

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Методические рекомендации для
самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

Б1.В.ДВ.04.01 Элементная база электронных устройств

Направление подготовки (специальность) 35.04.06 – Агроинженерия

**Профиль образовательной программы «Электротехнологии и электрооборудование в
сельском хозяйстве»**

Форма обучения заочная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Организация самостоятельной работы	3
2. Методические рекомендации по самостоятельному изучению вопросов	3
3. Методические рекомендации по подготовке к занятиям	16
4. Методические рекомендации по выполнению индивидуальных домашних заданий	17

1. ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1.1. Организационно-методические данные дисциплины

№ п.п.	Наименование темы	Общий объем часов по видам самостоятельной работы (из табл. 5.1 РПД)				
		подготовка курсового проекта (работы)	подготовка реферата/эссе	индивидуальны е домашние задания (ИДЗ)	самостоятельно е изучение вопросов (СИВ)	подготовка к занятиям (ПкЗ)
1	2	3	4	5	6	7
1	Основные сведения по физике полупроводников	-	-	-	6	-
2	Контактные явления	-	-	-	7	-
3	Полупроводниковые диоды	-	-	-	6	-
4	Биполярные транзисторы	-	-	10	7	-
5	Тиристоры	-	-	-	6	-
6	Полевые транзисторы	-	-	-	7	-
7	Оптоэлектронные приборы	-	-	-	8	-
8	Интегральные микросхемы	-	-	10	8	-

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОПРОСОВ

2.1 Структура и основные элементы. Вольт-амперная характеристика диода при инжекции и экстракции носителей заряда. Расчет распределения неосновных носителей заряда в базе диода. Физический смысл параметров диода. Виды пробоев диода. Процессы в диодах при больших прямых токах. Переходные процессы в диодах.

Внешнее напряжение нарушает динамическое равновесие токов в p - n -переходе. P - n -переход переходит в неравновесное состояние. В зависимости от полярности напряжения приложенного к областям в p - n -перехода возможно два режима работы.

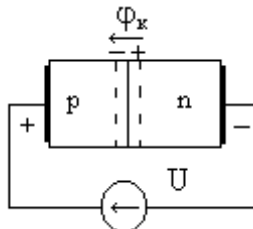


Рис. 1

1) **Прямое смещение p - n перехода.** P - n -переход считается смещённым в прямом направлении, если положительный полюс источника питания подсоединен к p -области, а отрицательный к n -области (рис.1)

При прямом смещении, напряжения j_k и U направлены встречно, результирующее напряжение на p - n -переходе убывает до величины $j_k - U$. Это приводит к тому, что напряженность электрического поля убывает и возобновляется процесс диффузии

основных носителей заряда. Кроме того, прямое смещение уменьшает ширину p - n перехода, т.к. $I_{p-n} \approx (j_k - U)^{1/2}$. Ток диффузии, ток основных носителей заряда, становится много больше дрейфового. Через p - n -переход протекает прямой ток

$$I_{p-n} = I_{np} = I_{diff} + I_{dr}.$$

При протекании прямого тока основные носители заряда p -области переходят в n -область, где становятся неосновными. Диффузионный процесс введения основных носителей заряда в область, где они становятся неосновными, называется *инжекцией*, а прямой ток – диффузионным током или током инжекции. Для компенсации неосновных носителей заряда накапливающихся в p и n -областях во внешней цепи возникает электронный ток от источника напряжения, т.е. принцип электронейтральности сохраняется. При увеличении U ток резко возрастает, $I_{np} = I_0 e^{U/\varphi_T}$, φ_T – температурный потенциал, и может достигать больших величин т.к. связан с основными носителями концентрация которых велика.

2) **Обратное смещение**, возникает когда к p -области приложен минус, а к n -области плюс, внешнего источника напряжения (рис.2).

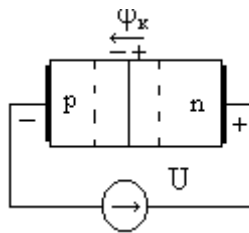


Рис. 2

Такое внешнее напряжение U включено согласно j_k . Оно: увеличивает высоту потенциального барьера до величины $j_k + U$; напряженность электрического поля возрастает; ширина p - n перехода возрастает, т.к. $I_{p-n} \approx (j_k + U)^{1/2}$; процесс диффузии полностью прекращается и через p - n переход протекает дрейфовый ток, ток неосновных носителей заряда. Такой ток p - n -перехода называют обратным, а поскольку он связан с неосновными носителями заряда, которые возникают за счет термогенерации то его называют тепловым током и обозначают - I_0 , т.е.

$$I_{p-n} = I_{обр} = I_{diff} + I_{dr} \quad I_{dr} = I_0.$$

Этот ток мал по величине т.к. связан с неосновными носителями заряда, концентрация которых мала. Таким образом, p - n перехода обладает односторонней проводимостью.

При обратном смещении концентрация неосновных носителей заряда на границе перехода несколько снижается по сравнению с равновесной. Это приводит к диффузии неосновных носителей заряда из глубины p и n -областей к границе p - n перехода. Достигнув ее неосновные носители попадают в сильное электрическое поле и переносятся через p - n переход, где становятся основными носителями заряда. Диффузия неосновных носителей заряда к границе p - n перехода и дрейф через него в область, где они становятся основными носителями заряда, называется *экстракцией*. Экстракция и создает обратный ток p - n перехода – это ток неосновных носителей заряда.

Величина обратного тока сильно зависит: от температуры окружающей среды, материала полупроводника и площади p - n перехода.

Температурная зависимость обратного тока определяется выражением $I_{0(T)} = I_{0(T_0)} 2^{\frac{T-T_0}{T^*}}$, где T_0 – номинальная температура, T – фактическая температура, T^* – температура удвоения теплового тока $T^* = \begin{cases} 5-6^\circ \text{C, Si} \\ 8-10^\circ \text{C, Ge} \end{cases}$.

Тепловой ток кремниевого перехода много меньше теплового тока перехода на основе германия $I_0(T_0)_{Si} \ll I_0(T_0)_{Ge}$ (на 3-4 порядка). Это связано с j_k материала.

- С увеличением площади перехода возрастает его объем, а следовательно возрастает число неосновных носителей появляющихся в результате термогенерации и тепловой ток.
- Итак, главное свойство *p-n*-перехода – это его односторонняя проводимость.

Основным для решения поставленной задачи является уравнение непрерывности, например, для дырок в базе диода с электропроводностью *n*-типа.

Таково распределение постоянной составляющей избыточной концентрации неосновных носителей заряда в базе диода при разных напряжениях.

Под пробоем *p-n*-перехода понимают значительное уменьшение обратного сопротивления, сопровождающееся возрастанием обратного тока при увеличении приложенного напряжения. Различают три вида пробоя: туннельный, лавинный и тепловой.

В основе туннельного пробоя лежит туннельный эффект, т. е. «просачивание» электронов сквозь потенциальный барьер, высота которого больше, чем энергия носителей заряда.

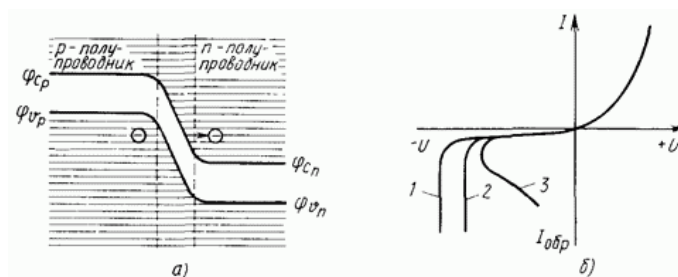


Рис. 3. Энергетическая зонная диаграмма, поясняющая туннельный переход электрона (а); вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода (б): 1 - лавинный пробой; 2 - туннельный пробой; 3 - тепловой пробой

Иными словами, туннельный пробой наступает тогда, когда напряженность электрического поля возрастает настолько, что становится возможным туннельный переход электронов из валентной зоны полупроводника с электропроводностью одного типа в зону проводимости полупроводника с электропроводностью другого типа (рис. 3, а). Туннельный пробой чаще всего возникает у полупроводниковых приборов, имеющих узкий переход и малое значение удельного сопротивления, причем напряженность электрического поля должна быть достаточно высокой (более 10^5 В/см). При такой напряженности энергетические зоны искривляются настолько, что энергия электронов валентной зоны полупроводника *p*-типа становится такой же, как и энергия свободных электронов зоны проводимости полупроводника *n*-типа. В результате перехода электронов «по горизонтали» из области *p* в область *n* возникает туннельный ток. Начало туннельного пробоя оценивается по десятикратному превышению туннельного тока над обратным. При увеличении температуры напряжение, при котором возникает туннельный пробой, уменьшается.

Лавинный пробой вызывается ударной ионизацией, которая происходит тогда, когда напряженность электрического поля, вызванная обратным напряжением, достаточно велика. Неосновные носители заряда, движущиеся через *p-n*-переход, ускоряются настолько, что при соударении с атомами в зоне *p-n*-перехода ионизируют их. В результате появляется пара электрон — дырка. Вновь появившиеся носители заряда ускоряются электрическим полем и в свою очередь могут вызвать ионизацию следующего атома и т. д. Если процесс ударной ионизации идет лавинообразно, то по тому же закону увеличиваются количество носителей заряда и обратный ток. При лавинной ионизации

ток в цепи ограничен только внешним сопротивлением. Для количественной характеристики этого процесса используется коэффициент лавинного умножения, который показывает, во сколько раз ток, протекающий через переход, больше обратного тока:

Коэффициент можно определить из эмпирического выражения

$$M_n = \frac{1}{1 - (U/U_{\text{проб лав}})^n},$$

2.2 Структура и основные режимы работы. Распределение стационарных потоков носителей заряда. Постоянные токи при активном режиме. Явления в транзисторах при больших токах. Статические параметры. Пробой транзистора. Статические характеристики. Эквивалентные схемы. Частотные характеристики. Однопереходные транзисторы.

Биполярный транзистор состоит из трёх различным образом легированных полупроводниковых слоёв: эмиттера Е, базы В и коллектора С. В зависимости от типа проводимости этих зон различают NPN (эмиттер – n-полупроводник, база – p-полупроводник, коллектор – n-полупроводник) и PNP-транзисторы. К каждой из зон подведены проводящие невыпрямляющие контакты. База расположена между эмиттером и коллектором и слаболегирована, поэтому имеет большое омическое сопротивление.

Режимы работы биполярного транзистора:

- нормальный активный режим
- инверсный активный режим
- режим насыщения
- режим отсечки
- барьерный режим

Физические причины, вызывающие пробой переходов транзистора, те же, что и в полупроводниковом диоде. В то же время пробой переходов в транзисторах имеет определенную специфику, связанную с взаимодействием переходов и проявляющуюся главным образом в схеме с общим эмиттером, где напряжение $u_{кэ}$ прикладывается к обоим переходам. В схеме ОБ напряжение лавинного пробоя коллекторного перехода $U_{КБ0 \text{ проб}}$ близко к напряжению пробоя изолированного перехода. Эмиттерный переход, как правило, работает при прямом смещении и его пробивное напряжение не представляет интереса, однако следует иметь в виду, что из-за сильного легирования эмиттера напряжение пробоя эмиттерного перехода мало – несколько вольт. В схеме ОЭ условия возникновения лавинного пробоя очень сильно зависят от режима базовой цепи. В случае, когда ток базы не ограничен пробой коллекторного перехода происходит так же, как и в схеме ОБ, и возникает при том же пробивном напряжении на коллекторе $U_{КБ0 \text{ проб}}$. При фиксированном токе базы, когда базовая цепь питается от источника тока, проявляется механизм положительной обратной связи, снижающей пробивное напряжения. Его суть состоит в том, что образующиеся в переходе в результате ударной ионизации пары носителей заряда разделяются полем перехода: электроны уходят на коллектор, увеличивая его ток, а дырки скапливаются в базе, увеличивая ее потенциал и снижая потенциальный барьер в эмиттерном переходе. В результате увеличивается инжекция электронов из эмиттера в базу и растет коллекторный ток. Соответственно уменьшается пробивное напряжение. Наиболее сильно накопление дырок в базе происходит при отсутствии базового тока ($i_b=0$), что соответствует разомкнутой цепи базы. В этом режиме пробивное напряжение $U_{КЭ0 \text{ проб}}$ оказывается в несколько раз ниже, чем в схеме ОБ, и определяется выражением:

$$U_{КЭ0 \text{ проб}} = U_{КБ0 \text{ проб}} \sqrt[n]{1 - \alpha} \quad (1)$$

где $b=2...6$ - коэффициент, зависящий от материала, из которого изготовлен транзистор. В связи с сильным уменьшением пробивного напряжения запрещается эксплуатация транзистора с разомкнутой базовой цепью.

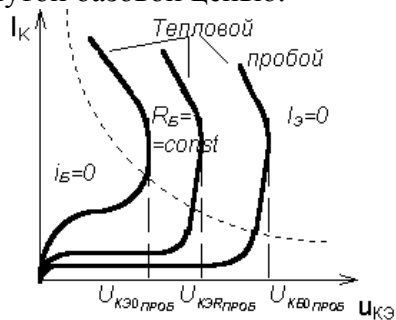


Рис. 1

На рис. 1 приведены выходные характеристики транзистора в режиме пробоя. Помимо рассмотренных выше пробивных напряжений $U_{КБ0проб}$ и $U_{КЭ0проб}$ на рисунке показано напряжение $U_{КЭRпроб}$, соответствующее некоторому конкретному сопротивлению R_B , включенному в цепь базы и определяющему ее ток. Из рисунка видно, что $U_{КЭ0проб} < U_{КЭRпроб} < U_{КБ0проб}$. Для увеличения напряжения пробоя коллекторного перехода степень легирования коллектора стараются выбирать достаточно низкой. Так же, как и в полупроводниковом диоде, обратимый лавинный пробой (называемый иногда первичным пробоем) при отсутствии ограничения тока может перейти в тепловой пробой (вторичный пробой), характеризующийся уменьшением напряжения $u_{КЭ}$ (см. рис. 3.29) и приводящий к выходу транзистора из строя. При этом в транзисторе опасность возникновения теплового пробоя оказывается значительно сильнее, чем в диоде. Это объясняется тем, что за счет инжекции электронов из эмиттера в базу через обратно-смещенный коллекторный переход при больших напряжениях протекает большой обратный ток и, соответственно, велика мощность, рассеиваемая в переходе. Тепловой пробой наступает в том случае, когда рассеиваемая на коллекторе мощность $P_K = u_{КЭ} \times i_K$ превышает максимально допустимую рассеиваемую мощность $P_{K\text{ макс}}$. Гипербола, соответствующая допустимой мощности, показана пунктиром на рис. 3.29. Кроме лавинного и теплового пробоя в транзисторах с очень узкой базой возникает специфический для транзисторной структуры вид пробоя, называемый эффектом смыкания. Он связан с эффектом Эрли и заключается в том, что при очень большом обратном напряжении коллекторный переход, расширяясь, заполняет всю базовую область и смыкается с эмиттерным переходом, что эквивалентно их короткому замыканию.

Однопереходный транзистор или, как его еще называют, двухбазовый диод, представляет собой трехэлектродный полупроводниковый прибор с одним р-п переходом. Структура его условно показана на рис. 2, а, условное графическое обозначение в схемах — на рис. 2, б.

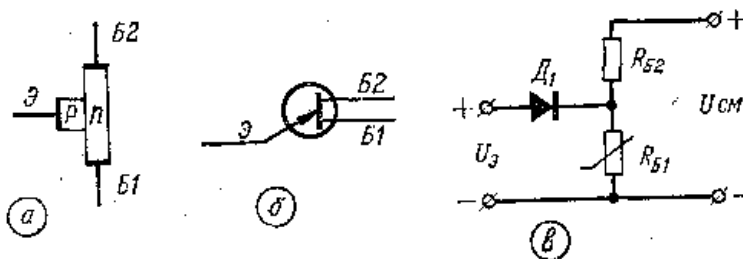


Рис. 2

Основой однопереходного транзистора является кристалл полупроводника (например, с проводимостью n-типа), называемый базой. На концах кристалла имеются

омические контакты Б1 и Б3, между которыми расположена область, имеющая выпрямляющий контакт с полупроводником р-типа, выполняющим роль эмиттера.

Принцип действия однопереходного транзистора удобно рассмотреть, пользуясь простейшей эквивалентной схемой (рис. 2, в), где $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$ — сопротивления между соответствующими выводами базы и эмиттером, а Д1 — эмиттерный р-п переход. Ток, протекающий через сопротивления $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$, создает на первом из них падение напряжения, смещающее диод Д1 в обратном направлении. Если напряжение на эмиттере $U_э$ меньше падения напряжения на сопротивлении $R_{Б1}$, диод Д1 закрыт, и через него течет только ток утечки. Когда же напряжение $U_э$ становится выше напряжения на сопротивлении $R_{Б1}$, диод начинает пропускать ток в прямом направлении. При этом сопротивление $R_{Б1}$ уменьшается, что приводит к увеличению тока в цепи Д1 $R_{Б1}$, а это, в свою очередь, вызывает дальнейшее уменьшение сопротивления $R_{Б1}$. Этот процесс протекает лавинообразно. Сопротивление $R_{Б1}$ уменьшается быстрее, чем увеличивается ток через р-п переход, в результате на вольт-амперной характеристике однопереходного транзистора (рис. 3), появляется область отрицательного сопротивления (кривая 1). При дальнейшем увеличении тока зависимость сопротивления $R_{Б1}$ от тока через р-п переход уменьшается, и при значениях, больших некоторой величины ($I_{вкл}$) оно не зависит от тока (область насыщения).

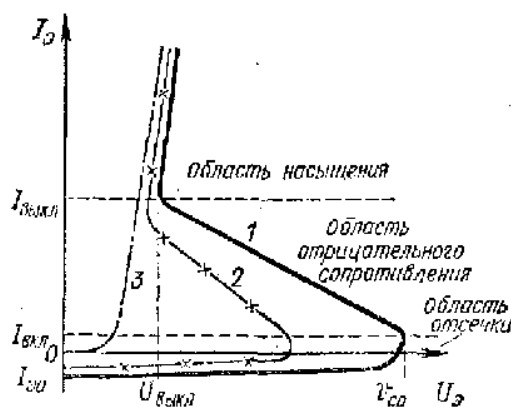


Рис. 3

При уменьшении напряжения смещения $U_{см}$ вольт-амперная характеристика смещается влево (кривая 2) и при отсутствии его обращается в характеристику открытого р-п перехода (кривая 3).

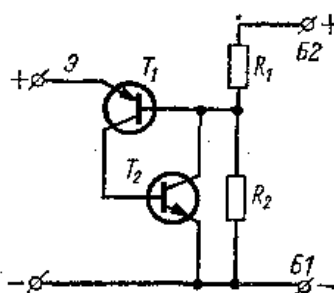


Рис. 4

Здесь ток, протекающий через делитель, состоящий из резисторов R_1 и R_2 , создает на втором из них падение напряжения, закрывающее эмиттерный переход транзистора T_1 . При увеличении напряжения на эмиттере транзистор T_1 начинает пропускать ток в базу транзистора T_2 , в результате чего он также открывается. Это приводит к снижению напряжения на базе транзистора T_1 , что, в свою очередь, вызывает еще большее открывание его и т. д. Другими словами, процесс открывания транзисторов в

таком устройстве также протекает лавинообразно и вольтамперная характеристика устройства имеет вид, аналогичный характеристике однопереходного транзистора.

2.3 Полевые транзисторы с управляющим переходом. Эквивалентные схемы полевого транзистора с управляющим переходом. Частотные свойства полевых транзисторов. Полевые транзисторы с изолированным затвором. Параметры и свойства полевых транзисторов.

Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом – это полевой транзистор, затвор которого отделен в электрическом отношении от канала р-п-переходом, смещенным в обратном направлении.

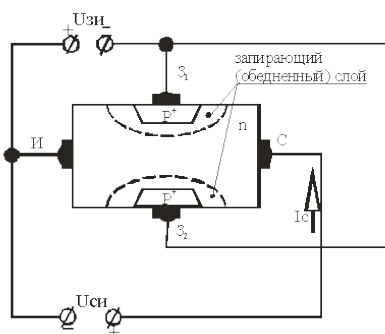


Рис. 1 – Устройство полевого транзистора с управляющим р-п-переходом (каналом n-типа)



Рис. 2 – Условное обозначение полевого транзистора с р-п-переходом и каналом n-типа (а), каналом р-типа (б)

Каналом полевого транзистора называют область в полупроводнике, в которой ток основных носителей заряда регулируется изменением ее поперечного сечения.

Электрод (вывод), через который в канал входят основные носители заряда, называют истоком. Электрод, через который из канала уходят основные носители заряда, называют стоком. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала за счет управляющего напряжения, называют затвором.

Как правило, выпускаются кремниевые полевые транзисторы. Кремний применяется потому, что ток затвора, т.е. обратный ток р-п-перехода, получается во много раз меньше, чем у германия.

Условные обозначения полевых транзисторов с каналом n- и р-типов приведены на рис. 2.

Полярность внешних напряжений, подводимых к транзистору, показана на рис. 1. Управляющее (входное) напряжение подается между затвором и истоком. Напряжение $U_{зи}$ является обратным для обоих р-п-переходов. Ширина р-п-переходов, а, следовательно, эффективная площадь поперечного сечения канала, его сопротивление и ток в канале зависят от этого напряжения. С его ростом расширяются р-п-переходы, уменьшается площадь сечения токопроводящего канала, увеличивается его сопротивление, а, следовательно, уменьшается ток в канале. Следовательно, если между истоком и стоком включить источник напряжения $U_{си}$, то силой тока стока I_c , протекающего через канал, можно управлять путем изменения сопротивления (сечения) канала с помощью напряжения, подаваемого на затвор. На этом принципе и основана работа полевого транзистора с управляющим р-п-переходом.

При напряжении $U_{зи} = 0$ сечение канала наибольшее, его сопротивление наименьшее и ток I_c получается наибольшим.

Ток стока I_c нач при $U_{зи} = 0$ называют начальным током стока.

Напряжение $U_{зи}$, при котором канал полностью перекрывается, а ток стока I_c становится весьма малым (десять доли микроампер), называют напряжением отсечки $U_{зи\text{отс}}$.

Частотные свойства полевых транзисторов определяются постоянной времени RC -цепи затвора. Поскольку входная емкость $C_{зи}$ у транзисторов с p - n -переходом велика (десятки пикофарад), их применение в усилительных каскадах с большим входным сопротивлением возможно в диапазоне частот, не превышающих сотен килогерц – единиц мегагерц.

При работе в переключающих схемах скорость переключения полностью определяется постоянной времени RC -цепи затвора. У полевых транзисторов с изолированным затвором входная емкость значительно меньше, поэтому их частотные свойства намного лучше, чем у полевых транзисторов с p - n -переходом.

Ток насыщения I_{c0} в цепи стока транзистора, включенного по схеме с общим истоком, при затворе накоротко замкнутым с истоком (т. е. при $U_{з.и}=0$) - характерен лишь для полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом.

Ток стока в рабочей точке можно определить по следующей формуле:

$$I_c = I_{c0}(1 - U_{з.и}/U_{отс})^2 \quad (1)$$

где $U_{отс}$ - напряжение отсечки.

Уравнение (1) является приближенным для характеристики передачи любого полевого транзистора (особенно с малыми напряжениями отсечки).

Напряжение отсечки $U_{отс}$ - один из основных параметров, характеризующих полевой транзистор. При напряжении на затворе, численно равном напряжению отсечки, практически полностью перекрывается канал полевого транзистора, и ток стока при этом стремится к нулю.

Измерение истинного значения напряжения отсечки (при полном перекрытии канала) произвести довольно трудно, так как при этом приходится иметь дело с чрезвычайно малыми токами стока, к тому же зависящими от сопротивления изоляции. В справочных данных на полевые транзисторы всегда указывается, при каком значении тока стока произведены измерения напряжения отсечки. Так, например, для транзисторов КП102 напряжения $U_{отс}$ получены при токе стока 20 мкА, а у транзистора КП103 - при токе стока 10 мкА.

Крутизна проходной характеристики. Входное сопротивление полевых транзисторов со стороны управляющего электрода составляет 10^7 - 10^9 Ом для транзисторов с p - n -переходом. Так как входные токи полевых транзисторов чрезвычайно малы, то управление током в выходной цепи осуществляется входным напряжением. Поэтому усилительные свойства полевого транзистора, как и электронных ламп, целесообразно характеризовать крутизной проходной характеристики.

Крутизна полевых транзисторов

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{з.и}} \text{ при } U_{с.и} = \text{const.}$$

Максимальное значение крутизны характеристики $S_{\text{макс}}$ достигается при $U_{з.и}=0$. При этом численное значение $S_{\text{макс}}$ равно проводимости канала полевого транзистора при нулевых смещениях на его электродах.

Крутизна характеристики полевых транзисторов на 1-2 порядка меньше, чем у биполярных транзисторов, поэтому при малых сопротивлениях нагрузки коэффициент усиления каскада на полевом транзисторе меньше коэффициента усиления аналогичного каскада на биполярном транзисторе.

В большинстве случаев крутизну характеристики полевых транзисторов считают частотно-независимым параметром. Поэтому быстродействие электронных схем на полевых транзисторах ограничено в основном паразитными параметрами схемы.

Выражение для крутизны характеристики в рабочей точке ПТ получим, используя (1):

$$S = S_{\text{макс}} (1 - U_{з.и}/U_{отс}), \quad (2)$$

где $U_{з.и}$ - напряжение затвор-исток, при котором вычисляется S ;

$$S_{\text{макс}} = 2 \frac{I_{с0}}{U_{отс}} \quad (3)$$

Соотношение (3) позволяет по двум известным параметрам рассчитать третий.

Пробивное напряжение. Механизм пробоя полевого транзистора можно объяснить возникновением лавинного процесса в переходе затвор - канал. Обратное напряжение диода затвор - канал изменяется вдоль длины затвора, достигая максимального значения у стокового конца канала. Именно здесь происходит пробой полевого транзистора. Если выводы стока и истока поменять местами, то пробивное напряжение почти не изменится. Например, у транзистора КП102 пробой наступает при суммарном напряжении между затвором и стоком, равном 30 В. Это напряжение является минимальным; фактически напряжение пробоя составляет в среднем около 55 В, а у отдельных экземпляров достигает 120 В.

Пробой не приводит к выходу из строя ПТ с управляющим р-п-переходом, если при этом рассеиваемая мощность не превышает допустимой. После пробоя в нормальном рабочем режиме эти транзисторы восстанавливают свою работоспособность. Это свойство транзисторов с р-п-переходом даёт им известное преимущество перед МОП-транзисторами, у которых пробой однозначно приводит к выходу прибора из строя.

Однако необходимо оговориться, что и для ПТ с р-п-переходом пробой не всегда безвреден. Степень его влияния на параметры транзистора определяется значением и продолжительностью действия тока, протекающего при этом через затвор. Так, в результате пробоя может увеличиться ток утечки затвора в нормальном режиме.

Динамическое сопротивление канала r_k определяется выражением

$$r_k = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_0} \text{ при } U_{з.и} = \text{const}$$

Это сопротивление при $U_{с.и} = 0$ и произвольном смещении $U_{з.и}$ можно выразить через параметры транзистора:

$$r_k = \frac{U_{отс}}{2I_{с0} (1 - U_{з.и}/U_{отс})} \quad (4)$$

При малом напряжении сток-исток вблизи начала координат ПТ ведёт себя как переменное омическое сопротивление, зависящее от напряжения на затворе. Это остаётся справедливым даже в случае изменения полярности напряжения стока; необходимо только, чтобы напряжение на затворе было больше, чем на стоке.

2.4 Диодные тиристоры. Диодный тиристор с зашунтированным эмиттерным переходом. Триодные тиристоры. Тиристоры, проводящие в обратном направлении. Симметричные тиристоры. Способы управления тиристорами. Конструкция и технология изготовления тириستоров.

Переключение тиристора из закрытого состояния в открытое происходит при возрастании суммарного дифференциального коэффициента передачи тока до единицы. В то же время в каждой из транзисторных структур, составляющих тиристор, коэффициенты передачи тока эмиттера могут быть близки к единице уже при малых напряжениях и токах, т.е. $U_{вкл}$ в простейшей динисторной структуре мало. Для уменьшения начального значения коэффициента передачи одну из базовых областей всех тириستоров делают

относительно толстой (до 200 мкм) по сравнению с диффузионной длиной неосновных носителей.

Для уменьшения коэффициента передачи тока эмиттера другого транзистора его эмиттерный переход шунтируют объемным сопротивлением прилегающей базовой области (рис. 1). Такое шунтирование осуществляют путем нанесения одного из основных электродов (например, катода) не только на эмиттерную область, но и частично на поверхность прилегающей базовой области.

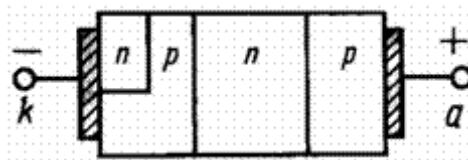


Рис.1

Шунтирование обеспечивает малые значения коэффициента передачи тока при малых напряжениях на тиристоре, так как почти весь ток при этом проходит по шунтирующему сопротивлению базы, минуя левый (рис. 1) эмиттерный переход в связи с его относительно большим сопротивлением при малых напряжениях. При больших напряжениях на тиристоре сопротивление левого эмиттерного перехода становится меньше шунтирующего сопротивления базы. Это значит, что теперь почти весь ток будет проходить через эмиттерный переход и будет вызван инжекцией неосновных носителей заряда в прилегающую базовую область.

Шунтирование, во-первых, дает возможность создавать тиристоры с большими значениями напряжения включения; во-вторых, при шунтировании эмиттерного перехода получается более резкая зависимость коэффициента передачи тока от напряжения и от тока. Поэтому тиристор с зашунтированным эмиттерным переходом будет иметь так называемую жесткую характеристику переключения, т.е. будет переходить из закрытого в открытое состояние каждый раз при одном и том же напряжении включения. При слабой зависимости коэффициента передачи тока от напряжения и от тока открывание тиристора может происходить в некотором диапазоне значений напряжения включения, т.е. тиристор в этом случае будет иметь так называемую мягкую характеристику переключения.

Симметричные тиристоры (симисторы) изготовлены на основе пятислойной кремниевой структуры (рис. 2) и предназначены для работы в коммутационной и регулирующей аппаратуре (светорегуляторы для ламп накаливания, коммутаторы нагрузок, аппараты импульсной сварки, регуляторы температуры для бытовых электроприборов, стабилизаторы тока и напряжения, мощные ультразвуковые генераторы и т. п.). Симистор способен проводить ток в обоих направлениях, заменяя таким образом два встречно-параллельно включенных тринистора. Иными словами, у симистора нет постоянных анода и катода.

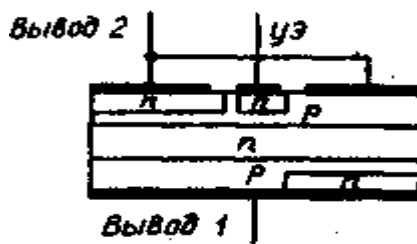


Рис. 2.

Для определенности принято выводы симистора, включаемые в цепь нагрузки, обозначать цифрами 1 и 2. Если между выводами 1 и 2 симистора приложено рабочее напряжение, а открывающий импульс на управляющий электрод не подан, то симистор

закрит и тока не проводит. Включают (открывают) симистор подачей на управляющий электрод импульса тока относительно вывода 2.

2.5 Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов. Полупроводниковые приборы отображения информации и инфракрасные излучающие диоды. Фоторезисторы. Фотодиоды. Полупроводниковые фотоэлементы. Фототранзисторы и фототиристоры. Оптопары и оптоэлектронные микросхемы.

Фотодиоды – селективные регистрирующие фотоэлектрические ПЛЭ, основанные на явлении фотовольтаического эффекта в полупроводниковом контактном переходе и предназначенные как для работы с приложением внешнего напряжения, так и без него.

Фотовольтаическим эффектом – (фотогальваническим, вентильным) – называют форму внутреннего фотоэффекта в полупроводниках со свойствами, неоднородными для движения фотоносителей даже при отсутствии внешнего напряжения, при которой оптически генерированные неравновесные носители заряда пространственно разделяются в объеме полупроводника вследствие его неоднородности, образуя при этом пространственно разделенные объемные заряды и, следовательно, разность потенциалов между участками облученного образца, называемую фото ЭДС (V_F).

Фотодиод представляет собой пластинку полупроводникового материала, внутри которого имеются области примесной электронной (n – область) и дырочной (p – область) проводимостей. Границу между этими областями называют контактным p - n переходом (рис. 1). Электронная и дырочная области снабжены невыпрямляющими контактами с присоединенными к ним выводами, с помощью которых осуществляется связь с внешней цепью. С целью предохранения чувствительного слоя фотодиода от воздействия внешней среды он покрывается лаком или монтируется в герметичном корпусе, изготовленном или из металла (со стеклянным входным окном) или из пластмасс.

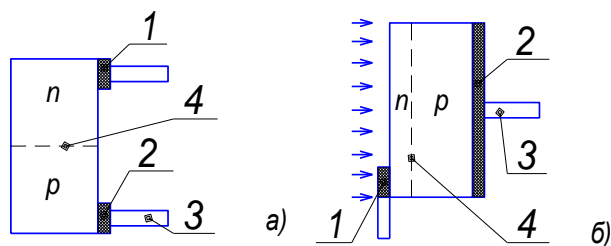


Рис. 1. Принципиальная схема фотодиода.

а) – направление светового пучка параллельно плоскости p – n перехода;

б) – световой пучок и плоскость p – n перехода взаимно перпендикулярны.

1 – контакт n – области; 2 – контакт p – области; 3 – выводы; 4 – p – n переход.

Оптоэлектронными называют приборы, которые чувствительны к электромагнитному излучению в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях, а также приборы, производящие или использующие такое излучение.

Излучение в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях относят к оптическому диапазону спектра. Обычно к указанному диапазону относят электромагнитные волны с длиной от 1 нм до 1 мм, что соответствует частотам примерно от $0,5 \cdot 10^{12}$ Гц до $5 \cdot 10^{17}$ Гц. Иногда говорят о более узком диапазоне частот – от 10 нм до 0,1 мм ($\sim 5 \cdot 10^{12} \dots 5 \cdot 10^{16}$ Гц). Видимому диапазону соответствуют длины волн от 0,38 мкм до 0,78 мкм (частота около 10^{15} Гц).

На практике широко используются источники излучения (излучатели), приемники излучения (фотоприемники) и оптроны (оптопары).

Оптроном называют прибор, в котором имеется и источник, и приемник излучения, конструктивно объединенные и помещенные в один корпус.

Из источников излучения нашли широкое применение светодиоды и лазеры, а из приемников – фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры.

Широко используются оптроны, в которых применяются пары светодиод-фотодиод, светодиод-фототранзистор, светодиод-фототиристор.

Основные достоинства оптоэлектронных приборов:

- высокая информационная емкость оптических каналов передачи информации, что является следствием больших значений используемых частот;
- полная гальваническая развязка источника и приемника излучения;
- отсутствие влияния приемника излучения на источник (однаправленность потока информации);
- невосприимчивость оптических сигналов к электромагнитным полям (высокая помехозащищенность).

Оптрон – полупроводниковый прибор, содержащий источник излучения и приемник излучения, объединенных в одном корпусе и связанные между собой оптически, электрически и одновременно обеими связями. Очень широко распространены оптроны, у которых в качестве приемника излучения используются фоторезистор, фотодиод, фототранзистор и фототиристор.

В резисторных оптронах выходное сопротивление при изменении режима входной цепи может изменяться в $10^7 \dots 10^8$ раз. Кроме того, вольт-амперная характеристика фоторезистора отличается высокой линейностью и симметричностью, что обуславливает широкую применимость резистивных оптопар в аналоговых устройствах. Недостатком резисторных оптронов является низкое быстродействие – $0,01 \dots 1$ с.

В цепях передачи цифровых информационных сигналов применяются главным образом диодные и транзисторные оптроны, а для оптической коммутации высоковольтных сильноточных цепей – тиристорные оптроны. Быстродействие тиристорных и транзисторных оптронов характеризуется временем переключения, которое часто лежит в диапазоне $5 \dots 50$ мкс.

Рассмотрим подробнее оптопару светодиод-фотодиод (рис.2,а). Излучающий диод (слева) должен быть включен в прямом направлении, а фотодиод – в прямом (режим фотогенератора) или обратном направлении (режим фотопреобразователя). Направления токов и напряжений диодов оптопары приведены на рис. 2,б.

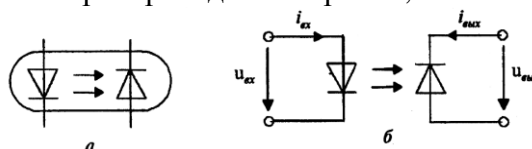


Рис. 2. Схема оптопары (а) и направление токов и напряжений в ней (б)

Изобразим зависимость тока $i_{вх}$ от тока i_{ex} при $u_{вх}=0$ для оптопары АОД107А (рис. 2). Указанная оптопара предназначена для работы как в фотогенераторном, так и в фотопреобразовательном режиме.

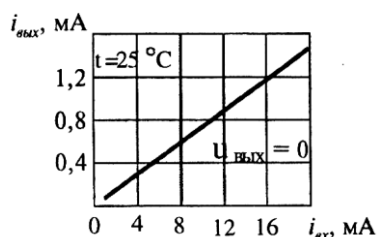


Рис. 3. Передаточная характеристика оптопары АОД107А

Фототранзистор и фототиристор

Выходные характеристики фототранзистора подобны выходным характеристикам обычного биполярного транзистора, в котором положение характеристик определяется не током базы, а уровнем освещенности (или величиной светового потока).

Свойства фототиристора подобны свойствам обычного тиристора, однако с той лишь особенностью, что включение тиристора осуществляется не с помощью импульса тока управления, а с помощью светового импульса.

2.7 Пассивные элементы интегральных микросхем. Биполярные транзисторы в ИМС. Диоды полупроводниковых ИМС.

В интегральных микросхемах процесс формирования активных элементов (транзисторов, диодов), пассивных элементов (резисторов, конденсаторов) и соединительных элементов происходит на поверхности или в объеме полупроводникового кристалла или на поверхности диэлектрической подложки в едином технологическом цикле. Минимальное количество внутрисхемных соединений дает возможность резко повысить надежность микроэлектронной аппаратуры.

Для изоляции областей соседних биполярных транзисторов можно использовать обратно смещенный (закрытый) p - n переход. В типовой структуре вертикальных транзисторов n^+ - p - n типа наряду с основным образуется паразитный транзистор p - n - p , включающий области база – коллектор – подложка основной структуры (рис. 1,а). Это учитывается в его модели, включающей наряду с основным (вертикальным) транзистором также паразитный транзистор и изолирующую диодную цепь (рис. 1,б)

Выполненная с высокой степенью легирования эмиттерная область (обозначена n^+), обладает поверхностным сопротивлением 2...3 Ом/см (сопротивление квадрата из плоского проводника фиксированной толщины). Поверхностное сопротивление базового p -слоя составляет примерно 100...200 Ом/см. Коллекторная область имеет значение удельного сопротивления 0,5...1,0 Ом·см и может образовывать выпрямляющий контакт с алюминием. Для получения омического контакта внутри нее формируют область n^+ .

Основным недостатком приведенной структуры является сравнительно большие токи обратного смещенного изолирующего перехода. Применяется также биполярная структура с диэлектрической изоляцией. Транзисторы формируют в изолированных карманах, окруженных тонким слоем диэлектрика (окиси кремния). Это обеспечивает высокое качество изоляции, т. к. обратный ток p - n перехода на несколько порядков превышает ток через диэлектрик, но существенно усложняет технологический процесс и уменьшает плотность элементов на кристалле. Распространенным способом разделения биполярных транзисторов в ИМС служит совмещение рассмотренных способов, называемое изопланарной технологией. При этом изоляция коллекторной области от подложки в горизонтальной плоскости осуществляется закрытым p - n переходом и с боковых сторон в вертикальной плоскости формируются островки диэлектрика.

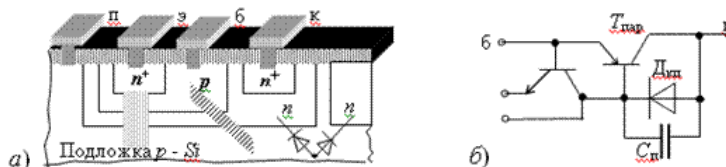


Рис. 1. Структура БТ с изоляцией p - n переходом (а) и его эквивалентная схема (б)

Биполярные ИМС преимущественно проектируют на основе транзисторов типа n^+ - p - n , имеющих хорошие усилительные параметры. При необходимости применения транзисторов типа p - n - p их можно получить на базе имеющейся структуры с использованием подложки в качестве коллектора. Такой транзистор имеет невысокие усилительные и частотные параметры. Если требуется одновременно иметь транзисторы с близкими параметрами, т.е. комплементарную пару, то транзистор типа p - n - p формируют в изолированном кармане, и структура получается достаточно сложной. Для реализации

логических и других элементов в интегральной технологии разработаны уникальные структуры многоэмиттерных и многоколлекторных транзисторов, элементов с инжекционным питанием, которые не имеют аналогов в виде отдельных приборов.

Полупроводниковые диоды. Для упрощения технологического цикла диоды изготавливают на основе транзисторных структур. Для быстродействующих диодов используют эмиттерный переход при соединенном с базой коллекторе (рис. 2, а). Для диодов, которые должны иметь большое пробивное напряжение, используют коллекторный переход, а эмиттер соединяют с базой (рис. 2, б). Во втором случае скорость переключения получается в десятки раз ниже из-за большего значения неравновесного заряда, накапливающегося не только в области базы, но и в области коллектора, а также из-за большей емкости перехода.

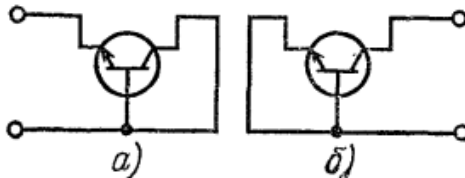


Рис. 2

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЗАНЯТИЯМ

3.1 Практическое занятие №1 (ПЗ-1) Расчет вольт-амперной характеристики диода

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты:

- используя аналитическое выражение для вольт-амперной характеристики диода уметь построить ее для различного типа диодов;
- проанализировать вольт-амперную характеристику и отметить основные характерные точки на ней.

3.2 Практическое занятие №2 (ПЗ-2) Принцип выбора полупроводникового диода.

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты:

- понимать значения основных параметров полупроводниковых диодов и уметь использовать их для выбора диодов для конкретных устройств и схем.

3.3 Практическое занятие №3 (ПЗ-3) Статические параметры и характеристики биполярных транзисторов.

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

3.4 Практическое занятие №4 (ПЗ-4) Эквивалентные схемы биполярных транзисторов.

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

3.5 Практическое занятие №5 (ПЗ-5) Расчет выходных статических характеристик полевого транзистора.

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

3.6 Практическое занятие №6 (ПЗ-6) Эквивалентные схемы полевого транзистора.

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

3.7 Практическое занятие №7 (ПЗ-7) Способы управления тиристорами

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты:

- понимать процессы, проходящие в тиристоре при его работе;
- иметь представление об основных схемах управления тиристорами;
- понимать отличие между незапираемым и запираемым тиристорами.

3.8 Практическое занятие №8 (ПЗ-8) Симметричные тиристоры.

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ

Индивидуальные домашние задания выполняются в форме контрольной работы.

4.1 Темы индивидуальных домашних заданий

Расчет электронного устройства.

4.2 Содержание индивидуальных домашних заданий

1. Для усилительного транзисторного каскада (рис. 1):
 - выбрать транзистор по приложению 1, определить напряжение источника питания $U_{\text{п}}$, рассчитать сопротивления резисторов и выбрать их номиналы по приложению 2;
 - определить h -параметры, $h_{11э}$, $h_{21э}$ в рабочей точке транзисторного каскада, его входное и выходное сопротивления $R_{\text{вх}}$ и $R_{\text{вых}}$;
 - найти амплитуды напряжения и тока базы $U_{\text{б}}$ и $I_{\text{б}}$, коэффициенты усиления каскада по току, напряжению и мощности K_{I} , K_{V} , K_{P} и амплитуду напряжения источника сигнала $U_{\text{гн}}$;
 - рассчитать емкости конденсаторов, выбрать их номинал по приложениям 2,3.
2. Задана схема на операционном усилителе, необходимо:

- рассчитать сопротивления резисторов и емкости конденсаторов, выбрать их номиналы по приложениям 2,3;
 - выбрать операционный усилитель (ОУ);
 - определить максимальные амплитуды источника сигнала.
3. Для логической функции необходимо:
- упростить функцию, пользуясь алгеброй логики;
 - составить таблицу истинности;
 - разработать функциональную электрическую схему на базовых элементах (И, ИЛИ, НЕ).

Исходные данные для контрольной работы выбираются по двум цифрам варианта.

По последней цифре (нижнее подчеркивание означает знак инверсии):

Последняя цифра варианта		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
К пункту 1 задания	Сопротивление нагрузки R_n , Ом	100	150	180	300	400	500	400	350	370	300
	Амплитуда напряжения на нагрузке U_{nm} , В	0,5	1	1,5	2	2,5	2,25	1,75	1,25	0,75	1
К пункту 2 задания	Схема на ОУ, рис.	4а	4б	4в	4г	4д	4а	4б	4г	4г	4д
	Коэффициент усиления по напряжению для источника сигнала K_{U2}	-	-	20	-	-	-	-	40	-	-
	Нижняя граничная частота F_n , Гц	-	-	-	50	20	-	-	-	100	75
	Внутреннее сопротивление источника сигнала R_{G2} , кОм	-	-	40	-	-	-	-	70	-	-
К пункту 3 задания	Логическая функция F	$X((Y+Z\bar{X})+A_1)A_2$	$(\bar{X}Z+Y)Z+A_1+A_2$	$X(\bar{Y}+XY\bar{Z})+A_1A_2$	$X(YZ+X)(A_1+A_2)$	$\bar{X}Y(Z+X)+A_1+A_2$	$XY(Z+\bar{X})+A_1+A_2$	$X(\bar{Y}+Z+X)A_1A_2$	$XYZ+\bar{Z}XY+A_1+A_2$	$XY(Z+XY)+A_1+A_2$	$X(YZ+X\bar{Y})A_1+A_2$

По предпоследней цифре:

Предпоследняя цифра варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

К пункту 1 задания	Внутреннее сопротивление источника сигнала R_G , Ом	100	150	200	300	350	400	450	500	600	700
К пункту 2 задания	Внутреннее сопротивление источника сигнала R_G , кОм	1	10	20	30	75	40	25	15	5	3
К пункту 3 задания	Логическая функция A_1	\overline{XYZ}	\overline{XYZ}	\overline{XYZ}	$\overline{X+YZ}$	\overline{XYZ}	\overline{XYZ}	$\overline{X+Y+Z}$	\overline{XYZ}	\overline{XYZ}	\overline{XYZ}

По последней цифре:

Последняя цифра варианта		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
К пункту 1 задания	Нижняя граничная частота F_H , Гц	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
К пункту 2 задания	Коэффициент усиления по напряжению для источника сигнала K_{U1}	10	20	30	40	50	55	45	35	25	15
К пункту 3 задания	Логическая функция A_2	$\overline{XY}(ZX+ZY)$	$\overline{XY}(XZ+Z)$	$\overline{XZ}(XY+\overline{X})$	$Y(Z+ZX)$	$ZY(XZ+\overline{X})$	$X(XYZ+ZY)$	$Z(XYZ+ZY)$	$(XY+\overline{ZX})ZY$	$(\overline{ZY}+ZX)YZ$	XY

Прочие данные:

Допустимые частотные искажения на граничной частоте $M_H=1,41$.

Динамический диапазон выходного напряжения $D=26$ дБ.

Максимальная температура окружающей среды $T=40$ °С.

4.3 Порядок выполнения заданий

Вычертить принципиальную электрическую схему транзисторного усилительного каскада (рис. 1).

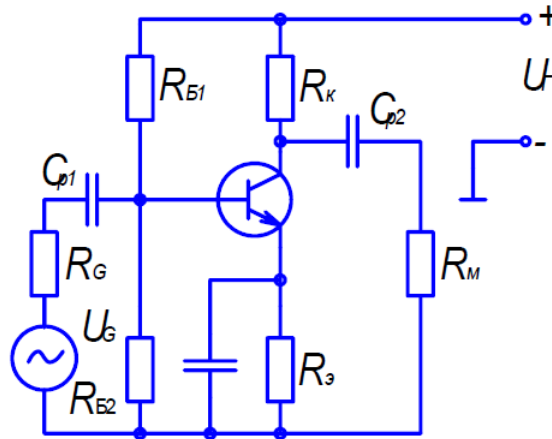


Рис. 1 – Принципиальная электрическая схема усилительного каскада

Рассчитаем сопротивление резистора в цепи коллектора транзистора:

$$R_K = (1 + K_R) \cdot R_H.$$

Выберем номинал сопротивления резистора.

Определим эквивалентное сопротивление нагрузки каскада:

$$R_H = \frac{R_H \cdot R_K}{R_H + R_K}.$$

Найдем амплитуду коллекторного тока транзистора:

$$I_{KM} = \frac{U_{Hm}}{R_H}.$$

Определим ток покоя (ток в рабочей точке) транзистора:

$$I_{KP} = \frac{I_{Km}}{k_3}.$$

Определим минимальное напряжение коллектор-эмиттер в рабочей точке транзистора:

$$U_{KЭП\min} = U_{Hm} + U_0.$$

Рассчитаем напряжение источника питания:

$$U_{\Pi} = \frac{U_{KЭП} + I_{KP} \cdot R_K}{0,7 - 0,9}.$$

Определим сопротивление резистора:

$$R_3 = (0,1 - 0,3) \frac{U_{\Pi}}{I_{KP}}.$$

Выбираем транзистор по следующим данным:

$$U_{KЭдоп} \geq U_{\Pi};$$

$$I_{Kдоп} \geq I_{KP}.$$

Вычертить выходные и входные характеристики транзистора.

На выходных характеристиках транзистора построим нагрузочную прямую постоянного тока по точкам А и В.

Точка А: $U_{КЭ} = 0, I_K = \frac{U_{\Pi}}{R_K + R_{Э}}$.

Точка В: $U_{КЭ} = U_{\Pi}, I_K = 0$.

Нанесем рабочую точку С на нагрузочную прямую с координатой $I_K = I_{КП}$, уточним напряжение в рабочей точке поля $U_{КЭП} = 5В$.

Рассчитаем мощность в точке покоя транзистора:

$$P_{КП} = I_{КП} \cdot U_{КЭП}.$$

Определим наибольшую мощность рассеивания транзистора при максимальной рабочей температуре:

$$P_{K \max} = P_{K \text{доп}} \frac{T_{\Pi \max} - T_m}{T_{\Pi \max} - T_o}.$$

Находим координаты рабочей точки С на входной характеристике транзистора.

$$R_{\delta 2} = \frac{U_{БЭП} + I_{КП} \cdot R_{Э}}{I_{Д}}.$$

Определим сопротивление резистора базового делителя:

$$R_{\delta 1} = R_{\delta 1} \cdot \left(\frac{U_{\Pi}}{U_{БЭП} + I_{КП} \cdot R_{Э}} - 1 \right).$$

Найдем эквивалентное сопротивление базового делителя:

$$R_{Д} = \frac{R_{\delta 1} \cdot R_{\delta 2}}{R_{\delta 1} + R_{\delta 2}}.$$

По выходным характеристикам транзистора определим $h_{21Э}$ в рабочей точке транзистора:

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}.$$

По входным характеристикам найдем $h_{11Э}$ в рабочей точке транзистора:

$$h_{11Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B}.$$

Найдем входное сопротивление каскада:

$$R_{ВХ} = \frac{h_{11Э} \cdot R_{Д}}{h_{11Э} + R_{Д}}.$$

Рассчитаем выходное сопротивление каскада: $R_{ВХ} \approx R_K$.

Построим на выходных характеристиках транзистора нагрузочную прямую по переменному току, проходящую через рабочую точку С и имеющую наклон:

$$\frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{1}{R_H}.$$

Находим амплитуду тока базы по выходным характеристикам:

$$I_{Бм} = \frac{\Delta I_B}{2}.$$

Определим по входным характеристикам амплитуду входного напряжения транзистора:

$$U_{Бм} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{2}.$$

Определим коэффициент усиления каскада по току:

$$K_I \approx h_{21Э} \cdot \frac{R_H}{R_H}.$$

Найдем коэффициент усиления каскада по напряжению:

$$K_U = K_I \cdot \frac{R_H}{R_G + R_{BX}}.$$

Рассчитаем коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = K_I \cdot K_U.$$

Определим амплитуду напряжения источника сигнала:

$$U_{Gm} = \frac{U_{Hm}}{K_U}.$$

Распределим частотные искажения в области нижних частот, вносимые ёмкостями конденсаторов C_{P1} , C_{P2} , $C_{\delta 1}$ равномерно между ними:

$$M_{HC} = \sqrt[3]{M_H} = \sqrt[3]{1,41} = 1,12$$

Рассчитаем ёмкость разделительного конденсатора:

$$C_{P1} \geq \frac{1}{2\pi \cdot F_H \cdot (R_G + R_{BX}) \sqrt{M_{HC}^2 - 1}}$$

Определим ёмкость разделительного конденсатора:

$$C_{P2} \geq \frac{1}{2\pi \cdot F_H \cdot (R_{BbX} + R_H) \sqrt{M_{HC}^2 - 1}}.$$

Найдём ёмкость блокировочного конденсатора:

$$C_{\delta 1} \geq \frac{1}{2\pi \cdot F_H \cdot R_H \sqrt{M_{HC}^2 - 1}}.$$

Задание №2

Принципиальные электрические схемы устройств
на операционных усилителях:

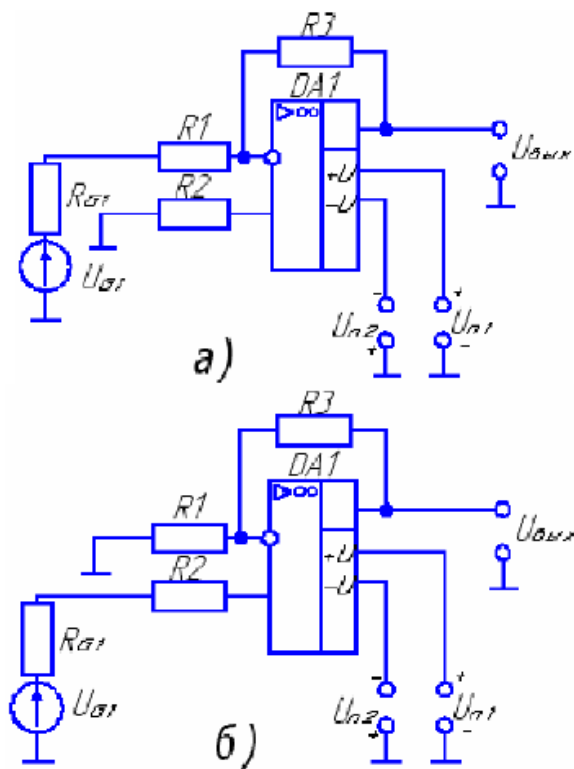


Рис. 4:

а) Инвертирующий усилитель постоянного тока, б) неинвертирующий усилитель постоянного тока

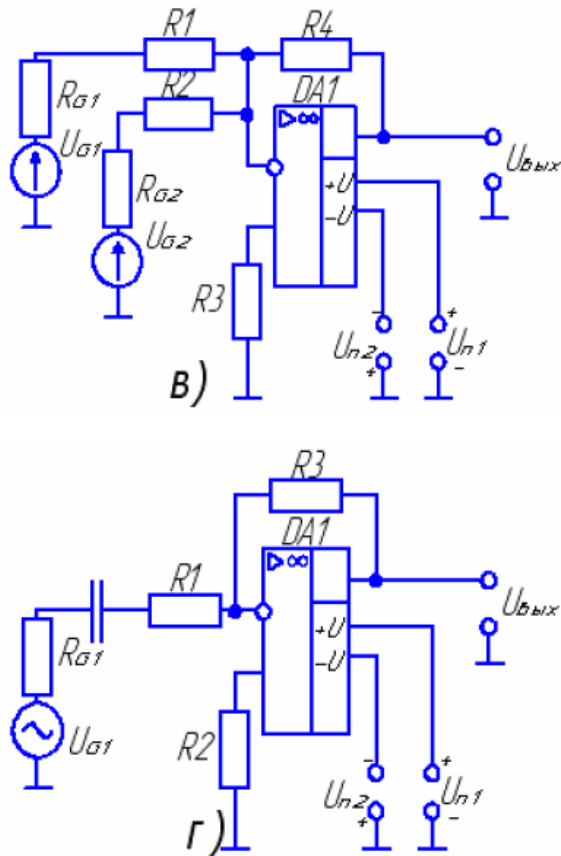


Рис. 4:
в) суммирующий усилитель постоянного тока, г) инвертирующий усилитель переменного тока.

Сопротивление резистора $R_1 = (5-10)R_{G1}$.

Сопротивление резистора $R_2 = R_1$.

Сопротивление резистора цепи обратной связи $R_3 = (K_{U1} - 1)R_1$.

Ёмкость разделительного конденсатора:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot F_H (R_G + R_{BX}) \sqrt{M_H^2 - 1}}.$$

Так как сопротивление источника сигнала $R_G = 10 \text{ кОм}$ и коэффициент усиления $K_U = 50$, выберем ОУ К140УД6 из приложения 4. К140УД6 имеет следующие параметры:

Коэффициент усиления по напряжению $K_{UOV} = 70 \cdot 10^3$;

Разность входных токов ОУ $\Delta i_{BX} = 10 \cdot 10^{-9} \text{ нА}$;

Внутреннее напряжение смещения $U_{CMB} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ В}$;

Тепловой дрейф разности входных токов $\frac{\Delta \Delta i_{BX}}{\Delta T} = 0,1 \cdot 10^{-9} \text{ А/}^\circ\text{С}$;

Тепловой дрейф внутреннего напряжения смещения $\frac{\Delta U_{CMB}}{\Delta T} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ В/}^\circ\text{С}$;

Максимальное напряжение на выходе ОУ $U_{ВЫХ \text{ max } OV} = 11 \text{ В}$;

Типовое напряжение питания $U_{П} = \pm 15 \text{ В}$.

Сопротивление по постоянному току подключенное между входом ОУ и нулевой точкой:

$$R_{BXO} = R_2.$$

Рассчитаем допустимое напряжение смещения ОУ:

$$U_{CMДоп} = \frac{U_{BbIX \max OY}}{K_{U1}} \cdot 10^{-D/20}.$$

Найдем напряжение смещения ОУ от разности входных токов:

$$U_{CMI} = \Delta i_{BX} \cdot R_{BXO} + \left(\frac{\Delta \Delta i_{BX}}{\Delta T} \right) \cdot R_{BXO} \cdot (T_m - T_o)$$

Определим напряжение смещения ОУ, вызванное внутренним смещением ОУ:

$$U_{CMU} = U_{CMB} + \left(\frac{\Delta U_{CMB}}{\Delta T} \right) \cdot (T_m - T_o).$$

Суммарное напряжение смещения:

$$U_{CM\Sigma} = U_{CMI} + U_{CMU}.$$

что меньше $U_{CM \text{ доп}}$, следовательно, ОУ К140УД6 обеспечивает заданный динамический диапазон выходного напряжения во всём интервале рабочих температур. ОУ К140УД6 выбран правильно.

Определим максимальную амплитуду источника сигнала:

$$U_{G1} = \frac{U_{BbIX \max OY}}{K_{U1}}.$$

Задание №3

Задана логическая функция:

$$F = \overline{X}Y(Z + X) + X\overline{Y}Z + ZY(XZ + \overline{X})$$

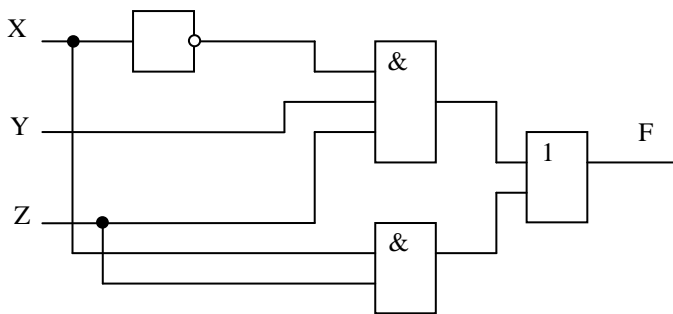
Упростим данную функцию, пользуясь законами алгебры логики:

$$\begin{aligned} F &= \overline{X}YZ + \overline{X}YX + X\overline{Y}Z + XYZZ + \overline{X}YZ = \overline{X}YZ + X\overline{Y}Z + XYZ + \overline{X}YZ = \overline{X}YZ + X\overline{Y}Z + XYZ = \\ &= \overline{X}YZ + XZ(\overline{Y} + Y) = \overline{X}YZ + XZ \end{aligned}$$

Составим таблицу истинности:

X	Y	Z	F
0	0	0	0
0	0	1	0
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

Схема, реализующая функцию:



4.4 Пример выполнения задания

Задание №1. Расчет усилительного каскада на биполярном транзисторе

Исходные данные: $R_H = 400 \text{ Ом}$; $U_{Hm} = 2,5 \text{ В}$; $R_G = 150 \text{ Ом}$; $F_H = 125 \text{ Гц}$; $M_H = M_B = 1,41$

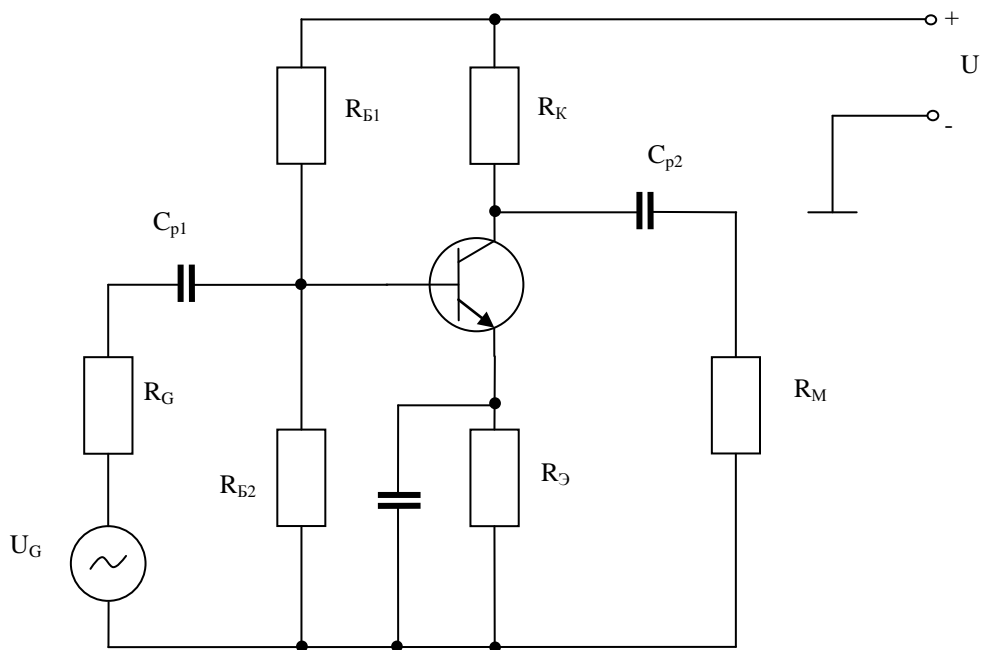


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема усилительного каскада.

Рассчитаем сопротивление резистора в цепи коллектора транзистора:

$$R_K = (1 + K_R) \cdot R_H = (1 + 1,2) \cdot 400 = 880 \text{ Ом}.$$

Выберем номинал сопротивления резистора $R_K = 910 \text{ Ом}$.

Определим эквивалентное сопротивление нагрузки каскада:

$$R_H = \frac{R_H \cdot R_K}{R_H + R_K} = \frac{400 \cdot 910}{400 + 910} = 449,78 \text{ Ом}.$$

Найдем амплитуду коллекторного тока транзистора:

$$I_{KM} = \frac{U_{Hm}}{R_H} = \frac{2,5}{449,78} = 5,56 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Определим ток покоя (ток в рабочей точке) транзистора:

$$I_{KP} = \frac{I_{Km}}{k_3} = \frac{5,56 \cdot 10^{-3}}{0,7} = 7,94 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Определим минимальное напряжение коллектор-эмиттер в рабочей точке транзистора:

$$U_{KЭП\min} = U_{Hm} + U_0 = 2,5 + 1 = 3,5 \text{ В}.$$

т.к. $U_{KЭП\min}$ меньше типового значения $U_{KЭП} = 5 \text{ В}$, принимаем $U_{KЭП} = 5 \text{ В}$.

Рассчитаем напряжение источника питания:

$$U_{\Pi} = \frac{U_{KЭП} + I_{KP} \cdot R_K}{0,7 - 0,9} = \frac{5 + 7,94 \cdot 10^{-3} \cdot 910}{0,7} = 17,46 \text{ В}.$$

Выбираем напряжение питания $U_{\Pi} = 18 \text{ В}$.

Определим сопротивление резистора:

$$R_9 = (0,1 - 0,3) \frac{U_{\Pi}}{I_{KP}} = 0,3 \cdot \frac{18}{7,94 \cdot 10^{-3}} = 680 \text{ Ом}.$$

Номинал резистора $R_9 = 680 \text{ Ом}$.

Выбираем транзистор КТ315Г:

$$U_{KЭдоп} = 25 \text{ В} > U_{\Pi} = 18 \text{ В};$$

$$I_{Kдоп} = 100 \text{ мА} > I_{KP} = 7,94 \text{ мА}.$$

Вычертим выходные и входные характеристики транзистора КТ315Г (рис. 2).

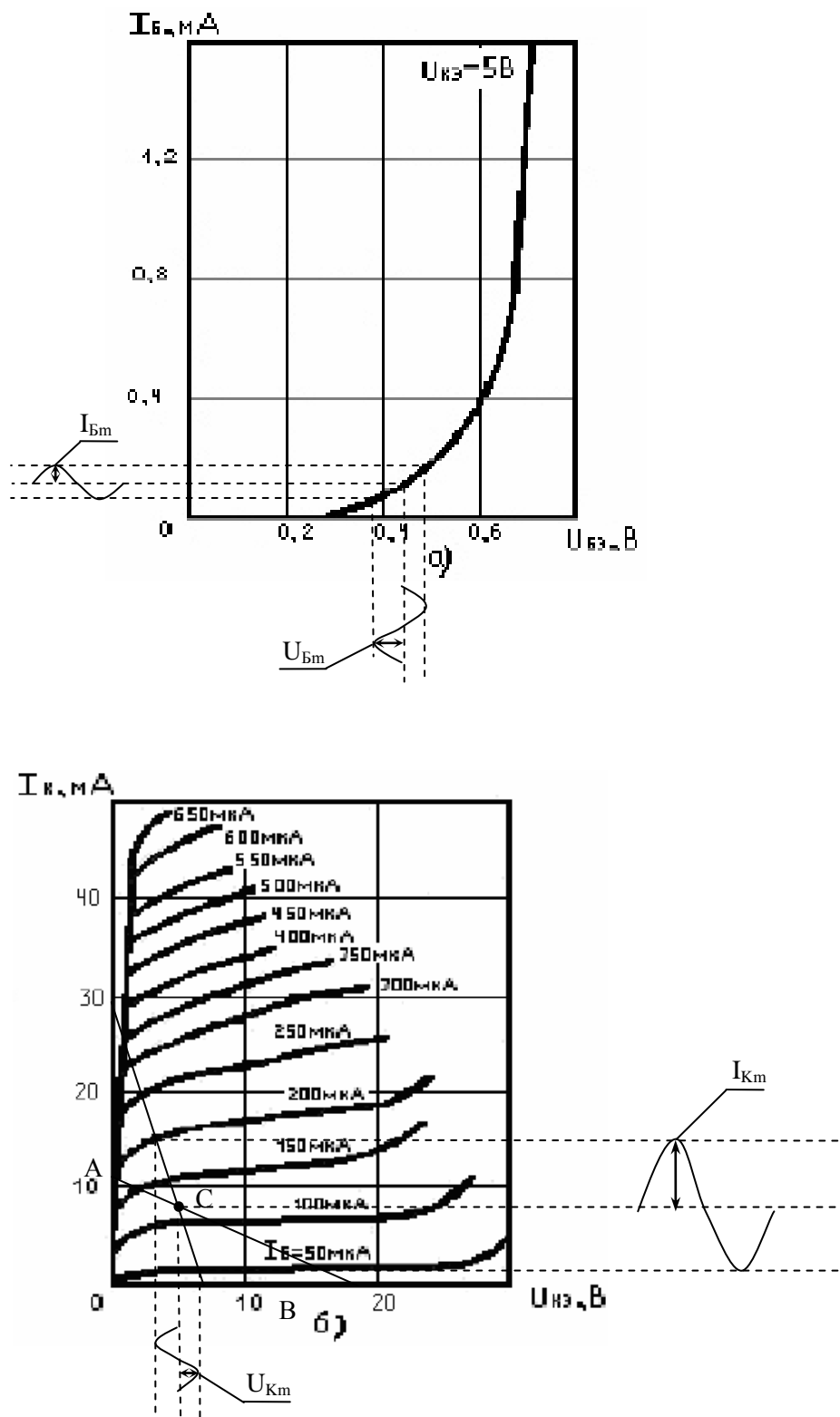


Рис. 2. Входные и выходные характеристики транзистора КТ315Г.

На выходных характеристиках транзистора КТ315Г построим нагрузочную прямую постоянного тока по точкам А и В.

Точка А: $U_{KЭ} = 0, I_K = \frac{U_{II}}{R_K + R_Э} = \frac{18}{910 + 680} = 11,32 \text{ мА}.$

Точка В: $U_{KЭ} = U_{II}, I_K = 0.$

Нанесем рабочую точку С на нагрузочную прямую с координатой $I_K = I_{КП} = 7,94 \text{ мА},$ уточним напряжение в рабочей точке поля $U_{КЭП} = 5 \text{ В}.$

Рассчитаем мощность в точке покоя транзистора:

$$P_{КП} = I_{КП} \cdot U_{КЭП} = 5 \cdot 7,94 \cdot 10^{-3} = 39,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

Определим наибольшую мощность рассеивания транзистора при максимальной рабочей температуре:

$$P_{K \max} = P_{K \text{дон}} \frac{T_{II \max} - T_m}{T_{II \max} - T_o} = 150 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{120 - 40}{120 - 25} = 125 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

$P_{КП} < P_{K \max}$, следовательно, транзистор КТ315Г выбран правильно.

Находим координаты рабочей точки С на входной характеристике транзистора.

$$R_{\delta 2} = \frac{U_{БЭП} + I_{КП} \cdot R_Э}{I_{Д}} = \frac{0,53 + 7,94 \cdot 10^{-3} \cdot 680}{1 \cdot 10^{-3}} = 5,93 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Номинал сопротивления резистора $R_{\delta 2} = 6,2 \text{ кОм}.$

Определим сопротивление резистора базового делителя:

$$R_{\delta 1} = R_{\delta 1} \cdot \left(\frac{U_{II}}{U_{БЭП} + I_{КП} \cdot R_Э} - 1 \right) = 6,2 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{18}{0,53 + 7,94 \cdot 10^{-3} \cdot 680} - 1 \right) = 12,62 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Номинал резистора $R_{\delta 1} = 13 \text{ кОм}.$

Найдем эквивалентное сопротивление базового делителя:

$$R_{Д} = \frac{R_{\delta 1} \cdot R_{\delta 2}}{R_{\delta 1} + R_{\delta 2}} = \frac{13 \cdot 10^3 \cdot 6,2 \cdot 10^3}{13 \cdot 10^3 + 6,2 \cdot 10^3} = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

По выходным характеристикам транзистора определим $h_{21Э}$ в рабочей точке транзистора:

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{0,05 \cdot 10^{-3}} = 160.$$

По входным характеристикам найдем $h_{11Э}$ в рабочей точке транзистора:

$$h_{11Э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} = \frac{0,1}{0,12 \cdot 10^{-3}} = 833,3 \text{ Ом}.$$

Найдем входное сопротивление каскада:

$$R_{BX} = \frac{h_{11Э} \cdot R_{Д}}{h_{11Э} + R_{Д}} = \frac{833,3 \cdot 4200}{833,3 + 4200} = 695,34 \text{ Ом}.$$

Рассчитаем выходное сопротивление каскада: $R_{BX} \approx R_K = 910 \text{ Ом}.$

Построим на выходных характеристиках транзистора нагрузочную прямую по переменному току, проходящую через рабочую точку С и имеющую наклон:

$$\frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KЭ}} = \frac{1}{R_H} = 2,22 \cdot 10^{-3} A/B.$$

Находим амплитуду тока базы по выходным характеристикам:

$$I_{Bm} = \frac{\Delta I_B}{2} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,05 \cdot 10^{-3} A.$$

Определим по входным характеристикам амплитуду входного напряжения транзистора:

$$U_{Bm} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{2} = \frac{0,1}{2} = 50 мВ.$$

Определим коэффициент усиления каскада по току:

$$K_I \approx h_{21Э} \cdot \frac{R_H}{R_H} = 160 \cdot \frac{449,78}{400} = 180.$$

Найдем коэффициент усиления каскада по напряжению:

$$K_U = K_I \cdot \frac{R_H}{R_G + R_{BX}} = 180 \cdot \frac{400}{150 + 695,34} = 85,17.$$

Рассчитаем коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = K_I \cdot K_U = 180 \cdot 85,17 = 15330,6.$$

Определим амплитуду напряжения источника сигнала:

$$U_{Gm} = \frac{U_{Hm}}{K_U} = \frac{2,5}{85,17} = 0,03 В.$$

Распределим частотные искажения в области нижних частот, вносимые ёмкостями конденсаторов C_{P1} , C_{P2} , $C_{\phi 1}$ равномерно между ними:

$$M_{HC} = \sqrt[3]{M_H} = \sqrt[3]{1,41} = 1,12$$

Рассчитаем ёмкость разделительного конденсатора:

$$C_{P1} \geq \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F_H \cdot (R_G + R_{BX}) \sqrt{M_{HC}^2 - 1}} = \frac{1}{6,28 \cdot 125 \cdot (150 + 695,34) \sqrt{1,12^2 - 1}} = 2,987 \cdot 10^{-6} \Phi.$$

Выбираем номинал электролитического конденсатора $C_{P1} = 3 \text{ мкФ}$.

Определим ёмкость разделительного конденсатора:

$$C_{P2} \geq \frac{1}{2 \pi \cdot F_H \cdot (R_{BIX} + R_H) \sqrt{M_{HC}^2 - 1}} = \frac{1}{6,28 \cdot 125 \cdot (910 + 400) \sqrt{1,12^2 - 1}} = 1,927 \cdot 10^{-6} \Phi.$$

Выбираем номинал ёмкости электролитического конденсатора $C_{P2} = 2 \text{ мкФ}$.

Найдём ёмкость блокировочного конденсатора:

$$C_{\phi 1} \geq \frac{1}{2 \pi \cdot F_H \cdot R_H \sqrt{M_{HC}^2 - 1}} = \frac{1}{6,28 \cdot 125 \cdot 449,78 \cdot \sqrt{1,12^2 - 1}} = 5,6 \text{ мкФ}.$$

Выбираем ёмкость электролитического конденсатора $C_{61}=5,6\text{мкФ}$.

Задание №2

Исходные данные: схема на ОУ – 4д; $F_H = 20\text{Гц}$; $R_{G1} = 10\text{кОм}$; $K_{U1} = 50$; $D = 26\text{дБ}$.

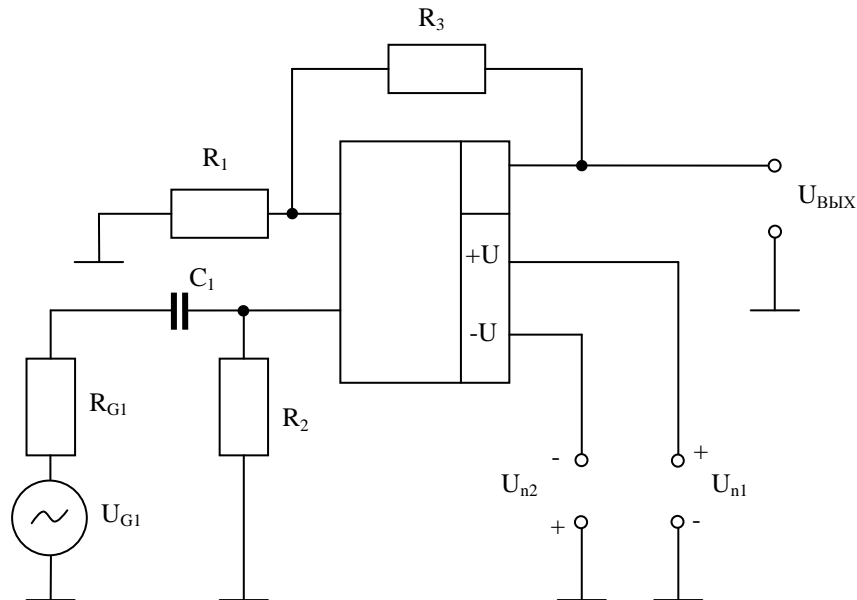


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема неинвертирующего усилителя переменного тока

Сопротивление резистора $R_1 = (5-10)R_{G1} = 75\text{кОм}$.

Сопротивление резистора $R_2 = R_1 = 75\text{кОм}$.

Сопротивление резистора цепи обратной связи $R_3 = (K_{U1} - 1)R_1 = 3675\text{кОм}$.

Ёмкость разделительного конденсатора:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot F_H (R_G + R_{BX}) \sqrt{M_H^2 - 1}} = 94 \cdot 10^{-9} \text{Ф}.$$

Так как сопротивление источника сигнала $R_G=10\text{кОм}$ и коэффициент усиления $K_U=50$, выберем ОУ К140УД6 из приложения 4. К140УД6 имеет следующие параметры:

Коэффициент усиления по напряжению $K_{UOY} = 70 \cdot 10^3$;

Разность входных токов ОУ $\Delta i_{BX} = 10 \cdot 10^{-9} \text{нА}$;

Внутреннее напряжение смещения $U_{CMB} = 5 \cdot 10^{-3} \text{В}$;

Тепловой дрейф разности входных токов $\frac{\Delta \Delta i_{BX}}{\Delta T} = 0,1 \cdot 10^{-9} \text{А/}^\circ\text{С}$;

Тепловой дрейф внутреннего напряжения смещения $\frac{\Delta U_{CMB}}{\Delta T} = 20 \cdot 10^{-6} \text{В/}^\circ\text{С}$;

Максимальное напряжение на выходе ОУ $U_{BbIX \max OY} = 11B$;

Типовое напряжение питания $U_{II} = \pm 15B$.

Сопротивление по постоянному току подключенное между входом ОУ и нулевой точкой:

$$R_{BXO} = R_2 = 75k\Omega.$$

Рассчитаем допустимое напряжение смещения ОУ:

$$U_{CM \text{ доп}} = \frac{U_{BbIX \max OY}}{K_{U1}} \cdot 10^{-D/20} = \frac{11}{50} \cdot 10^{-26/20} = \frac{11}{50} \cdot 10^{-1,3} = 11,02 \cdot 10^{-3} B.$$

Найдем напряжение смещения ОУ от разности входных токов:

$$U_{CMI} = \Delta i_{BX} \cdot R_{BXO} + \left(\frac{\Delta \Delta i_{BX}}{\Delta T} \right) \cdot R_{BXO} \cdot (T_m - T_o) = 10 \cdot 10^{-9} \cdot 75000 + 0,1 \cdot 10^{-9} \cdot 75000 \cdot (40 - 25) = 0,86 \cdot 10^{-3} B$$

Определим напряжение смещения ОУ, вызванное внутренним смещением ОУ:

$$U_{CMU} = U_{CMB} + \left(\frac{\Delta U_{CMB}}{\Delta T} \right) \cdot (T_m - T_o) = 5 \cdot 10^{-3} + 20 \cdot 10^{-3} \cdot (40 - 25) = 5,3 \cdot 10^{-3} B.$$

Суммарное напряжение смещения:

$$U_{CM\Sigma} = U_{CMI} + U_{CMU} = 6,16 \cdot 10^{-3} B.$$

что меньше $U_{CM \text{ доп}}$, следовательно, ОУ К140УД6 обеспечивает заданный динамический диапазон выходного напряжения во всём интервале рабочих температур. ОУ К140УД6 выбран правильно.

Определим максимальную амплитуду источника сигнала:

$$U_{G1} = \frac{U_{BbIX \max OY}}{K_{U1}} = \frac{11}{50} = 0,22 B.$$

Задание №3

Задана логическая функция:

$$F = \overline{X}Y(Z + X) + X\overline{Y}Z + ZY(XZ + \overline{X})$$

Упростим данную функцию, пользуясь законами алгебры логики:

$$F = \overline{X}YZ + \overline{X}YX + X\overline{Y}Z + XYZZ + \overline{X}YZ = \overline{X}YZ + X\overline{Y}Z + XYZ + \overline{X}YZ = \overline{X}YZ + X\overline{Y}Z + XYZ = \overline{X}YZ + XZ(\overline{Y} + Y) = \overline{X}YZ + XZ$$

Составим таблицу истинности:

X	Y	Z	F
0	0	0	0

0	0	1	0
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

Схема, реализующая функцию:

