





## Работа № 1 Полупроводниковые диоды

### Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование и анализ характеристик полупроводниковых диодов на базе р-п-переходов.

### Методические указания к выполнению лабораторной работы

Диодом называют электропреобразовательный прибор, содержащий один или несколько электрических переходов и два вывода для подключения к внешней цепи. Принцип работы большинства диодов основан на использовании физических явлений в электрическом переходе. Наиболее часто в диодах применяется р-п-переход, переход Шотки, гетеропереход. Однако существуют диоды, структура которых не содержит выпрямляющих электрических переходов (диод Ганна), либо содержит несколько переходов (р- i-n-диод, динистор). Электрическим переходом называется переходный слой между областями твердого тела с различными типами или значениями проводимости. Переход между областями полупроводника с электропроводностью р- и n-типа называют р-п-переходом.

Рассмотрим принцип работы р-п-перехода при равновесии, т.е. при нулевом внешнем напряжении на переходе (рис. 1.1).

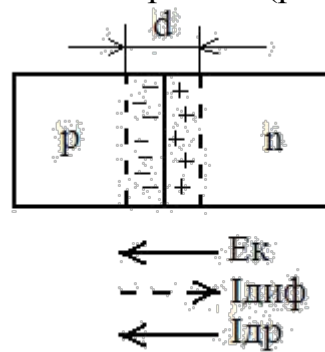


Рис. 1.1

Поскольку концентрация переходов в n-области значительно больше, чем в р-области, часть электронов диффундирует из n-области в р-область. При этом в р-области окажутся избыточные электроны, большая часть которых находится вблизи металлургической границы. Электроны будут рекомбинировать с дырками, соответственно концентрация дырок будет уменьшаться и обнажатся не скомпенсированные отрицательные заряды акцепторных ионов. С другой стороны, от металлургической границы (в n-области) из-за ухода электронов обнажатся не скомпенсированные положительные заряды донорных ионов. Аналогичные рассуждения можно провести для дырок, которые диффундируют из р-области в n-область. Вблизи металлургической границы по обе стороны ее образуется слой с пониженной концентрацией носителей заряда – обедненный слой. Существующие в нем

объемные заряды ионов примесей и связанное с ними электрическое поле препятствуют диффузии носителей и обеспечивают состояние равновесия, при котором ток через переход равен нулю, т.е. напряженность внутреннего электрического поля нарастает до тех пор, пока вызванное им дрейфовое движение (ток дрейфа  $I_{др}$ ) носителей не уравнивает встречное диффузионное движение (ток диффузии  $I_{диф}$ ), обусловленное градиентами концентрации электронов и дырок. Электрическое поле обуславливает внутреннюю (контактную) разность потенциалов  $U_k$  между p- и n-областями, т.е. потенциальный барьер.

Таким образом, область p-n-перехода обеднена свободными носителями и содержит равные по абсолютному значению положительный и отрицательный заряды не скомпенсированных ионов примесей. В ней существует внутреннее электрическое поле  $E_k$  и потенциальный барьер. Удельное сопротивление обедненной области на много порядков выше, чем соседних нейтральных областей. Переход в состояние равновесия характеризуется высотой потенциального барьера  $U_k$  и толщиной обедненного слоя  $L_{об}$ . Суммарный ток через переход, обусловленный противоположно направленными токами  $I_{диф}$  и  $I_{др}$ , равен нулю.

Если к p-n-переходу подключить источник напряжения, то равновесное состояние, рассмотренное выше, нарушается – в цепи потечет ток. Если полярность источника питания совпадет с полярностью основных носителей, то такое включение называют прямым. При прямом напряжении потенциальный барьер понижается, поскольку внешнее поле  $E_{пр}$  направлено навстречу внутреннему (рис. 1.2а) полю  $E_k$  перехода.

Понижение потенциального барьера приводит к увеличению тока диффузии, а на величину дрейфового тока не влияет. При комнатной температуре даже при незначительном понижении потенциального барьера  $I_{диф} \gg I_{др}$ , поэтому прямой ток  $I_{пр} \approx I_{диф}$ .

На рис. 1.2б показаны вольтамперные характеристики (ВАХ) германиевого и кремниевого переходов при прямом смещении. Начальные нелинейные участки ВАХ соответствуют наличию потенциального барьера. При дальнейшем повышении  $U_{пр}$  зависимость  $I_{пр} = f(U_{пр})$  становится практически линейной. Наклон прямой ветви ВАХ зависит от объемных сопротивлений p- и n-областей.

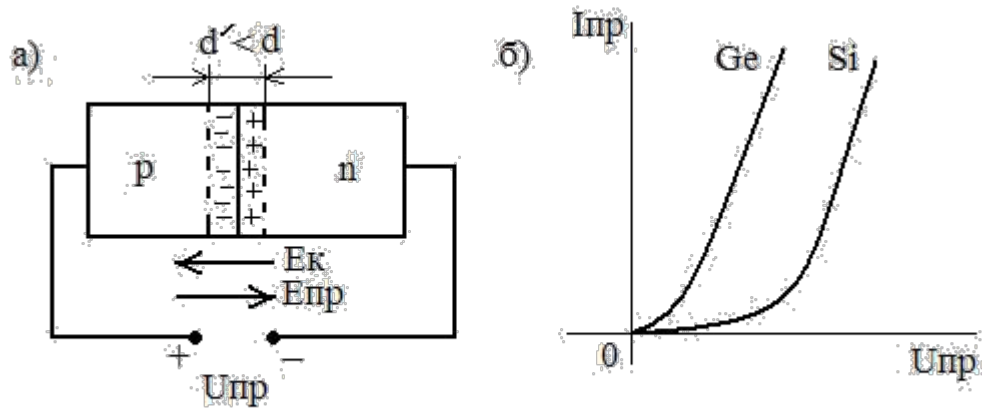


Рис.1.2

При обратном напряжении на переходе потенциальный барьер повышается, т.к. внешнее поле  $E_{обр}$  складывается с внутренним  $E_k$ . Ток диффузии уменьшается, а дрейфовый ток остается практически неизменным, поэтому

$$I_{обр} \approx I_{др}.$$

Однако в реальном p-n-переходе обратный ток увеличивается с ростом обратного напряжения из-за расширения обедненного слоя. Обратный ток резко снижается с ростом ширины запрещенной зоны. Для кремния он меньше, чем для германия приблизительно в 10 раз. ВАХ для обратного смещения приведена на рис. 1.3б.

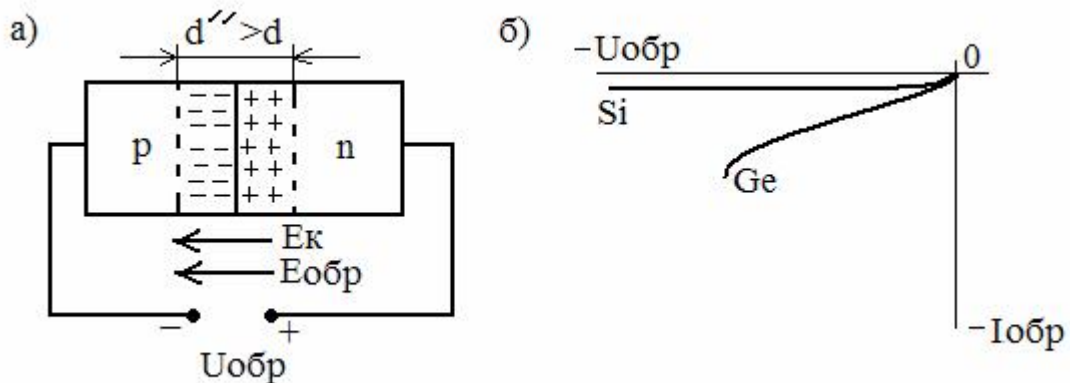


Рис.1.3

Явление резкого увеличения дифференциальной проводимости p-n-перехода при достижении обратным напряжением (током) критического для данного перехода значения называется пробоем p-n-перехода. Электрический пробой - явление обратимое, т.е. при снятии обратного напряжения свойства p-n-перехода полностью восстанавливаются. Тепловой пробой - необратимый

процесс, в результате которого разрушается кристаллическая решетка полупроводника и р-п-переход выходит из строя. Явление электрического пробоя в р-п-переходах используется при создании специальных полупроводниковых диодов.

Основное свойство р-п-перехода – односторонняя проводимость тока. Это свойство используется в выпрямительных и переключательных диодах. Кроме того, р-п-переход обладает рядом других свойств, которые позволили разработать диоды для различных назначений. Например, явление электрического пробоя используется в стабилитронах и лавинно-пролетных диодах, туннельный диод – в туннельных диодах, зависимость барьерной емкости от обратного напряжения – в варикапах, нелинейность ВАХ – в смесительных и преобразовательных диодах и т.д.

### Лабораторное задание

#### 1. Экспериментальное исследование выпрямительного диода:

а) собрать схему для исследования выпрямительного диода на постоянном токе в соответствии с принципиальной схемой рис. 1.4. Для измерения анодного тока включить миллиамперметр постоянного тока с пределом 100 мА. Для измерения анодного напряжения использовать мультиметр. Последовательно с диодом включить токоограничивающий резистор  $R = 150 \text{ Ом}$ .

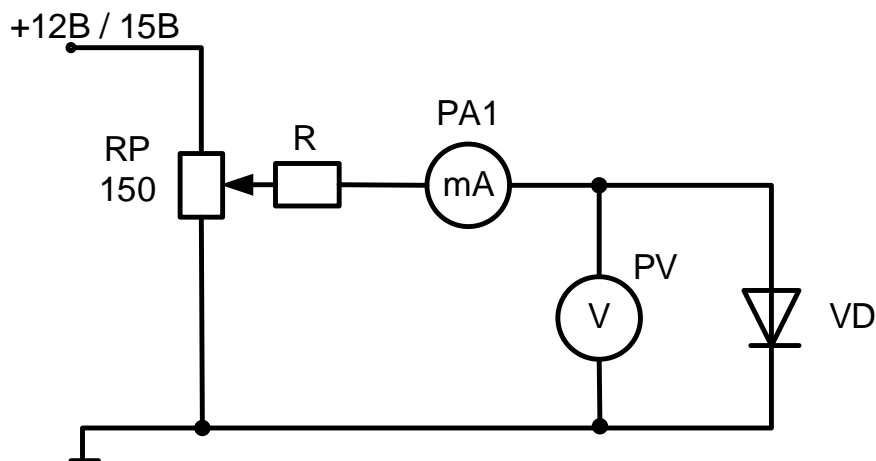


Рис. 1.4

Снять вольтамперную характеристику выпрямительного диода на постоянном токе для прямой ветви (рис. 1.4); для снятия характеристик регулировать напряжение на выходе потенциометра; результаты измерений занести в таблицу, по которой построить прямую ветвь ВАХ;

б) собрать схему для снятия обратной ветви ВАХ VD (рис. 1.5); снять обратную ветвь ВАХ диода;

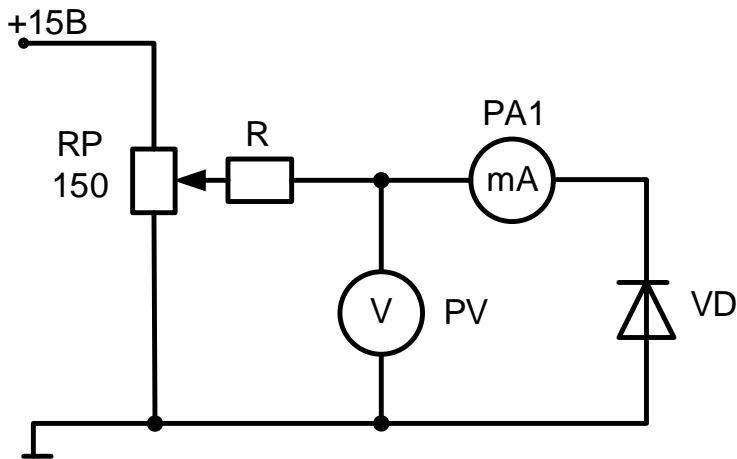


Рис. 1.5

в) определить параметры диода: максимальное напряжение между анодом и катодом в открытом состоянии  $U_{am}$  при максимальном анодном токе  $I_{a\max}$ , пороговое напряжение  $U_o$  и дифференциальное сопротивление  $r_d$ ;

г) собрать схему для получения ВАХ диода на экране осциллографа. Включить токоограничивающий резистор  $R = 150\text{Ом}$ . Исследование выпрямительного диода выполняется на переменном токе в соответствии с принципиальной схемой рис 1.6. Вход Y (CH2) осциллографа подключить к шунту  $R_m$ , а корпус осциллографа ( $\perp$ ) соединить с общим проводом ( $\perp$ ). Вход X (CH1) осциллографа подключить к аноду диода. При этом переключатель развертки осциллографа должен быть переведен в положение X/Y. Светящуюся точку на экране осциллографа поместить в начало координат. Подать питание. Зарисовать ВАХ диода, определить масштабы по току и напряжению;

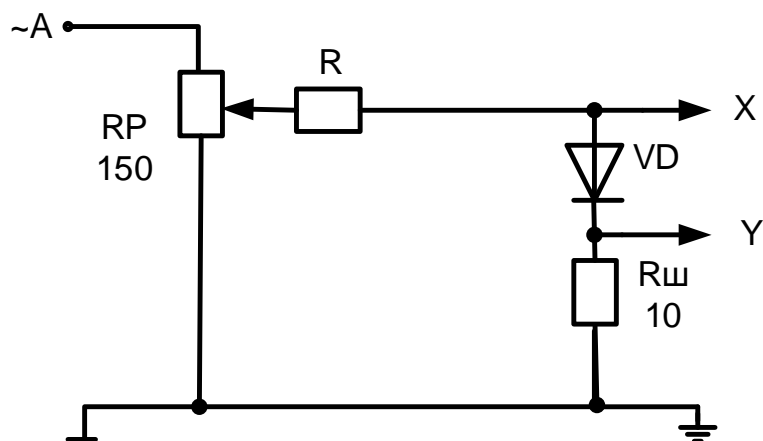


Рис. 1.6

д) определить по осциллограмме параметры диода: максимальное напряжение между анодом и катодом в открытом состоянии  $U_{am}$  при максимальном анодном токе  $I_{a\max}$ , пороговое напряжение  $U_o$  и

дифференциальное сопротивление  $r_d$ , сравнить с результатами, полученными на постоянном токе;

## 2. Экспериментальное исследование диода Шоттки:

Выполнить пункты 1а, в для диода Шоттки, используя схему рис. 1.4. ВАХ построить на том же рисунке, что и в п.1. Сравнить ВАХ и параметры диода Шоттки с параметрами и ВАХ обычного выпрямительного диода.

### Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов помещенных в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы;
- е) выводы по работе;

### Контрольные вопросы

1. Каковы свойства p-n перехода?
2. Объясните вид ВАХ p-n перехода?
3. Поясните вид ВАХ стабилитрона.
4. Где рабочий участок на ВАХ стабилитрона?
5. Как зависит напряжение стабилизации от температура?
6. В чем отличие ВАХ выпрямительного диода, диода Шоттки и светодиода?
7. От чего зависит яркость свечения диода?
8. Какой элемент обязателен в схеме индикатора на светодиоде?
9. Каким образом на экране осциллографа получают изображение функциональной зависимости двух напряжений?
10. Каким образом на экране осциллографа получается изображение периодической функции времени?



## Работа № 2

### Биполярный транзистор

#### Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование и анализ характеристик и параметров биполярного транзистора (БТ).

#### Методические указания к выполнению лабораторной работы

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими p-n-переходами и тремя выводами, пригодный для усиления мощности электрических сигналов. В БТ физические процессы определяются движением носителей заряда обоих знаков – основных и не основных.

Биполярный транзистор содержит три полупроводниковые области с чередующимися типами проводимости n-p-n или p-n-p (рис.2.1), которые называются соответственно эмиттером, базой и коллектором, а переходы, разделяющие эти области – эмиттерным (Э) и коллекторным (К). Взаимодействие между переходами обеспечивается благодаря тому, что толщина базы много меньше диффузионной длины не основных носителей в базе.

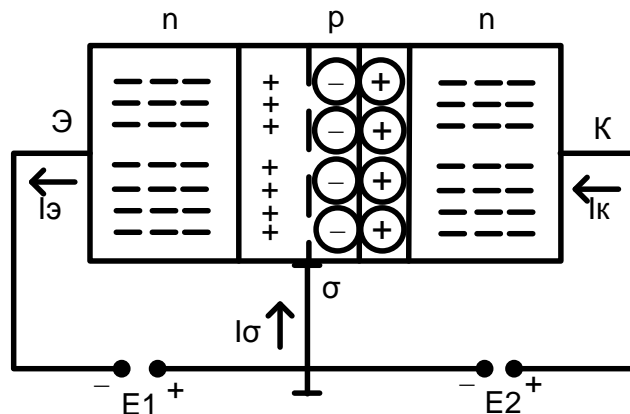


Рис.2.1

Рассмотрим принципы действия БТ типа n-p-n. Для p-n-p полярность рабочих напряжений и направления токов противоположны. В активном режиме, являющемся основным для усилительных схем, на эмиттерный переход подается прямое напряжение, а на коллекторный – обратное. Электроны, инжектированные в базу, движутся к коллекторному переходу. Часть электронов, инжектированных в базу, не доходит до коллекторного перехода вследствие рекомбинации. Однако их число не велико, т.к. толщина базы мала по сравнению с диффузионной длиной электронов. Электроны, достигающие коллекторного перехода, втягиваются в него электрическим полем и перебрасываются в коллектор. Таким образом, в активном режиме коллектор собирает инжектированные в базу электроны. Процесс освобождения базы от не основных носителей (электронов) называется

экстракцией. Таким образом, следующие процессы обеспечивают токи транзистора: инжекция – ток эмиттера  $I_{\text{Э}}$ , рекомбинация – ток базы  $I_{\text{б}}$ , экстракция – ток коллектора  $I_{\text{К}}$ .

Понимание характера этих процессов помогает запомнить следующее выражение:

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + I_{\text{б}}, \quad I_{\text{б}} \ll I_{\text{К}}, \quad I_{\text{К}} \approx I_{\text{Э}},$$

но всегда  $I_{\text{К}} < I_{\text{б}}$

Изменением потенциального барьера Э-го перехода изменяется уровень инжекции, т.е.  $I_{\text{Э}}$ , а как результат,  $I_{\text{К}}$ . Т.е. входной ток ( $I_{\text{Э}}$ ) изменяет выходной ( $I_{\text{К}}$ ) – в этом заключается управление транзистором. Ток коллекторного перехода определяется током эмиттерного перехода – в этом проявляется взаимодействие переходов БТ.

После того, как изучено движение носителей заряда в активном режиме, нетрудно перейти к пониманию процессов в режимах отсечки и насыщения. Обратите внимание, что в режиме отсечки  $I_{\text{Э}} = 0$ , а ток коллектора не равен 0. Обратный ток коллекторного перехода  $I_{\text{К0}}$  (иногда его называют тепловым из-за его сильного возрастания при повышении температуры) незначителен по величине, но может привести к нестабильной работе схемы. Режим насыщения связан с изменением смещения коллекторного перехода с обратного на прямое. Реально полярность  $E_2$  не меняют, инверсия смещения происходит из-за накопления неосновных носителей в Б около К-го перехода вследствие его ограниченной пропускной способности, т.е. уровень экстракции падает. При дальнейшем возрастании прямого смещения К-го перехода экстракция прекращается и  $I_{\text{К}} = 0$ .

1. Экспериментальное исследование характеристик биполярного транзистора:

а) собрать схему для снятия характеристик прямой передачи по току биполярного транзистора (рис. 2.2). Для измерения тока базы включить миллиамперметр PA1 на 1 мА, а тока коллектора – PA2 на 100 мА. Для измерения напряжения на коллекторе использовать мультиметр; в качестве резистора  $R_{\text{К}}$  использовать модули  $R = 150$  или  $R = 330$  Ом (по указанию преподавателя);

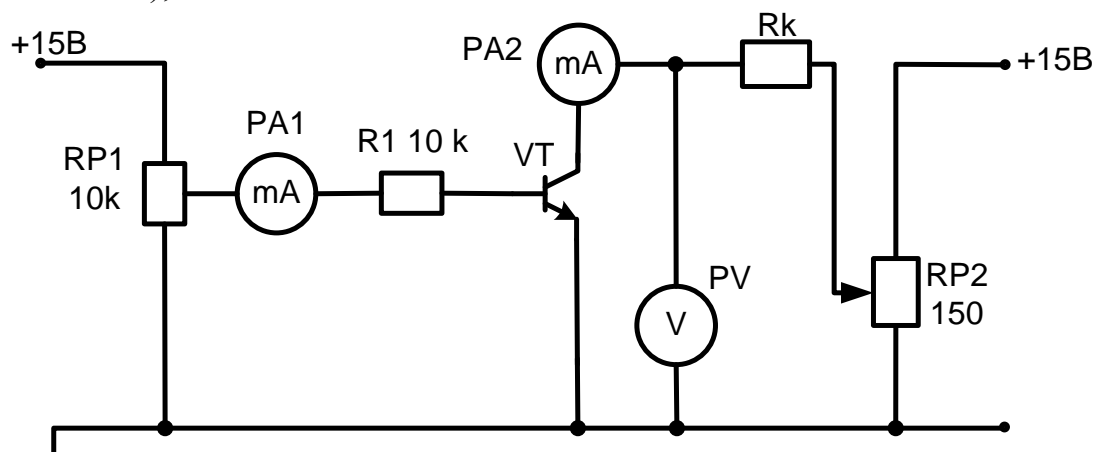


Рис. 2.2

б) снять статическую характеристику прямой передачи по току  $I_K=f(I_{\sigma})$  при  $U_{КЭ}$  равном заданному значению  $E_K(=2... 10 \text{ В})$  и  $R_K=0$ . Экспериментальные точки здесь и далее записывать в таблицу и наносить на график. При снятии характеристики следить за постоянством напряжения  $U_K$ ; и не допускать ток коллектора более 80 мА (максимальная мощность транзистора 800 мВт);

в) снять характеристику прямой передачи по току при наличии заданного сопротивления нагрузки  $R_K$  (рис. 2.2). С помощью потенциометра RP1 установите ток базы, равный нулю, а с помощью потенциометра RP2 установите заданное значение  $E_K$ . В дальнейшем ручку регулировки RP2 не трогать. В области вблизи насыщения точки снимать чаще;

г) по построенной в п.1в характеристике определить области активного усиления, отсечки и насыщения. Определить максимальный ток  $I_{\sigma\max}$ , при котором еще обеспечивается линейное усиление;

д) снять выходные статические ВАХ с помощью осциллографа. Собрать схему в соответствии с рис. 2.3; Вход Y (CH2) осциллографа подключить к шунту  $R_{ш}$ , а корпус осциллографа ( $\perp$ ) соединить с общим проводом ( $\perp$ ). Вход X (CH1) осциллографа подключить к коллектору. При этом переключатель должен быть приведен в положение X/Y. Установить потенциометр RP1 в крайнее левое положение. Включить питание модуля. Изменять ток базы от 0 до максимума (но не более 1 мА), наблюдать семейство выходных характеристик; зарисовать на одном рисунке выходные характеристики для трех значений тока базы:  $I_{\sigma 1} = 0$ ;  $I_{\sigma 2} = 0,5I_{\sigma\max}$ ;  $I_{\sigma 3} = I_{\sigma\max}$  Записать масштабы по напряжению и току. Выключить питание модуля.

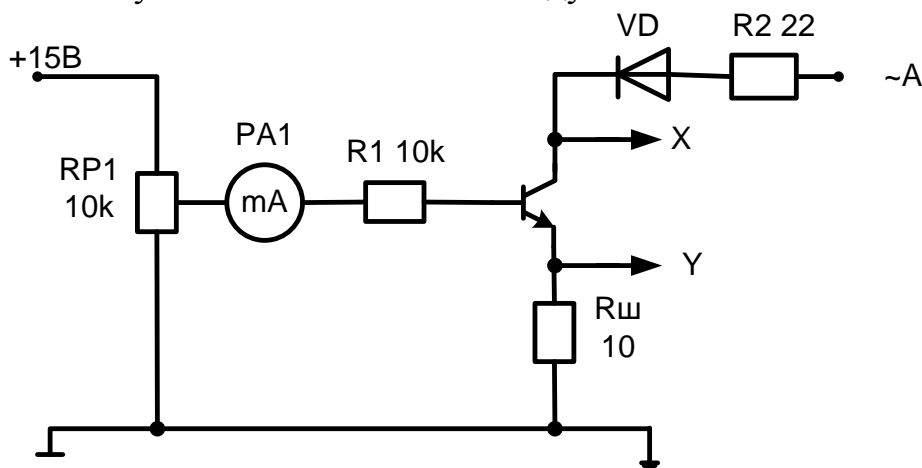


Рис. 2.3.

### Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы; определить по

экспериментальным характеристикам прямой передачи по току статический коэффициент передачи тока  $\beta$  и коэффициент усиления каскада по току  $K_i$  при заданной нагрузке вблизи рабочей точки покоя для класса А:

$$\beta = \frac{D I_k}{D I_\sigma}, \quad K_i = \frac{D I'_k}{D I_\sigma}$$

г) экспериментально снятые и построенные характеристики;

д) обработанные осциллограммы;

е) рассчитать потери в транзисторе в рабочей точке покоя в классе А ( $P_{KP} = U_{KP} I_{KP}$ ) в режиме насыщения  $P_{KH}$  отсечки  $P_{KO}$  и средние потери в ключевом режиме при относительной длительности импульса 0,5 ( $P_{KP.CP} = 0,5P_{KH} + 0,5P_{KO}$ ), воспользовавшись экспериментально снятыми выходными характеристиками. Сравнить потери в классе А и в ключевом режиме. Указать, какие потери в ключевом режиме не учтены.

### Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия транзистора?
2. Какие существуют схемы включения транзисторов?
3. Какова полярность постоянных напряжений, прикладываемых к транзистору типа n-p-n при различных схемах включения?
4. Как выглядят выходные и входные статические характеристики в схеме с общим эмиттером?
5. Что такое статическая характеристика прямой передачи по току? Как ее построить? Как она видоизменяется при наличии нагрузки? Как ее снять?
6. Как определить статический коэффициент передачи транзистора по току  $\beta$ ?
7. Как снять статические выходные характеристики?
8. Как построить линию нагрузки?
9. Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?
10. Что такое ключевой режим?
11. Каковы преимущества ключевого режима?

## Работа № 3

### Биполярный транзистор в усилительных каскадах

#### Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование и анализ работы биполярного транзистора в усилительных каскадах, включенного по схеме ОЭ.

#### Методические указания к выполнению лабораторной работы

Одним из важнейших применений транзистора является усиление переменного сигнала с допустимым или заданным уровнем искажений.

Усиление сигнала происходит за счет энергии источника постоянного тока в цепи коллектора с помощью транзистора. Напомним, что наилучшими усилительными свойствами обладает схема ОЭ, поэтому она получила наибольшее распространение. Однако, с точки зрения нелинейных искажений лучше схема ОБ, поэтому она используется в выходных каскадах, где на транзистор подаются большие входные сигналы.

Для правильного использования транзистора в режиме усиления необходимо изучить особенности его режимов и способы их обеспечения. Для этого построим нагрузочную прямую постоянного тока для схемы, представленной на рис. 3.1.

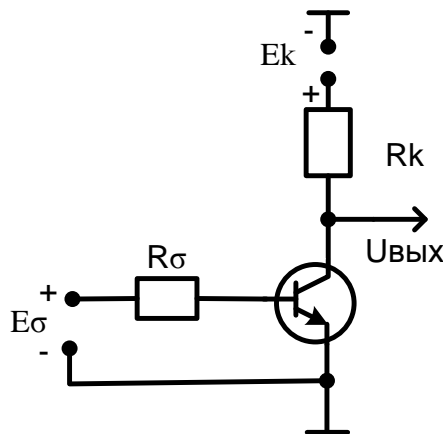


Рис.3.1

Правило построения нагрузочной прямой постоянного тока (рис. 3.2)

$$U_{\text{кЭ}} = E_{\text{к}}, \quad I_{\text{к}} = 0 \quad (\text{холостой ход})$$

$$U_{\text{кЭ}} = 0, \quad I_{\text{ккз}} = \frac{E_{\text{к}}}{R_{\text{к}}} \quad (\text{короткое замыкание})$$

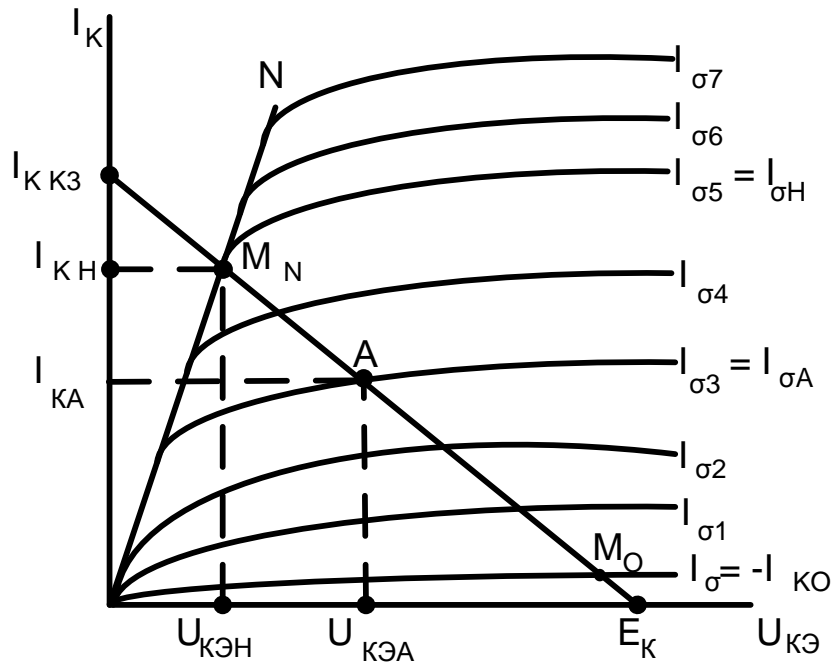


Рис.3.2

а) Режим отсечки:

$M_O$  - точка, соответствующая режиму отсечки.

Параметры этого режима:

$$I_{Э} = 0, \quad I_{Б} = -I_{К0}, \quad I_{К} = I_{К0}$$

$$U_{ВЫХ} = U_{КЭ} = E_K - I_{К0} R_K \cong E_K$$

Сопротивление БТ в режиме отсечки  $\bar{r}_{tp} = \frac{E_K}{I_{К0}}$  – самое большое для данной схемы. Часто считают, что  $\bar{r}_{TP} = \infty$ .

Обеспечение режима:

$E_{Б}$ - отрицательное, при этом  $|E_{Б}| > |I_{ком\max} \cdot R_{Б}|$  (рис.3.3).

Обычно  $E_{Б}$  больше правой части на 0.2...0.5В

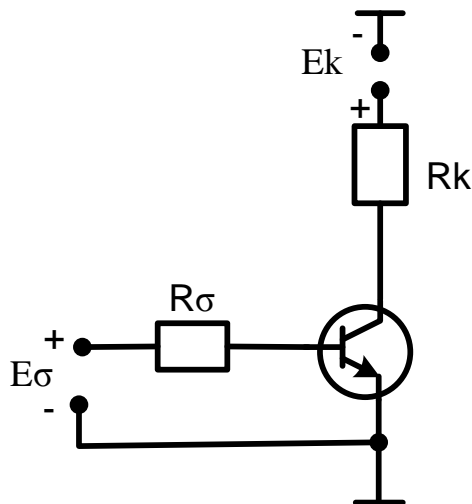


Рис. 3.3

б) Активный режим.

В этом режиме  $E_B$  – положительное (рис.3.1). С увеличением тока базы (входного) будет увеличиваться выходной ток  $I_K$  и уменьшаться выходное напряжение  $U_{KЭ}$  и сопротивление транзистора  $r_{тр}$ . Это говорит об управляемости режима. Для обеспечения любой точки активного режима, например, А, нужно задать  $E_K$ ,  $R_K$  таким образом, чтобы нагрузочная прямая проходила через точку А; а также задать  $I_{БA}$  (для схемы на рис. 3.1 - сопротивление  $R_{б} = \frac{E_{б}}{I_{ба}}$ ). При этом фиксируется точка А и  $I_{КА}$ ,  $U_{KЭA}$

в) Режим насыщения.

Линия ON - касательная к кривым семейства выходных характеристик (рис. 3.2) - линия насыщения. Точка пересечения нагрузочной прямой постоянного тока и линии ON определяет положение точки  $M_N$ , рабочей точки БТ в режиме насыщения. Ей соответствуют ток  $I_{КН}$  и напряжение  $U_{KЭН}$  насыщения. Очевидно, что  $I_{КН}$  – самый большой коллекторный ток, который может быть достигнут в схеме при заданных  $E_K$  и  $R_K$ , а  $U_{KЭН}$  – самое малое  $U_{KЭ}$ . Поэтому сопротивление БТ в режиме насыщения  $r_{тр} = \frac{U_{KЭН}}{I_{КН}}$  – минимальное.

Часто считают его равным нулю.

Параметр кривой семейства, на рис. 3.3 исходящей из точки  $M_N$ , является током базы насыщения  $I_{БН}$  (на рис.3.2 - это  $I_{Б5}$ ). При  $I_B > I_{БН}$  положение точки  $M_N$  не изменяется, т.е. изменение входного параметра ( $I_B$ ) не вызывает изменения выходных параметров ( $I_K$ ,  $U_{KЭ}$ ), что говорит о неуправляемости режима насыщения. Увеличивается  $S = \frac{I_{б}}{I_{БН}}$  степень насыщения.

Обеспечение режима: напряжение  $E_B$  положительное, при этом необходимо задать ток базы  $I_B = S \cdot I_{БН}$  для режима насыщения  $S \geq 1$ .

$I_{БН}$  можно определить графически (см. выше) или аналитически (для рис. 3.1):

$$I_{БН} = \frac{I_{КЭН}}{\beta} = \frac{E_K}{\beta \cdot R_K}$$

Задается  $I_B$  выбором  $R_B$ . Основным режимом при усилении является активный.

1. Экспериментальное исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе в классе А:

а) собрать схему для исследования усилительного каскада в соответствии с рис. 3.4. Подключить канал СН1 осциллографа ко входу усилителя, а канал СН2 к выходу усилителя. Включить временную развертку осциллографа. Включить функциональный генератор и установить синусоидальный сигнал частотой 50 Гц, уменьшить сигнал до нуля регулятором амплитуды.

Переключить входы CH1 осциллографа на положение «вход закорочен». Включить питание стенда. При токе  $I_{\sigma} = 0$  установить с помощью потенциометра RP2 заданное значение  $E_K$  и далее не изменять его при всех экспериментах (не трогать ручку потенциометра RP2!);

б) определить экспериментально максимальную амплитуду неискаженного выходного синусоидального напряжения  $U_{\text{вых.м}}$ . Для этого при токе базы, равном нулю, проверьте положение линии на экране осциллографа. При закороченном входе осциллографа она должна совпадать с нулевой линией, а при разомкнутом - отклоняться примерно на три четверти от половины экрана. Нулевую линию можно сместить вниз для увеличения масштаба, но обязательно отметить ее положение. Плавно увеличивайте амплитуду входного сигнала и постоянную составляющую тока базы до появления видимого уплощения вершин синусоиды выходного напряжения. Обратите внимание, одновременно ли начинают уплощаться положительная и отрицательная полуволны. При необходимости уточните положение рабочей точки покоя. Зарисуйте на кальке выходное напряжение с искажениями и предельное без искажения. При зарисовке осциллограмм не забудьте нанести положение нулевой линии. Определите масштабы по напряжению и по времени. Дальнейшие измерения выходного сигнала необходимо производить в том же масштабе;

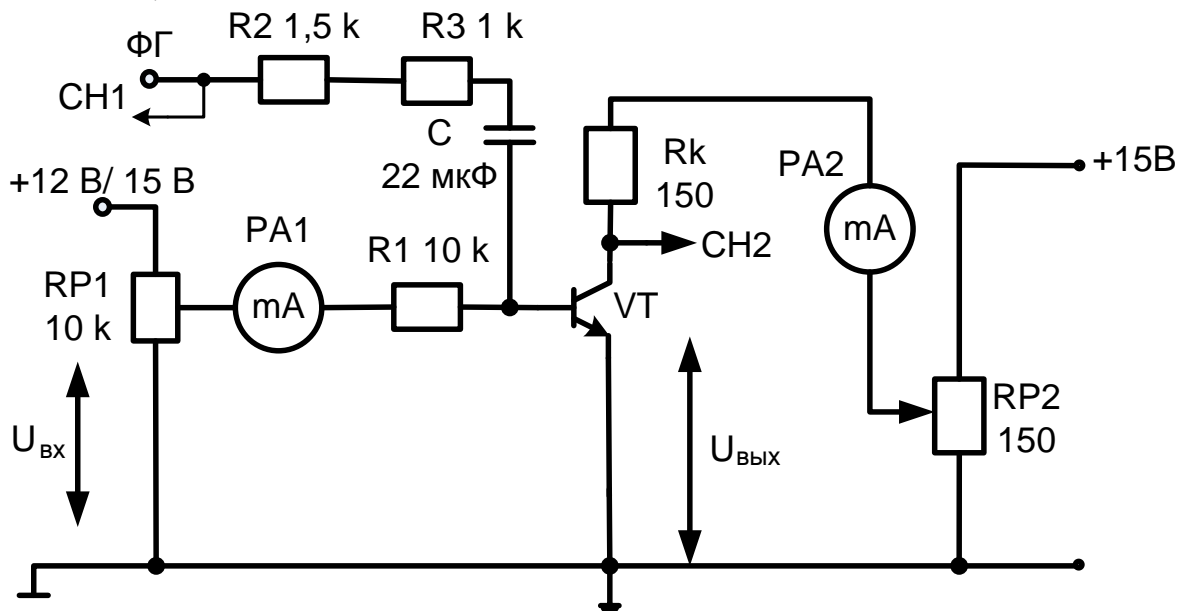


Рис. 3.4.

в) определить положение рабочей точки покоя. Для этого уменьшить входной синусоидальный сигнал до нуля и определить величины токов  $I_{\text{бр}}$ ,  $I_{\text{кр}}$  по осциллографу определить  $U_{\text{кр}}$ ;

г) исследовать экспериментально влияние положения рабочей точки покоя на форму выходного напряжения. Для этого установите вновь рабочую точку  $I_{\text{бр}}$ ,  $I_{\text{кр}}$ ,  $U_{\text{кр}}$  и максимальную амплитуду синусоидального неискаженного выходного напряжения. Зарисовать кривые выходного напряжения при изменении постоянной составляющей тока базы  $I'_{\text{бр}} = 0,5 I_{\text{бр}}$  и  $I'_{\text{бр}} = 1,5 I_{\text{бр}}$ ,



при этом переменный входной сигнал изменять не следует;

д) определить коэффициент усиления каскада по напряжению  $K_U$ . Для этого установить  $I_6 = I_{6p}$ , вход СН1 осциллографа, переключить на закрытый вход (АС). Изменяя переменный входной сигнал, добиться синусоидального по форме максимального выходного сигнала. Измерить с помощью осциллографа амплитуды выходного  $U_{вых}$  и входного  $U_{вх}$  сигналов. Определить коэффициент усиления, учесть масштабы;

2. Экспериментальное исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе в классе В:

а) определить амплитуду выходного напряжения (полуволны) в классе В. Для этого с помощью потенциометра RP1 установить  $I_6 = 0$ , и регулируя амплитуду входного сигнала добиться максимальной неуплощенной полуволны синусоиды выходного напряжения; зарисовать и обработать осциллограмму;

б) если длительность полуволны меньше полупериода, повысьте потенциометром RP1 постоянный ток  $I_6$  и изменяя переменный входной сигнал добейтесь воспроизведения усилителем ровно половины периода неискаженного синусоидального напряжения с максимальной амплитудой. Уменьшите  $U_{вх}$  до нуля и запишите ток  $I_6$ , который пришлось установить в рабочей точке покоя, чтобы не было искажений. Эта рабочая точка покоя соответствует классу АВ.

3. Экспериментальное исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе в классе D:

а) исследовать работу транзистора в ключевом режиме (класс D). Установите  $I_6 = 0$  и увеличьте сигнал от функционального генератора ФГ до перехода транзистора в ключевой режим; зарисуйте и обработайте осциллограмму выходного напряжения;

б) повторите опыт при подаче на вход прямоугольного сигнала.

### Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) обработанные осциллограммы;

### Контрольные вопросы

1. Как построить линию нагрузки?
2. Как выбрать рабочую точку покоя в классах А, АВ, В, D?
3. Нарисуйте схему усилительного каскада с общим эмиттером.
4. Каково назначение элементов усилителя?
5. Как определить коэффициент усиления каскада по току и напряжению (графически и экспериментально)?
6. Что такое ключевой режим?

7. Каковы преимущества ключевого режима?

### Лабораторная работа № 4 Полевой транзистор

#### Цель работы

Целью работы является изучение и экспериментальное исследование параметров и характеристик полевого транзистора.

#### Методические указания к выполнению лабораторной работы.

В настоящее время широкое распространение получили полевые транзисторы (ПТ), которые обладают значительно большим входным сопротивлением, чем биполярные. Различают полевые транзисторы с управляющим переходом (р-п, переходом Шотки или гетеропереходом), а также МДП (или МОП) структуры.

В лабораторной работе экспериментально исследуются ПТ с управляющим р-п-переходом (рис.4.1)

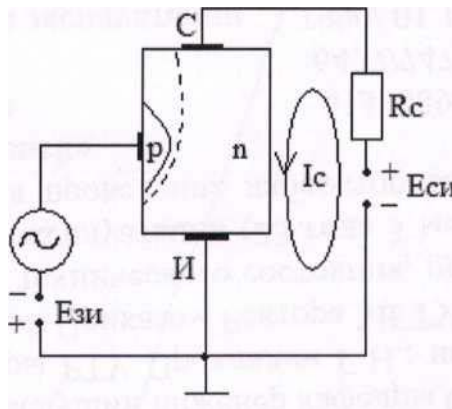


Рис.4.1

Пластина п-типа - канал - имеет электроды, с помощью которых она включена в электрическую цепь.

Вдоль ПТ идет ток (электроны). И - исток, С - сток,  $I_c$  - ток стока. Входная цепь образована с помощью электрода - затвора (З) - р - типа. При  $E_{зи} < 0$  образуется единственный обратно смещенный р-п- переход. При  $E_{зи} = 0$  поперечное сечение канала  $S$  максимально, его сопротивление  $R_{кан\ min}$ , а  $I_c\ max$ .

При  $E_{зи} < 0$  канал сужается, его сопротивление растет, а ток стока уменьшается. При  $E_{зи} = E_{зи\ отс}$  (отсечки)  $I_c = 0$ . Чтобы входной сигнал эффективнее управлял током стока, сечение канала небольшое, а начальное сопротивление достаточно велико (несколько сотен Ом).

Статистические характеристики показаны на рис.4.2 и 4.3.

А) Выходные  $I_c = f(U_{си}) | U_{зи} = const$ . Рассмотрим кривую с параметром  $U_{зи} = 0$  (рис.4.2).

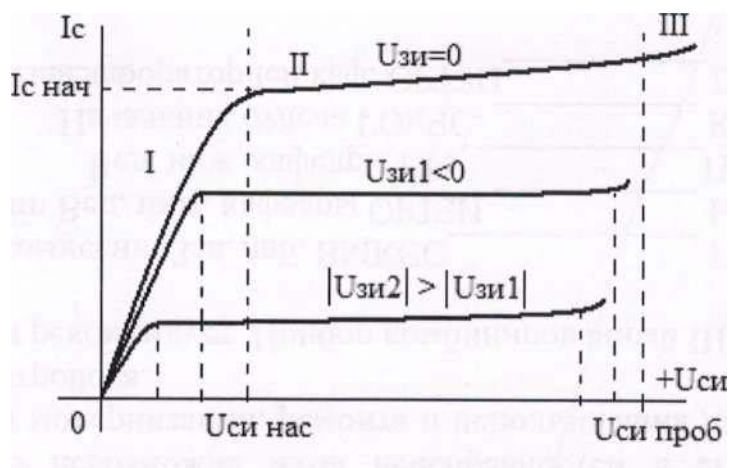


Рис. 4.2

Имеется три области, существенно отличающиеся друг от друга. I - крутой участок. Его наклон определяется начальным сопротивлением канала. Участок сублинейный. При  $U_{си} = U_{си\text{ нас}}$  наступает режим насыщения (II), где  $I_c \approx \text{const}$ . Обедненный слой около стока шире, чем у истока (из-за «+» со стороны стока). При  $U_{си} = U_{си\text{ нас}}$  наступает условное перекрытие канала: электроны у стока поступают во внешнюю цепь через узкую горловину. С увеличением  $U_{си} > U_{си\text{ нас}}$  диаметр горловины не уменьшается, а увеличивается длина условно перекрытой части канала. Т.е. с  $U_{си} > U_{си\text{ нас}}$  увеличивается сопротивление канала, а  $I_c \approx \text{const}$ . При  $U_{си} = U_{си\text{ проб}}$  начинается лавинный пробой.

При  $U_{зи1} < 0$  наклон крутого участка меньше, т.к. сопротивление канала (начальное) больше. Условное перекрытие наступает раньше, т.к. канал изначально уже. Пробой также наступает при меньшем значении  $U_{си}$ , т.к. со стороны стока, помимо  $U_{си}$  действует еще  $U_{зи}$ .  $I_c$  при  $U_{зи} = 0$  и  $U_{си} = U_{си\text{ нас}}$  называется начальным.

Б) Стоко-затворные  $I_c = f(U_{си})|_{U_{зи} = \text{const}}$  построены для  $U_{си} \geq U_{си\text{ нас}}$ , т.к. именно режим насыщения является рабочим.

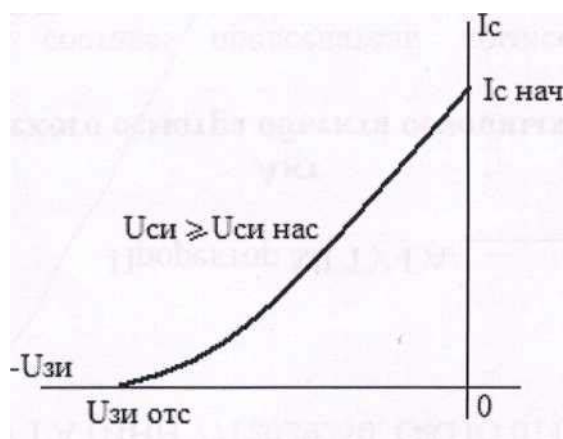


Рис. 4.3

Параметры:

$$\text{Крутизна: } S = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \right|_{U_{си} = const}, \left[ \frac{\text{мА}}{\text{В}} \right].$$

$$\text{Внутреннее сопротивление: } Ri = \left. \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \right|_{U_{зи} = const}, [\text{кОм}].$$

$$\text{Коэффициент усиления: } \mu = S * Ri.$$

Условное обозначение на электрической схеме (рис.4.4).

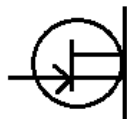


Рис. 4.4

### Лабораторное задание

а) собрать схему для снятия передаточной (стокзатворной) характеристики полевого транзистора без нагрузки (рис. 4.5). В качестве вольтметров PV1 и PV2 использовать мультиметры в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 20 В. Для измерения тока использовать стрелочный миллиамперметр постоянного тока на 100 мА. Предъявить схему для проверки преподавателю;

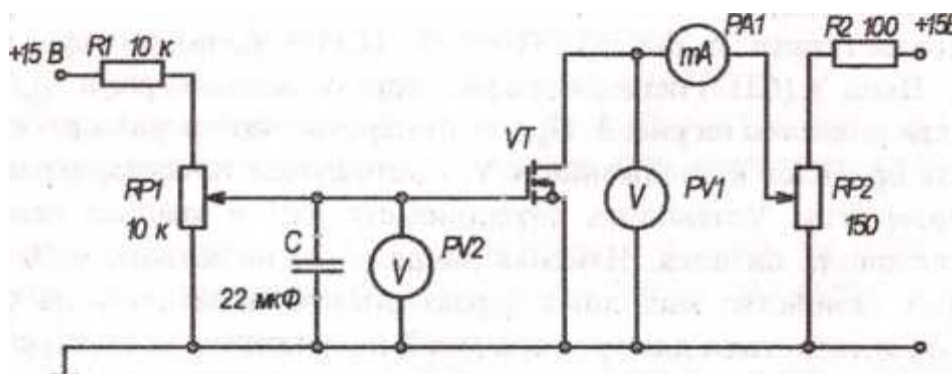


Рис. 4.5

б) снять статические передаточные характеристики транзистора  $I_c = f(U_{зи})$  при заданном постоянном значении напряжения  $U_{си}$ , равном 2 или 3 В (по указанию преподавателя). Включить тумблер SA1 источника питания С помощью потенциометра RP2 установите заданное значение  $U_{си}$ . Изменяя напряжение  $U_{зи}$ , начиная с «0» снять характеристику, не забывая поддерживать заданное  $U_{си}$ . Особо отметить точку отсечки, при которой начинает появляться ток стока. Экспериментальные точки здесь и далее записывать в таблицу и наносить на график. Выключить тумблер «Питание»;

в) снять передаточную характеристику при наличии заданного сопротивления нагрузки и заданном преподавателем значении напряжения

источника питания  $E_c$  (12 — 15 В). Собрать схему по рис.4.6. В качестве резистора  $R_c$  использовать модули  $R = 150$  или  $R = 100$  Ом (по указанию преподавателя). С помощью потенциометра  $RP2$  установите заданное значение напряжения источника питания  $E_c$ . В дальнейшем ручку регулировки  $RP2$  не трогать. Изменяя напряжение  $U_z$ , (начиная с «0»), снять характеристику. В области вблизи насыщения (ток  $I_c$  перестает расти и  $U_c$  меньше 1 В) точки снимать чаще. Экспериментальные результаты записать в таблицу и построить характеристику на графике. Выключить тумблер «Питание»;

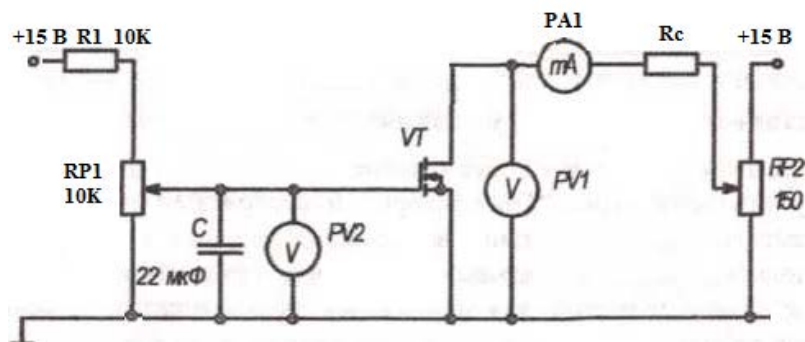


Рис.4.6

г) по построенной в п.в характеристике определить области активного усиления, отсечки и насыщения. Определить максимальное напряжение  $U_{zmax}$  при котором еще обеспечивается линейное усиление;

д) снять выходные статические ВАХ с помощью осциллографа. Собрать схему в соответствии с рис.4.7. Вход X (CH1) осциллографа подключить к стоку. Вход Y (CH2) осциллографа и корпус осциллографа ( $\perp$  подключить к шунту  $R_{ш}$ ), как показано на рис.4.7. При этом переключатель развертки осциллографа должен быть приведен в положение X/Y. Светящуюся точку на экране поместить в нижнем левом углу. Установить потенциометр  $RP1$  в крайнее левое положение. Включить источник питания. Изменяя напряжение на затворе от 0 до максимума наблюдать семейство выходных характеристик. Зарисовать на одном рисунке выходные характеристики для трех значений напряжения на затворе:  $U_z = U_{z0}$ ;  $U_z = U_{zmax}$  и  $U_z$ , обеспечивающее расположение выходной характеристиками посередине между снятыми. Записать масштабы по напряжению и току. Выключить тумблер питания.

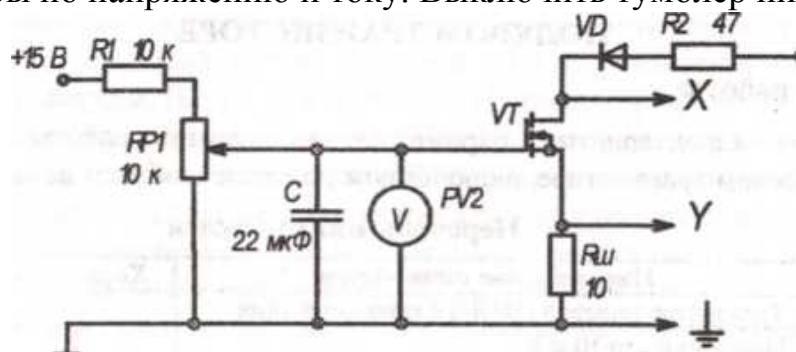


Рис.4.7

### Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики; определить по экспериментальным передаточным характеристикам крутизну передаточной характеристики  $S = (dI_c/dU_3)$  при отсутствии и наличии нагрузки;
- д) обработанную осциллограмму выходных характеристик; по полученным экспериментальным выходным характеристикам определить сопротивление сток-исток на участке насыщения  $R_{си} = U_c/I_c$  при  $U_3.\max$

### Контрольные вопросы

1. Какие разновидности полевых транзисторов вы знаете?
2. Каковы основные преимущества и недостатки полевых транзисторов?
3. Почему ток транзистора достигает насыщения при изменении напряжения на стоке?
4. Какова полярность напряжений, прикладываемых к полевому транзистору с изолированным затвором и каналами «п» и «р» типов при схеме включения с общим истоком?
6. Как выглядят передаточные и выходные характеристики транзистора с индуцированным каналом?
7. Как снять статические выходные характеристики?

## Лабораторная работа № 5 Операционный усилитель

### Цель работы

Целью работы является изучение и экспериментальное исследование параметров и характеристик операционного усилителя.

### Методические указания к выполнению лабораторной работы

Операционный усилитель (ОУ) - это усилитель с непосредственными связями, большим коэффициентом усиления, большим входным сопротивлением, дифференциальным входом, несимметричным выходом с малым выходным сопротивлением. Название этих усилителей связано с первоначальным их применением главным образом для выполнения различных операций над аналоговыми величинами (сложение, вычитание, интегрирование и др.). Однако благодаря достижениям в области микроэлектроники и широкому выпуску операционных усилителей в интегральном исполнении они приобрели более широкие схемотехнические возможности. В настоящее время ОУ играют роль многоцелевых элементов при построении аппаратуры самого различного назначения. Они применяются в усилительной технике, устройствах генерации сигналов синусоидальной и импульсной формы, в стабилизаторах напряжения, активных фильтрах и т.д.

Операционный усилитель почти всегда используется с внешней глубокой отрицательной обратной связью, определяющей его результирующие характеристики. Введение обратной связи того или иного вида обеспечивает способность ОУ выполнять различные математические операции над сигналами, циркулирующими в его цепях.

Операционные усилители характеризуются большим числом параметров, которые делятся на группы: общие, точностные, динамические и др.

ОУ имеет два входа: инвертирующий ( $e^-$ ) и не инвертирующий ( $e^+$ ) (рис.5.1). При работе ОУ в линейном режиме напряжение на его выходе увеличивается с уменьшением напряжения на инвертирующем входе и с увеличением напряжения на не инвертирующем.

Разность напряжений на выходах ОУ  $U_{вх} = e_+ - e_-$  называют дифференциальным входным сигналом, а полусумму этих напряжений  $E_{\text{сиф}} = (e_+ + e_-)/2$  - синфазным входным сигналом.

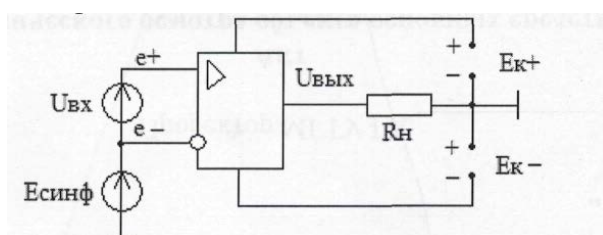


Рис.5.1

К общим параметрам ОУ относятся:

Коэффициент усиления дифференциального сигнала:  $K_0 = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ ,  
где  $U_{\text{вых}}$  - выходной дифференциальный сигнал;

Отношение ослабления синфазного сигнала:  $00CC = 20 \lg K_c/K_d$ ,  
где  $K_c$  - коэффициент передачи синфазного сигнала;  $00CC = 60 \dots 120$  дБ;

Входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  (для отдельных входов) и  $R_{\text{синф.}}$  (для объединенных входов);  $R_{\text{вх.}} = 10^3 \dots 10^6$  Ом,  $R_{\text{синф.}} = (10 \dots 1000) R_{\text{вх}}$

Выходное сопротивление.

Схема включения ОУ во внешнюю цепь содержит два разнополярных источника питания, обычно с одинаковыми значениями напряжений  $E_{\text{к}^+}$  и  $E_{\text{к}^-}$ , резистор нагрузки  $R_{\text{н}}$  и источник входного сигнала  $\pm U_{\text{вх}}$ . Есинф. поступает на оба входа одновременно (в фазе).

Выходное напряжение ОУ может симметрично изменяться относительно нуля, причем, если  $U_{\text{вх}} = 0$ , то  $U_{\text{вых}} = 0$ . Это условие называется условием баланса ОУ. Напряжение входного сигнала также может быть двуполярным.

Если заземлен инвертирующий вход ОУ, то усилитель является неинвертирующим и его переходная характеристика имеет вид, представленный на рис.5.2 (сплошная линия). В этом случае входной и выходной сигналы изменяются в одинаковой фазе.

Если заземлен неинвертирующий вход ОУ, то схема включения является инвертирующей (пунктирная линия на рис.5.2).

Если в схеме нет обратных связей, наклон передаточной характеристики  $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$  равен собственному коэффициенту усиления  $K_0$ .

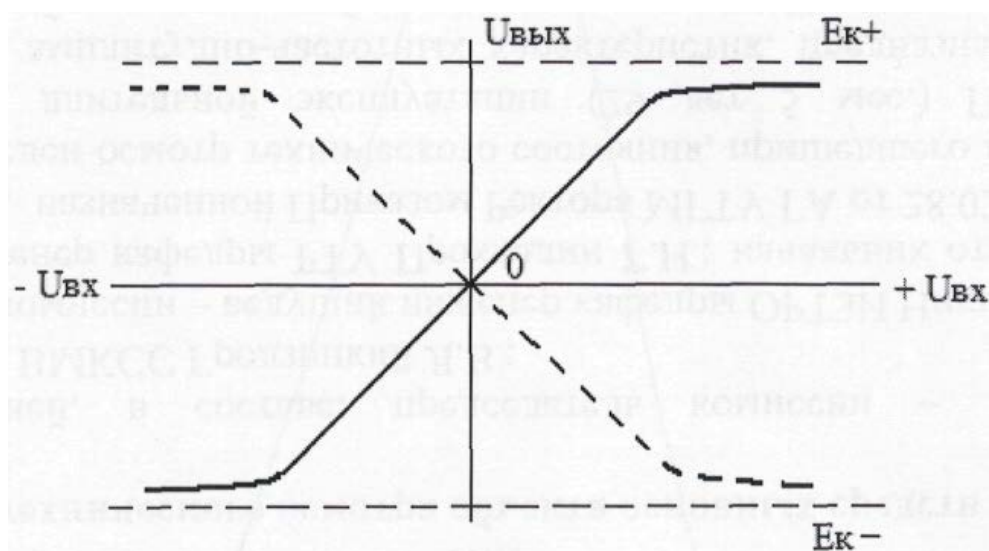


Рис.5.2

В реальном ОУ наблюдается разбаланс (рис.5.3).



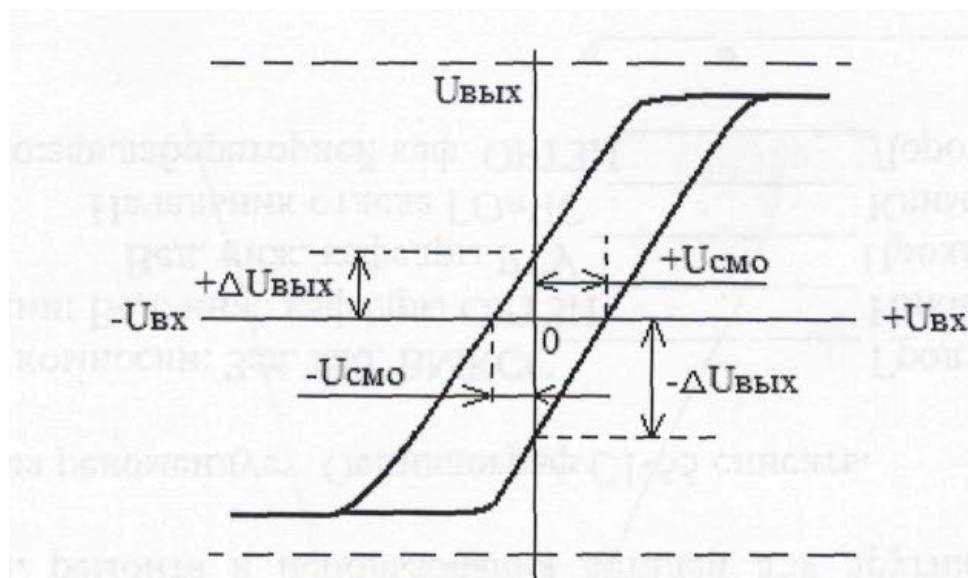


Рис.5.3

При этом, когда оба входа ОУ заземлены и  $U_{вх} = 0$ , на выходе имеется некоторое напряжение  $+\Delta U_{вых}$  или  $-\Delta U_{вых}$ . Это напряжение пересчитывается на вход ОУ через  $K_0$  во входное напряжение смещения нуля  $-U_{см0}$  или  $+U_{см0}$ .

Изменение питающего напряжения вызывает разбаланс ОУ. Качество усиления по этому параметру определяется отношением ослабления влияния питания - ООВП:

$$\text{ООВП} = U_{см0} / \Delta E_{к\pm},$$

которое определяется отдельно для положительного и отрицательного источников питания и имеет размерность мкВ/В, либо выражается в дБ.

К динамическим параметрам относятся параметры, характеризующие быстродействие ОУ, которое определяется различными способами.

Для схемы обработки гармонических сигналов используется малосигнальная частотная характеристика, которая отображает закон уменьшения коэффициента усиления  $K_0$  при увеличении частоты и имеет две особые точки: значение частоты, на которой  $K_0$  падает до уровня  $0,7 / -3$  дБ/, и значение частоты единичного усиления  $f_1$ , где  $K_0$  становится равным единице. Наиболее универсальной и простой характеристикой быстродействия усилителя является его скорость отклика  $\rho$ . При ее определении на вход ОУ подается большой скачок сигнала и измеряется скорость нарастания выходного импульса.

При импульсном режиме работы требуется знать время установления  $t_{уст}$  выходного сигнала, а также время восстановления усилительных свойств после перегрузки ОУ входным сигналом. Отметим на диаграмме выходного отклика характерные точки, используемые при определении импульсных и временных характеристик ОУ (рис.5.4).

$t_1 - t_0$  - время включения ОУ.

За время  $t_2 - t_1$  происходит нарастание выходного сигнала со скоростью  $\rho$  до конечного уровня  $U_{вых}$ .

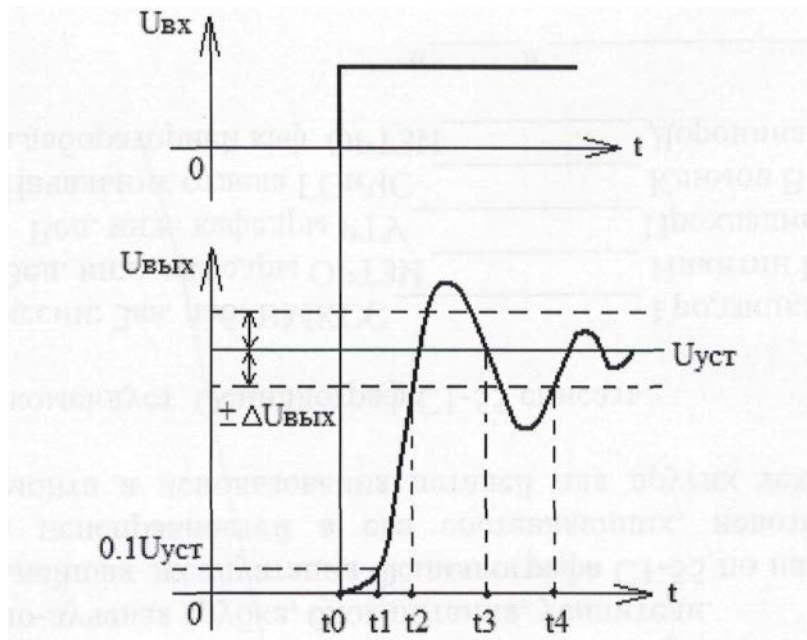


Рис. 5.4

Если выходной сигнал имеет выброс, то  $t_3 - t_2$  - время восстановления. В момент  $t_4$  выходной сигнал входит в требуемую зону ошибки  $\pm \Delta U_{\text{вых}}$  и считается установившимся.

Применение обратных связей в операционных усилителях (ОУ) позволяет создать усилители с любыми амплитудными и частотными характеристиками. Как правило, это отрицательная связь. Она осуществляется применением навесных элементов. Рассмотрим влияние нескольких вариантов обратных связей на результирующие характеристики ОУ.

1. Инвертирующий усилитель (рис.5.5).

Коэффициент передачи инвертирующего усилителя:  $K = - R_2/R_1$ .

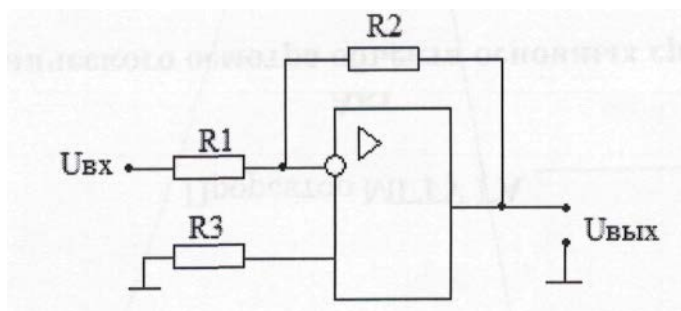


Рис.5.5

Достоинством такого усилителя является то, что ОУ в нем работает при нулевом синфазном сигнале. Это снимает вопрос о влиянии на  $U_{\text{вых}}$  конечного значения ослабления синфазного сигнала примененного ОУ. Благодаря этому оказывается возможным прикладывать ко входу инвертирующего усилителя большие напряжения, в том числе и превышающие напряжение питания. При этом  $R_2/R_1$  должно быть таким, чтобы  $U_{\text{вых}}$  оставалось в границах линейного участка амплитудной характеристики.

ОУ в инвертирующем усилителе позволяет производить суммирование сигналов от нескольких источников при практически полном отсутствии влияния их друг на друга. Недостатком инвертирующего усилителя является относительно низкое  $R_{\text{вх}}=R_1$ , поэтому он применяется тогда, когда нужно инвертировать  $U_{\text{вх}}$  и к усилителю не предъявляется требование высокого  $R_{\text{вх}}$ , или когда нужно просуммировать несколько входных сигналов (рис.5.6).

$$U_{\text{вых}} = - \left( U_1 * \frac{R_{\text{ос}}}{R_1} + U_2 * \frac{R_{\text{ос}}}{R_2} \right) + U_3 * \frac{R_{\text{ос}}}{R_3}$$

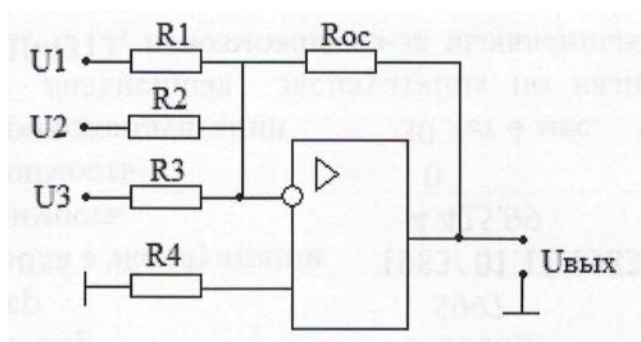


Рис.5.6

2. Не инвертирующий усилитель (рис.5.7).

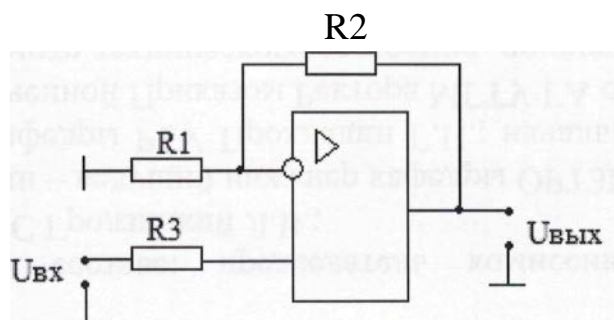


Рис.5.7

В не инвертирующем усилителе реализуется последовательная отрицательная обратная связь путем подачи части выходного напряжения на инвертирующий вход. Коэффициент передачи усилителя:

$$K=1+R2/R1$$

Не инвертирующий усилитель обладает большим  $R_{вх}$ .

Широкое применение находит не инвертирующий усилитель с  $K=1$  (рис.5.8). Он имеет высокое  $R_{вх}$ , малое  $R_{вых}$ . Его включают между источником сигнала и нагрузкой для исключения влияния сопротивления нагрузки на источник сигнала, имеющий сравнимое с нагрузкой внутреннее сопротивление.

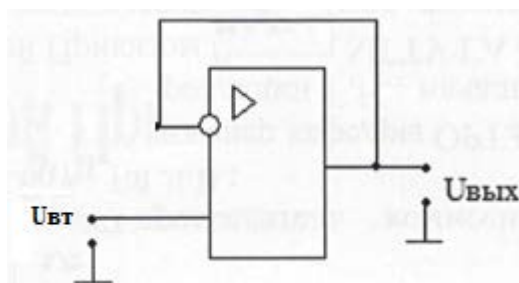


Рис.5.8

### Лабораторные задание

а) собрать схему согласно рис. 5.9.

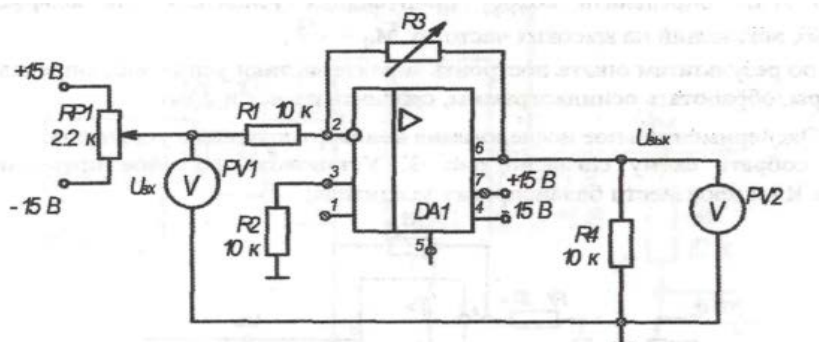


Рис. 5.9

В качестве R3 включить минимодуль резистор с переключением 10...470 кОм; установить заданное преподавателем значение R3; в качестве вольтметров использовать мультиметры;

б) произвести балансировку операционного усилителя с помощью

потенциометра RP2. При нулевом входном сигнале сигнал на выходе должен быть равен 0;

в) снять амплитудную характеристику усилителя на постоянном токе  $U_{\text{вых}} = F(U_{\text{вх}})$ . В качестве источника сигнала использовать напряжение, регулируемое потенциометром RP1.

По амплитудной характеристике определить коэффициент усиления по напряжению  $K_{uoc}$ ; выключить питание;

г) снять амплитудные характеристики усилителя при помощи осциллографа для двух значений  $R_{oc}$  (R3). Для опыта необходимо подключить к модулю функциональный генератор (рис.5.10). Для снятия зависимости одной величины от другой надо использовать два входа осциллографа X и Y. Вход Y (один вывод) подключается к выходу усилителя, вход X - к входу усилителя, а корпус ( $\perp$ ) общему проводу ( $\perp$ ). Развертка луча переключается в положение X/Y. Установить на выходе функционального генератора напряжение частотой порядка 100...200 Гц; определить по характеристикам коэффициенты усиления;

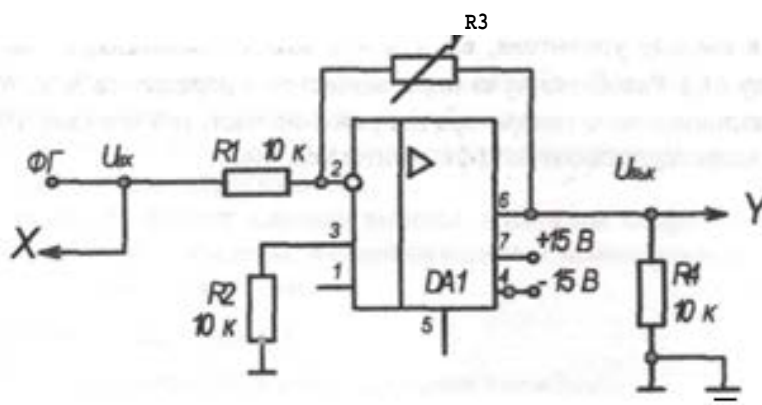


Рис.5.10

д) снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя  $K_{и} = F(f)$  при  $U_{\text{вх}} = \text{const}$  для заданного преподавателем значения  $R_{oc}$  (R3). Переключатель развертки осциллографа установить на временную развертку. Выходной сигнал усилителя должен находиться на линейном участке амплитудной характеристики. Амплитуды сигналов  $U_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{вых}}$  измерять осциллографом.

По АЧХ определить полосу пропускания усилителя.

е) по результатам опыта построить характеристики усилителя,

определить его параметры, обработать осциллограммы, сравнить расчет и опыт.

2. Экспериментальное исследование не инвертирующего усилителя.

а) собрать схему согласно рис.5.11 Установить заданное преподавателем значение  $R_3$  и произвести балансировку усилителя;

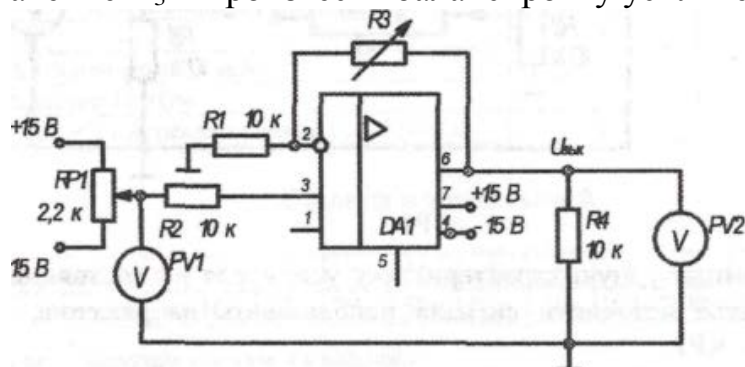


Рис.5.11

б) снять амплитудную характеристику усилителя на постоянном токе  $U_{\text{вых}} = F(U_{\text{вх}})$ . В качестве источника сигнала использовать напряжение, регулируемое потенциометром RP1.

По амплитудной характеристике определить коэффициент усиления по напряжению  $K_u$ ; выключить питание;

в) снять амплитудные характеристики усилителя при помощи осциллографа для двух значений  $R_{oc}$  ( $R_3$ ). Для опыта необходимо подключить к модулю функциональный генератор (рис. 4). Для снятия зависимости одной величины от другой надо использовать два входа осциллографа X и Y. Вход Y (один вывод) подключается к выходу усилителя, вход X - к входу усилителя, а корпус ( $\perp$ ) к общему проводу ( $\perp$ ). Развертка луча переключается в положение X/Y. Установить на выходе функционального генератора напряжение частотой порядка 100...200 Гц; определить по характеристикам коэффициенты усиления;

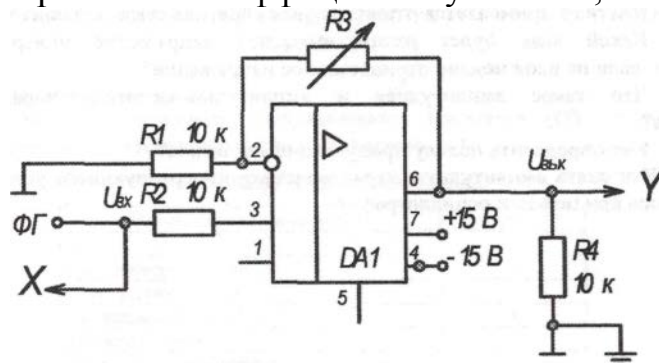


Рис.5.12

г) снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя  $K_u = F(f)$  при  $u_{\text{вх}} = \text{const}$  для заданного значения  $R_{oc}$ . Переключатель развертки осциллографа установить на временную развертку. Выходной сигнал

усилителя должен находиться на линейном участке амплитудной характеристики. Амплитуды сигналов  $u_{вх}$ ,  $u_{вых}$  измерять осциллографом.

По АЧХ определить полосу пропускания усилителя.

д) по результатам опыта построить характеристики усилителя, определить его параметры, обработать осциллограммы, сравнить расчет и опыт.

### Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве, начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных лабораторной работе;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы.
- е) выводы по работе: сделать выводы о влиянии сопротивления обратной связи на коэффициенты усиления инвертирующего и не инвертирующего усилителя и их амплитудные характеристики.

### Контрольные вопросы

1. Что называется операционным усилителем?
2. Каковы основные параметры операционного усилителя?
3. Какие допущения принимаются для операционного усилителя при выводе коэффициента усиления с различными обратными связями?
4. Для чего применяется отрицательная обратная связь в усилителях?
5. Какой знак будет иметь выходное напряжение инвертирующего усилителя, если на вход подано отрицательное напряжение?
6. Что такое амплитудная и амплитудно-частотная характеристики усилителя?
7. Как определить полосу пропускания усилителя?
8. Как снять амплитудную характеристику инвертирующего усилителя или компаратора при помощи осциллографа?

## Лабораторная работа № 6

### Устройства на основе операционного усилителя

#### Цель работы

Целью работы является изучение и экспериментальное исследование процессов обработки аналоговых сигналов операционными усилителями.

#### Методические указания к выполнению лабораторной работы

Существует огромное количество способов применения операционных усилителей (ОУ) в процессах обработки аналоговых сигналов, например, дифференцирование и интегрирование входного напряжения как функции времени, логарифмирование, выпрямление входного сигнала. Рассмотрим некоторые из них.

1. Инвертирующий усилитель формируется из ОУ с резистором  $R_1$  на входе и  $R_2$  в цепи обратной связи. Учитывая незначительное влияние входного смещения напряжения, а также принимая коэффициент усиления ОУ с незамкнутой цепью обратной связи равным бесконечности, коэффициент усиления инвертирующего усилителя будет равен:

$$K = -R_2/R_1$$

В общем виде

$$K = -Z_2/Z_1 \quad (6.1)$$

#### 2. Дифференциатор

На рис.6.1 представлена базовая схема дифференциатора на основе ОУ.

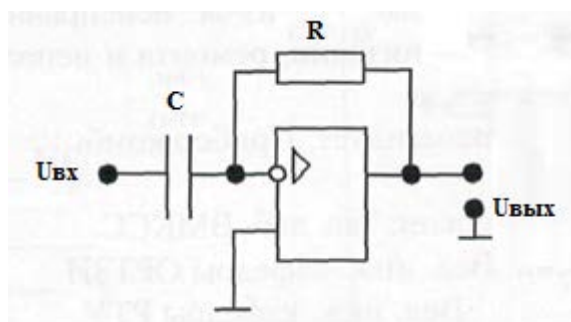


Рис.6.1

Выходное напряжение будет определяться как:

$$U_{\text{вых}} = -R_{\text{ос}} * C \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} \quad (6.2)$$

Реактивное сопротивление конденсатора

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$



уменьшается с увеличением частоты.

Выходное напряжение дифференциатора будет увеличиваться с увеличением частоты, делая схему чувствительной к высокочастотным шумам и склонной к неустойчивости.

На практике применяется схема дифференциатора, представленная на рис.6.2.

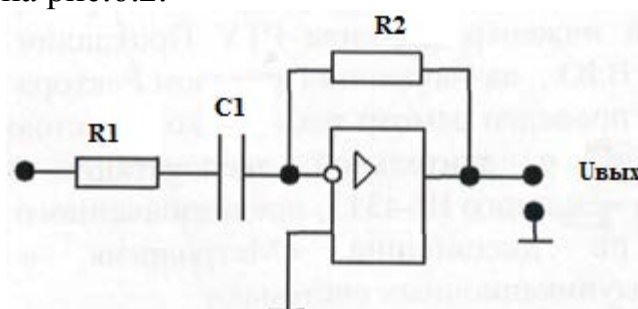


Рис.6.2

Для ограничения коэффициента усиления на высоких частотах соотношением  $K = -R_{oc}/R_1$  на входе схемы используют резистор, соединённый последовательно с конденсатором. При частоте входного сигнала менее

$$f = \frac{1}{2\pi R_1 C} \quad (6.3)$$

выходное напряжение в этой схеме определяется по формуле (6.2). Если частота входного сигнала больше, чем по формуле (6.3), рабочие характеристики схемы приближаются к таковым инвертирующего усилителя

с коэффициентом усиления по напряжению  $K = -R_{oc}/R_1$

### 3. Интегратор

Если в схеме на (рис.6.1) поменять местами конденсатор и резистор, то получится схема интегратора на базе операционного усилителя (рис.6.3).

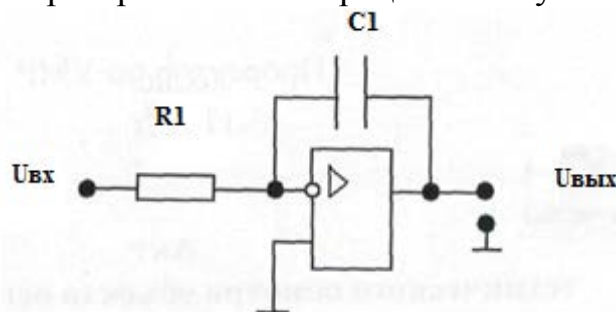


Рис.6.3

Выходное напряжение этой схемы определяется по формуле:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{R_1 C} \int U_{\text{вх}} dt \quad (6.4)$$

На практике применяется схема интегратора, представленная на (рис. 6.4).

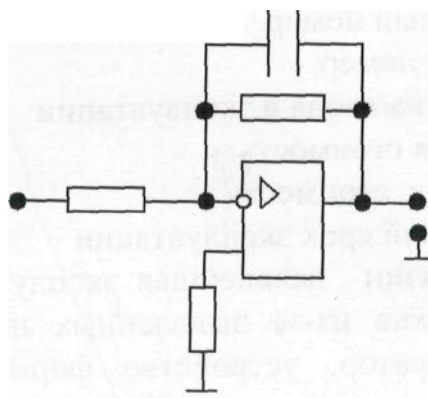


Рис.6.4

Для ограничения коэффициента усиления на низких частотах в цепи обратной связи этой схемы применяется шунтирующий резистор  $R_2$ . Если его не ограничивать, наступает насыщение ОУ. Чтобы минимизировать смещение постоянного напряжения, применяется резистор  $R_3$  с сопротивлением:

$$R_3 = R_1 * R_2 / (R_1 + R_2)$$

При частоте входного сигнала ниже

$$f = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

уравнение (6.4) недействительно. При этом рабочие характеристики схемы приближаются к характеристикам инвертирующего усилителя с коэффициентом усиления по напряжению

$$K = - R_2 / R_1$$

#### 4. Компаратор.

В схеме компаратора на ОУ нет отрицательной обратной связи (рис.6.5).

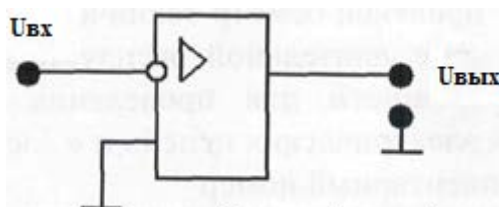


Рис.6.5

Пороговым напряжением здесь является «земля». Входное напряжение бывает выше или ниже порогового уровня напряжения. Выходное напряжение является результатом сравнения входного напряжения с пороговым напряжением. Так как ОУ разрабатывались не для применения их без обратной связи, то сравнение напряжений они выполняют не очень хорошо. Однако в случае, если не требуются высокие скорости и чувствительность, ОУ с незамкнутой цепью обратной связи можно

применять в качестве адекватного компаратора.

### 5. Сумматор

Схема суммирует сигналы от разных источников с различными весовыми коэффициентами (рис.6.6).

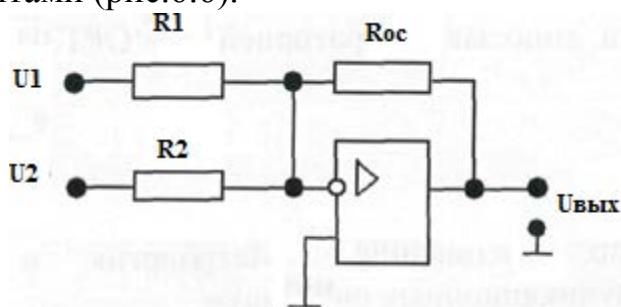


Рис.6.6

$$U_{\text{ВЫХ}} = - \left( U_1 \frac{R_{oc}}{R_1} + U_2 \frac{R_{oc}}{R_2} \right) \quad (6.5)$$

### Лабораторное задание

#### 1. Исследование интегратора:

а) собрать схему интегратора согласно рис.6.7, установить заданное преподавателем значения емкости  $C$ ;

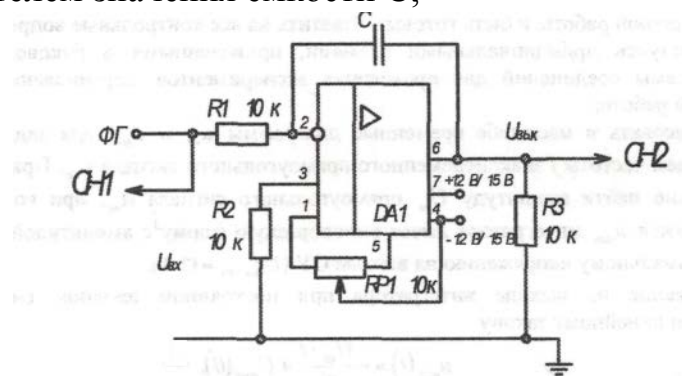


Рис.6.7

б) исследовать работу интегратора в режиме генератора пилообразного напряжения (рис.6.7). Для этого на функциональном генераторе установить прямоугольное знакопеременное напряжение с заданной частотой  $f$  и амплитудой  $U_m$ . Напряжение на входе  $u_{\text{вх}}$  и выходе  $u_{\text{вых}}$  контролировать при помощи осциллографа. При необходимости подстроить потенциометром  $RP1$  амплитуду  $U_m$  знакопеременного прямоугольного сигнала так, чтобы пилообразный выходной сигнал интегратора стал симметричным относительно нуля с амплитудой  $U_{nm} = U_{\text{вых.max}}$ . Зарисовать осциллограммы  $u_{\text{вх}}(t)$  и  $u_{\text{вых}}(t)$ . Сравнить полученные результаты с расчетом по значениям  $U_m, f, U_{nm}$ ;

в) снять и построить зависимость амплитуды выходного напряжения от

частоты  $U_{nm} = F(f)$  при постоянной амплитуде синусоидального входного напряжения. Амплитуды  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$ , замерять при помощи осциллографа. Результаты заносить в таблицу. Построить зависимость  $U_{вых} = F(f)$ . Выключить питание модуля.

## 2. Исследование активного фильтра:

а) собрать схему активного фильтра согласно рис. 6.8. Сопротивление резистора с переключением  $RP2$  и величину емкости конденсатора  $C$  установить в соответствии с указанным преподавателем;

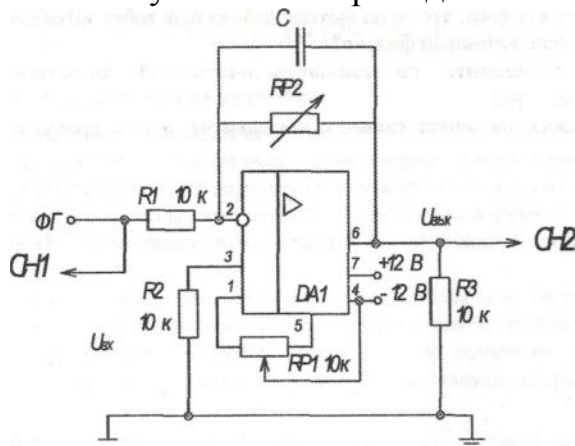


Рис.6.8

б) снять и построить амплитудно-частотную характеристику активного фильтра при заданных параметрах элементов фильтра;  
 в) повторить опыт при других значениях параметров фильтра;  
 г) определить полосы пропускания исследованных активных фильтров.

## Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) пользуясь принципиальными схемами, приведенными в руководстве, начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе;
- в) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- г) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- д) обработанные осциллограммы.
- е) сделать выводы по работе: о влиянии частоты входного напряжения и емкости конденсатора обратной связи на амплитуду выходного пилообразного напряжения в интеграторе; о влиянии параметров на полосу пропускания активного фильтра.