	140	150	130	150	140	140

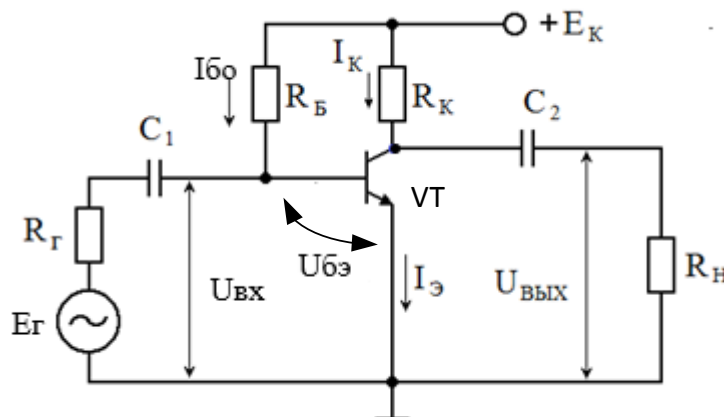


Рис. 3.1 Схема усилительного каскада на биполярном транзисторе

Теоретические сведения

Основные элементы: транзистор (п-р-п), источник энергии E_K , нагрузка R_H и вспомогательные элементы.

Во входной цепи действует источник входного напряжения $U_{вх}$ подлежащий усилению, в выходную цепь включается нагрузка R_H . Такой режим называется динамическим или рабочим. Полярность источника постоянного тока E_K обеспечивает работу транзистора VT в активном режиме.

Для того, чтобы усилитель работал в динамичном режиме необходимо задать начальный режим или режим постоянного тока (или статический режим, режим покоя). Это режим работы транзистора без подачи на вход сигнала. В идеальном случае в режиме покоя через транзистор должен протекать такой ток коллектора, чтобы напряжение на коллекторе находилось между землей и напряжением источника питания (посередине), и было готово изменяться в любом направлении в соответствии с полярностью входного сигнала. В этом случае нелинейные искажения будут минимальны.

Сопротивление базы R_b необходимо установки начального тока базы в режиме покоя I_{b0} . Для этого в цепь база-эмиттер необходимо подавать постоянное напряжение источника питания E_k ($I_{b0} = \frac{E_k}{R_b}$). Кроме этого падение напряжения на резисторе R_b при протекании тока базы задает постоянное напряжение смещения между базой и эмиттером $U_{бэ}$ для открытия транзистор (0,6В для кремния).

Сопротивление R_k это внутренняя нагрузка транзистора, которая определяет наклон нагрузочной прямой и соответственно положение рабочей точки. ($tg \alpha = \frac{1}{R_k}$; $ctg \alpha = R_k$).

В исходном состоянии транзистор открыт смещающим напряжением (т. О рис.3.2) и во входных и выходных цепях транзистора протекают токи покоя.

На семействе выходных характеристик $I_k = f(I_b; U_{кэ})$ строится нагрузочная прямая. Уравнение нагрузочной прямой определяется по закону Кирхгофа для замкнутой цепи коллектора с нагрузочным сопротивлением и источником питания. $U_{кэ0} = E_k - I_{k0} R_k$ - уравнение линии нагрузки. Эта прямая строится по двум точкам, точке А, соответствующей режиму холостого хода входной цепи и точке В, соответствующей короткому замыканию цепи коллектора.

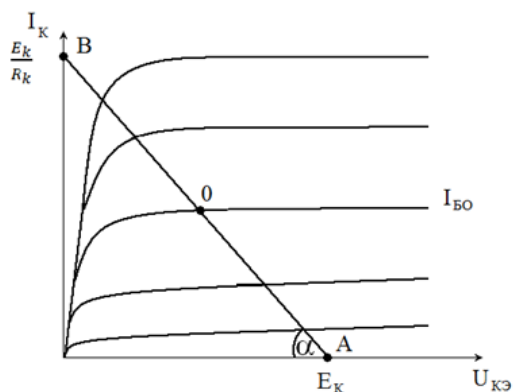


Рис.3.2 Определение положения рабочей точки транзистора

Конденсаторы C_1 и C_2 называются разделительными. C_1 — исключает протекания постоянного тока по цепи $E_k - R_b$ — генератор, C_2 — пропускает в цепь нагрузки переменное напряжение и задерживает постоянное.

Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения E_k в энергию переменного напряжения выходной цепи за счет изменения сопротивления управляющего элемента (транзистора) по закону, задаваемому входным сигналом.

Напряжение входного синусоидального сигнала $U_{вх}$ подают на участок база

– эмиттер, что создает пульсацию тока базы, относительно постоянной составляющей тока базы $I_{б0}$ (который определяется E_k и R_b). Изменение тока базы вызывает соответствующие изменение тока коллектора, проходящего через сопротивление R_k . Переменная составляющая тока коллектора I_k создает на R_k усиленное по амплитуде падение напряжение $U_{вых} = E - i_k R_k$.

Схема с общим эмиттером переворачивает фазу входного сигнала по напряжению на 180° .

При подаче на вход положительной полуволны потенциал базы складывается с напряжением сигнала, это приводит к большему открытию транзистора. Ток коллектора I_k максимален, следовательно, потенциал т.А = $E_k - U_k$ стремится к потенциалу корпуса, что соответствует отрицательной полуволне. При подаче на вход отрицательной полуволны потенциал базы понижается, транзистор закрывается, ток коллектора стремится к нулю и на выходе напряжение равно плюс напряжения E_k .

Расчет такого каскада можно произвести графически с использованием входных и выходных характеристик (рис.3.3. и 3.4). Для этого необходимо решить систему уравнений.

$$\begin{cases} I_k = f(I_b, U_{кэ}) \\ I_k = \frac{E_k - U_{кэ}}{R_k} \end{cases}$$

Если известны R_k и E_k , то положение линии нагрузки определяется точками D и C. D= E_k , C= $I_k=E_k/R_k$. Точка пересечения статистической характеристики снятой при заданном токе базы $I_{б0}$ и нагрузочной прямой определяет положение рабочей точки (т.О) (без подачи входного сигнала). Рабочая точка O определяет ток коллектора I_{k0} и напряжение на коллекторе $U_{кэ0}$ в режиме покоя. При подаче на вход напряжения от источника E_g ток базы $I_{мб} = \frac{E_{мг}}{R_g}$ будет изменяться относительно $I_{б0}$ по синусоидальному закону. Рабочая точка будет перемещаться по нагрузочной прямой между точками A и B, которые определяют рабочий участок. Точки A и выбираются на прямолинейных участках, тогда искажения сигнала будут минимальны. Ток коллектора с амплитудой I_{mk} также будет изменяться около тока I_{k0} , а $U_{mkэ}$ около напряжения $U_{кэ0}$. Ток коллектора I_k будет изменяться в одной фазе с I_b , а выходное напряжение $U_{кэ}$ в противофазе с I_k . Проекция отрезка АО на ось ординат определяет амплитуду коллекторного тока, а проекция на ось абсцисс – амплитуду переменной составляющей $U_{кэ}$.

Для определения входного напряжения базы эмиттера надо взять входные характеристики транзистора $I_b = f(U_{бэ})|U_{кэ} = U_{k0}$. Но так как входные характеристики отличаются незначительно при различных напряжениях $U_{кэ}$, на практике пользуются одной входной характеристикой, соответствующей среднему значению $U_{кэ}=U_{кэ0}$. Точки O, A и B на входной характеристике соответствуют точкам O, A и B на выходной характеристике. Проекции точек

A' и B' на ось абсцисс и ординат определяют размах входного тока и напряжения.

$$K_U = \frac{U_{m\text{вых}}}{U_{m\text{вх}}}, K_I = \frac{I_{m\text{вых}}}{I_{m\text{вх}}}$$

Схема с общим эмиттером усиливает входной сигнал и по току, и по напряжению, следовательно, и по мощности.

Работа усилительного каскада зависит от начального режима, то есть от положения рабочей точки на характеристиках транзистора и от амплитуды входного сигнала. Если неправильно выбрать положение рабочей точки, то транзистор в процессе усиления будет периодически находится в режиме насыщения, когда коллекторный ток максимален и не увеличивается, несмотря на увеличение амплитуды входного сигнала, либо в режиме отсечки, когда коллекторный ток минимален из-за закрытия транзистора. В обоих случаях усиление сигнала будет происходить со значительными нелинейными искажениями. То есть форма сигнала на выходе не будет соответствовать форме входного усиливаемого сигнала. Поэтому из всего выше изложенного следует, что рабочая точка должна быть расположена посередине нагрузочной прямой. В этом случае коэффициент усиления будет максимален, а искажения минимальны.

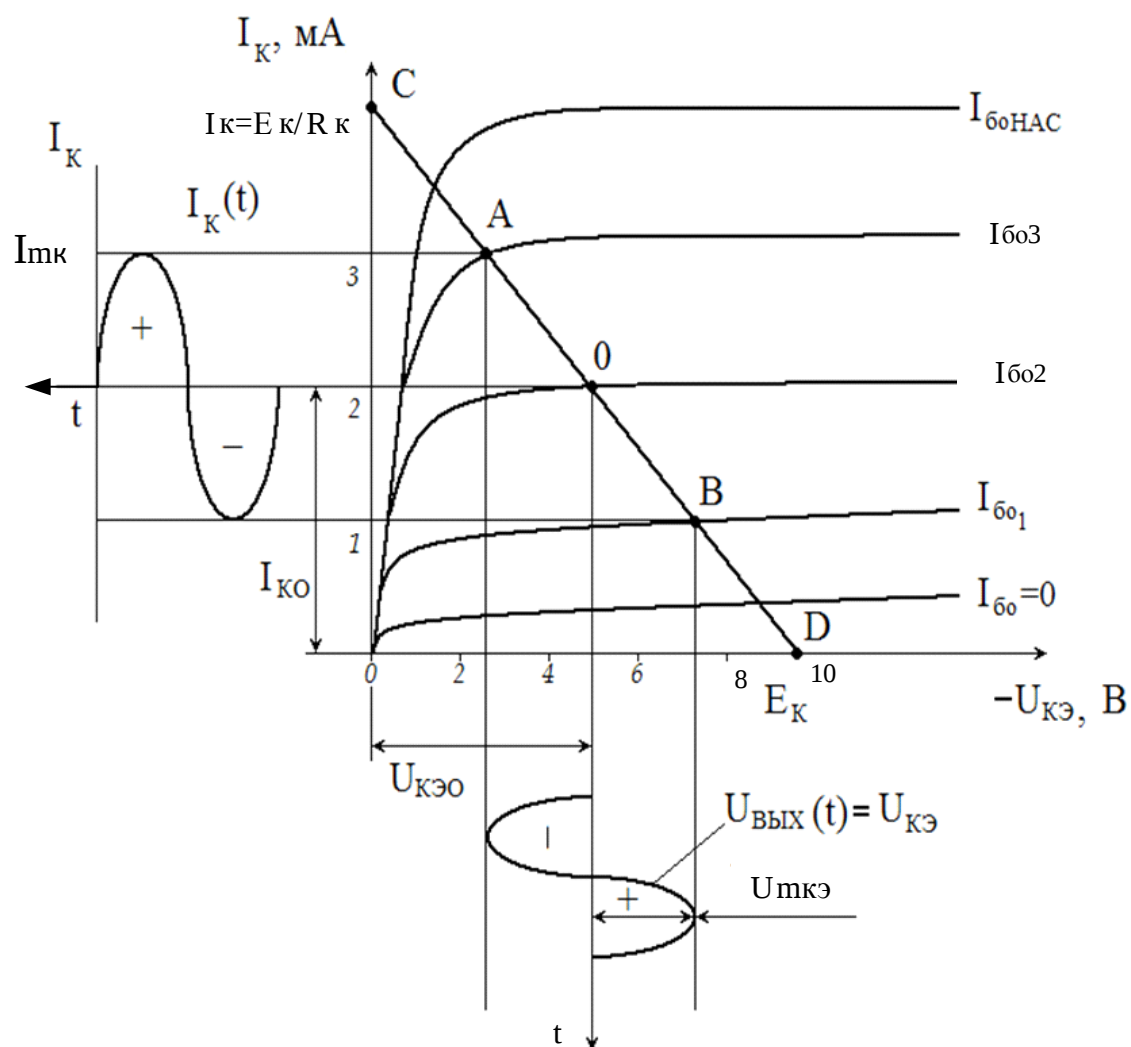


Рис.3.3 Выходные характеристики транзистора по схеме ОЭ

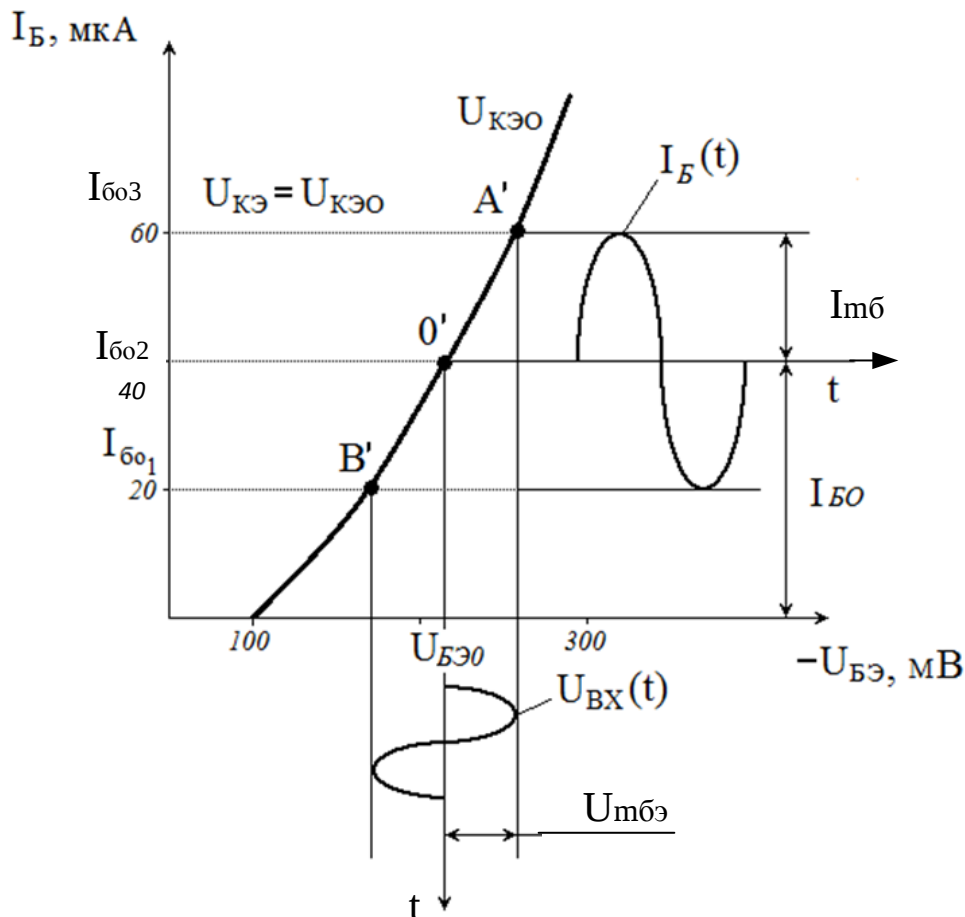


Рис.3.4 Входные характеристики транзистора по схеме ОЭ

Решение

Рассмотрим пример. Исходные данные: $E_K=10\text{В}$, $I_{B0}=0,3\text{мА}$, $R_H=500\text{кОм}$, $P_{Kmax}=150\text{мВт}$. Диапазон усиливаемых колебаний $80\text{Гц}-100\text{кГц}$. Схема приведена на рис.3.1. При отсутствии справочной литературы студент может воспользоваться характеристиками транзистора, на которых рассмотрен пример.

Порядок решения задачи следующий. На семействе выходных характеристик строим линию максимально допустимой мощности, используя уравнение:

$$I_{Kmax} = \frac{P_{Kmax}}{|U_{KЭ}|} = \frac{0,15}{|U_{KЭ}|}$$

Подставляя в него значения $U_{KЭ}$, равные, например, $-7,5$; -10 ; -15 и -20В , получаем значения I_K , равные 20 ; 15 ; 10 и $7,5\text{мА}$ соответственно. Построенная по этим точкам линия P_{Kmax} показана на рис.3.5

Затем, используя уравнение линии нагрузки $I_K=(E+U_{KЭ})/R_H$, на семействе выходных характеристик наносим линию нагрузки: при $I_K=0$ $U_{KЭ}=E=-10\text{В}$ - первая точка линии нагрузки; при $U_{KЭ}=0$ $I_K=E/R_H=10/500=20\text{мА}$ - вторая точка линии нагрузки.

Рабочая точка является точкой пересечения линии нагрузки с характеристикой, соответствующей постоянной составляющей тока базы, равной $I_{B0} = 0,3 \text{ мА} = 300 \text{ мкА}$. Рабочей точке Г соответствует постоянная составляющая тока коллектора $I_{K0} = 6 \text{ мА}$ и постоянная составляющая напряжения $U_{KЭ0} = -7 \text{ В}$.

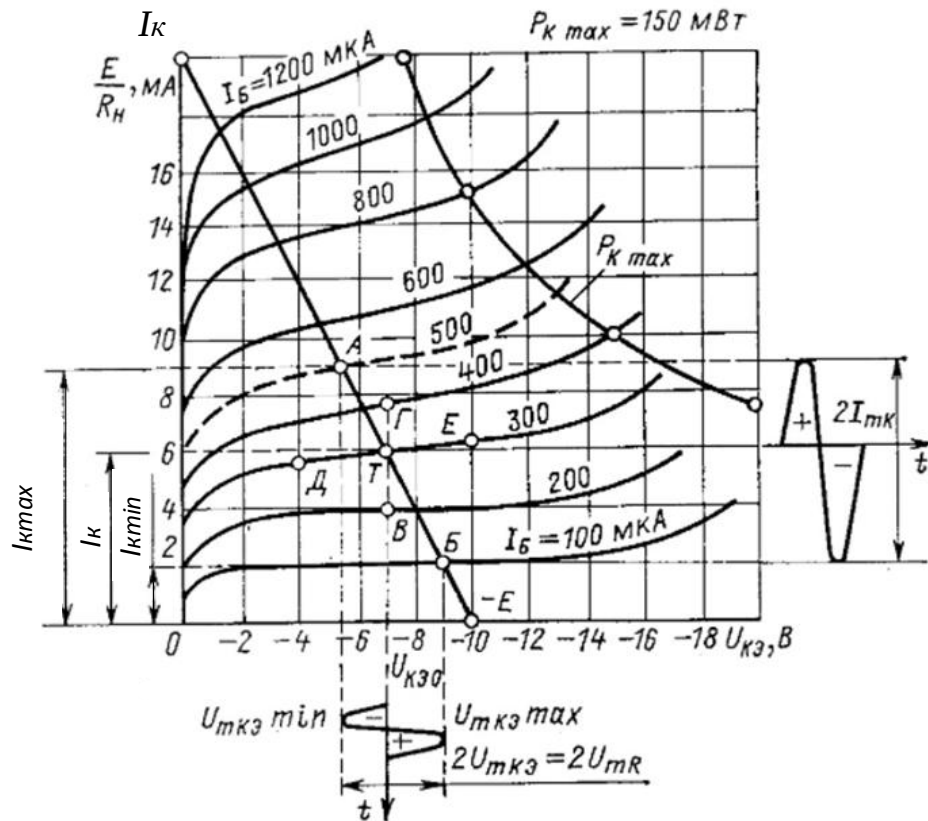


Рис.3.5 Графоаналитический расчет усилителя при помощи выходных характеристик

Приращение тока базы $I_{бм} = 0,2 \text{ мА}$ из условия задачи, поэтому рабочий участок выбран на пересечении нагрузочной прямой и токов базы, равных 0,5 и 0,1 мА. (точки А и Б соответственно).

Амплитуду переменной составляющей тока коллектора определим как среднюю:

$$I_{mk} = \frac{I_{kmax} - I_{kmin}}{2} = \frac{90 - 20}{2} = 3,5 \text{ мА}$$

Амплитуда переменного напряжения на нагрузке:

$$U_{mR} = U_{mkэ} = I_{mk} R_H = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 1,75 \text{ В}$$

Коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{I_{mk}}{I_{мб}} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 17,5$$

Выходная мощность:

$$P_{\text{вых}} = 0,5 I_{mk} \cdot U_{mR} = 0,5 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,75 = 3 \text{ мВт}$$

Полная потребляемая мощность в коллекторной цепи:

$$P_0 = E \cdot I_{k0} = 10 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 60 \text{ мВт}$$

Мощность, рассеиваемая на коллекторе постоянной составляющей коллекторного тока:

$$P_{k0} = I_{k0} \cdot |U_{kэ0}| = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 7 = 42 \text{ мВт}$$

Коэффициент полезного действия коллекторной цепи:

$$\text{КПД} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_0} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^{-3}} = 0,05 \cdot 100\% = 5\%$$

$P_{k0} < P_{k\text{max}}$, так как $42 \text{ мВт} < 150 \text{ мВт}$, следовательно, режим работы допустимый.

Далее расчет ведем по семейству входных характеристик (рис.3.6). Поскольку у транзисторов входные характеристики расположены близко друг к другу, то в качестве рабочей входной характеристики можно принять одну из статических характеристик, соответствующую активному режиму, например, снятую при $U_{кэ} = -5 \text{ В}$

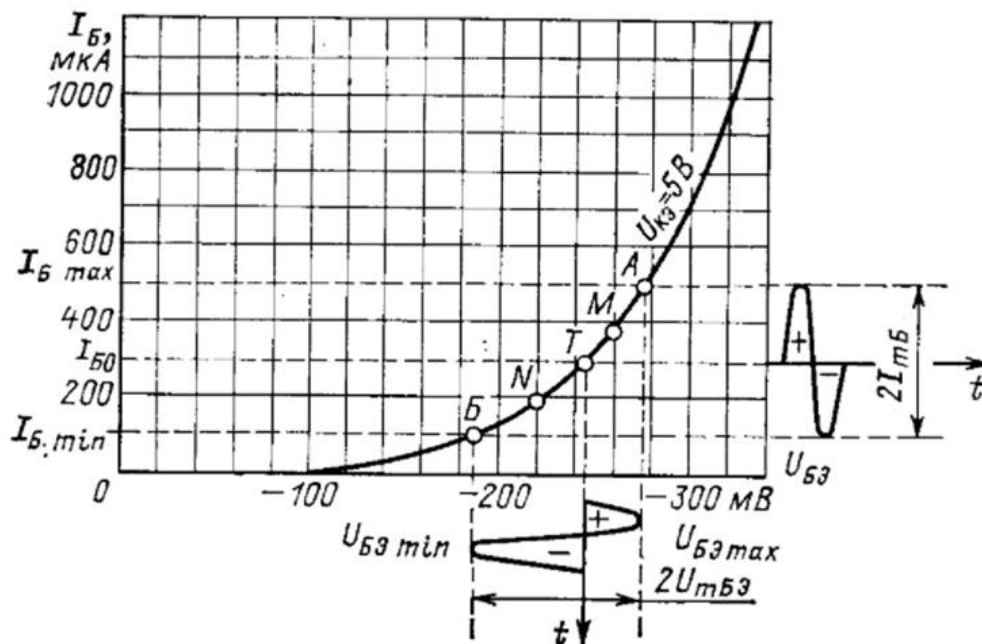


Рис.3.6 Графоаналитический расчет усилителя при помощи входных характеристик

Из графика находим, что $|U_{БЭ0}| = 246 \text{ мВ}$ при $I_{Б0} = 0,3 \text{ мА}$.

По условию $I_{mБ} = 0,2 \text{ мА}$, $U_{БЭ} = 187 \text{ мВ}$ при $I_B = 0,3 - 0,2 = 0,1 \text{ мА}$ и $U_{БЭ} = 277 \text{ мВ}$ при $I_B = 0,3 + 0,2 = 0,5 \text{ мА}$.

Амплитуда входного напряжения:

$$U_{mБЭ} = \frac{0,227 - 0,187}{2} = 0,045 \text{ В} = 45 \text{ мВ}$$

Модуль коэффициента усиления по напряжению:

$$|K_U| = \frac{U_{mкэ}}{U_{mбэ}} = \frac{1,75}{0,045} = 39$$

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = |K_I \cdot K_U| = 17,5 \cdot 39 = 690$$

Входная мощность:

$$P_{вх} = 0,5 \cdot I_{mб} \cdot U_{mбэ} = 0,5 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} = 4,5 \text{ мкВт}$$

Входное сопротивление:

$$R_{вх} = \frac{U_{mбэ}}{I_{mб}} = \frac{0,045}{0,02} = 225 \text{ Ом}$$

Сопротивление резистора

$$R_{вх} = \frac{E - |U_{mбэ0}|}{I_{б0}} = \frac{10 - 0,25}{0,3 \cdot 10^{-3}} = 32,5 \text{ кОм}$$

Ёмкость конденсатора C_p определяется из условия:

$$\frac{1}{\omega_H \cdot C_p} = \frac{R_{вх}}{10},$$

где ω_H – низшая рабочая частота.

Следовательно,

$$C_p = \frac{10}{\omega_H \cdot R_{вх}} = \frac{10}{2\pi \cdot f_H \cdot R_{вх}} = \frac{5}{\pi \cdot f_H \cdot R_{вх}}$$

$$C_p = \frac{5}{3,14 \cdot 80 \cdot 225} = 90 \text{ мкФ}$$

Задача 3.2

В рабочей точке усилителя, рассмотренного в предыдущей задаче, найти параметры $h_{11э}$, $h_{21э}$, $h_{22э}$, $R_{вых} = 1/h_{22э}$, и аналитически рассчитать K_I , K_U , K_P , $R_{вх}$.

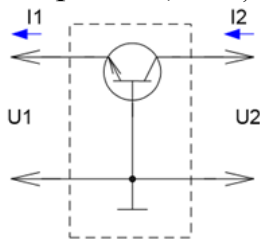


Рис.3.7 Транзистор как 4-х полюсник

Теоретические сведения

Характеристики транзистора носят нелинейный характер, но при малых изменениях тока и напряжения участки характеристик можно считать отрезками прямых. В таком случае транзистор представляют, как активный 4-х полюсник. Активный 4-х полюсник – это 4-х полюсник, у которого происходит увеличение мощности (имеет источник энергии).

Математически такой 4-х полюсник описывается системой двух алгебраических уравнений с четырьмя независимыми коэффициентами. Эти уравнения описывают связь между входными и выходными параметрами.

$$\begin{cases} \Delta U1 = h_{11} \cdot \Delta I1 + h_{12} \cdot \Delta U2 \\ \Delta I2 = h_{21} \cdot \Delta I1 + h_{22} \cdot \Delta U2 \end{cases}$$

Очевидно, что значения h-параметров в различных схемах включения будут различны.

$h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}$ при $U_2 = const$ – входное сопротивление транзистора при коротком замыкании на выходе;

$h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}$ при $I_1 = const$ – коэффициент обратной связи по напряжению при холостом ходе на входе (показывает какая часть выходного напряжения поступает на вход транзистора);

$h_{21} = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}$ при $U_2 = const$ – коэффициент передачи тока при коротком замыкании на выходе;

$h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2}$ при $I_1 = const$ – выходная проводимость при холостом ходе на входе.

Измерения z-параметров осуществляются в режиме холостого хода на входе ($I_1=0$) и выходе ($I_2=0$). Реализовать режим разомкнутого входа для биполярного транзистора достаточно просто (сопротивление эмиттерного перехода составляет десятки Ом и поэтому размыкающее сопротивление в цепи эмиттера в несколько кОм уже позволяет считать $I_1=0$). Реализовать режим разомкнутого выхода для биполярного транзистора сложно. Сопротивление коллекторного перехода десятки МОм и размыкающее сопротивление в цепи коллектора в силу этого должно быть порядка ГОм.

Измерения y-параметров осуществляются в режиме короткого замыкания на входе ($U_1=0$) и выходе ($U_2=0$). Реализовать режим короткого замыкания на входе для биполярного транзистора достаточно сложно (сопротивление эмиттерного перехода составляет десятки Ом и поэтому замыкающее сопротивление в цепи эмиттера должно составлять доли Ома, что достаточно сложно). Реализовать режим короткого замыкания на выходе просто. Сопротивление коллекторного перехода десятки МОм и замыкающее сопротивление в цепи коллектора может быть даже сотни Ом. Реализовать h-параметры у транзистора легко, так как он имеет низкоомный вход и высокоомный выход. H-параметры можно определить по входным и выходным характеристикам (рис.3.8 и р3.9).

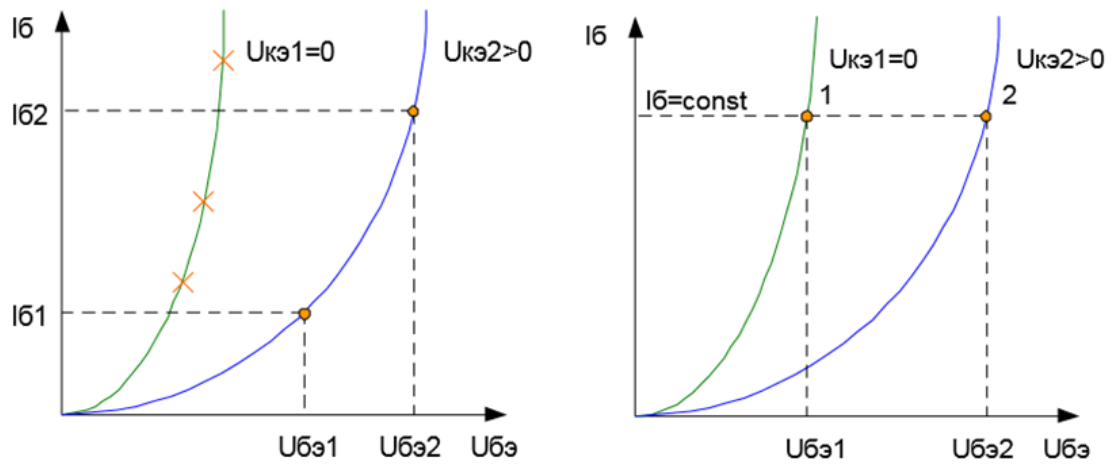


Рис.3.8 Входные характеристики биполярного транзистора по схеме с ОЭ

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} \right|_{U_{кэ}=const} = \frac{U_{бэ2} - U_{бэ1}}{I_{б2} - I_{б1}} \Big|_{U_{кэ}=const};$$

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_б=const} = \frac{U_{бэ2} - U_{бэ1}}{U_{кэ2} - U_{кэ1}} \Big|_{I_б=const}.$$

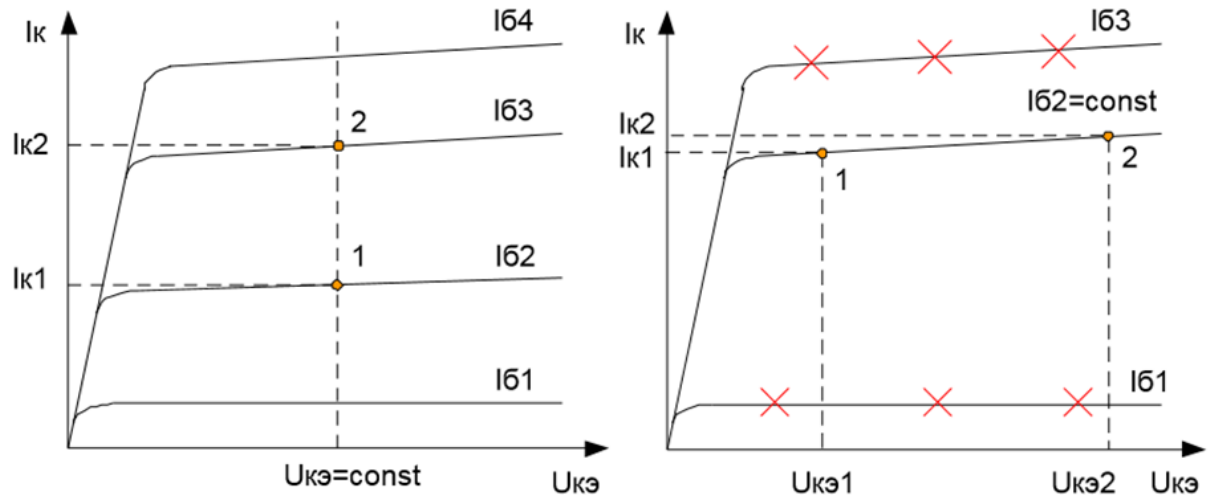


Рис. 3.9 Выходные характеристики биполярного транзистора по схеме с ОЭ

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} \right|_{U_{кэ}=const} = \frac{I_{к2} - I_{к1}}{I_{б3} - I_{б2}} \Big|_{U_{кэ}=const};$$

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_к}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_б=const} = \frac{I_{кэ2} - I_{кэ1}}{U_{кэ2} - U_{кэ1}} \Big|_{I_б=const}$$

На линейном участке выбирается рабочая точка, относительно которой определяются малые приращения. Крестом указаны кривые, неиспользуемые при расчёте.

Решение

Рассчитаем параметры в рабочей точке при $U_{кэ} = -7$ В и $I_{к0} = 6$ мА.

По выходной характеристике для схемы с общим эмиттером определяем:

- коэффициент передачи тока (по точкам В и Г рис.3.5):

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta I_6} \right|_{U_{кэ}=const} = \frac{3,7 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 18,5$$

- выходную проводимость (по точкам Д и Е рис.3.5):

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_6=const} = \frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{6} = 117 \text{ мкСм}$$

$$R_{вых} = \frac{1}{h_{22э}} = \frac{1}{0,117 \cdot 10^{-3}} = 8,5 \text{ кОм}$$

По входной характеристике для $U_{кэ} = -5$ В определяем входное сопротивление (по точкам М и N рис.3.6)

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{6э}}{\Delta I_6} \right|_{U_{кэ}=const} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0,19 \cdot 10^{-3}} = 210 \text{ Ом}$$

С помощью найденных параметров определим искомые значения по приближённым формулам.

Коэффициент усиления по току:

$$K_I \approx h_{21э} = 18,5$$

Аналитический расчет:

$$K_I = \frac{h_{21э} \cdot R_{вых}}{R_{н} + R_{вых}} = \frac{18,5 \cdot 8,5 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 10^3 + 8,5 \cdot 10^3} = 17,5$$

Результат сходится с графо-аналитическим расчётом.

Входное сопротивление:

$$R_{вх} \approx h_{11э} = 210 \text{ Ом}$$

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{-h_{21э} \cdot R_{н}}{R_{вх}} = \frac{-18,5 \cdot 500}{210} = -44$$

Аналитический расчет:

$$K_U = \frac{-h_{21э} \cdot R_{н}}{R_{вх}} = \frac{-17,5 \cdot 500}{210} = -41,5$$

Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = |K_I \cdot K_U| = 17,5 \cdot 41,5 = 725$$

Список рекомендуемой литературы

1. Жеребцов, И.П. Основы электроники. – изд.5, перераб. и доп./ И.П. Жеребцов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 352с.
2. Нахалов, В.А. Электронные твердотельные приборы: учебное пособие в 2ч. Ч1 /В.А. Нахалов – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006. – 65 с.
3. Новожилов, И.П. Электроника и схемотехника: учебник для академического бакалавриата в 2.ч.Ч.1/И.П. Новожилов – Москва: Изд-во «Юрайт», 2018. –382с.
4. Монк, Саймон. Электроника. Теория и практика — 4-е изд.: Пер. с англ. / Саймон Монк, Пауль Шерц. — СПб.: БХВ-Петербург, 2018. — 1168 с.

Вопросы к защите

1. Основные положения теории электропроводности.
2. Токи в полупроводниках.
3. Контактные явления в полупроводнике.
4. Условия равновесия р-п перехода.
5. Ширина запирающего слоя р-п перехода.
6. Вольт- амперная характеристика р-п перехода.
7. Германиевые и кремниевые диоды.
8. Влияние температуры на работу диода.
9. Стабилитрон. Физические процессы.
10. Виды пробоев в р-п переходе.
11. Параметрический стабилизатор напряжения.
12. Биполярный транзистор. Физические процессы. Принцип действия.
13. Статистические характеристики и параметры схем ОБ.
14. Статистические характеристики и параметры схем ОЭ.
15. Статистические характеристики и параметры схем ОК.
16. Эквивалентная схема транзистора. h- параметры.
17. Усилительный каскад на транзисторе в схеме ОБ.
18. Усилительный каскад на транзисторе в схеме ОЭ.
19. Усилительный каскад на транзисторе в схеме ОК.
20. Графическое представление усилительного режима.
21. Влияние температуры на работу биполярных транзисторов.
22. Полевой транзистор. Принцип действия. Физические процессы.
23. Статические характеристики и параметры полевых транзисторов.
24. Разновидности полевых транзисторов.

