

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

---

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И.  
Ульянова (Ленина)

---

**ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ:**  
**лабораторный практикум**

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2022

УДК 621.375.134+621.373

ББК 32.886

Д79

Дурукан Я., Сидоренко И. Г., Шевелько М. М.

Д Исследование характеристик устройств на операционных усилителях и интегральных микросхемах / Сост.: Я. Дурукан, И. Г. Сидоренко, М. М. Шевелько. СПб.: Изд – во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. 96 с.

ISBN

Рассматриваются основные вопросы функционирования базовых элементов электроники: резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, диодов и транзисторов.

Приводятся теоретические сведения о работе электронных устройств, необходимые для проведения исследований, описание функциональных возможностей лабораторного стенда, порядок выполнения лабораторных работ по дисциплине «Элементная база электроники».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» и 12.03.01 «Приборостроение».

УДК 621.375.134+621.373

ББК 32.886

Рецензент:

Утверждено

редакционно – издательским советом университета

в качестве учебного пособия

ISBN

©СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022

## ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКТА ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Общая компоновка комплекта оборудования показана на рис. 1.1

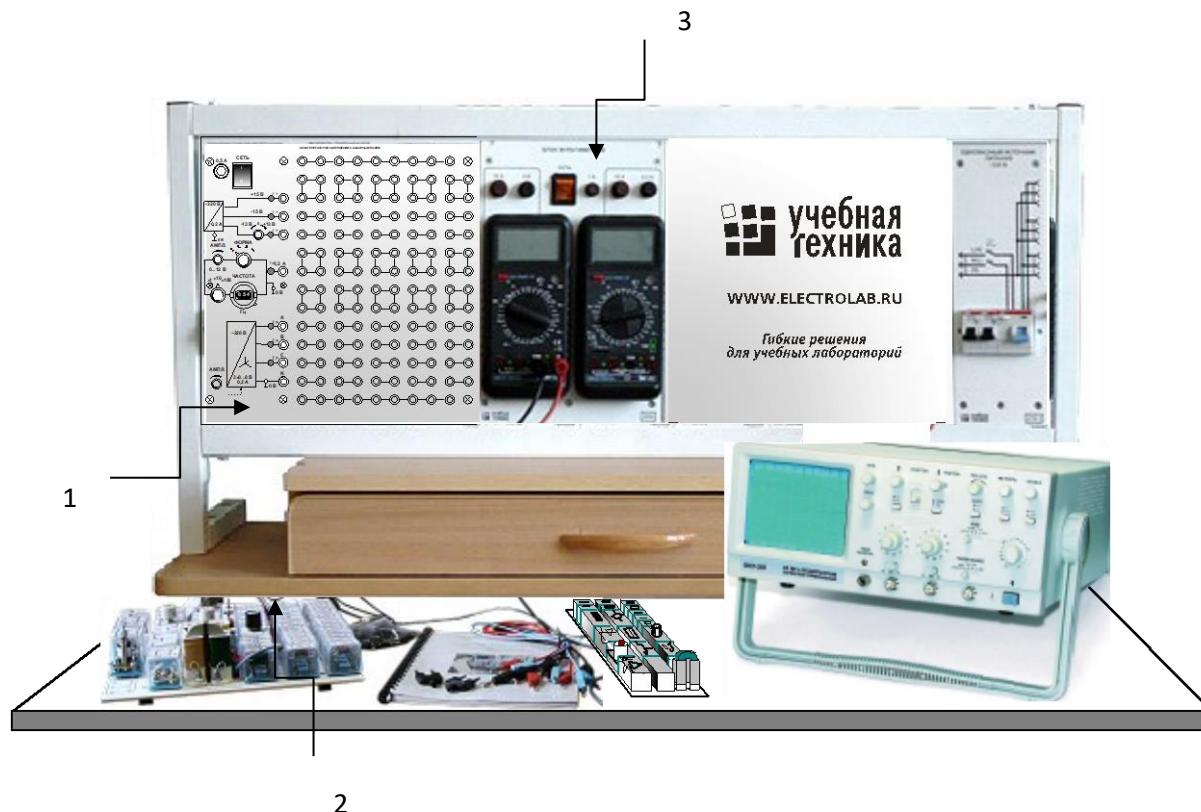


Рис. 1.1

На рис. 1.1 приняты следующие обозначения:

1 – блок генераторов напряжения с наборным полем. Блок генераторов предназначен для формирования однофазных сигналов различной формы, регулируемых по амплитуде и частоте, формирования трехфазного напряжения и постоянных напряжений для питания исследуемых схем. Блок содержит наборное поле для сборки электрических схем с использованием набора миниблоков

2. Наборное поле подробным образом будет рассмотрено далее.

3 – блок мультиметров. Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Для обеспечения надежной длительной работы мультиметров соблюдайте следующие правила:

- не превышайте допустимых перегрузочных значений, указанных в заводской инструкции для каждого рода работы
- когда порядок измеряемой величины неизвестен, устанавливайте переключатель пределов измерения на наибольшую величину. перед тем, как повернуть переключатель для смены рода работы (для изменения предела измерения!), отключайте щупы от проверяемой цепи.
- не измеряйте сопротивление в цепи, к которой подведено напряжение.
- не измеряйте емкость конденсаторов, не убедившись, что они разряжены.

Присоединение мультиметра как вольтметра, амперметра и омметра показано на рис. 1.2

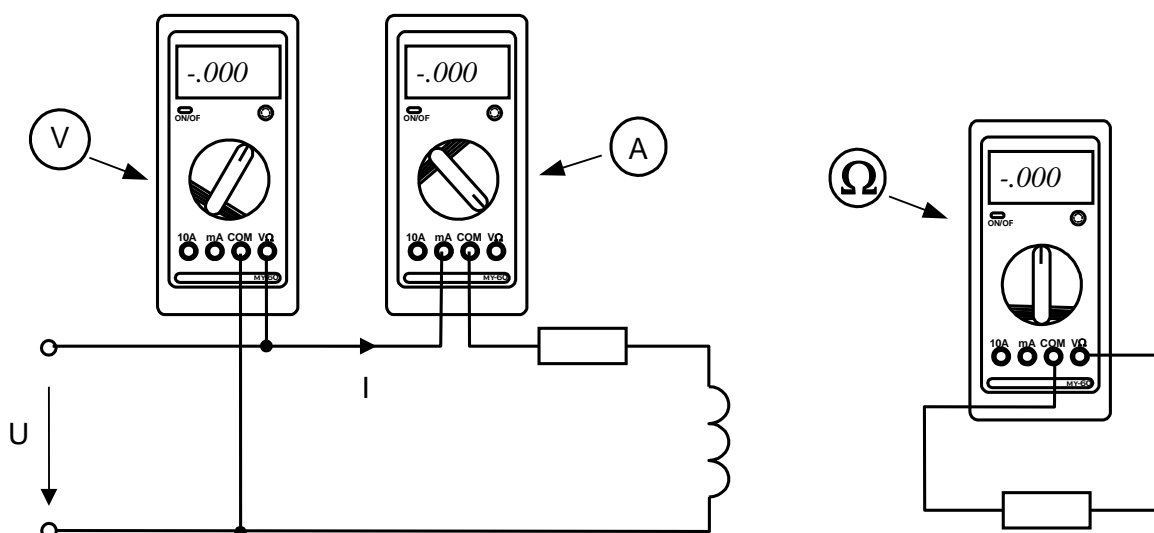


Рис. 1.2

Наборное поле представлено на рис. 1.3:

На рис. приняты следующие обозначения:

1. Выключатель **СЕТЬ** подачи питания на блок;
  2. Предохранитель в цепи питания блока;
  3. Генератор напряжений специальной формы;
  4. Кнопка **ФОРМА**, изменяющая форму напряжения на выходе генератора.
- Горящий светодиод показывает выбранную форму выходного сигнала;

5. Светодиоды, показывающие форму сигнала на выходе генератора. Горящее/мигающее состояние светодиода показывает, как будет изменяться выходная частота при повороте ручки потенциометра;
6. Ручка потенциометра, позволяющая изменять выходную частоту генератора. При горящем состоянии светодиода частота меняется по декадам. При мигающем состоянии светодиода, частота меняется с минимально возможным шагом. Переключение между режимами производится путем нажатия кнопки энкодера-потенциометра;
7. Индикатор частоты генератора;
8. Светодиоды, показывающие размерность установленной частоты генератора;
9. Ручка потенциометра регулировки выходного напряжения генератора;
10. Светодиод, показывающий перегрузку выхода генератора по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);
11. Выход генератора напряжений специальной формы;
12. Генератор постоянных напряжений;
13. Выходное гнездо источника питания +15 В;
14. Светодиод, показывающий перегрузку источника +15 В по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);

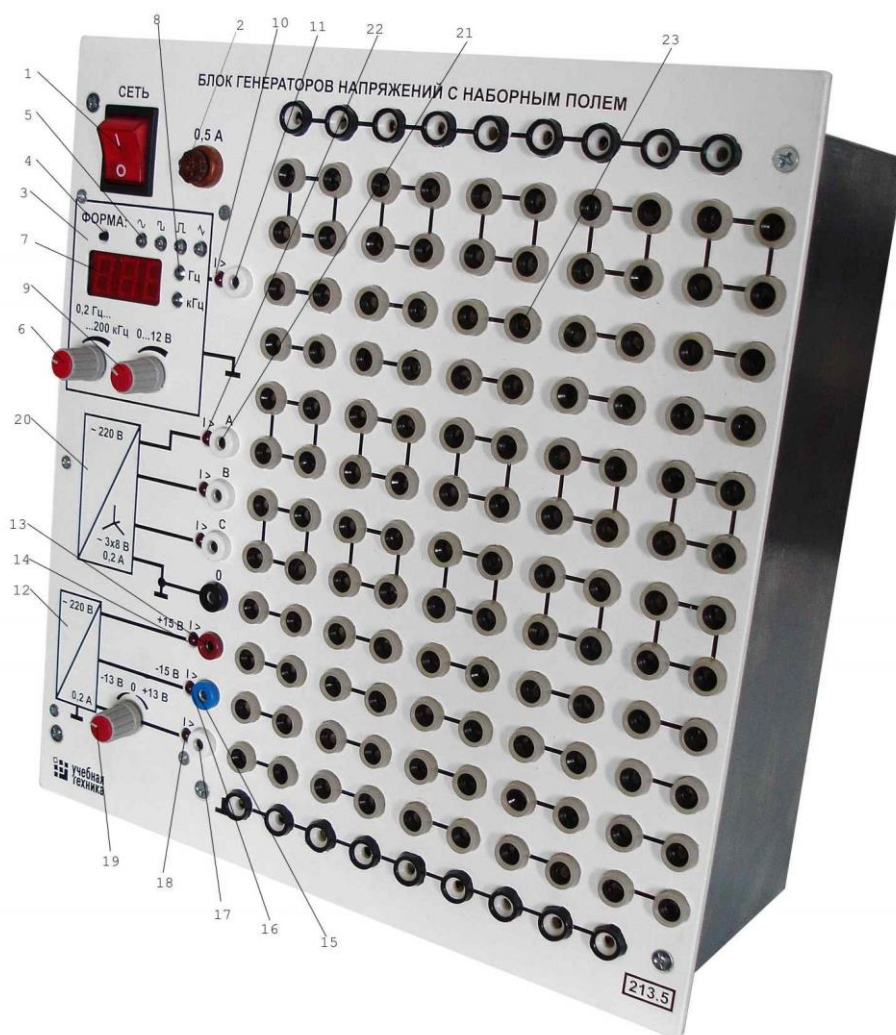


Рис. 1.3

- 15. Выходное гнездо источник питания -15 В;
- 16. Светодиод, показывающий перегрузку источника -15 В по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);
- 17. Выходное гнездо регулируемого источника питания -13 – 0 – +13 В;
- 18. Светодиод, показывающий перегрузку регулируемого источника питания по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);
- 19. Ручка потенциометра, регулировки выходного напряжения регулируемого источника питания;

- 20. Генератор трехфазного напряжения, с действующим значением выходного напряжения 8 В;
- 21. Выходные гнезда генератора трехфазного напряжения (фазы А, В, С и 0);
- 22. Светодиоды в цепях фазных напряжений трехфазного генератора, показывающие перегрузку соответствующей фазы по току (выходное напряжение при срабатывании защиты перегрузки по току может отсутствовать или быть искажено);
- 23. Наборное поле, для сборки схем на базе комплектов миниблоков.

Гнезда на этой панели соединены в узлы, как показано на ней линиями. Поэтому часть соединений выполняется автоматически при установке миниблоков в гнезда панели. Остальные соединения выполняются проводами и перемычками.

На рис. 1.4 схематично изображено наборное поле, где приняты следующие обозначения:

1 – ряд соединенных между собой гнезд, имеющих нулевой потенциал (земля).

2 – ряд соединенных между собой гнезд, которые имеют один потенциал. Этот ряд удобно использовать, если необходимо подключить несколько элементов к одному потенциалу, например, к источнику постоянного напряжения. Для этого необходимо соединить любое гнездо из ряда 2 с источником питания и весь ряд будет иметь потенциал источника.

3 – пример группы соединенных между собой гнезд, имеющих один потенциал. Такие гнезда также удобно использовать для узлов схемы, где требуется передать напряжение в различные части из одной точки.

4 – два гнезда, имеющие одинаковый потенциал

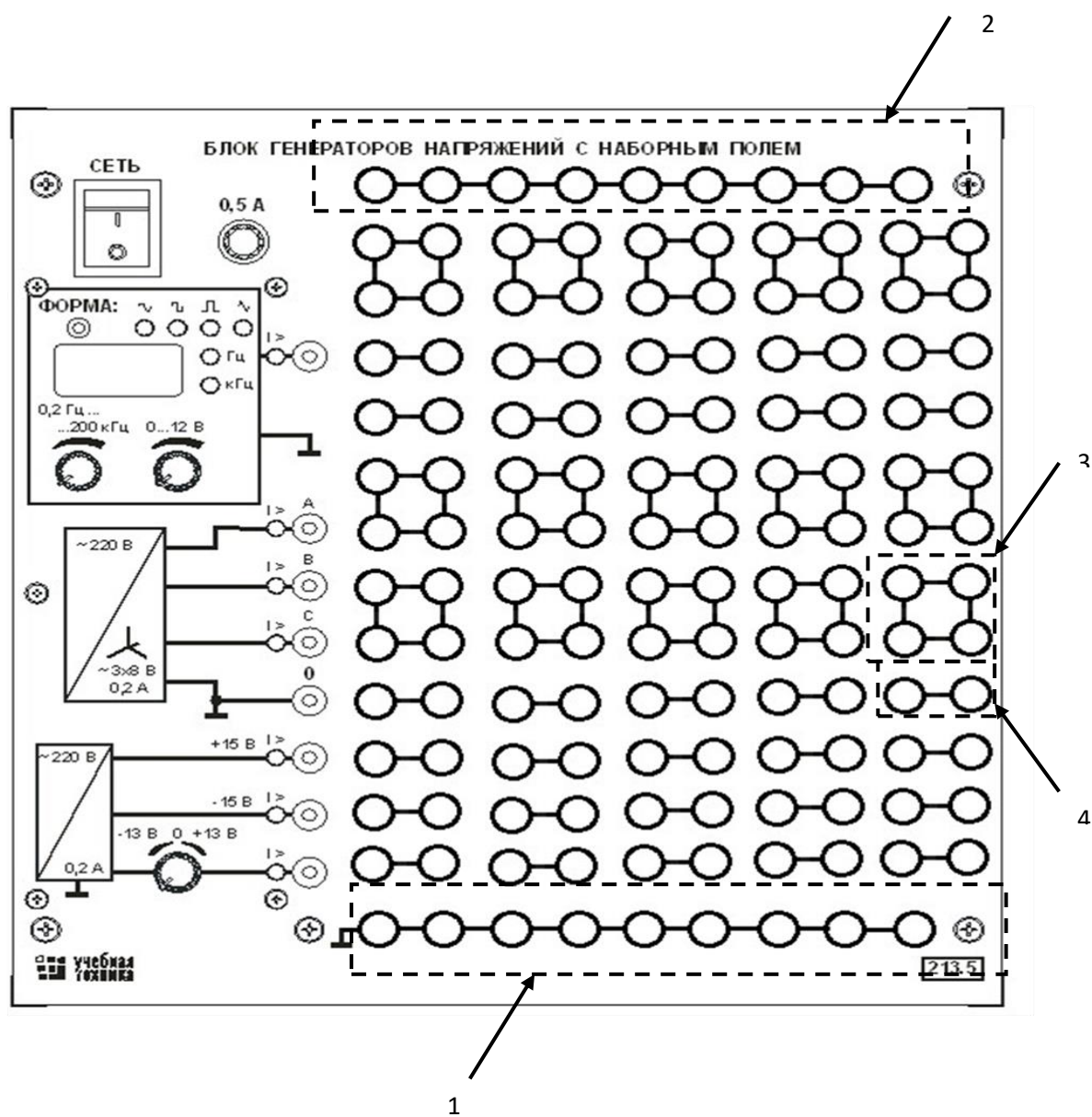


Рис. 1.4



# 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ»

*Цель работы:* исследование делителей напряжения с частотно не зависимыми и частотно зависимыми элементами.

*Задачи:*

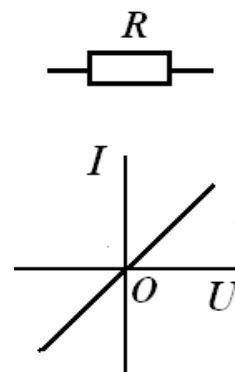
- Изучить основные характеристики и области применения базовых элементов электроники: резистора, конденсатора и катушки индуктивности.
- Изучить работу фильтров нижних и верхних частот, полосового и полосно-заграждающего фильтров.

## Основные теоретические положения

Пассивными элементами называют потребители и накопители электрической энергии. Базовые пассивные компоненты: резистор, конденсатор и катушка индуктивности.

### Резистор

Резистор (от лат. resisto — сопротивляюсь) — пассивный элемент электрических цепей, обладающий определенным или переменным значением электрического сопротивления. Резисторы относятся к наиболее широко используемым в электронике элементам. Условно графическое обозначение (УГО) и вольт-амперная характеристика (ВАХ) резистора изображены на рис. 2.1. Основная функция резисторов - *деление напряжения* или *ограничение тока*.



### Основные параметры резисторов

- **Номинальное сопротивление** - указываемое на резисторе значение сопротивления. Измеряется в Омах.

Номиналы сопротивлений постоянных резисторов, выпускаемых промышленностью, сведены к так называемым рядам резисторов, которые представляют собой результат стандартизации номинальных сопротивлений резисторов. Постоянные резисторы имеют шесть рядов: E6, E12, E24, E48, E96 и E192; где цифра следующая за буквой E обозначает количество значений в ряду для каждого десятичного интервала.

На рис. 2.2. представлен один из наиболее часто используемых в промышленности ряд номиналов E24.

Ряд E24		
1,0	2,2	4,7
1,1	2,4	5,1
1,2	2,7	5,6
1,3	3,0	6,2
1,5	3,3	6,8
1,6	3,6	7,5
1,8	3,9	8,2
2,0	4,3	9,1

Рис. 2.2

- **Номинальная мощность рассеивания** - максимально допустимая мощность, которую резистор может рассеивать при непрерывной электрической нагрузке и заданной температуре окружающей среды, не изменяя параметров свыше норм, установленных техническими условиями.

На рис. 2.3 приведены обозначения номинальных мощностей резисторов наиболее часто применяемых в электронике резисторов.









Обозначение по ГОСТ 2.728-74	Описание
	Постоянный резистор без указания номинальной мощности рассеивания
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 0.05 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 0.125 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 0.25 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 0.5 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 1 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 2 Вт
	Постоянный резистор номинальной мощностью рассеивания 5 Вт

Рис. 2.3

- **Предельное рабочее напряжение (Uпред)** – максимальное напряжение приложенное к R, при котором допускается эксплуатация резистора без нарушения его работоспособности. Uпред – справочный параметр.
- **Температурный коэффициент сопротивления резистора (ТКС или  $\alpha$ )** – параметр, определяющий изменение величины сопротивления резистора при изменении температуры на 1 °С.

### Конденсатор

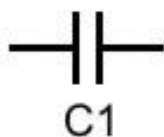


Рис. 2.4

Конденсатор (от лат. condense — «уплотнять») — двухполюсник с определённым значением ёмкости и малой омической проводимостью. Обычно состоит из двух электродов в форме пластин (называемых обкладками), разделённых диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок. УГО конденсатора изображено на рис. 2.4.

Рассчитать реактивное сопротивление конденсатора можно по нижеприведенной формуле.

$$x_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

### ***Основные функции конденсаторов***

- Разделение цепей по постоянному и переменному току
- Частотная фильтрация
- Накопление энергии

### ***Основные параметры конденсаторов***

- **Номинальная емкость конденсатора** - емкость, которую должен иметь конденсатор в соответствии с нормативной документацией.
- **Номинальное рабочее напряжение (номинальное напряжение)** - максимальное напряжение, при котором конденсатор может работать в заданных условиях эксплуатации в течение гарантированного срока службы (указывается на конденсаторе).
- **Тангенс угла потерь ( $\text{tg}\delta$ )** характеризующий потери энергии в конденсаторе при протекании переменного тока. Потери происходят в обкладках и диэлектрике. Основные потери приходятся на диэлектрик. Наличие потерь ( $P_a = I \times R_{из}$ ) приводит к тому, что вектор полного тока отклоняется на угол  $\delta$  относительно вектора емкостного тока. Современные конденсаторы (кроме электролитических) имеют очень малые потери  $\text{tg}\delta < 0,01...0,001$ .
- **Температурный коэффициент емкости (ТКЕ)** — величина, применяемая для характеристики конденсаторов с линейной зависимостью емкости от температуры и равная относительному изменению емкости при изменении температуры окружающей среды на один градус Цельсия.

### ***Фильтры высоких и низких частот***

На основе резистора и конденсатора можно собирать цепи фильтра нижних частот и фильтра верхних частот. Фильтры высоких и низких частот – электрические цепи, состоящие из элементов, обладающих нелинейной АЧХ, т.е. имеющих разное сопротивление на разных частотах.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) - зависимость амплитуды установившихся колебаний выходного сигнала некоторой системы от частоты её входного гармонического сигнала.

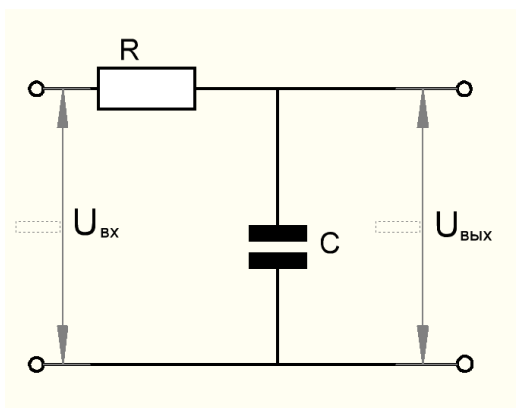


Рис. 2.5

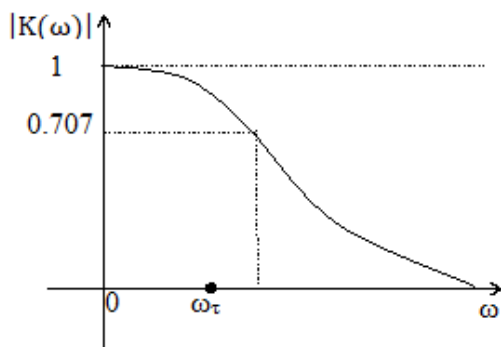


Рис. 2.6

Фильтры нижних частот (ФНЧ) пропускают составляющую сигнала, отсекая высокие частоты, то есть являются интегрирующими цепями. Схема ФНЧ представлена на рис. 2.5.

АЧХ для ФНЧ представлена на рис. 2.6. Определяется по следующей формуле:

Коэффициент передачи по напряжению определяется следующим соотношением:

$$K = \frac{1}{1 + x_c/R} = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_\tau},$$

где  $\omega_\tau$  – частота среза.

$$\omega_\tau = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC}$$

Коэффициент передачи – отношение выходной величины ко входной величине. Коэффициенты передачи бывают по напряжению, току и мощности.

Частота среза – это частота, на которой происходит спад амплитуды выходного сигнала до значения равного 0,7 от входного напряжения.

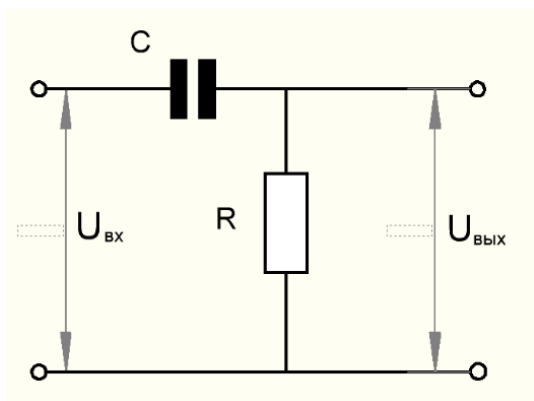


Рис. 2.7

Для постоянного напряжения конденсатор представляет собой разрыв цепи, то есть постоянная составляющая сигнала в цепи дифференцирующего типа будет отсечена. Такие цепи являются фильтрами верхних частот (ФВЧ). Схема представлена на рис. 2.7.

Зависимость коэффициента передачи от частоты определяется по следующей формуле:

$$|K| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_\tau)^2}}$$

Коэффициент передачи по напряжению:

$$K = \frac{1}{1 + X_c/R} = \frac{1}{1 + 1/j\omega RC} = \frac{1}{1 + \omega_\tau/j\omega}$$

АЧХ для ФВЧ представлена на рис. 2.8.

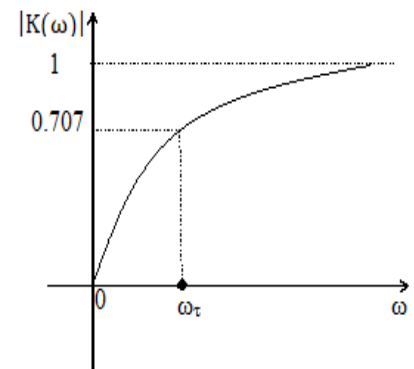


Рис. 2.8

### Мост Вина

Еще один фильтр на основе резистора и конденсатора - простейший пассивный полосовой RC фильтр - мост Вина. Мост Вина представляет собой полосовой RC фильтр (ПФ), пропускающий без искажений сигнал, спектр которого находится в соответствующей полосе частот. Коэффициент передачи на резонансной частоте составляет 1/3. Схема данного фильтра представлена на рис. 2.9.

Коэффициент передачи по напряжению и частота, соответствующая максимуму коэффициента передачи:

$$K = \frac{1}{3 + j(\omega_\tau/\omega - \omega/\omega_\tau)}$$

$$\omega_\tau = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC}$$

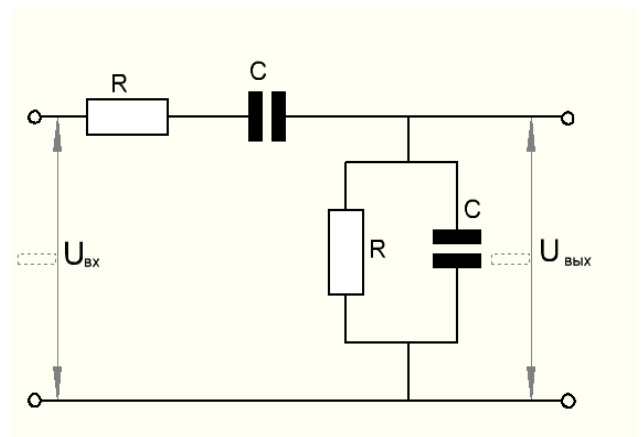


Рис. 2.9

АЧХ данного фильтра представлена на рис. 2.10.

Выражение,  
описывающее АЧХ моста  
Вина:

$$|K| = \frac{1}{\sqrt{9 + (\omega\tau/\omega - \omega/\omega\tau)^2}}$$

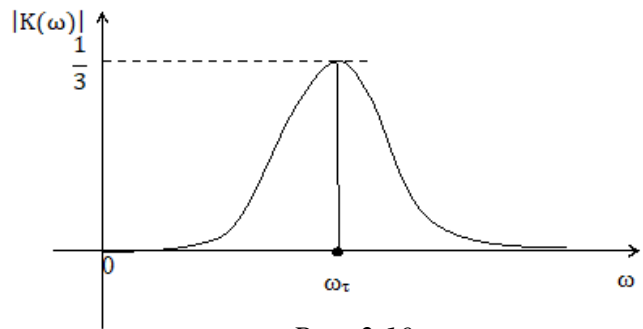


Рис. 2.10

### ***Катушка индуктивности***

Катушка индуктивности - винтовая, спиральная или винтоспиральная катушка из свёрнутого изолированного проводника, обладающая значительной индуктивностью при относительно малой ёмкости и малом активном сопротивлении. УГО элемента представлено на рис. 2.11.

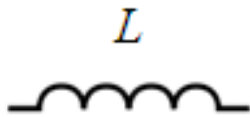


Рис. 2.11

Реактивное сопротивление катушки индуктивности рассчитывается по формуле, измеряется в Омах:

$$x_L = 2\pi fL$$

### ***Применение катушек индуктивности***

- фильтры, колебательные контура
- трансформаторы, электромагниты
- накопление магнитной энергии

### ***Основные параметры катушек индуктивности***

- **Индуктивность (коэффициент самоиндукции)** - основной электрический параметр, характеризующий величину энергии, запасаемой катушкой при протекании по ней электрического тока. Индуктивность зависит от размеров каркаса, формы, числа витков катушки, диаметра и марки провода, а также от формы и материала магнитопровода (сердечника).
- **Добротность (Q)** характеризуется качеством работы катушки индуктивности в цепях переменного тока и определяется как отношение

реактивного сопротивления катушки к ее **активному сопротивлению потерь**.

- Активное сопротивление включает в себя сопротивление провода обмотки катушки; сопротивление, вносимое диэлектрическими потерями в каркасе; сопротивление, вносимое собственной емкостью и сопротивления, вносимые потери в экраны и сердечники.
- Чем **меньше** активное сопротивление, тем **выше** добротность катушки и ее качество. В большинстве случаев добротность катушки определяют резонансные свойства и КПД контура. Современные катушки средних размеров имеют добротность около 50 – 300.
- Катушки индуктивности обладают **собственной емкостью**, которая увеличивается по мере увеличения числа витков и размеров катушки. Между соседними витками существует **межвитковая емкость**, из-за которой некоторая часть тока проходит не по проводу, а через емкость между витками, отчего сопротивление между выводами катушки уменьшается. Общее напряжение, приложенное к катушке, разделяется на межвитковые напряжения из-за чего между витками образуется электрическое поле, вызывающее скопление зарядов. Витки, разделенные слоями изоляции, образуют обкладки множества маленьких конденсаторов, через которые протекает часть тока, из общей емкости которых и складывается собственная емкость катушки. Таким образом катушка обладает не только индуктивными, но и емкостными свойствами.
- Собственная емкость является вредным параметром и ее стремятся уменьшить применением специальных форм каркаса и способом намотки провода.
- Изменение индуктивности под влиянием температуры характеризуют **температурным коэффициентом индуктивности (ТКИ)**, равным относительному изменению индуктивности при изменении температуры на 1°С. ТКИ катушки определяется способом намотки и качеством диэлектрика каркаса.

### **Порядок выполнения эксперимента**

#### **1. Исследование работы ФНЧ**

- Соберите схему RC фильтра нижних частот, изображенного на рис. 2.12. Резистор  $R = 1$  кОм, конденсатор  $C = 0.1$  мкФ. Первый канал осциллографа подключается для измерения входного напряжения, второй канал подключается для измерения выходного сигнала.

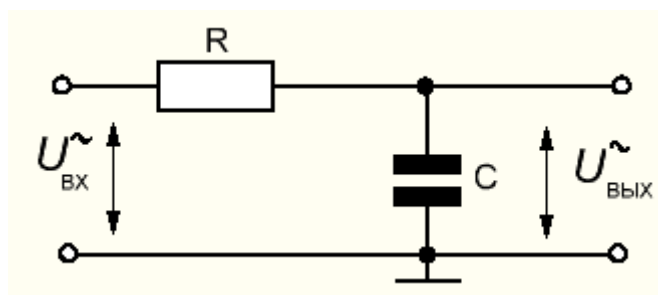


Рис. 2.12

- Изменяя частоту синусоидального сигнала  $f$ , фиксируйте осциллографическим методом значения входного и выходного напряжений. Данные заносите в таблицу 2.1. В отчете необходимо рассчитать коэффициент передачи по напряжению и частоту среза  $f_{\text{ср}}$ .

Таблица 2.1

$f$ , кГц	0,1	0,5	1,5	2	3	4	5	7	9
$U_{\text{ВХ}}$ , В									
$U_{\text{ВЫХ}}$ , В									
$K_U(f)$									

- По данным таблицы построить АЧХ ФНЧ.

## 2. Исследование работы ФВЧ

- Соберите схему RC фильтра верхних частот в соответствии с рисунком 2.13. Для этого необходимо поменять местами резистор R и конденсатор C. Номиналы резистора и конденсатора оставить те же, осциллограф подключить, как и в пункте с ФНЧ.

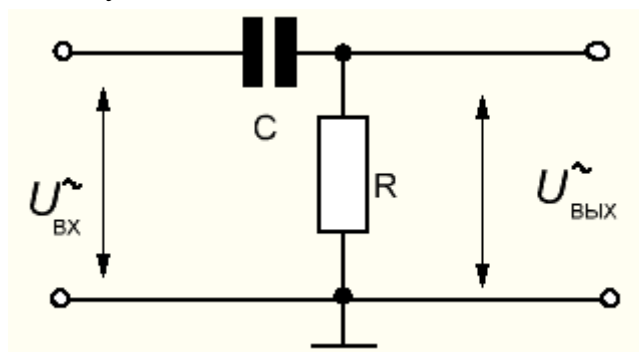


Рис. 2.13

- Изменяя частоту синусоидального сигнала  $f$ , фиксируйте осциллографическим методом значения входного и выходного напряжений. Данные заносите в таблицу 2.2. В отчете необходимо рассчитать коэффициент передачи по напряжению и частоту среза  $f_{\text{ср}}$ .



Таблица 2.2

f, кГц	0,1	0,5	0,75	1	1,25	1,5	2	3	4
$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$									
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									
$K_U(f)$									

- По данным таблицы в отчете привести АЧХ ФВЧ.

### 3. Мост Вина

- Соберите цепь для Моста Вина, представленную на рис. 2.14.  $R = 1 \text{ кОм}$ ,  $C = 0,1 \text{ мкФ}$ . Первый канал осциллографа подключается для измерения входного напряжения, второй канал подключается для измерения выходного сигнала.

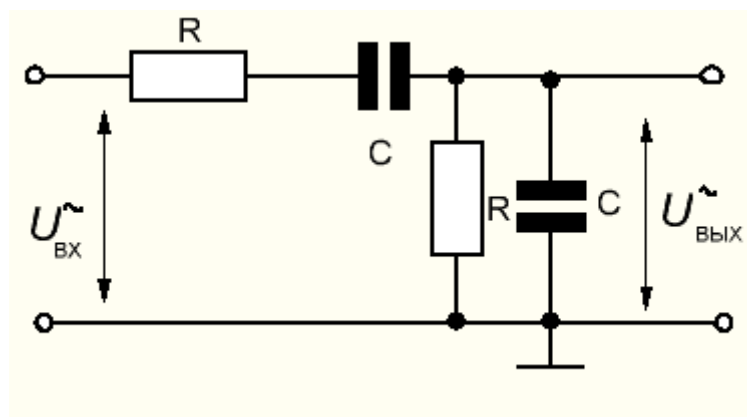


Рис. 2.14

- Изменяя частоту синусоидального сигнала  $f$ , фиксируйте осциллографическим методом значения входного и выходного напряжений. Данные заносите в таблицу 2.3. В отчете необходимо рассчитать коэффициент передачи по напряжению, резонансную частоту  $f_p$  и полосу пропускания  $\Delta f$  (по уровню 0.7 от  $K_U(f_p)$ ).

Таблица 2.3

f, кГц	0,1	0,5	0,75	1	1,5	2	2,6	3	4	6	10
$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$											
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$											
$K_U(f)$											

- По данным таблицы в отчете привести АЧХ Моста Вина

### 4. Полосовой фильтр

- Соберите цепь для режекторного фильтра (параллельного колебательного контура), представленную на рис. 2.15.  $R = 1 \text{ кОм}$ ,  $C = 0,1 \text{ мкФ}$ ,  $L = 100 \text{ мГн}$ . Первый канал осциллографа подключается для измерения входного напряжения, второй канал подключается для измерения выходного сигнала.

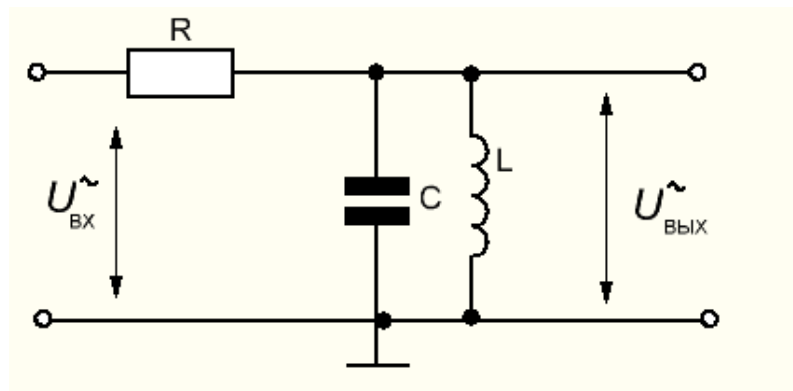


Рис. 2.15

- Изменяя частоту синусоидального сигнала  $f$ , фиксируйте осциллографическим методом значения входного и выходного напряжений. Данные заносите в таблицу 2.4. В отчете необходимо рассчитать коэффициент передачи по напряжению, резонансную частоту  $f_p = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ .

Таблица 2.4

$f, \text{ кГц}$	0,1	0,5	0,8	1,2	1,5	2,5	3	3,6	4,6	6
$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$										
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$										
$K_U(f)$										

- По данным таблицы в отчете привести АЧХ ПФ.

## 5. Режекторный фильтр

- Соберите цепь для режекторного фильтра, представленную на рис. 2.16.  $R = 1 \text{ кОм}$ ,  $C = 0,1 \text{ мкФ}$ ,  $L = 100 \text{ мГн}$ . Первый канал осциллографа подключается для измерения входного напряжения, второй канал подключается для измерения выходного сигнала.

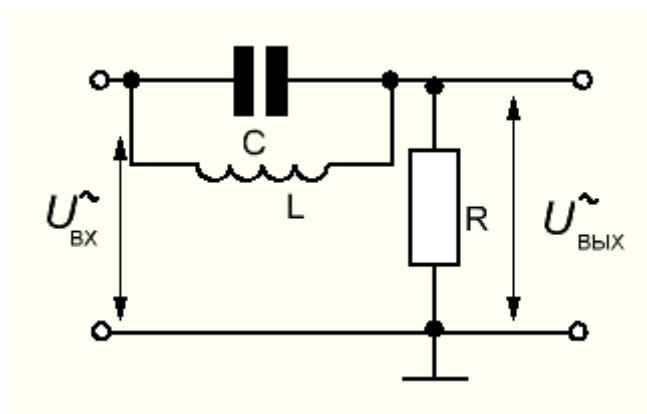


Рис. 2.16

- Изменяя частоту синусоидального сигнала  $f$ , фиксируйте осциллографическим методом значения входного и выходного напряжений. Данные заносите в таблицу 2.5. В отчете необходимо рассчитать коэффициент передачи по напряжению, антирезонансную частоту  $f_{ap} = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ .

Таблица 2.5

$f$ , кГц	0,1	0,2	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,8	3,6	5
$U_{вх}$ , В													
$U_{вых}$ , В													
$K_U(f)$													

- По данным таблицы в отчете привести АЧХ РФ.
- **Основные понятия:** УГО, АЧХ, ВАХ, Резистор, конденсатор, катушка индуктивности, ФНЧ, ФВЧ, ПФ, коэффициент передачи, частота среза, мост Вина, колебательный контур

**Вопросы для допуска к выполнению и защиты лабораторной работы:**

1. Нарисуйте УГО элементов, исследуемых в лабораторной работе.
2. Перечислите основные параметры резисторов
3. Для чего применяются резисторы?
4. Перечислите основные параметры конденсаторов
5. Для чего применяются конденсаторы?
6. Перечислите основные параметры индуктивностей
7. Для чего применяются индуктивности?
8. Как математически выражается сопротивление конденсатора и индуктивности в цепях переменного тока? В чем оно измеряется?

9. Изобразите схему простейшего делителя напряжения.
10. Изобразите схему ФНЧ и его АЧХ и напишите формулу для определения коэффициента передачи.
11. Изобразите схему ФВЧ и его АЧХ и напишите формулу для определения коэффициента передачи.
12. Изобразите схему Моста вина и его АЧХ и напишите формулу для определения коэффициента передачи.
13. Изобразите схему ПФ и его АЧХ и напишите формулу для определения коэффициента передачи.
14. Изобразите схему РФ и его АЧХ и напишите формулу для определения коэффициента передачи.
15. Что такое коэффициент передачи? Какие виды коэффициента передачи бывают?
16. Что такое частота среза? Как определить частоту среза?
17. Чем отличаются активные фильтры от пассивных? На каких частотах целесообразно использовать активные фильтры?

## **2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ»**

*Цель работы* – изучение основных характеристик, процессов работы и областей применения полупроводниковых приборов.

*Задачи:*

- Снять вольтамперные характеристики выпрямительного диода (типа КД226,) и диода Шоттки (типа 1N5819), светодиода.
- По характеристикам определить основные параметры. На экране осциллографа пронаблюдать процессы включения и выключения диода, определить время включения и выключения
- Изучить влияние напряжения  $U_{сд}$  и тока  $I_{сд}$  светодиода на световую эмиссию.

### **Основные теоретические положения**

**Полупроводник** - вещество, электропроводность которого при комнатной температуре имеет промежуточное значение между электропроводностью проводников и диэлектриков (таблица 3.1). При этом часть электронов высвобождается и становится носителями электрического тока. «Дырки» (отсутствие электронов), оставленные этими электронами, двигаются в противоположном электронам направлении и действуют как

носители положительных зарядов. Существует два типа полупроводников: **n**-тип, в котором носители тока (электроны) имеют отрицательный заряд, и **p**-тип, в котором носители тока (дырки) имеют положительный заряд. Полупроводниковые переходы образуются, когда происходит резкий скачок от одного вида примеси к другому. такой p-n-переход действует как выпрямитель (преобразователь переменного электрического тока в постоянный) и является основой полупроводникового диода.

Таблица 3.1

Удельное сопротивление $\rho$	Проводники (металлы)	Полупроводники	Диэлектрики (изоляторы)
$\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\rho < 10^{-6}$	$10^{-6} < \rho < 10^8$	$\rho > 10^8$
Зависимость от температуры, $t \uparrow$	$\rho \uparrow$	$\rho \downarrow$	$\rho \downarrow$
Зависимость от освещенности	-	$\rho \downarrow$	$\rho \downarrow$
Зависимость от примесей	$\rho \uparrow$	$\rho \downarrow$	$\rho \downarrow$
<b>Деление материалов на диэлектрики и полупроводники условно. При одних условиях вещество ведет себя как диэлектрик, а при других – как полупроводник.</b>			

### Диоды

**Диод** - полупроводниковый элемент, *обладающей односторонней проводимостью*. В **n**-проводящем слое в качестве свободных носителей заряда преобладают электроны, а в **p**-проводящем слое – дырки.

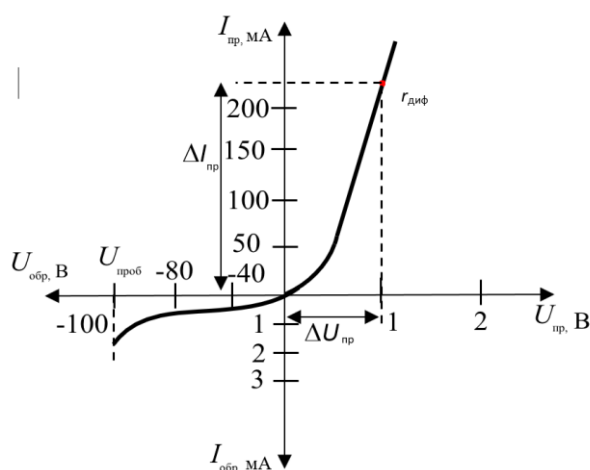
Электрод диода, подключённый к положительному полюсу источника тока, когда диод открыт (то есть имеет маленькое сопротивление), называют анодом, подключённый к отрицательному полюсу — катодом. Условное графическое обозначение (УГО) диода на схемах приведено на рис. 3.1.



Рис. 3.1

В результате диффузии электронов из **n**-области в **p**-область и, наоборот, дырок из **p**-области в **n**-область на границе создаётся потенциальный барьер. При прямом приложенном напряжении («+» к слою **p**, «-» к слою **n**) потенциальный барьер уменьшается, и *диод начинает проводить ток (диод открыт). При обратном напряжении потенциальный барьер увеличивается (диод заперт).* Прямой ток через **p-n** переход определяется носителями заряда, неосновными для того слоя, куда они проникают. В процессе движения они сталкиваются с основными носителями данного слоя и рекомбинируют. С увеличением прямого тока падение напряжения на диоде несколько возрастает. При рекомбинации может выделяться энергия в виде излучения. Это явление используется в светодиодах. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода имеет вид, изображённый на рис. 3.2.

Рис. 3.2



В дальнейшем будем считать, что диод открывается при напряжении 0,7 В. В обратном направлении через диод протекает только небольшой ток утечки, обусловленный неосновными носителями. С увеличением обратного напряжения выше предельно допустимого для данного типа диода наступает пробой **p-n** перехода. В диодах различных типов он протекает по-разному: в обычных выпрямительных диодах — необратимое разрушение **p-n** перехода в результате его перегрева, в лавинных — происходит лавинное размножение неосновных носителей, что приводит к резкому уменьшению обратного напряжения на нём и уменьшению нагрева, в стабилитронах — при увеличении обратного тока имеется достаточно протяжённый участок ВАХ, на котором напряжение мало зависит от тока (зенеровский пробой).

### Основные параметры диода

- Постоянное прямое напряжение  $U_{пр}$  — постоянное напряжение на

диоду при заданном прямом токе.

- Постоянный прямой ток  $I_{пр}$  – постоянный ток, протекающий через диод в прямом направлении.

- Постоянный обратный ток  $I_{обр}$  – постоянный ток, протекающий через диод в обратном направлении при заданном обратном напряжении.

- Средний прямой ток  $I_{пр.ср.}$  – прямой ток, усредненный за период.

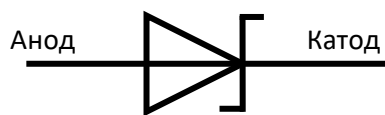
- Средний обратный ток  $I_{обр.ср.}$  – обратный ток, усредненный за период.

- Дифференциальное(динамическое) сопротивление диода  $r_{диф}$  – отношение приращения напряжения на диоде к вызвавшему его малому приращению тока. Динамическое сопротивление играет важную роль и в рассмотрении процессов при обратном включении диода, например, в стабилитронах. Там динамическое сопротивление определяется через приращение обратного тока и обратного напряжения.

- Рабочая частота – частота, при которой обеспечиваются заданные токи, напряжение и мощность.

- Напряжение пробоя  $U_{проб}$  – постоянное обратное напряжение, при котором происходит резкое увеличение обратного тока. Пробои переходов могут быть двух видов: *тепловой пробой* и *электрический пробой*. В свою очередь электрический пробой делится на два типа: лавинный и туннельный. Тепловой пробой является необратимым и возникает при нарушении баланса выделяемой в переходе мощности и мощности, рассеиваемой в окружающую среду. Лавинным пробоем называют явление резкого повышения обратного тока в узком диапазоне прироста обратного напряжения, которое вызвано лавинообразным размножением носителей заряда в результате ударной ионизации атомов в области перехода. Туннельным пробоем называется явление перехода электронов через энергетический барьер, высота которого больше энергии электрона. Лавинный и туннельный пробои, в отличие от теплового, являются обратимыми. Это означает, что они не приводят к повреждению диода и при снижении напряжения его свойства сохраняются.

Основные статические параметры диодов, такие как пороговое напряжение  $U_0$ , прямое падение напряжения  $U_{пр}$ , дифференциальное сопротивление  $r_{диф}$ , обратный ток  $I_{обр}$ , напряжение стабилизации стабилитрона  $U_{ст}$ , можно определить по ВАХ, снятой на постоянном или медленно изменяющемся токе.



на рис. 3.3.

Рис. 3.3

Диод Шоттки - полупроводниковый диод, обладающей односторонней проводимостью, выполненный на основе контакта металл-полупроводник. УГО диода Шоттки представлено

Главная особенность диодов Шоттки - низкий уровень падения прямого напряжения после перехода, отсутствие заряда обратного восстановления. На основе барьера Шоттки изготавливают в частности быстродействующие и ультрабыстрые диоды, они служат главным образом как СВЧ диоды различного назначения.

Диоды являются одними из самых распространённых элементов, применяемых в электронике. Ниже рассмотрены некоторые из областей применения диодов.

- Нелинейная обработка аналоговых сигналов

В связи с тем, что диоды - нелинейные элементы, они применяются в устройствах, где предполагается нелинейная обработка аналоговых сигналов (детекторах, логарифматорах, экстрематорах, преобразователях частоты и). В таких случаях диоды используют или как основные рабочие приборы – для обеспечения прохождения главного сигнала, или же в качестве косвенных элементов, например, в цепях обратной связи.

- Выпрямители - устройства, которые используются для получения постоянного тока из переменного.
- Стабилизаторы -устройства, которые служат для реализации стабильности напряжения на выходе источников питания
- Ограничители - устройства, используемые для того, чтобы ограничивать возможный диапазон колебания различных сигналов.
- Устройства коммутации. Диоды нашли применение и в устройствах коммутации, которые используются для того, чтобы переключать токи или напряжения. Диодные мосты дают возможность размыкать или замыкать цепь, которая служит для передачи сигнала.
- Логические цепи. В логических цепях диоды применяются для того, чтобы обеспечить прохождение тока в нужном направлении (элементы «И», «ИЛИ»). Подобные цепи используются в схемах аналогового и аналогово-цифрового типа. Здесь перечислены только основные



устройства, в которых применяются диоды, но существует и много других, менее распространенных.

### Стабилитроны

Стабилитрон (диод Зенера) – полупроводниковый диод, предназначенный для стабилизации напряжения в источниках питания. Условное обозначение стабилитрона приведено на рис. 3.4.

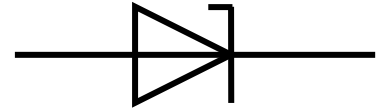


Рис. 3.4

Стабилитрон представляет собой кремниевый диод, характеристика которого в открытом состоянии такая же, как у выпрямительного диода. Отличие стабилитрона заключается в относительно низком напряжении пробоя при обратном напряжении. Когда это напряжение превышено, ток обратного направления возрастает (пробой Зенера). В выпрямительных диодах такой режим является аварийным, а стабилитроны нормально работают при обратном токе, не превышающем максимально допустимого значения.

Материалы, используемые для создания р-п-перехода стабилитронов, имеют высокую концентрацию примесей. Поэтому, при относительно небольших обратных напряжениях в переходе возникает сильное электрическое поле, вызывающее его электрический пробой, в данном случае являющийся обратимым (если не наступает тепловой пробой вследствие слишком большой силы тока).

Типовая статическая ВАХ стабилитрона представлена на рис. 3.5.

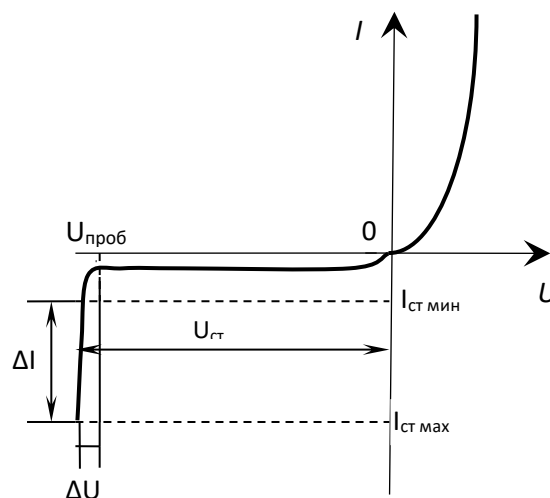


Рис. 3.5

Обратная ветвь характеристики стабилитрона имеет крутой излом,

обусловленный резким ростом тока. Этот излом соответствует напряжению стабилизации  $U_{ст}$ . При достижении напряжения стабилизации обратный ток резко возрастает. Эффект стабилизации основан на том, что большое изменение тока  $\Delta I$  вызывает малое изменение напряжения  $\Delta U$ . Стабилизация тем лучше, чем круче идет эта кривая и, соответственно, чем меньше дифференциальное внутреннее сопротивление.

Диапазон рабочих токов стабилитрона снизу ограничен минимальным током стабилизации  $I_{ст\ мин}$ , определяемым началом пробоя, а сверху – максимальным током стабилизации  $I_{ст\ макс}$ , определяемым допустимой мощностью рассеяния прибора.

### Основные параметры стабилитрона

- Напряжение стабилизации  $U_{ст}$  – напряжение на стабилитроне при заданном токе стабилизации.
- Допускаемый разброс напряжения стабилизации от номинального  $\Delta U_{ст.ном.}$  – максимально допустимое отклонение напряжения стабилизации от номинального для стабилитронов данного типа.
- Дифференциальное сопротивление стабилитрона  $r_{ст}$  – отношение приращения напряжения стабилизации к вызвавшему его малому приращению тока в заданном диапазоне частот.
- Температурный коэффициент напряжения стабилизации  $\alpha_{ст}$  – отношение относительного изменения напряжения стабилизации к абсолютному изменению температуры окружающей среды при постоянном токе стабилизации.
- Полная емкость стабилитрона  $C$  – емкость между выводами стабилитрона при заданном напряжении смещения.

Чтобы избежать перегрузки, последовательно со стабилитроном включают балластный резистор. Величина его вычисляется следующим образом:

$$R_{бал} = (U_{раб} - U_{ст}) / (I_{ст} + I_{нагр}),$$

где  $U_{раб}$  – приложенное рабочее напряжение,

$U_{ст}$  – напряжение стабилизации,

$I_{ст}$  – допустимый ток стабилизации,

$I_{н}$  – ток в резисторе нагрузки  $R_{н}$ , включенном параллельно стабилитрону

Таким образом, полупроводниковый стабилитрон – кремниевый диод, работающий при обратном напряжении в режиме электрического пробоя.

## Светодиоды

В случаях, когда полупроводниковые диоды выполнены из таких материалов как арсенид галлия или фосфид галлия, часть подводимой к ним электрической энергии преобразуется не в тепло, как в других полупроводниках, а в световые потоки с намного более короткой длиной волны. Цвет излучения определяется выбором соответствующего материала и присадками. Цвет может быть инфракрасным, красным, желтым, оранжевым, зеленым или голубым.

Таким образом, светодиод или светоизлучающий диод (LED - light emitting diodes) - полупроводниковый прибор, который при определенных условиях начинает светиться. УГО светодиода приведено на рис. 3.6.

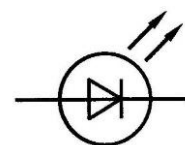


Рис. 3.6

ВАХ красного, желтого и зеленого светодиодов приведены на рис. 3.7

Основные области применения светодиодов: системы отображения информации и передачи данных, а также осветительные приборы.

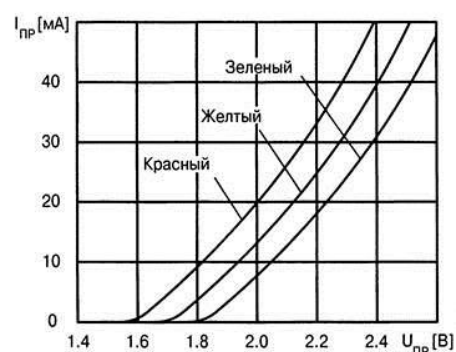


Рис. 3.6

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь (Рис. 3.8.) для снятия прямой ветви вольтамперной характеристики диодов  $R=330 \text{ Ом}$ .
- **Обратите внимание, вольтметр этой схеме подключён к точке «В» (после амперметра) и на его показания не влияет падение напряжения на амперметре, которое соизмеримо с прямым падением напряжения на диоде. В то же время ток через вольтметр несоизмеримо мал с прямым током диода и не вносит заметной погрешности в показания амперметра.**

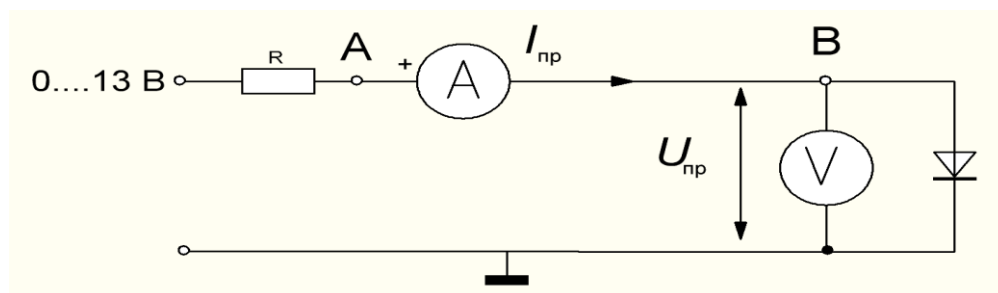


Рис. 3.8

- Устанавливая токи, указанные в таблице 3.2, снимите прямую ветвь вольтамперной характеристики сначала выпрямительного диода (КД226), затем для диода Шоттки(1N5819) и стабилитрона (КС456).

Таблица 3.2

I, mA		2	5	10	20	30	35
U, V	КД226						
	1N5819						
	КС456						

- Измените схему для снятия обратной ветви вольтамперных характеристик, переключив вольтметр в точку А (до амперметра) и перевернув диод (Рис. 3.9).

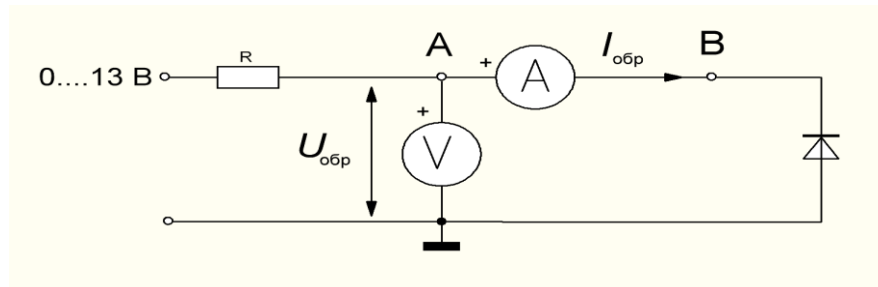


Рис. 3.9

- В этой схеме через амперметр не протекает ток вольтметра, который теперь соизмерим и даже больше обратного тока через диод. В то же время падение напряжения на амперметре ничтожно мало по сравнению с обратным напряжением на диоде.
- Устанавливая напряжения U, указанные в таблице 3.3, снимите обратные ветви вольтамперных характеристик.

Таблица 3.3

U, V		2	5	10	13	15
КД226	U <sub>обр</sub> , V					
	I, mA					
1N5819	U <sub>обр</sub> , V					
	I, mA					
КС456	U <sub>обр</sub> , V					
	I, mA					

- Убедитесь, что обратный ток выпрямительного диода невозможно измерить приборами, имеющимися в стенде.

- В отчете на *одном графике* приведите ВАХ выпрямительного диода, диода Шоттки и стабилитрона.
- Соберите цепь согласно схеме (Рис. 3.10) и изменяйте входное напряжение последовательными шагами, как указано в таблице 3.4. Измерьте прямое напряжение  $U_{сд}$  и ток  $I_{сд}$  светодиода с помощью мультиметра и оцените визуально светоизлучение (отсутствует, слабое, среднее, сильное). Занесите данные в таблицу.
- В отчете постройте график вольтамперной характеристики светодиода, снятую на постоянном токе.

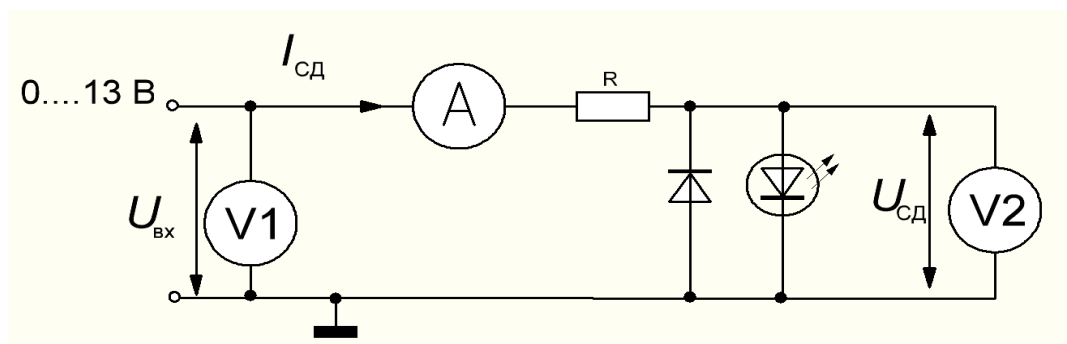


Рис. 3.10

Таблица 3.4

$U_{вх}$ , В	$U_{сд}$ , В	$I_{сд}$ , мА	светоизлучение
2			
4			
6			
8			
10			
12			
14			
15			

➤ **Основные понятия:** полупроводник, диод, пробой, выпрямительный диод, диод Шоттки, стабилитрон, светодиод

Вопросы для допуска к выполнению и защиты лабораторной работы

1. Нарисуйте УГО и ВАХ элементов, исследуемых в лабораторной работе.
2. Перечислите основные параметры выпрямительных диодов и стабилитронов.

3. Что такое пробой диода и какого типа они могут быть?
4. Для чего применяются выпрямительные диоды и диоды Шоттки?
5. В чем заключается особенность использования стабилитронов?
6. Для чего применяются светодиоды?
7. От чего зависит напряжение, при котором открывается светодиод?
8. Почему у диода Шоттки пороговое напряжение меньше, чем у выпрямительного диода, а обратный ток больше?

### **3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ»**

*Цель работы* – изучение областей применения полупроводниковых диодов.

*Задачи:*

- Определить напряжение стабилизации  $U_{СТ}$  стабилитрона. Исследовать зависимость выходного напряжения и тока стабилитрона от входного напряжения в цепи параметрического стабилизатора напряжения.
- Изучить работу последовательного амплитудного ограничителя.
- Изучить работу параллельного амплитудного ограничителя.

#### **Основные теоретические положения**

Диоды являются одними из самых распространенных электронных компонентов. Они присутствуют практически во всех электронных приборах, которые мы ежедневно используем – от мобильного телефона до его зарядного устройства.

#### ***Нелинейная обработка аналоговых сигналов***

В связи с тем, что диоды относятся к элементам нелинейного типа, они применяются в детекторах, преобразователях частоты и в других устройствах, в которых предполагается нелинейная обработка аналоговых сигналов. В таких случаях диоды используют или как основные рабочие приборы – для обеспечения прохождения главного сигнала, или же в качестве косвенных элементов, например, в цепях обратной связи. Указанные выше устройства значительно отличаются между собой и используются для разных целей, но применяемые диоды в каждом из них занимают очень важное место.

#### ***Выпрямители***

Устройства, которые используются для получения постоянного тока из

переменного называются выпрямителями. В большинстве случаев они включают в себя три главных элемента – это силовой трансформатор, непосредственно выпрямитель (вентиль) и фильтр для сглаживания. Диоды применяют в качестве вентилях, так как по своим свойствам они отлично подходят для этих целей.

### ***Стабилизаторы***

Устройства, которые служат для реализации стабильности напряжения на выходе источников питания, называются стабилизаторами. Они бывают разных видов, но каждый из них предполагает применение диодов. Эти элементы могут использоваться либо в цепях, отвечающих за опорные напряжения, либо в цепях, которые служат для коммутации накопительной индуктивности.

### ***Ограничители***

Ограничители – это специальные устройства, используемые для того, чтобы ограничивать возможный диапазон колебания различных сигналов. В цепях такого типа широко применяются диоды, которые имеют прекрасные ограничительные свойства. В сложных устройствах могут использоваться и другие элементы, но большинство ограничителей базируются на самых обычных диодных узлах стандартного типа.

### ***Устройства коммутации***

Диоды нашли применение и в устройствах коммутации, которые используются для того, чтобы переключать токи или напряжения. Диодные мосты дают возможность размыкать или замыкать цепь, которая служит для передачи сигнала. В работе применяется некоторое управляющее напряжение, под воздействием которого и происходит замыкание или размыкание. Иногда управляющим может быть сам входной сигнал, такое бывает в самых простых устройствах.

### ***Логические цепи***

В логических цепях диоды применяются для того, чтобы обеспечить прохождение тока в нужном направлении (элементы «И», «ИЛИ»). Подобные цепи используются в схемах аналогового и аналогово-цифрового типа. Здесь перечислены только основные устройства, в которых применяются диоды, но существует и много других, менее распространенных.

## **Порядок выполнения эксперимента**

### **1. Параметрический стабилизатор**

- Соберите цепь параметрического стабилизатора,  $R=100$  Ом, согласно принципиальной схеме (Рис. 4.1) сначала **не включая** в неё сопротивление нагрузки.

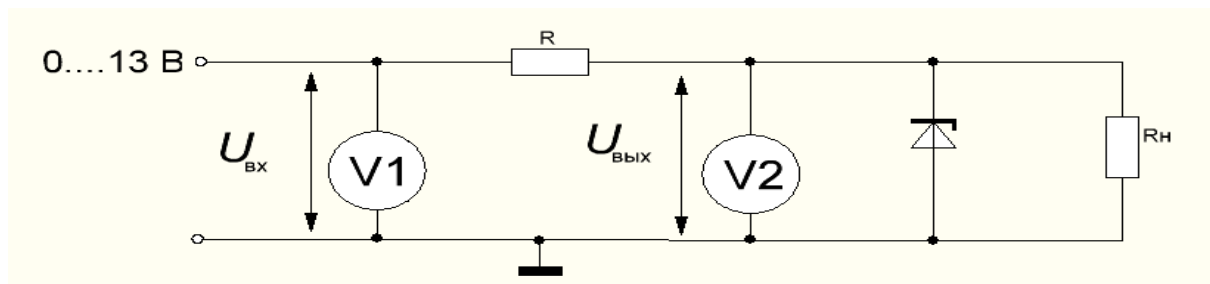


Рис. 4.1

- Включите генератор напряжений и, изменяя постоянное напряжение на входе стабилизатора от 0 до максимального значения 13...14 В, снимите зависимость выходного напряжения от входного на холостом ходу (XX) и при различных сопротивлениях нагрузки  $R_{н1}=33$  Ом;  $R_{н2}=100$  Ом;  $R_{н3}=150$  Ом. Результаты записывайте в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

$U_{вх}, В$	0	2	4	6	8	10	12	
$U_{выххх}, В$								
$U_{вых1}, В$								
$U_{вых2}, В$								
$U_{вых3}, В$								

- Измените схему согласно рисунку 4.2.
- Установите максимальное напряжение на входе (крайнее правое положение) и, включая различные сопротивления нагрузки, согласно таблице 4.2, снимите зависимость выходного напряжения стабилизатора от тока нагрузки.

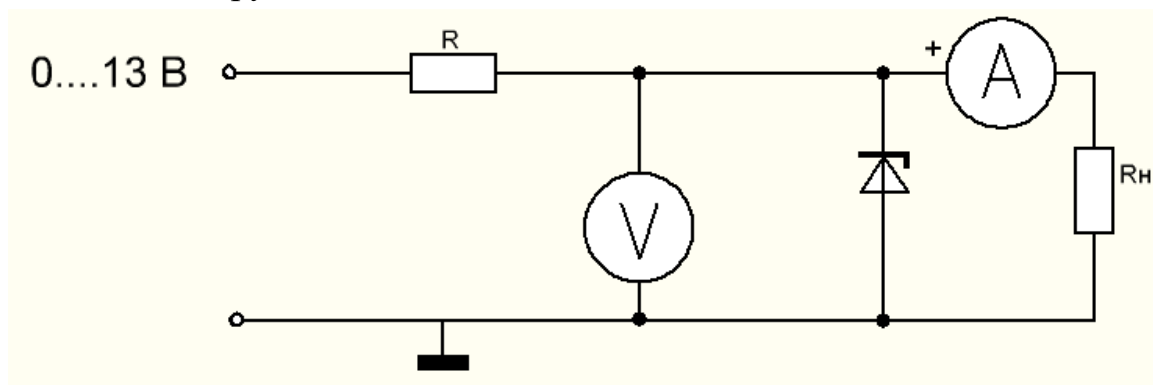


Рис. 4.2

Таблица 4.2



$R_H$ Ом	$\infty$	150	100	47+22	47+10	47	33+10	33
$I_H$ , мА	0 (х.х.)							
$U_{ВЫХ}$ , В								

- В отчете постройте графики  $U_{ВЫХ}(U_{ВХ})$  и  $U_{ВЫХ}(I_H)$ .

### ***Исследование характеристик диодов на переменном токе***

- Для исследования характеристик диодов на переменном токе соберите на наборном поле цепь параллельного диодного ограничителя по минимуму согласно принципиальной схеме Рис. 4.3. Измерительные приборы в схему не включайте, так как они могут создать дополнительные паразитные ёмкости.

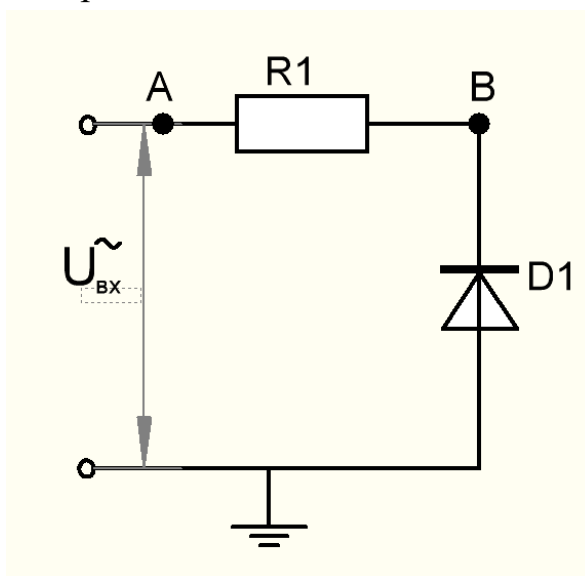
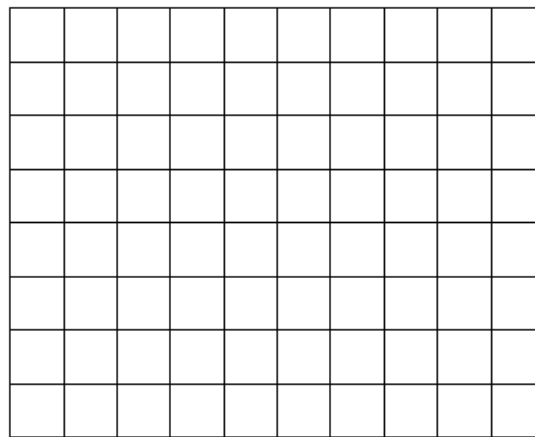


Рис. 4.3

- Включите в цепь выпрямительный диод, подайте на вход синусоидальное напряжение частотой 1 кГц, установите ручку регулятора амплитуды примерно в среднее положение (4...6 В).  $R_I = 330$  Ом. В данной лабораторной работе используется выпрямительный диод КД226. Первый канал осциллографа подключается в точку А, второй канал в точку В. Значения входного напряжения, частоты и номинал резистора оставьте такими же.
- Перерисуйте осциллограмму на Рис. 4.4 и укажите коэффициент отклонения и коэффициент развертки.



Масштабы

По каналу I:  
 $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

По каналу II:  
 $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

По времени:  
 $m_t = \dots\dots\dots \text{мс/дел.}$

Рис. 4.4

- Для того чтобы получить схему параллельного диодного ограничителя по максимуму нужно изменить схему согласно рисунку 4.5. Перерисуйте полученную осциллограмму.

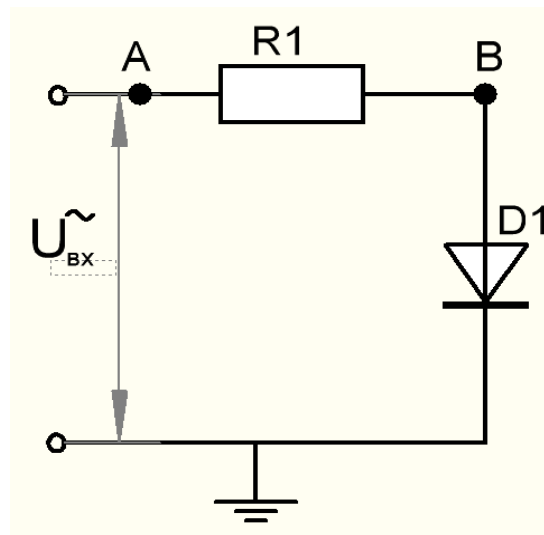


Рис. 4.5

- Поменяйте местами резистор  $R_1$  и диод  $D_1$  согласно рисунку 4.6, такая схема называется последовательный диодный ограничитель по максимуму. Перерисуйте полученную осциллограмму.

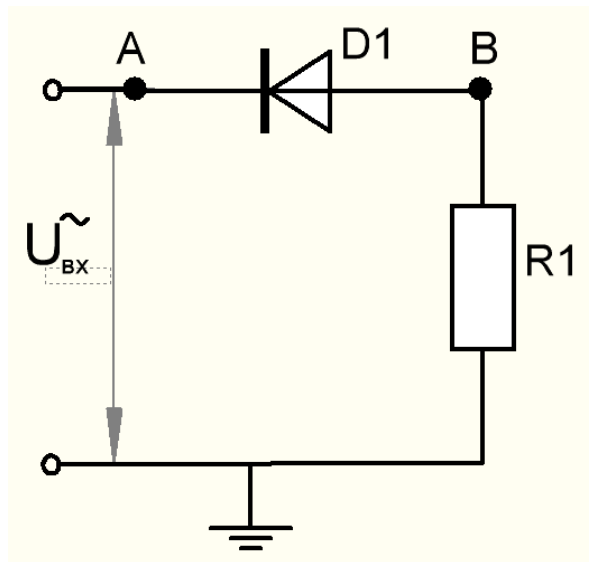


Рис. 4.6

- Для получения схемы последовательного диодного ограничителя по минимуму диод  $D_1$  необходимо подключить в прямом направлении. Перерисуйте полученную осциллограмму.

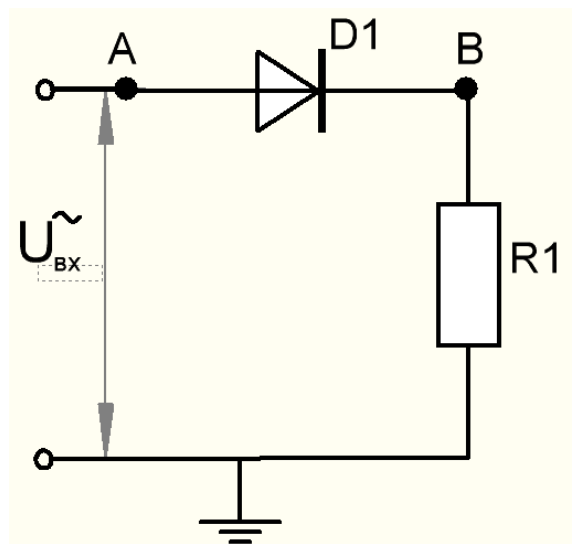


Рис. 4.7

- Для ограничения сигналов сверху и снизу используются двухсторонние ограничители, которые чаще всего состоят из двух односторонних ограничителей. Перерисуйте полученную осциллограмму.

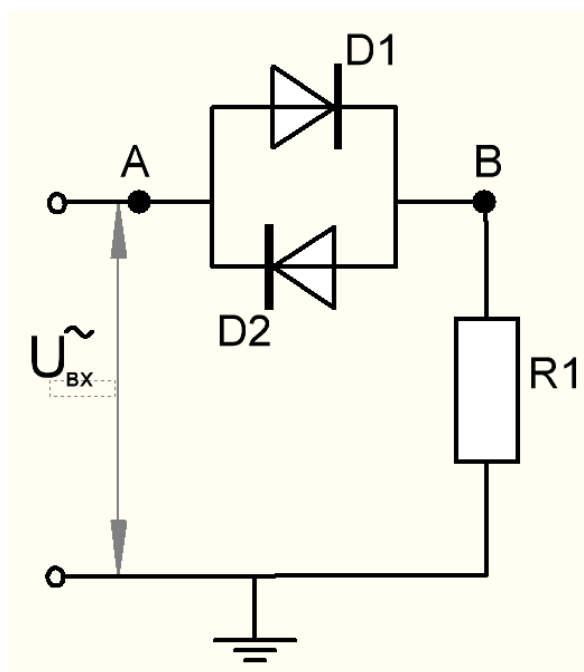


Рис. 4.8

- Соберите схему двухстороннего ограничителя параллельного типа, который представляют собой последовательно соединенные параллельные ограничители по минимуму и по максимуму. Перерисуйте полученную осциллограмму.

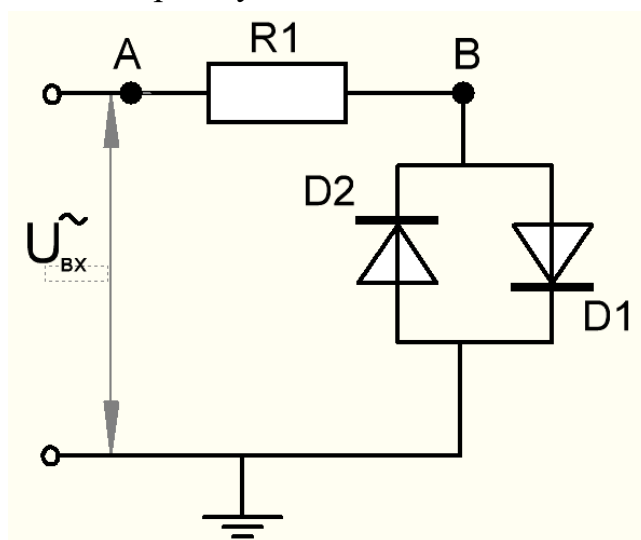


Рис. 4.9

- **Основные понятия: выпрямители, стабилизаторы, ограничители, коммутаторы, логические цепи.**

**Вопросы для допуска к выполнению и защиты лабораторной работы:**

1. Назовите схемы, в которых используются различные диоды.
2. Изобразите схему параметрического стабилизатора.

3. Изобразите схемы различных ограничителей.
4. Каковы отличия в режимах передачи сигналов со входа на выход в схемах последовательных и параллельных диодных ограничителей.

#### 4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 «ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДА С ПЕРЕМЕННОЙ ЁМКОСТЬЮ (ВАРИКАПА)»

*Цель работы* – исследовать работу диода с переменной ёмкостью(варикапа)

*Задачи:*

- Ознакомиться с принципами функционирования варикапа
- Снять с помощью осциллографа вольтамперную характеристику варикапа
- В параллельном резонансном контуре изучить зависимость резонансной частоты от обратного напряжения варикапа и влияние этого напряжения на емкость обедненного (запирающего) слоя.

##### Основные теоретические положения

Варикап — полупроводниковый диод, работа которого основана на зависимости барьерной ёмкости р-п-перехода от обратного напряжения. Р-п-переход запертого кремниевого диода подобен диэлектрику конденсатора. Приложенное обратное напряжение влияет на толщину р-п перехода, и соответственно на емкость запирающего слоя. Условное графическое обозначение (УГО) диода на схемах приведено на рис. 5.1.



Рис. 5.1

Вольт-фарадная характеристика варикапа имеет вид, изображенный на рис. 5.2.

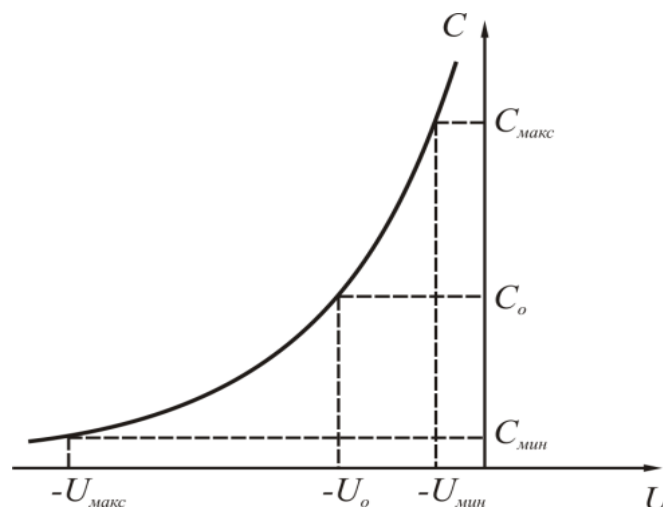


Рис. 5.2

Кроме параметров, характеризующих работу любого диода, варикапы характеризуются следующими **основными параметрами**:

- $C_{\max}$  — максимальная емкость варикапа при заданном минимальном напряжении смещения;
- $C_{\min}$  — минимальная емкость варикапа при максимальном напряжении смещения;
- $C_{\text{ном}}$  — номинальная емкость варикапа при номинальном напряжении смещения
- $Q_{\text{ном}}$  — номинальная добротность варикапа при номинальном напряжении смещения;
- $K$  — показатель степени в зависимости емкости от напряжения;
- $k_c$  — коэффициент перекрытия — отношение максимальной емкости к минимальной;
- ТКЕ и ТКД — температурные коэффициенты  $C$  и  $Q$ , т. е. относительное изменение емкости или добротности при заданном напряжении смещения при изменении температуры окружающей среды на  $1^\circ\text{C}$  в заданном интервале температур.

Для измерения емкости запорного слоя в данной работе используется резонансный метод в параллельном резонансном контуре. В работе нужно учесть также собственную емкость катушки индуктивности, которая соизмерима с емкостью варикапа. Она определяется по собственной резонансной частоте катушки индуктивности и, затем, вычитается из общей резонансной емкости.

Варикапы **применяются** в качестве элементов с электрически управляемой ёмкостью в схемах перестройки частоты колебательного контура в частотно-избирательных цепях, деления и умножения частоты, частотной модуляции, управляемых фазовращателей и др.

### **Порядок выполнения эксперимента**

- Соберите цепь согласно принципиальной схеме (Рис. 5.3) для снятия осциллограммы с варикапа  $R = 10\text{кОм}$ . На вход подайте переменное напряжение частотой порядка 50- 60 Гц. Первый канал подключите на вход, второй на выход.

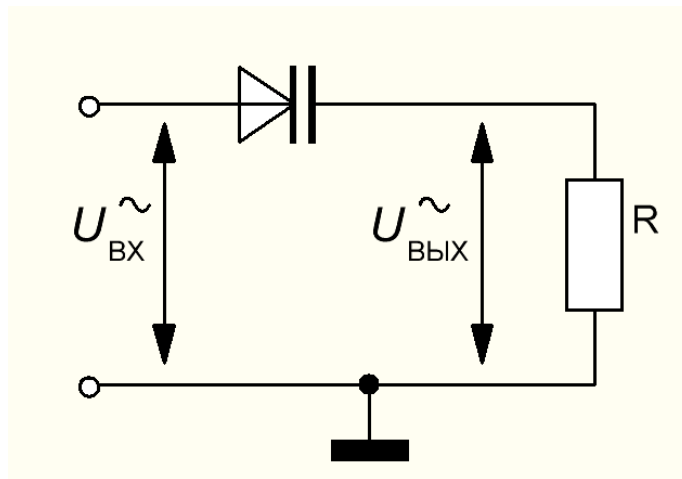


Рис. 5.3

- Перерисуйте осциллограмму на график (Рис. 5.4)

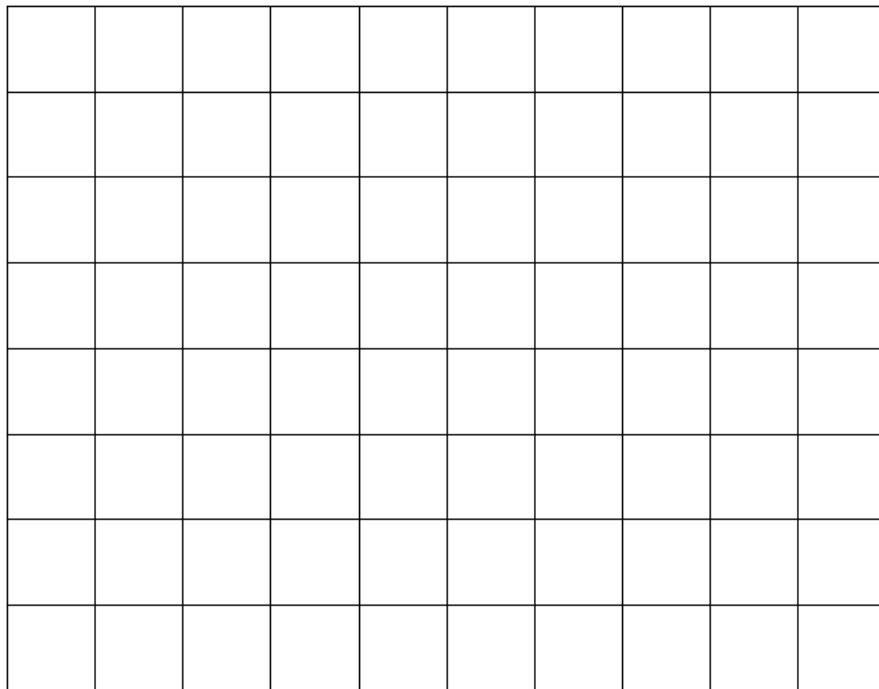


Рис. 5.4

- Соберите цепь параллельного резонансного контура согласно принципиальной схеме (Рис. 5.5). Конденсатор  $C = 0,22 \text{ мкФ}$  служит для исключения пути протекания постоянного тока через катушку и ввиду большой емкости не влияет на параметры резонансного контура.

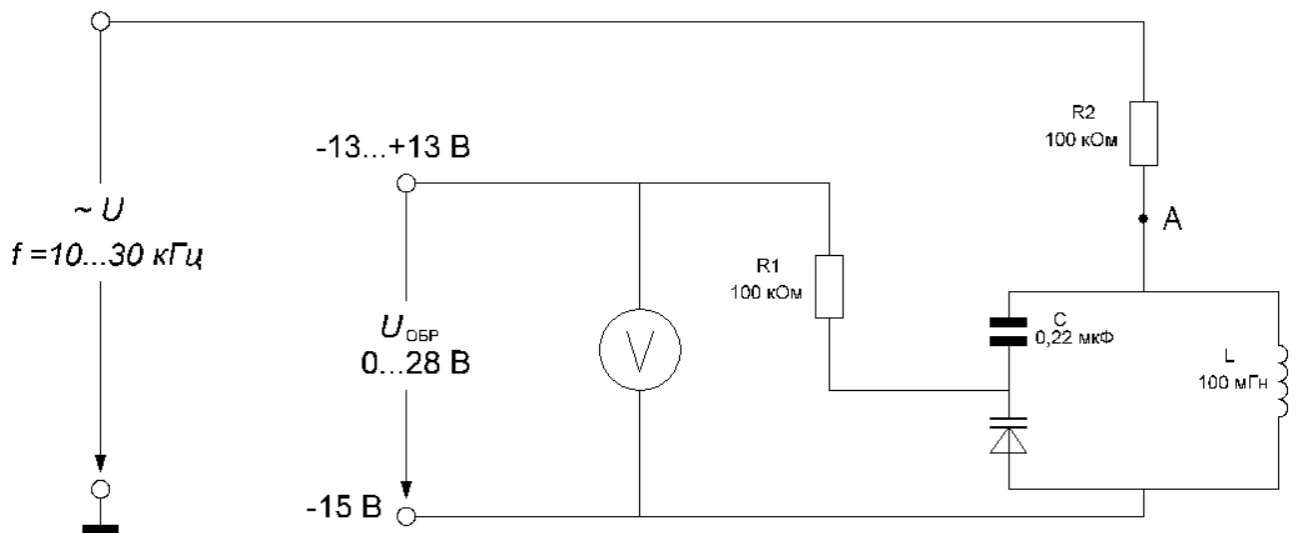


Рис. 5.5

- Установите частоту напряжения генератора синусоидальной формы между 10 и 20 кГц и максимальную амплитуду. Включите и настройте осциллограф, который служит в данном опыте для измерения напряжения высокой частоты (А).
- Изменяйте обратное постоянное напряжение варикапа согласно таблице 5.1 и находите значения резонансной частоты  $f_{\text{РЕЗ}}$  для каждого значения обратного напряжения, увеличивая или уменьшая частоту подаваемого напряжения. Резонансная частота определяется по максимальной амплитуде напряжения между концами параллельной цепочки. Если синусоида сильно искажена, то уменьшите её амплитуду. Занесите результаты измерений в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

$U_{\text{ОБР}}, \text{В}$	$f_{\text{РЕЗ}}, \text{кГц}$	$L, \text{мГн}$	$C, \text{пФ}$	$C_{\text{ВАР}}, \text{пФ}$
2		100		
5		100		
10		100		
15		100		
20		100		



25		100		
28		100		

- В отчете постройте график изменения резонансной частоты от обратного напряжения варикапа.
- Вычислите общую емкость резонансной цепи по измеренным резонансным частотам и индуктивности по формуле:

$$C = \frac{1}{(2\pi f_{\text{РЕЗ}})^2 L}$$

где  $C$  – общая емкость цепи,  $L$  – индуктивность катушки,  $f_{\text{РЕЗ}}$  – резонансная частота.

- Определите собственную емкость катушки. Для этого уберите из цепи диод и конденсатор и снова подберите, и измерьте резонансную частоту  $f_{\text{РЕЗ1}}$ . Собственную емкость катушки определите по такой же формуле:

$$C_{\text{КАТ}} = \frac{1}{(2\pi f_{\text{РЕЗ1}})^2 L}$$

- Определите емкость варикапа, как разность общей емкости при каждом значении обратного напряжения и неизменной собственной емкости катушки:

$$C_{\text{ВАР}} = C - C_{\text{КАТ}}$$

- Занесите значения емкости варикапа в таблицу 5.1. Затем постройте зависимость его емкости  $C_{\text{ВАР}}$  от обратного напряжения  $U_{\text{ОБР}}$  на графике (Рис. 5.6).

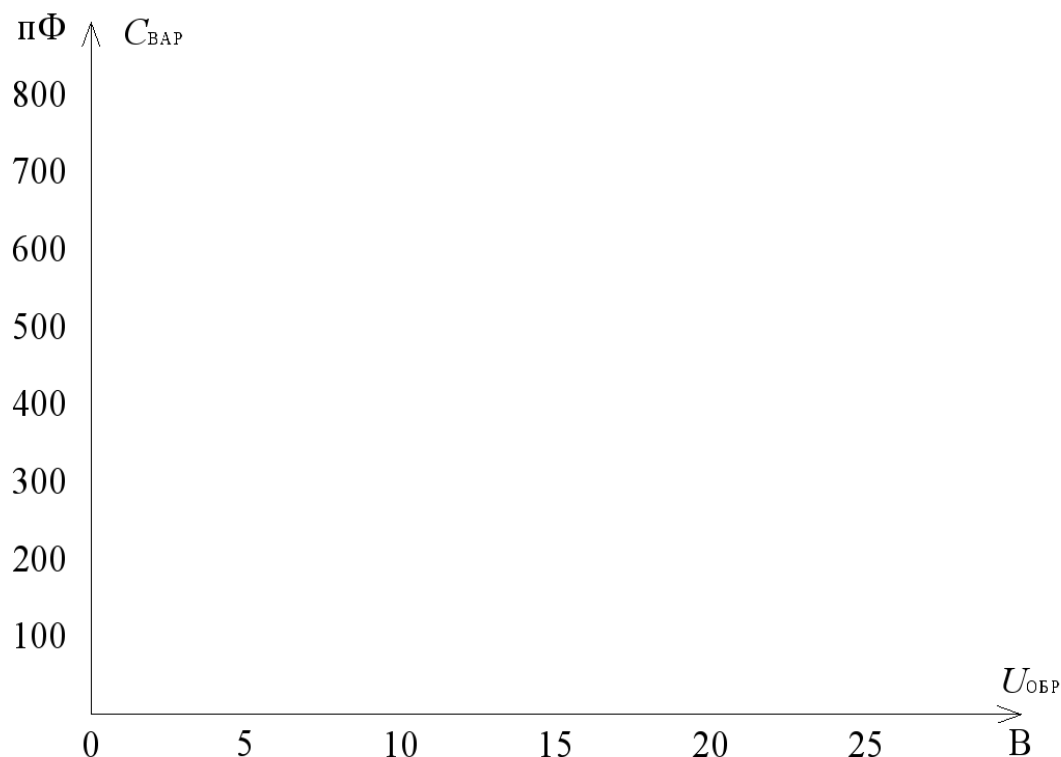


Рис. 5.6

➤ **Основные понятия:** варикап, управляемая емкость, собственная емкость,

**Вопросы для допуска к выполнению и защиты лабораторной работы:**

1. Нарисуйте УГО и ВАХ элементов, исследуемых в лабораторной работе.
2. Перечислите основные параметры варикапов.
3. Как обратное напряжение влияет на емкость запирающего слоя варикапа?
4. Для чего применяются варикапы?

## 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ - АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРОВ»

*Цель работы* - изучение основных характеристик, процессов работы и областей применения тиристоров.

*Задачи:*

- Снять вольтамперные характеристики динистора (типа КН102А), тринистора (типа ВТ149) и симистора (типа МАС97А6).
- Убедиться, что тиристор остаётся во включенном состоянии и после снятия управляющего тока, и выключается только при снижении тока через него ниже тока удержания.

- Определить напряжение включения динистора ( $U_{\text{вкл}}$ ), токи удержания и открытия управляющего электрода ( $I_{\text{отк}}$  и  $I_{\text{отк.у}}$ ) для тринистора и симистора. Для последнего определить параметры в прямом и обратном направлениях.
- По полученным данным построить графики ВАХ для динистора, тринистора и симистора.

### Основные теоретические положения

Тиристоры – переключающие полупроводниковые приборы, имеющие четырёхслойную структуру. Они имеют два устойчивых состояния: открытое (проводящее) и закрытое (непроводящее). Они выпускаются с двумя или тремя выводами. В первом случае они называются динисторами (или диодными тиристорами), во втором – тринисторами (триодными или управляемыми тиристорами). Их условные обозначения показаны на рис. 5.1. Выводы обозначаются:  $A$  – анод,  $K$  – катод,  $УЭ$  – управляющий электрод. Производятся также симметричные динисторы и тиристоры (симисторы), которые могут проводить ток в обоих направлениях и эквивалентны двум динисторам или тиристорам, соединённым встречно - параллельно.

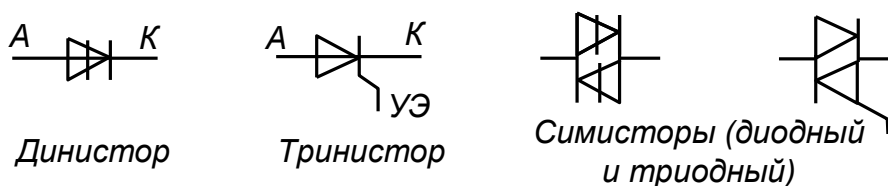


Рис. 6.1

Четырёхслойная структура динистора представлена на рис. 6.2 а. Для уяснения принципа действия четырёхслойный прибор можно представить, как два трёхслойных прибора, как показано на рис. 6.2 б, или как два транзистора, эквивалентная схема соединения которых показана на рис. 6.3 в. Вольт – амперная характеристика тиристора представлена на рис. 6.2 г.

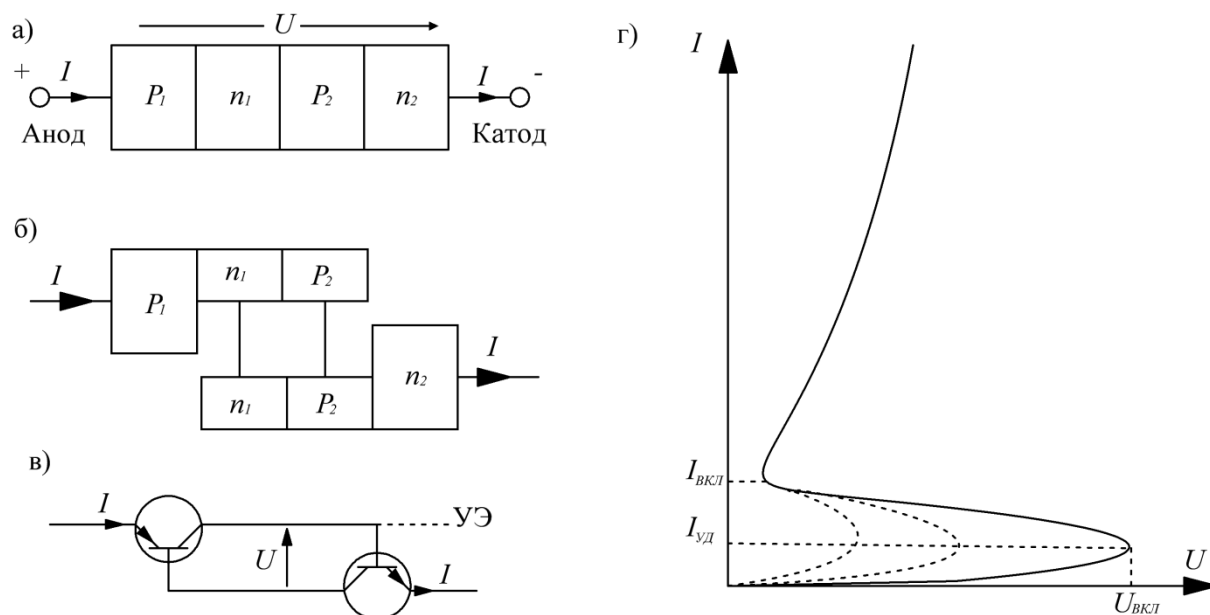


Рис. 6.2

При прямом приложенном напряжении, показанном на рисунках, левый и правый  $p - n$  переходы открыты, а средний закрыт. Через тиристор протекает лишь незначительный ток неосновных носителей (см. рис. 6.2 г). По мере увеличения прямого напряжения энергия носителей заряда, проходящих через запертый  $n_1 - p_2$  увеличивается и при некотором напряжении ( $U_{\text{вкл}}$ ) возникает ударная ионизация атомов полупроводника в зоне  $n_1 - p_2$  перехода, ток резко возрастает, два транзистора (рис. 6.2. в) открываются, напряжение на тиристоре резко падает, и он переходит в открытое состояние. Вольт - амперная характеристика открытого тиристора аналогична вольт - амперной характеристике диода. При снижении тока тиристор остаётся в открытом состоянии до некоторого небольшого тока (см. рис. 6.2. г), называемого током удержания ( $I_{\text{уд}}$ ). Он несколько меньше тока включения, показанного на рис. 6.2. г.

Управляемые тиристоры имеют кроме основных выводов «Анод» и «Катод» третий вывод «Управляющий электрод». Он показан на рис. 6.2. в пунктиром. Подавая на него импульс тока положительной полярности, мы принудительно открываем один из транзисторов, второй транзистор также открывается, так как через его базу начинает протекать ток коллектора другого транзистора. Напряжение включения уменьшается, как показано на рис. 5.2. г пунктиром. При токе управления, превышающем открывающий ток управления ( $I_{\text{откр.у}}$ ) вольт - амперная характеристика тиристора полностью аналогична характеристике диода.

Важно, что управляемый тиристор остаётся во включенном состоянии и после снятия управляющего тока. Он выключается только при снижении тока через него ниже тока удержания. Причём, для того чтобы тиристор не включился самопроизвольно при следующей подаче на него прямого напряжения, он должен находиться в выключенном состоянии определённое время, называемое временем восстановления запирающих свойств. Кроме того, скорость нарастания анодного напряжения не должна превышать для данного типа тириستоров допустимую величину.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь для снятия вольт - амперной характеристики динистора согласно схеме (рис. 6.3).

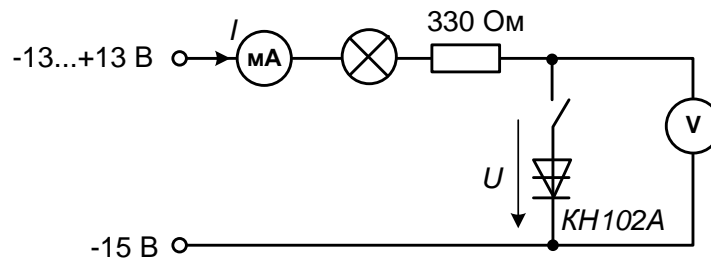


Рис. 6.3

- Для определения напряжения включения установите регулятором напряжения какое-нибудь напряжение, например, 5 В. Включая и выключая динистор тумблером, определите по показаниям амперметра и вольтметра, включается динистор или нет. Если динистор выключен (очень маленький ток и большое напряжение), то медленно увеличивая напряжение, добейтесь его включения. Так как при включении динистора напряжение на нём резко падает, а ток возрастает, то для получения напряжения включения ( $U_{\text{вкл}}$ ) процедуру необходимо провести несколько раз (отключая цепь тумблером) с максимальным приближением подаваемого напряжения к  $U_{\text{вкл}}$  динистора до его спада в момент открытия. Запишите значение  $U_{\text{вкл}}$  в табл. 6.1.
- Приведите динистор во включенное состояние и, уменьшая напряжение регулируемого источника, поочередно устанавливайте значения тока, указанные в табл. 5.1. и записывайте соответствующие напряжения на динисторе.
- На рис. 6.4. постройте кривую зависимости тока от напряжения (вольт - амперную характеристику).

Таблица 6.1 – Экспериментальные данные

	$I$ , мА	5	10	20	30	40
Динистор $U_{\text{вкл}} = \dots\dots\dots \text{В})$	$U$ , В					
Тринистор ( $I_{\text{уд}} = \dots\dots\dots \text{мА},$ $I_{\text{откр.у}} = \dots\dots\dots \text{мА})$	$U$ , В					
Симистор при $+U$ ( $I_{\text{уд}} = \dots\dots\dots \text{мА}, I_{\text{откр.у}} = + \dots\dots\dots \text{мА},$ $- \dots\dots\dots \text{мА})$	$U$ , В					
Симистор при $-U$ ( $I_{\text{уд}} = \dots\dots\dots \text{мА}, I_{\text{откр.у}} = + \dots\dots\dots \text{мА},$ $- \dots\dots\dots \text{мА})$	$U$ , В					

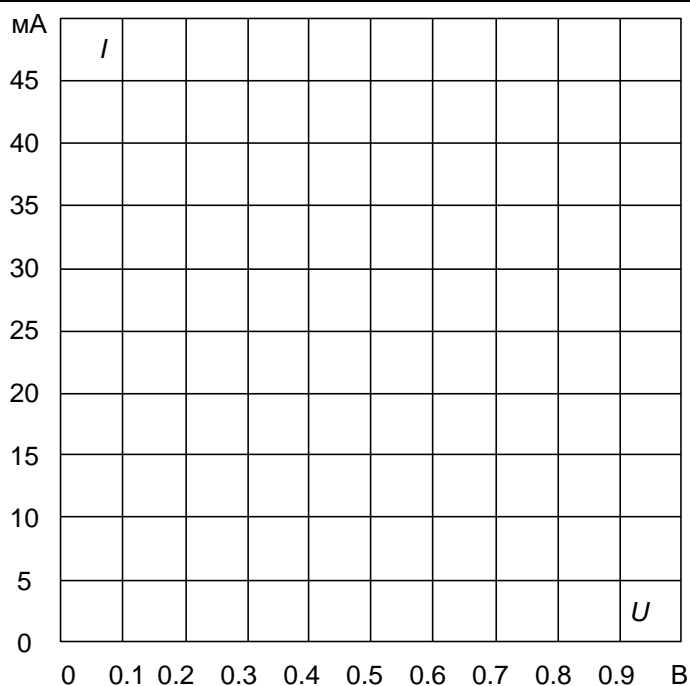


Рис. 6.4

- Соберите цепь (рис. 6.5.) для исследования характеристик управляемых тиристоров. Сначала установите лишь амперметры. Ручку потенциометра (10 кОм) поверните вправо до упора (ток управления равен нулю).

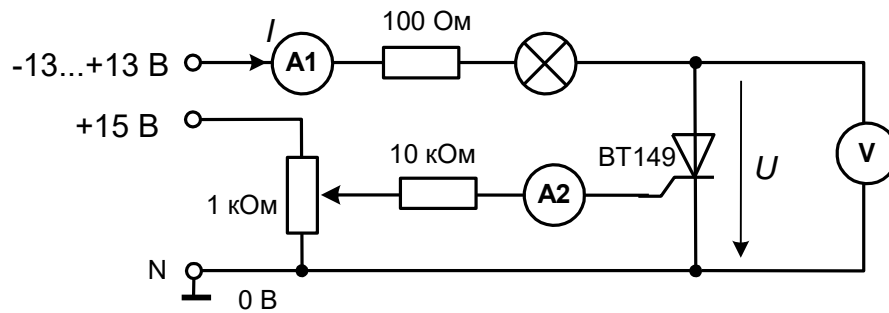


Рис. 6.5

- Включите питание и, вращая ручку регулятора постоянного напряжения влево и вправо до упора, убедитесь, что тиристор закрыт, как при прямом, так и при обратном приложенном напряжении.
- Оставьте ручку регулятора постоянного напряжения в крайнем правом положении, и потенциометром увеличивайте ток управления (уменьшайте сопротивление потенциометра в цепи управляющего электрода) до тех пор, пока не включится лампочка, что свидетельствует о переходе тиристора в открытое состояние. Зафиксируйте ток открытия управляющего электрода ( $I_{отк.у}$ ) и запишите его значение в табл. 6.1. Верните ручку потенциометра в правое крайнее положение и убедитесь, что и при отсутствии тока управления тиристор остаётся включённым.
- Выключите тиристор кратковременным разрыванием анодной цепи (или тумблером) или снижением приложенного напряжения до любого отрицательного значения.
- Снова включите тиристор при максимальном приложенном напряжении, ток управления сделайте равным нулю и, уменьшая приложенное напряжение снимите вольтамперную характеристику (табл. 6.1.) и постройте её график (рис. 6.4.). Амперметр (A1) можно убрать из цепи и включить в цепь вольтметр (V).
- Снова включив тиристор, и установив ток управления равным нулю. Установите диапазон на амперметре (A1) 20m и не меняйте его при измерении тока удержания. Плавно уменьшая напряжение регулируемого источника напряжения, определите ток удержания тиристора. Запишите значение  $I_{уд}$  также в табл. 6.1.

Помните, что при малых значениях тока лампочка может не загореться, либо этого можно не видеть. Поэтому ориентируйтесь только на показания приборов.

- Верните в цепь A1

- Замените тиристор симистором МАС97А6, сопротивление в цепи управления 10 кОм на 1 кОм и проделайте аналогичные опыты по определению  $I_{отк.у}$ , при двух напряжениях питания: +13 В (ручка регулятора в правом крайнем положении) и – 13 В (ручка регулятора в левом крайнем положении). В каждом из этих случаев симистор может открываться как положительным током управления, так и отрицательным. Для получения отрицательного тока управления переключите питание потенциометра с гнезда +15 В на гнездо –15 В.

- Снимите вольт - амперные характеристики при положительном и отрицательном анодном напряжениях, определите токи удержания. Результаты запишите в табл. 6.1. и постройте графики на рис. 6.4.

➤ **Основные понятия: тиристор, динистор, симистор, ВАХ и УГО тиристоров, управляющий электрод, токи удержания и открытия тиристора, напряжение включения тиристора, ток открытия управляющего электрода**

#### **Вопросы для допуска к выполнению и защиты лабораторной работы**

1. Нарисуйте УГО и ВАХ элементов, исследуемых в лабораторной работе.
2. Перечислите основные параметры тиристоров.
3. Нарисуйте эквивалентную схему тиристора и структуру.
4. В чем разница между динисторами, тринисторами и симисторами?
5. Что такое ток открытия и ток удержания тиристора?
6. Для чего и где применяются тиристоры?
7. Для чего нужен управляющий электрод?
8. Что такое время восстановления запирающих свойств?
9. В чем особенность включенного тиристора?
10. Как изменяется вольтамперная характеристика тиристора при подаче тока управления на управляющий электрод?

### **6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «СНЯТИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ»**

*Цель работы* – ознакомление с принципами работы биполярного транзистора и изучение семейств характеристик биполярного транзистора

*Задачи:*



- Снять экспериментально и построить графики четырех семейств характеристик биполярного транзистора **n-p-n** типа для схемы с общим эмиттером (см. л.р.№3).

### Основные теоретические положения

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор с двумя p-n переходами. Транзистор был создан американскими учеными Дж. Бардином, У. Браттейном и У. Шокли в 1947 году. Это событие имело большое значение для развития электроники, поскольку транзисторы могут работать при значительно меньших напряжениях, чем ламповые триоды. **Кроме того, транзисторы можно использовать не только для усиления сигналов, но и в качестве ключевых элементов.** Определение «биполярный» указывает на то, что работа транзистора связана с процессами, в которых принимают участие носители заряда, как электроны, так и дырки.

Структура биполярного транзистора изображена на рис. 7.1. Он представляет собой полупроводник, в котором созданы три области с чередующимися типами электропроводности. На границах этих областей возникают электронно-дырочные переходы. Среднюю область транзистора, расположенную между электронно-дырочными переходами, называют **базой** (Б). Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей заряда в базу, называют **эмиттером** (Э), а p-n-переход между базой и эмиттером – **эмиттерным**. Область транзистора, основным назначением которой является собирание носителей заряда из базы, называют **коллектором** (К), а p-n-переход между базой и коллектором – **коллекторным**. В зависимости от типа электропроводности крайних слоев (эмиттера и коллектора) различают транзисторы *p-n-p* и *n-p-n* типа. В обоих типах транзисторов физические процессы аналогичны, они различаются только типом инжектируемых и экстрагируемых носителей и имеют одинаково широкое применение.

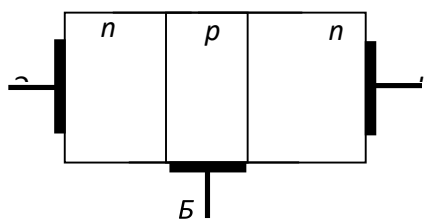


Рис. 7.1

На рис. 7.2 представлены УГО биполярных транзисторов *p-n-p* и *n-p-n*

типа.

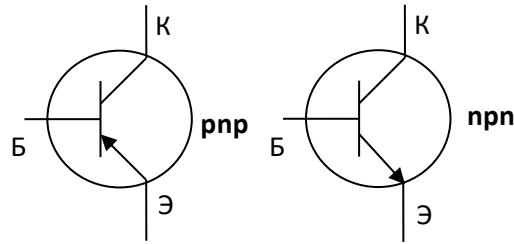


Рис. 7.2

Свойства транзисторов описываются следующими четырьмя семействами характеристик.

**Входная характеристика** показывает зависимость тока базы  $I_B$  от напряжения в цепи база-эмиттер  $U_{БЭ}$  (при  $U_{КЭ} = const$ ). При  $U_{КЭ}=0$  эта характеристика представляет собой прямую ветвь ВАХ эмиттерного перехода.

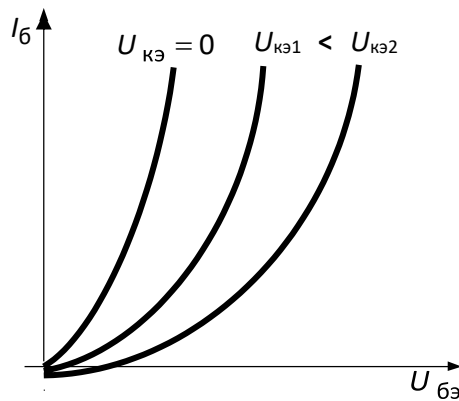


Рис. 7.3

**Выходная характеристика** показывает зависимость тока коллектора  $I_K$  от напряжения цепи коллектор/эмиттер  $U_{КЭ}$  при различных фиксированных значениях тока базы.

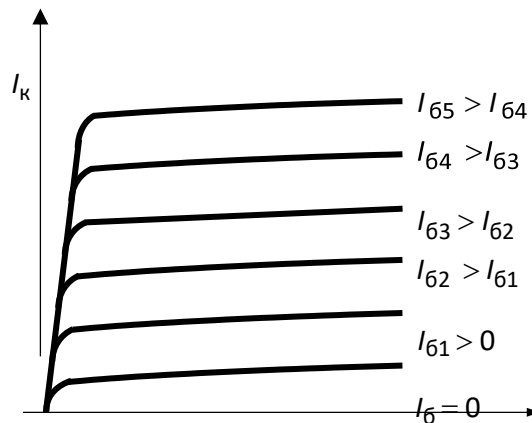


Рис. 7.4

При  $I_6=0$  эта характеристика представляет собой обратную ветвь ВАХ коллекторного перехода. При  $I_6>0$  характеристики имеют большую крутизну в области малых значений  $U_{кэ}$ , т.к. коллекторный переход включен в прямом направлении; поэтому сопротивление его незначительно и достаточно небольшого изменения напряжения на нем, чтобы ток  $I_к$  изменился значительно. При увеличении значения  $U_{кэ}$  ВАХ будут становиться более пологими, поэтому изменения значения  $U_{кэ}$  не приведут к пропорциональному росту тока  $I_к$ .

**Характеристика управления** представляет собой зависимость тока коллектора  $I_к$  от тока базы  $I_б$  (при  $U_{кэ} = const$ ).

**Характеристика обратной связи** есть зависимость напряжения цепи база-эмиттер  $U_{бэ}$ , от напряжения цепи коллектор/эмиттер  $U_{кэ}$  при различных фиксированных значениях тока базы.

### ***Режимы работы транзистора***

При работе транзистора к его электродам прикладываются напряжения от внешних источников питания. В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора, каждый из  $p-n$ -переходов может быть смещен в прямом или в обратном направлении, исходя из этого, возможны четыре режима работы транзистора.

Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, и он инжектирует носители в базу, а на коллекторном переходе напряжение обратное, и он собирает носители из базы, то такое включение транзистора называют нормальным, а транзистор работает в **активном (усилительном)** режиме (Рис. 7.5).

В **режиме насыщения** оба  $p-n$ -перехода включены в прямом направлении, переходы насыщены подвижными носителями заряда, их сопротивления малы.

В **режиме отсечки** оба  $p-n$ -перехода включены в обратном направлении. В электродах транзистора протекают тепловые токи обратно включенных переходов.

Исходя из этого следуют две основные области применения биполярных транзисторов: **усиление сигналов** и применение в качестве **ключевых элементов**.

Если же на коллекторном переходе напряжение прямое, и он инжектирует носители в базу, а на эмиттерном переходе напряжение обратное,

и он осуществляет экстракцию носителей из базы, то такое включение транзистора называют **инверсным**, а транзистор работает в инверсном режиме.

Режим работы транзистора можно выделить на семействе выходных ВАХ. В режиме отсечки выходной ток практически равен нулю.

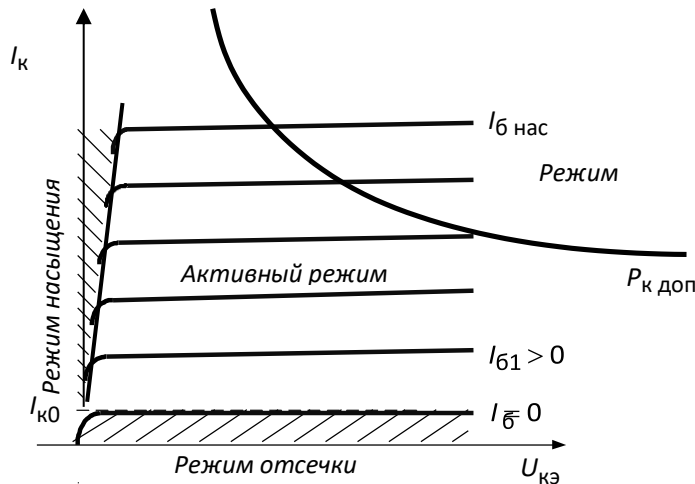


Рис. 7.5

В паспортных данных каждого транзистора указывается его предельно допустимая мощность рассеивания  $P_{к доп}$ , превышение которой недопустимо, так как это ведет к тепловому разрушению полупроводниковой структуры. Область которая лежит выше гиперболы допустимых мощностей  $P_{к доп}$  является нерабочей зоной, что соответствует **режиму пробоя** биполярного транзистора. Очевидно, что работа транзистора должна осуществляться в пределах рабочей области, т.е. ниже гиперболы допустимых мощностей.

### Транзистор как линейный четырехполюсник

Транзистор с его внутренними параметрами, определяемыми эквивалентной схемой, можно представить в виде линейного четырехполюсника (Рис. 7.6) – «черного ящика» с произвольной, но неизменной структурой, которая определяет соответствующие зависимости между входными и выходными параметрами ( $U_1, I_1, U_2, I_2$ ).

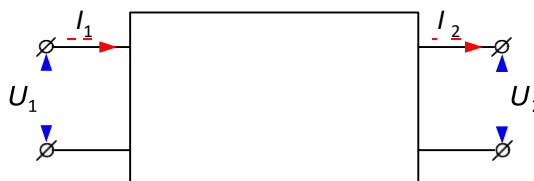


Рис. 7.6

Исходя из того, какие из указанных величин взять за независимые переменные, а какие – за зависимые, линейный четырехполюсник можно описать шестью различными системами уравнений. Наибольшее

распространение получила система, где за независимые переменные принимаются входной ток  $I_1$  и выходное напряжение  $U_2$ , а за зависимые – выходной ток  $I_2$  и входное напряжение  $U_1$ . Тогда система уравнений, связывающая между собой зависимые и независимые переменные, выглядит следующим образом:

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2$$

Физический смысл коэффициентов  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$ , называемых  $h$  – параметрами, определяется по следующему алгоритму:

Если в первом уравнении положить  $U_2=0$  (короткое замыкание (к.з.) на выходе), то параметр  $h_{11}$ , можно найти:

$$h_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2=0},$$

$h_{11}$  [Ом]– входное сопротивление транзистора при к.з. на выходе.

Если  $I_1=0$  (холостой ход (х.х.) на входе), то параметр  $h_{12}$  равен:

$$h_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{I_1=0},$$

$h_{12}$  [-]– коэффициент внутренней обратной связи транзистора по напряжению при х.х. во входной цепи.

Аналогично из второго уравнения:

$$h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2=0},$$

$h_{21}$  [-]–коэффициент передачи транзистора по току при к.з. на выходе

$$h_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1=0},$$

$h_{22}$  [См]– входная проводимость транзистора при х.х. во входной цепи.

**Определение  $h$ -параметров по статическим характеристикам**

Для различных схем включения транзистора (см. л.р.№3)  $h$ -параметры будут различны. Для схемы с общим эмиттером  $h$ -параметры определяются из соотношений:

$$h_{11э} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} \right|_{U_{кэ}=\text{const}}; h_{12э} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_б=\text{const}}; h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} \right|_{U_{кэ}=\text{const}}; h_{22э} = \left. \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_к} \right|_{U_{бэ}=\text{const}}$$

$$= \left. \frac{\Delta I_к}{\Delta U_{кэ}} \right|_{I_б=\text{const}}$$

Используя семейства входных и выходных характеристик транзистора  $h$ -параметры можно определить графически. Входные характеристики транзистора в справочниках обычно представлены двумя кривыми, снятыми при  $U_{кэ} = 0$  и  $U_{кэ} = 5$  В (Рис. 7.7, а).

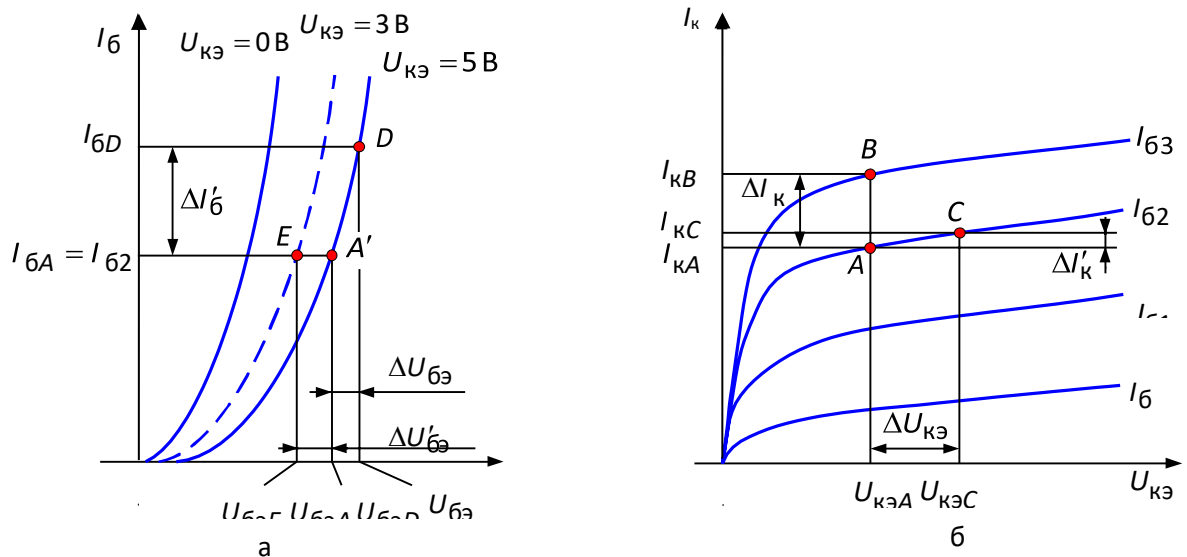


Рис. 7.7

Все остальные входные характеристики при  $U_{кэ} > 5$  В настолько близко расположены друг от друга, что практически сливаются в одну характеристику.

Поэтому, откладывая на оси абсцисс выходных характеристик (Рис. 2.7 б)  $U_{кэ} = 5$  В, (транзистор находится в линейной активной области) восстанавливается из этой точки перпендикуляр до пересечения с какой-либо из средних характеристик, например,  $I_{б2}$  (точка  $A$ ). Точке  $A$  соответствует коллекторный ток  $I_{кA}$ . Тогда, давая приращение току  $I_к$  при неизменном  $U_{кэ}$  на величину  $\Delta I_к$ , например до пересечения со следующей характеристикой ( $I_{б3}$ ), получается точка  $B$ . Приращение базового тока  $\Delta I_б$  при этом соответствует разности:  $I_{б3} - I_{б2}$ . Откуда можно определить параметр  $h_{21э}$ :

Давая приращение напряжению  $U_{кэ}$  на величину  $\Delta U_{кэ}$  от точки  $A$  до точки  $C$ , получается напряжение  $U_{кэC}$ . Точке  $C$  соответствует коллекторный

ток  $I_{кС}$  на оси ординат. Находя разность токов  $I_{кЭ} - I_{кС} = I_{кА}$  можно определить  $h_{22э}$ .

Далее на оси ординат входной характеристики можно отложить величину тока базы  $I_{Б2} = I_{БА}$ . Используя входную характеристику при  $U_{кЭ} = 5В$  найдем напряжение  $U_{БЭА}$ . Давая приращение напряжения  $\Delta U_{БЭ} : \Delta U_{БЭ} = U_{БЭD} - U_{БЭА}$  на величину  $U_{ЭБМ}$  находится приращение тока базы. Откуда можно определить  $h_{11э}$ .

Для нахождения параметра  $h_{12}$  необходимы две входные характеристики, снятые для  $U_{кЭ} \neq 0$ . Предположим, что кроме приведенных входных характеристик была бы еще одна, снятая, например, для  $U_{кЭ} = 3В$  (показана на рис. 2.7, а пунктиром). Тогда, находя на этой характеристике  $E$ , соответствующую базовому току точку  $E$ , соответствующую базовому току  $I_{БА}$  Тогда можно определить:

$$U_{БЭ} - U_{БЭА} = U_{БЭE} \text{ и } U_{кЭ} - U_{кЭА} = U_{кЭE} = 5 - 3 = 2 \text{ В,}$$

Откуда можно определить  $h_{12э}$ .

В таблице 7.1 представлены примерные значения  $h$  параметров для схемы с ОЭ.

Таблица 7.1

Параметр	Физический смысл	Приблизительные значения
$h_{11э}$	входное сопротивление транзистора	несколько кОм
$h_{12э}$	коэффициент обратной связи транзистора	$10^{-3} - 10^{-4}$
$h_{21э}, (\beta)$	коэффициент передачи по току	десятки–сотни раз
$h_{22э}$	выходная проводимость транзистора	единицы – десятки кОм( $1/h_{22э}$ )

### **Основные параметры биполярных транзисторов:**

1. Коэффициенты передачи эмиттерного и базового тока:

$$h_{21э} = \left. \frac{dI_K}{dI_6} \right|_{U_{кэ}=\text{const}}; h_{216} = \left. \frac{dI_K}{dI_6} \right|_{U_{к6}=\text{const}}$$

2. Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода (единицы – десятки Ом):

$$r_{э\text{диф}} = \left. \frac{dU_{э6}}{dI_6} \right|_{U_{кэ}=\text{const}}$$

3. Обратный ток коллекторного перехода при заданном обратном напряжении (единицы нано- ампер – десятки миллиампер)

$$I_{к60} = I_K|_{I_3=0}; U_{к6} < 0$$

4. Объемное сопротивление базы  $r_6$  (десятки – сотни Ом).

5. Выходная проводимость  $h_{22}$  или дифференциальное сопротивление коллекторного перехода (доли – сотни мкСм)

$$r_{к\text{диф}} = \frac{1}{h_{22э}} = \left. \frac{dU_{к6}}{dI_K} \right|_{I_6=\text{const}}; r_{к\text{диф}} = \frac{1}{h_{226}} = \left. \frac{dU_{к6}}{dI_K} \right|_{I_3=\text{const}}$$

6. Максимально допустимый ток коллектора  $I_{K\text{ max}}$  (сотни миллиампер – десятки ампер).

7. Напряжение насыщения коллектор – эмиттер  $U_{кэ\text{ нас}}$  (десятые доли – один вольт).

8. Наибольшая мощность рассеяния коллектором  $P_{K\text{ max}}$  (милливатт – десятки ватт).

9. Ёмкость коллекторного перехода  $C_K$  (единицы – десятки пикофарад)

### Порядок выполнения экспериментов

- Соберите цепь согласно схеме (Рис. 7.8). Потенциометр  $R_{п}=1\text{ кОм}$  используется для регулирования тока базы, резисторы  $R_1 = 100\text{ кОм}$  и  $R_2 = 47\text{ кОм}$  – для ограничения максимального тока базы. Управление напряжением  $U_{кэ}$  осуществляется регулятором источника постоянного напряжения. Для предотвращения подачи обратного напряжения на транзистор в цепь коллектора включён диод. Переход эмиттер база также защищён шунтирующим диодом. Измерение тока базы  $I_6$  и напряжения  $U_{бэ}$  производятся мультиметрами на пределах  $200\text{ мкА}$  и  $2\text{ В}$  соответственно, Пределы измерения тока коллектора  $I_K$  и напряжения



$U_{кэ}$  изменяются в ходе работы по мере необходимости.

- При сборке схемы предусмотрите перемычки для переключения амперметра из одной ветви в другую.
- Установите первое значение тока базы  $20\text{ }\mu\text{A}$ , переключите миллиамперметр в цепь коллектора и, изменяя напряжение  $U_{кэ}$  согласно значениям, указанным в таблице 7.2, снимите зависимости  $I_{к}(U_{кэ})$  и  $U_{бэ}(U_{кэ})$ . Повторите эти измерения при каждом значении  $I_{б}$ , указанном в таблице.
- *Характеристики транзистора изменяются в ходе работы из-за его нагрева. Поэтому для большей определенности рекомендуется установить нужные значения  $I_{бэ}$  и  $U_{кэ}$ , выключить на 30 с блок генераторов напряжений, затем включить его и быстро записать показания приборов V1 и A2.*

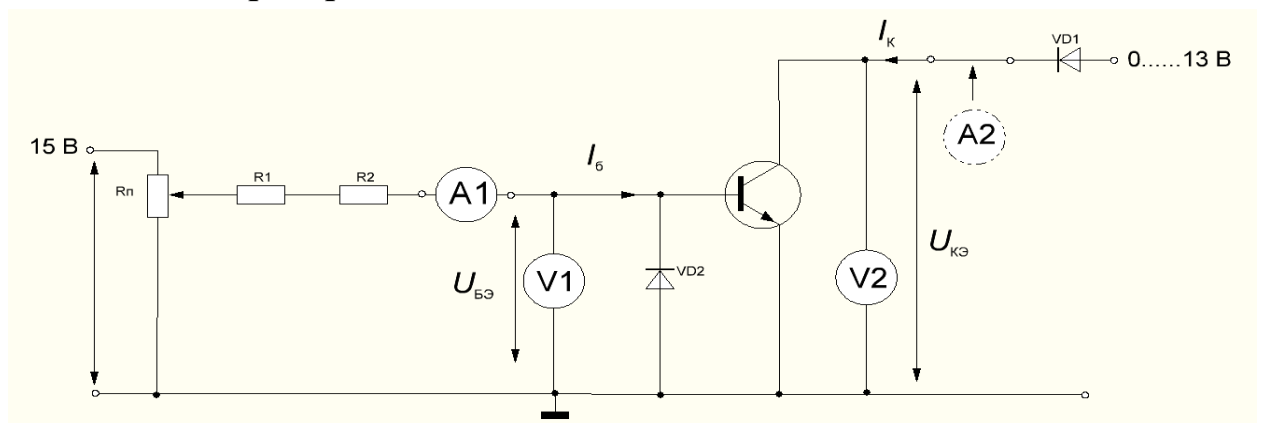


Рис. 7.8

Таблица 7.2

$U_{кэ}$ , В	$I_{б} = 20\text{ }\mu\text{A}$		$I_{б} = 40\text{ }\mu\text{A}$		$I_{б} = 60\text{ }\mu\text{A}$		$I_{б} = 80\text{ }\mu\text{A}$	
	$I_{к}$ , мА	$U_{бэ}$ , В	$I_{к}$ , мА	$U_{бэ}$ , В	$I_{к}$ , мА	$U_{бэ}$ , В	$I_{к}$ , мА	$U_{бэ}$ , В
0								
0,5								
1								
2								
5								
10								
15								

- Постройте графики семейства выходных характеристик  $I_{к}(U_{кэ})$  и семейство характеристик обратной связи  $U_{бэ}(U_{кэ})$ , не забыв указать

какому току базы соответствует каждая кривая.

- Установите  $U_{кэ} = 0$  и изменяя ток базы в соответствии со значениями, указанными в таблице 7.3, снимите зависимость  $U_{бэ}(I_б)$ , Увеличьте напряжение  $U_{кэ}$  до 5 В и снова снимите зависимость  $U_{бэ}(I_б)$ , а также и  $I_к(I_б)$ . Повторите этот опыт также при  $U_{кэ} = 15$  В. (При проведении этих измерений также учитывайте примечание к предыдущему опыту).
- Постройте графики входных  $I_б(U_{бэ})$  и регулировочных  $I_к(I_б)$  характеристик, указав для каждой кривой соответствующие значения  $U_{кэ}$ .

Таблица 7.3

$I_б,$ μА	$U_{кэ} = 0$ В		$U_{кэ} = 5$ В		$U_{кэ} = 15$ В	
	$U_{бэ},$ В	$I_к,$ мА	$U_{бэ},$ В	$I_к,$ мА	$U_{бэ},$ В	$I_к,$ мА
0						
5						
10						
20						
50						
80						

- **В отчете необходимо определить графически  $h$ -параметры для схемы с общим эмиттером.**

➤ **Основные понятия:** биполярный транзистор, база, эмиттер, коллектор, активный режим, режим насыщения, режим отсечки, гипербола допустимых мощностей,  $h$ -параметры, семейства характеристик

Вопросы для допуска к выполнению и защиты лабораторной работы:

1. Нарисуйте УГО биполярного транзистора
2. Перечислите основные параметры биполярного транзистора
3. Нарисуйте семейства входных и выходных ВАХ биполярного транзистора.
4. Какие области можно выделить на семействе выходных ВАХ биполярного транзистора?
5. Какое явление в транзисторе отражает характеристика обратной связи?
6. Что такое гипербола допустимой мощности?
7. Что такое  $h$ -параметры? Каким образом их можно определить графически?
8. В чем заключается физический смысл  $h$ -параметров для схемы с общим

эмиттером?

9. Для чего могут применяться биполярные транзисторы?

10. Как можно построить характеристику управления по семейству выходных характеристик?

## **7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. «СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДИНОЧНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ»**

*Цель работы* – ознакомление с принципами работы одиночных усилительных каскадов на биполярных транзисторах

*Задачи:*

- Определить экспериментально коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности усилительных каскадов с ОЭ, ОК и ОБ, а также их входные и выходные сопротивления.

### **Основные теоретические положения**

Биполярный транзистор имеет три вывода (эмиттер, база, коллектор), а два источника питания имеют четыре вывода, поэтому обязательно один из выводов транзистора будет общим для обоих источников, т.е. одновременно будет принадлежать и входной цепи и выходной. По этому признаку различают три возможных схемы включения:

- с общим эмиттером (ОЭ) (Рис. 8.1 а),
- с общим коллектором (ОК) (Рис. 8.1, б)
- с общей базой (ОБ) (Рис. 8.1 в).

Все схемы могут быть выполнены как на **p-n-p** так и на **n-p-n** транзисторе.

В каждой из этих схем один из выводов транзистора является общей точкой, а два других являются входом и выходом. При этом на эмиттерный переход подаётся напряжение смещения в прямом направлении, а на коллекторный – в обратном направлении. Напряжение смещения задаётся базовым делителем – сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ . В цепи эмиттера и (или) коллектора включают сопротивления для ограничения тока и приданию усилителю определённых свойств. На входе усилительного каскада (часто и на выходе) включается разделительный конденсатор  $C_{вх}$  для предотвращения протекания постоянного тока через источник переменного сигнала. Для анализа таких схем вводятся коэффициенты усиления по току ( $K_I$ ), напряжению ( $K_U$ ) и мощности ( $K_P$ )

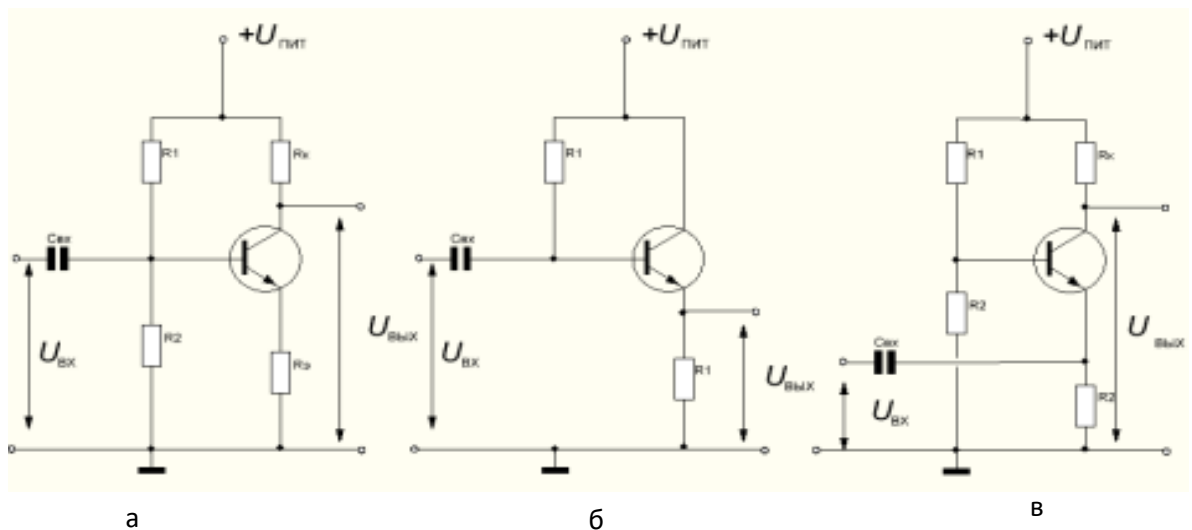


Рис. 8.1

Схема с ОЭ (Рис. 8.1, а) используется наиболее часто. В ней входной сигнал подаётся на цепь база – эмиттер, а выходное напряжение снимается с цепи коллектор – эмиттер. Она имеет большой коэффициент усиления, как по напряжению, так и по току. Коэффициент усиления по напряжению, с учётом ряда допущений, для схемы с ОЭ определяется по формуле:

$$K_U = \frac{R_k}{R_e}$$

Таким образом, усиление по напряжению регулируется отношением сопротивлений в цепи коллектора и в цепи эмиттера. *Подбирая отношения указанных сопротивлений, можно регулировать значение коэффициента усиления по напряжению.*

Коэффициент передачи по току для схемы с общим эмиттером определяется следующим соотношением:

$$K_I = h_{21э} = \beta = \frac{I_K}{I_B}$$

Параметр  $\beta$  или  $h_{21э}$  является справочной величиной и зависит непосредственно от марки транзистора.

В схеме с ОК (Рис. 8.1, б) входной сигнал подаётся на цепь база – коллектор, а выходной снимается с цепи эмиттер – коллектор. Это утверждение не противоречит рисунку 1б, так как для переменного сигнала общая точка имеет такой же потенциал, как и  $+U_{пит}$ . Эту схему называют ещё **эмиттерным повторителем**, так как выходное напряжение в ней почти равно входному. Схема имеет большой коэффициент передачи по току. Однако достаточно часто данная схема применяется не для усиления тока, а для **согласования усилительных каскадов с низкоомной нагрузкой**. Это

обусловлено тем, что схема с ОК имеет высокое входное сопротивление и низкое выходное.

В схеме с ОБ (Рис. 8.1, в) входное напряжение подаётся на цепь эмиттер – база, а выходное снимается с цепи коллектор – база. Здесь также нет противоречия с рисунком 1в, так как для переменного сигнала общая точка имеет такой же потенциал, как и потенциал базы. Эта схема имеет большой коэффициент, но ток на выходе почти равен току на входе. В противоположность схеме с общим коллектором схема имеет малое входное сопротивление, но большое выходное.

Схема с ОЭ изменяет фазу входного сигнала на  $180^\circ$ , тогда как в схемах с ОК и ОБ выходное напряжение совпадает по фазе с входным.

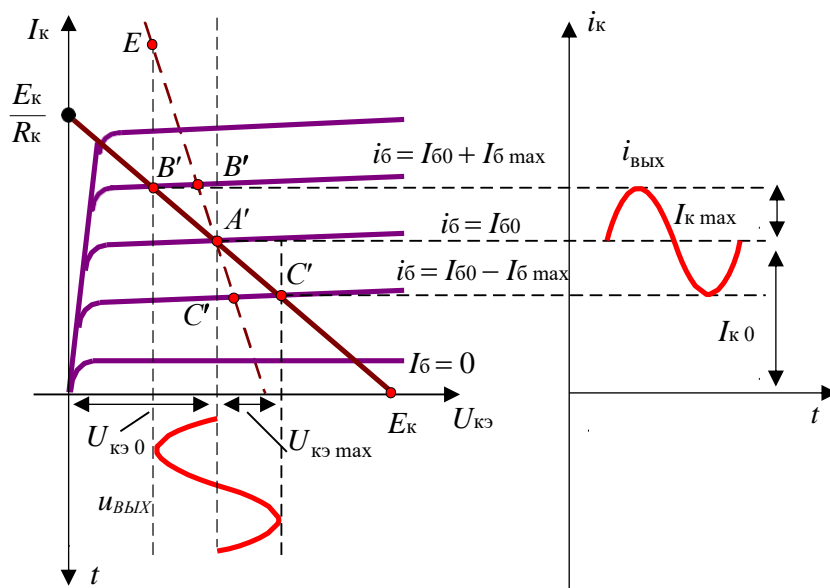
В таблице 8.1 представлены примерные сравнительные характеристики для схем с ОЭ, ОК и ОБ.

Таблица 8.1

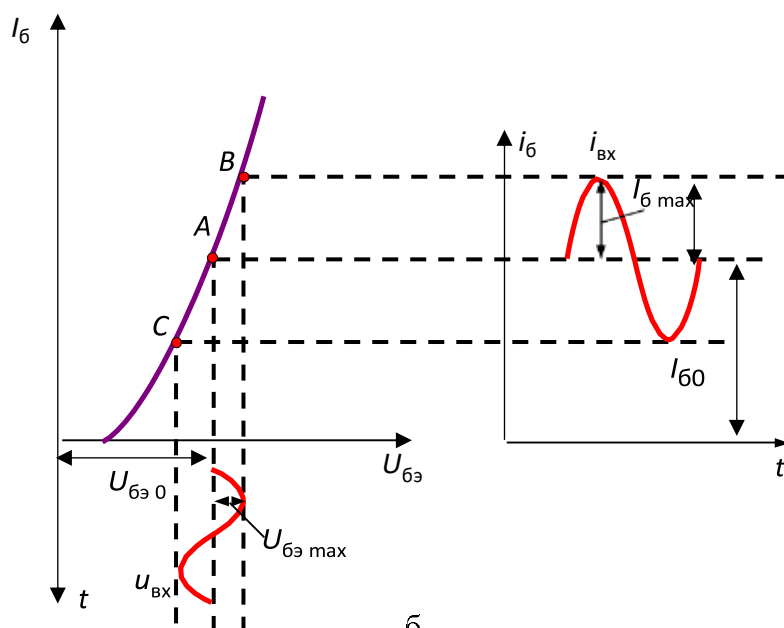
Параметр	Схема с ОЭ	Схема с ОК	Схема с ОБ
Коэффициент усиления по току $K_I$	$\beta = \Delta I_K / \Delta I_B$ 20-200	$\gamma = \Delta I_{\Sigma} / \Delta I_B$ 20-200	$\alpha = \Delta I_K / \Delta I_{\Sigma}$ $< 1$
Коэффициент усиления по напряжению $K_U$	Несколько сотен	$< 1$	Несколько сотен/тысяч
Коэффициент усиления по мощности $K_P$	Несколько тысяч	Несколько десятков	Несколько сотен
Входное сопротивление $R_{ВХ}$	200-2000 Ом	0,2-1 Мом	30-1500 Ом
Выходное сопротивление $R_{ВЫХ}$	10-10 кОм	50-500 Ом	0,5-2 Мом
Фазовый сдвиг между $U_{ВЫХ}$ и $U_{ВХ}$	$180^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$
Применение	Универсальное. Усилитель и фазоинвертор	При работе на низкоомную нагрузку. В качестве буфера.	На высоких частотах. При работе на высокоомную нагрузку

### **Рабочая точка**

На работу транзисторного усилительного каскада влияет выбор *рабочей точки (точки покоя)*. Выбор рабочей точки можно рассмотреть для схемы с общим эмиттером (Рис. 8.2 а). Если входной сигнал отсутствует ( $u_{вх}=0$ ), линия нагрузки может быть получена методом по двум точкам:  $E_{пит}$  на оси абсцисс и  $I_{кmax}=E_{пит}/R_k$  на оси ординат. Для того, чтобы искажения усиленного сигнала были минимальными, смещение надо выбрать так, чтобы начальная *рабочая точка* (при отсутствии входного сигнала) располагалась в середине линейного участка входной характеристики (точка А на Рис. 8.2 б). Тогда при изменении входного сигнала напряжение  $U_{бэ}$  будет изменяться на величину  $U_{бэ\max}$  от начального значения  $U_{бэ}=0$ , вызывая изменение базового на величину  $I_{б\max}$  от начального значения  $I_{б0}$  (Рис. 8.2 б). Коллекторный ток при этом будет изменяться относительно начального коллекторного тока  $I_{к0}$  (Рис. 8.2 б.), соответствующего базовому току  $I_{см}$ , в сторону увеличения и в сторону уменьшения на величину амплитуды переменной составляющей  $I_{к\max}$ . Выходное напряжение  $U_{вых}$  при этом будет тоже изменяться от начального значения  $U_{кэ0}$  в большую и в меньшую сторону на величину амплитуды своей переменной составляющей  $U_{кэ\max}$ . В рассматриваемой схеме увеличению входного сигнала соответствует увеличение базового тока, а, следовательно, и коллекторного тока, а выходное напряжение  $u_{вых}$  при этом уменьшается. Из чего следует, что в этой схеме входное и выходное напряжение изменяются в противофазе. Переменная составляющая выходного напряжения проходит через разделительный конденсатор С2 и выделяется на нагрузке  $R_n$ . В качестве нагрузки может служить и входное сопротивление следующего каскада усиления, а характер нагрузки в общем случае может быть различным. По переменному току нагрузка усилительного каскада  $R_n$  состоит из параллельно включенных а по постоянному току – только  $R_k$ . Поэтому линия нагрузки по постоянной и переменной составляющим будет проходить по-разному. Так, если сопротивление нагрузки  $R_n$  по переменному току меньше  $R_k$  – сопротивления по постоянному току, то линия нагрузки будет проходить через ту же рабочую точку А, но под другим углом, следовательно, линия нагрузки пойдет круче.



а



б  
Рис. 8.2

От положения рабочей точки зависит режим работы транзистора, а, следовательно, и уровень нелинейных искажений сигнала на выходе каскада. В зависимости от формы выходного сигнала усилители по режиму работы делят на различные классы усиления (см. лабораторную работу №5.)

### Порядок выполнения экспериментов

- Соберите на наборном поле цепь усилительного каскада с ОЭ (Рис. 8.3). В ней напряжение смещения (положение рабочей точки)

регулируется потенциометром  $R_{п}$ . Последовательно с источником переменного сигнала и на выходе включены конденсаторы  $C_{вх}$  и  $C_{вых}$  для развязки цепей постоянного и переменного тока. На входе имеется также токоограничивающее сопротивление  $R_{доб}$ . Диод КД226 включён для защиты эмиттерного перехода от обратного напряжения, а сопротивление  $R_{э}$  для стабилизации характеристик транзистора. Сопротивление в цепи коллектора  $R_{к} = 330 \text{ Ом}$ . Измерение входного и выходного напряжений осуществляется осциллографом и двумя мультиметрами ( $V1$  и  $V2$ ). Первый канал осциллографа подключается в точку А, второй канал в точку В. Номиналы элементов представлены в таблице 8.2.

Таблица 8.2

Элемент	$R1$	$R2, R_{п}$	$R_{к}$	$C_{вх}, C_{вых}$	$R_{доб}$	$R_{э}$
Номинал	4,7 кОм	1 кОм	330 Ом	1 мкФ	1 кОм	10 Ом

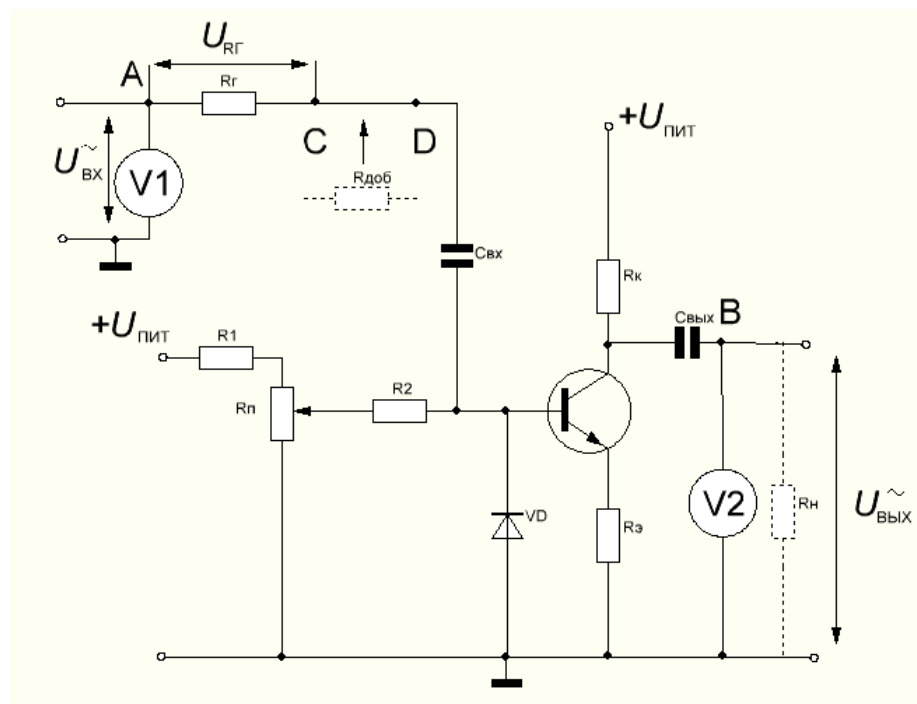


Рис. 8.3

- Включите осциллограф для наблюдения по двум каналам одновременно (канал I – 0,5 В/дел., канал II – 5 В/дел). Включите мультиметры для измерения переменных напряжений.
- Не используйте предел измерения 200 mV для измерения



**переменных напряжений, содержащих постоянную составляющую! Другие пределы использовать можно.**

- Включите блок генераторов напряжений и установите частоту синусоидального напряжения 1 кГц.
- Изменяя напряжение смещения на базе поворотом ручки потенциометра вправо и влево, установите напряжение покоя  $U_{кэ}$  (положение рабочей точки) примерно в середине диапазона его изменения. Подайте на вход усилителя синусоидальное напряжение и, регулируя его амплитуду, установите на входе максимальный сигнал, соответствующий неискажённому напряжению на выходе. При необходимости уточните положение точки покоя.
- Запишите в таблицу 8.6 входное и выходное напряжения.
- Для определения тока базы и тока коллектора измерьте также напряжения на резисторе  $R_{г1}=1$  кОм ( $U_{RBX}$ , между точками А и С) во входной цепи и на резисторе  $R_k$  в цепи коллектора ( $U_{RH}$ ).
- Вычислите ток базы (входной ток) и ток коллектора (выходной ток), разделив напряжения на соответствующие сопротивления, запишите их в таблицу 8.6.
- Определите коэффициенты усиления по напряжению, току, и мощности ( $k_P = k_U \cdot k_I$ ).
- Для определения выходного сопротивления подключите к выходу (параллельно вольтметру V2, показано пунктиром) нагрузочное сопротивление  $R_H$ , указанное в таблице. При этом напряжение на выходе уменьшится от  $U_{ВЫХ}$ , которое уже записано в таблицу 8.6, до  $U_{ВЫХ1}$ . Запишите это значение также в табл. и вычислите выходное сопротивление по формуле:

$$R_{ВЫХ} = R_H \left( \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ1}} - 1 \right).$$

- Уберите нагрузочное сопротивление, а для определения входного сопротивления включите добавочное сопротивление  $R_{доб}$  во входную цепь между точками С и D (последовательно с генератором переменного напряжения показано пунктиром). При этом напряжение на выходе уменьшится от  $U_{ВЫХ}$  до  $U_{ВЫХ2}$ . Запишите это значение **напряжения на выходе**  $U_{ВЫХ2}$  также в табл. и вычислите входное сопротивление по формуле:

$$R_{BX} = \frac{R_{доб}}{\left( \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ2}} - 1 \right)}.$$

- Уберите нагрузочное сопротивление и замените сопротивление в цепи коллектора на  $R_k = 470 \text{ Ом}$ . Отрегулируйте положение рабочей точки, если это необходимо, чтобы получить на выходе неискаженный сигнал. Запишите в таблицу 8.3. значения напряжения на входе и выходе.
- Меняйте сопротивления в схеме согласно таблице 8.3 и записывайте соответствующие напряжения на входе и выходе. Определите коэффициент передачи по напряжению для каждого случая. В выводе проанализируйте полученные результаты. Для последнего случая, когда сопротивления в цепи эмиттера и коллектора равны, необходимо зафиксировать осциллограммы и привести их в отчете.

Таблица 8.3

$R_э, \text{ Ом}$	$R_k, \text{ Ом}$	$U_{ВХ}, \text{ В}$	$U_{ВЫХ}, \text{ В}$	$K_U$
10	470			
10	220			
100	100			

- Соберите цепь усилительного каскада с ОК (Рис. 8.4). Номиналы элементов для схемы с ОК представлены в таблице 8.4.

Таблица 8.4

Элемент	$R_2$	$R_{доб}$	$R_п$	$R_э$	$C_{ВХ},$ $C_{ВЫХ}$
Номинал	4,7 кОм	1 кОм	10 кОм	330 Ом	1 мкФ

- Снова подайте на вход синусоидальное напряжение, соответствующее максимальному неискажённому напряжению на выходе, отрегулировав предварительно точку покоя потенциометром.
- Проведите все те же опыты, что и в схеме с общим эмиттером, и заполните второй столбец таблицы 8.6.

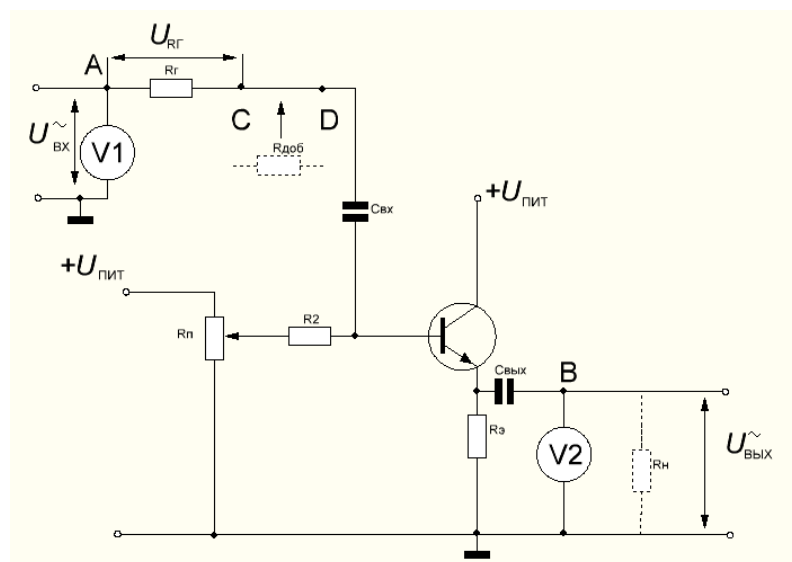


Рис. 8.4

- Прodelайте аналогичные опыты в схеме усилителя с общей базой (Рис. 8.5) и сравните результаты. Номиналы элементов для схемы с ОБ представлены в таблице 8.5.

Таблица 8.5

Элемент	R1	Rдоб, Rп	Rк	Rэ	Cвх	Cвых
Номинал	2,2 кОм	1 кОм	330 Ом	100 Ом	470 мкФ	1 мкФ

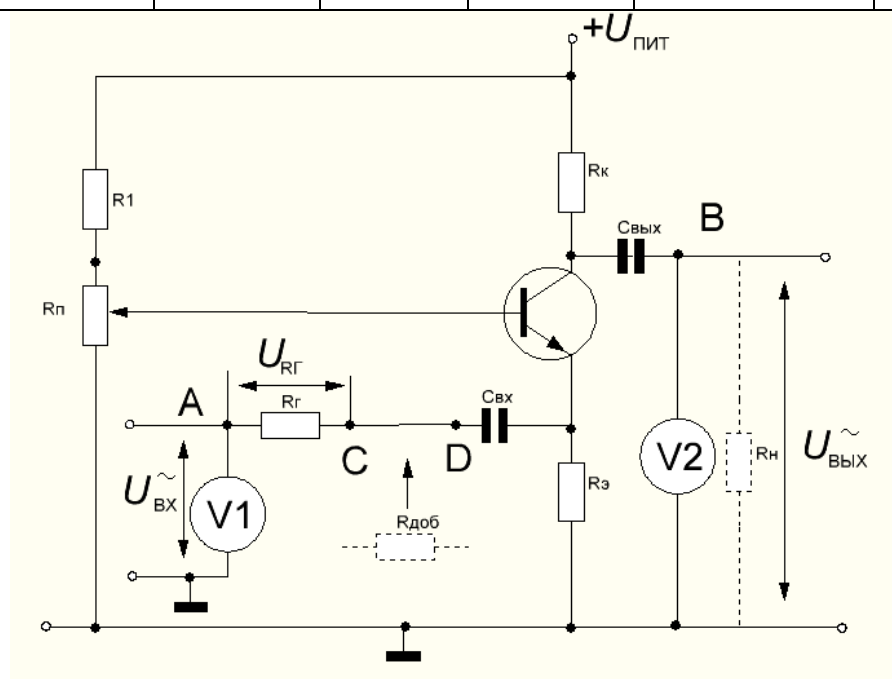


Рис. 8.5

Таблица 8.6

	Схема с ОЭ	Схема с ОК	Схема с ОБ
$U_{BX}, В$			
$U_{ВЫХ}, В$			
$U_{RГ}, В$			
$U_{RH}, В$			
$U_{ВЫХ1}, В$	(при $R_H=1 \text{ кОм}$ )	(при $R_H=0,47 \text{ кОм}$ )	(при $R_H=1 \text{ кОм}$ )
$U_{ВЫХ2}, В$	(при $R_{ДОБ}=1 \text{ кОм}$ )	(при $R_{ДОБ}=4,7 \text{ кОм}$ )	(при $R_{ДОБ}=10 \text{ Ом}$ )
$I_{BX}, \text{ мА}$			
$I_{ВЫХ}, \text{ мА}$			
$K_U$			
$K_I$			
$K_P$			
$R_{ВЫХ}, \text{ кОм}$			
$R_{BX}, \text{ кОм}$			

➤ **Основные понятия:** усилительный каскад, коэффициент усиления, рабочая точка, базовый делитель, входное сопротивление, выходное сопротивление.

Вопросы для допуска к выполнению и защиты лабораторной работы:

1. Нарисуйте схему включения с ОЭ и запишите коэффициенты усиления для этой схемы
2. Нарисуйте схему включения с ОК и запишите коэффициенты усиления для этой схемы
3. Нарисуйте схему включения с ОБ и запишите коэффициенты усиления для этой схемы
4. В каком из усилителей происходит инвертирование сигнала и в чём оно выражается?
5. Какой из усилителей имеет наибольший коэффициент усиления по мощности?
6. В каких случаях свойства усилителей с общим коллектором имеют особое применение?
7. Чем определяется коэффициент передачи по напряжению для схемы с ОЭ?

8. Что такое рабочая точка? Какое значение постоянного напряжения оптимально для рабочей точки?
9. Что может произойти, если рабочая точка выбирается не корректно?
10. Зачем в схемах необходимы потенциометры и емкости?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 «ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ОДИНОЧНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ»**

*Цель работы* – ознакомление с принципами работы полевых транзисторов и одиночных усилительных каскадов на базе них.

*Задачи:*

- Снять статические характеристики полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом, включенного по схеме с общим истоком;
- Определить экспериментально коэффициенты усиления по напряжению и мощности усилительных каскадов, а также их входные и выходные сопротивления.

### **Основные теоретические положения**

*Полевой транзистор* – это полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем. Принцип действия полевых транзисторов основан на использовании носителей заряда только одного знака (электронов или дырок). Управление током в полевых транзисторах осуществляется изменением проводимости канала, через который протекает ток транзистора под воздействием электрического поля. Вследствие этого транзисторы называют полевыми. Полевые транзисторы также иначе называют *униполярными*, т.к. в создании электрического тока участвуют только основные носители заряда.

По способу создания канала различают полевые транзисторы с затвором в виде управляющего  $p$ - $n$ -перехода и с изолированным затвором (МДП- или МОП- транзисторы). Транзисторы с изолированным затвором бывают двух типов: со встроенным каналом и с индуцированным каналом.

В зависимости от проводимости канала полевые транзисторы делятся на: полевые транзисторы с каналом  $p$ -типа и  $n$ -типа. Канал  $p$ -типа обладает дырочной проводимостью, а  $n$ -типа – электронной.

Разделение полевых транзисторов в зависимости от перечисленных особенностей представлено на рис. 9.1.

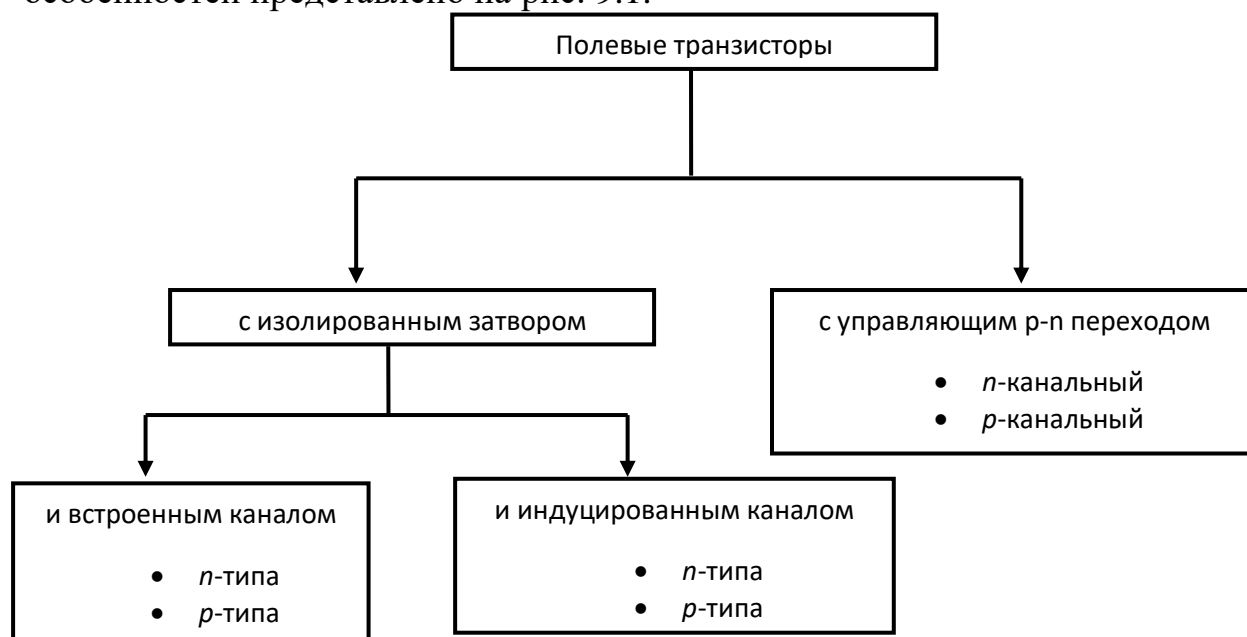


Рис. 9.1

### ***Полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом***

Полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом — это полевой транзистор, затвор которого изолирован (то есть отделён в электрическом отношении) от канала *p-n* переходом, смещённым в обратном направлении. 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 *исток*ом. Электрод, через который из канала уходят **основные** носители заряда, называют *сток*ом. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала за счет управляющего напряжения, называют *затвор*ом.

УГО полевых транзисторов с каналом *n*- и *p*-типов приведены на рис. 9.2: *а* - *n*-типа, *б*- *p*-типа.

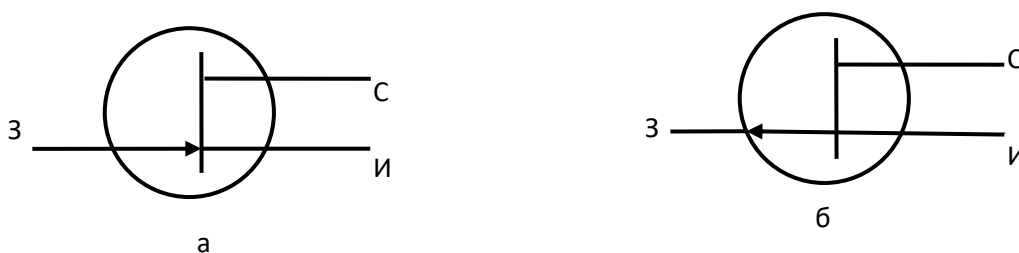


Рис. 9.2

Для этих транзисторов представляют интерес два вида ВАХ: стоковые и стоко-затворные. Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с  $p$ - $n$ -переходом и каналом  $n$ -типа показаны на рис. 9.3 а. Они отражают зависимость тока стока от напряжения  $U_{си}$  при фиксированном напряжении  $U_{зи}$ :  $I_c = f(U_{си})$  при  $U_{зи} = \text{const}$ .

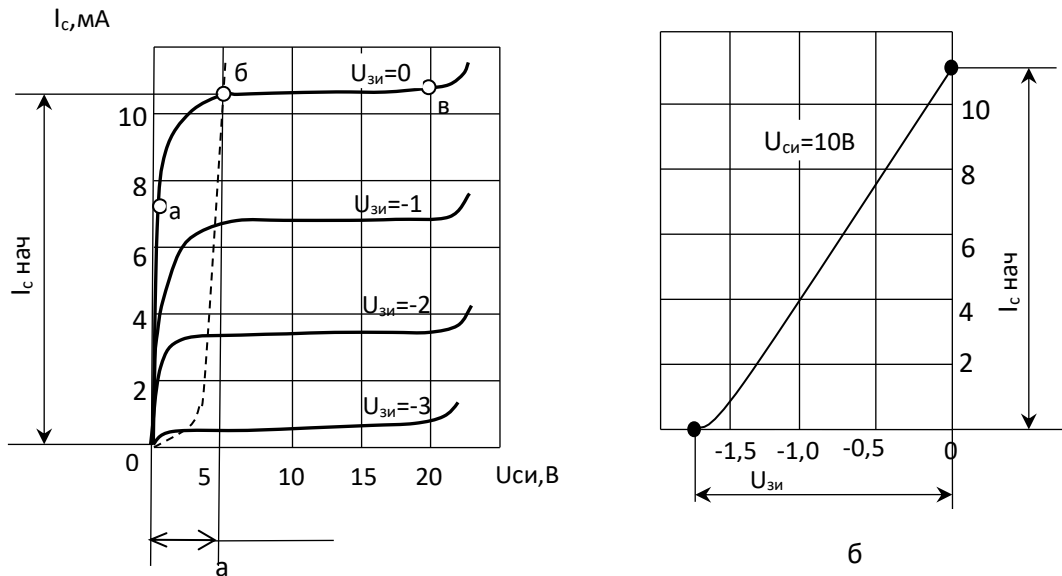


Рис. 9.3

Особенностью полевого транзистора является влияние на проводимость канала как управляющего напряжения  $U_{зи}$ , так и напряжения  $U_{си}$ . При  $U_{си} = 0$  выходной ток  $I_c = 0$ . При  $U_{си} > 0$  ( $U_{зи} = 0$ ) через канал протекает ток  $I_c$ , в результате чего создается падение напряжения, возрастающее в направлении стока. Суммарное падение напряжения участка исток-сток равно  $U_{си}$ . Повышение напряжения  $U_{си}$  вызывает увеличение падения напряжения в канале и уменьшение его сечения и, следовательно, уменьшение проводимости канала. При некотором напряжении  $U_{си}$  происходит сужение канала, при котором границы обоих  $p$ - $n$ -переходов смыкаются и сопротивление канала становится высоким. Такое напряжение  $U_{си}$  называют напряжением перекрытия или напряжением насыщения  $U_{си.нас}$ . При подаче на затвор обратного напряжения  $U_{зи}$  происходит дополнительное сужение канала, и его перекрытие наступает при меньшем значении напряжения  $U_{си.нас}$ . В рабочем режиме используются пологие (линейные) участки выходных характеристик.

Стоко-затворная характеристика полевого транзистора показывает зависимость тока  $I_c$  от напряжения  $U_{зи}$  при фиксированном напряжении  $U_{си}$ :  $I_c = f(U_{си})$  при  $U_{си} = \text{const}$  (Рис. 9.3 б).

### ***Основные параметры полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом***

- *максимальный ток стока  $I_{с\ max}$  (при  $U_{зи} = 0$ );*
- *максимальное напряжение сток-исток  $U_{си\ max}$ ;*
- *напряжение отсечки  $U_{зи\ отс}$ ;*
- *внутреннее (выходное) сопротивление  $r_i$  – представляет собой сопротивление транзистора между стоком и истоком (сопротивление канала) для переменного тока:*

$$r_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \text{ при } U_{зи} = \text{const};$$

- *крутизна стоко-затворной характеристики:*

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ при } U_{си} = \text{const},$$

-отображает влияние напряжения затвора на выходной ток транзистора;

- *входное сопротивление*  $r_{вх} = \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta I_3} \text{ при } U_{си} = \text{const}$  транзистора определяется сопротивлением р-п-переходов, смещенных в обратном направлении. Входное сопротивление полевых транзисторов с р-п-переходом довольно велико (достигает единиц и десятков мегаом), ( $10^7$ - $10^9$ Ом) что выгодно отличает их от биполярных транзисторов.

### ***Полевые транзисторы с изолированным затвором***

Полевой транзистор с изолированным затвором – полевой транзистор, затвор которого отделен в электрическом отношении от канала слоем диэлектрика. УГО таких транзисторов, имеющих также название. Как было отмечено ранее, существует две разновидности МДП-транзисторов: с индуцированным каналом и со встроенным каналом. На рис. 9.4 изображены УГО МДП-транзисторов: а – со встроенным каналом n-типа; б – со встроенным каналом p-типа; г – с индуцированным каналом n-типа; д – с индуцированным каналом p-типа.



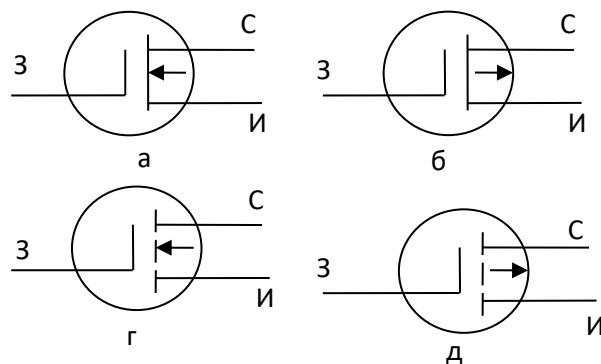


Рис. 9.4

В качестве диэлектрика используют окисел кремния  $\text{SiO}_2$ . Отсюда другое название этих транзисторов – МОП-транзисторы (структура: *металл-окисел-полупроводник*). Наличие диэлектрика обеспечивает высокое входное сопротивление рассматриваемых транзисторов ( $10^{10} \dots 10^{14} \text{ Ом}$ ). Принцип действия МДП-транзисторов основан на эффекте изменения проводимости приповерхностного слоя полупроводника на границе с диэлектриком под воздействием поперечного электрического поля. Приповерхностный слой полупроводника является токопроводящим каналом этих транзисторов.

В МДП-транзисторах с индуцированным каналом проводящий канал между сильнолегированными областями истока и стока отсутствует и, следовательно, заметный ток стока появляется только при определённой полярности и при определённом значении напряжения на затворе относительно истока, которое называют пороговым напряжением ( $U_{зи\text{пор}}$ ). В МДП-транзисторах со встроенным каналом у поверхности полупроводника под затвором при нулевом напряжении на затворе относительно истока существует инверсный слой — канал, который соединяет исток со стоком.

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с индуцированным каналом  $n$ -типа  $I_c = f(U_{си})$  показаны на рис. 9.5 а. Стоко-затворная характеристика транзистора со встроенным каналом  $n$ -типа  $I_c = f(U_{зи})$  приведена на рис. 4.5 б. Отличие стоковых характеристик заключается в том, что управление током транзистора осуществляется напряжением одной полярности, совпадающей с полярностью напряжения  $U_{си}$ . Ток  $I_c = 0$  при  $U_{си} = 0$ , в то время как в транзисторе со встроенным каналом для этого необходимо изменить полярность напряжения на затворе относительно истока.

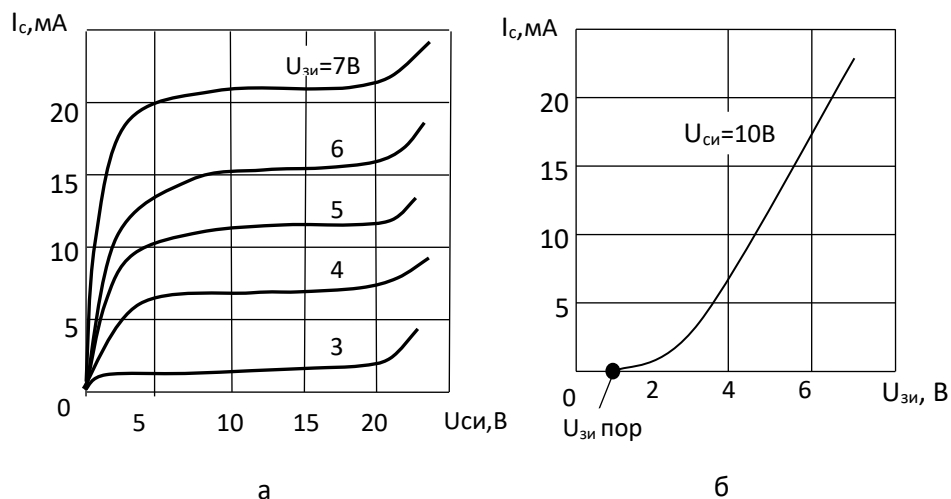


Рис. 9.5

### Основные параметры МДП-транзисторов

Параметры МДП-транзисторов аналогичны параметрам полевых транзисторов с  $p-n$ -переходом. Входное сопротивление МДП-транзисторов составляет  $r_{вх} = 10^{12} \dots 10^{14}$  Ом.

### Схемы включения полевых транзисторов

Полевые транзисторы также как и биполярные могут быть использованы в качестве управляющих элементов в различных усилительных цепях. По названию того электрода транзистора, который используется как общая точка для напряжений входного и выходного сигналов, различают три основные схемы усилителей на полевых транзисторах: с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС) и с общим затвором (ОЗ).

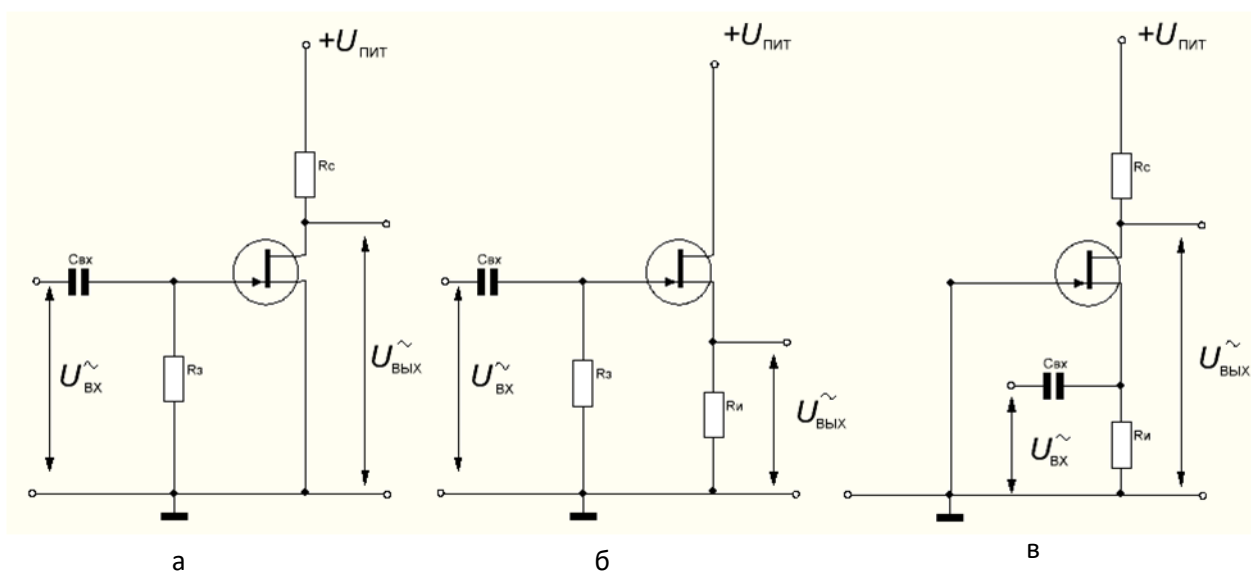


Рис. 9.6

Схема включения полевого транзистора с общим истоком (Рис. 9.6, а) является аналогом схемы с общим эмиттером для биполярного транзистора. Такое включение весьма распространено в силу возможности давать значительное усиление по напряжению. Входное сопротивление непосредственно перехода затвор-исток достигает сотен мегаом.

Схема включения полевого транзистора с общим стоком (истоковый повторитель, Рис. 9.6, б) является аналогом схемы с общим коллектором для биполярного транзистора. Такое включение используется в согласующих каскадах, где выходное напряжение должно находиться в фазе с входным.

Схема с общим затвором (Рис. 9.6, в) аналогична схеме с общей базой у биполярных транзисторов.

Полевой транзистор, так же как и биполярный транзистор, можно представить в виде линейного четырехполюсника. Наличие большого входного сопротивления у полевых транзисторов позволяет ввести описание с помощью  $Y$ -параметров. За независимые переменные принимаются входной ток  $I_1$  и выходной ток  $I_2$ , а за зависимые - входное напряжение  $U_1$  и выходное напряжение  $U_2$ .

$$I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2$$

$$I_2 = Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2$$

Для схемы с ОИ в качестве независимых переменных принимают  $U_{зи}$  и  $U_{си}$ , а зависимые величины –  $I_3$ ,  $I_c$ , тогда транзистор описывается следующей системой уравнений:

Откуда  $Y$ -параметры для схем с ОИ будут определяться следующим образом:

Таблица 9.1

Параметр	Формула	Единицы измерения	Физический смысл
$Y_{11}$	$\left. \frac{\Delta I_3}{\Delta U_{зи}} \right _{U_{си}=\text{const}}$	См	Входная проводимость
$Y_{12}$	$\left. \frac{\Delta I_3}{\Delta U_{си}} \right _{U_{зи}=\text{const}}$	См	Проводимость обратной связи

$Y_{21}(S)$	$\left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \right _{U_{си}=\text{const}}$	См	Проводимость прямой передачи (крутизна характеристики), определяет наклон данной характеристики в любой точке
$Y_{22}$	$\left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{си}} \right _{U_{зи}=\text{const}}$	См	Выходная проводимость. На практике часто используют обратную величину.

В настоящее время полевые транзисторы вытесняют биполярные в ряде применений:

- Управляющая цепь полевых транзисторов потребляет ничтожную энергию, т.к. входное сопротивление этих приборов очень велико (единицы и десятки ГОм и более). Обычно такие усилители используются как первые каскады предварительных усилителей, усилителей постоянного тока измерительной и другой радиоэлектронной аппаратуры.
- Как правило, усиление мощности в МДП- транзисторах больше, чем в биполярных, поскольку **коэффициент передачи по току полевых транзисторов стремится к бесконечности.**
- Управляющая цепь изолирована от выходной цепи, поэтому значительно повышаются надежность работы и помехоустойчивость схем на МДП-транзисторах.
- МДП-транзисторы имеют низкий уровень собственных шумов, что связано с отсутствием инжекции носителей заряда.
- Полевые транзисторы обладают более высоким быстродействием, т.к. в них нет инерционных процессов накопления и рассасывания носителей заряда.

Полевые транзисторы также имеют ряд недостатков:

- На частотах выше 1,5 ГГц, потребление энергии у МДП-транзисторов начинает возрастать по экспоненте, что ограничивает их использование на сверхвысоких частотах.

- Структура полевых транзисторов начинает разрушаться при меньшей температуре ( $150^{\circ}\text{C}$ ), чем структура биполярных транзисторов ( $200^{\circ}\text{C}$ ).
- Полевые транзисторы **чувствительны к статическому электричеству**. Поскольку изоляционный слой диэлектрика на затворе чрезвычайно тонкий, иногда даже относительно невысокого напряжения бывает достаточно, чтоб его разрушить.

### Порядок выполнения экспериментов

- Для исследования статических характеристик полевого транзистора соберите цепь (Рис. 9.7). Диод типа КД226 включен в схему для предотвращения подачи отрицательного напряжения на транзистор при снятии выходных характеристик,  $R_{\text{п}} = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_1 = 1 \text{ Мом}$ .

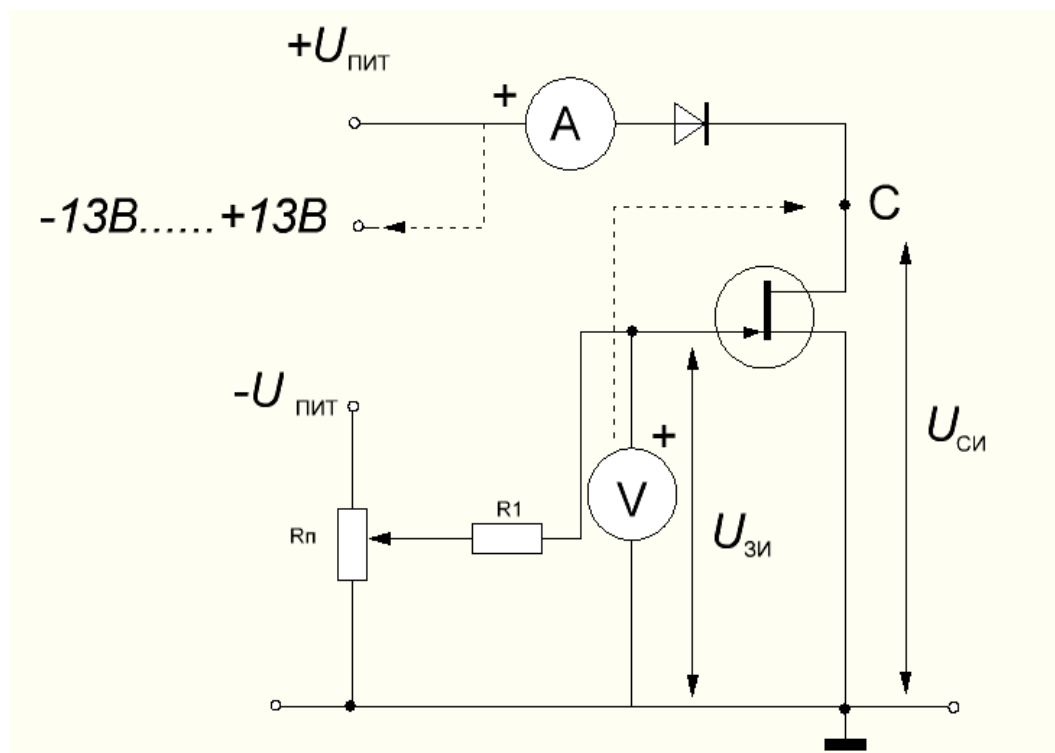


Рис. 9.7

- Включите блок генераторов напряжений и мультиметры. Регулируя напряжение на затворе потенциометром, определите начальный ток стока (при  $U_{\text{зи}}=0$ ) напряжение отсечки (при  $I_{\text{с}}=0$ ).

$$I_{\text{нач}} = \dots\dots\dots \text{мА}; \quad U_{\text{отс}} = \dots\dots\dots \text{В}.$$

- Изменяя напряжение на затворе потенциометром от нуля до напряжения отсечки, снимите стоко-затворную характеристику

Таблица 9.2

$U_{зи}, \text{В}$	0	-1	-2	-3	-3.5
$I_c, \text{мА}$					

- Для снятия выходных характеристик транзистора переключите питание на регулируемый источник постоянного напряжения  $-13...+13 \text{ В}$ , как показано на схеме пунктиром, установите напряжение на затворе равным нулю и переключите вольтметр для измерения напряжения  $U_{си}$  в точку С.
- Регулируя напряжение питания от 0 до максимального значения ( $13...14 \text{ В}$ ), снимите зависимость  $I_c(U_{си})$  при  $U_{зи} = 0$  (таблица 4.3)
- Переключите снова вольтметр для измерения напряжения  $U_{зи}$ , установите потенциометром  $U_{зи} = -1 \text{ В}$ , переключите вольтметр обратно для измерения напряжения  $U_{си}$  и снимите зависимость ( $U_{си}$ ) при  $U_{зи} = -1 \text{ В}$ .
- Аналогично снимите выходные характеристики при других значениях  $U_{зи}$ .

Таблица 9.3

$U_{си}, \text{В}$		0	0,5	1	1,5	2	3	4	6	8	12	13
$I_c$ мА	при $U_{зи}=0$ В											
	при $U_{зи}=-1$ В											
	при $U_{зи}=-2$ В											
	при $U_{зи}=-3$ В											

- В отчете необходимо построить графики выходных и стоко-затворной характеристик и определить крутизну  $S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$

## *Исследование усилительных свойств каскадов на базе полевых транзисторов*

- Соберите на наборном поле цепь усилительного каскада с ОИ (Рис. 9.8). Для управления напряжением смещения замените потенциометр на 10 кОм. Последовательно с источником переменного сигнала и на выходе включены конденсаторы для развязки цепей постоянного и переменного тока. На входе между точками А и В включена перемычка для подключения добавочного сопротивления  $R_{доб}$ . Измерение входного и выходного напряжений осуществляется осциллографом и двумя мультиметрами. Один канал осциллографа подключается к точке А, второй к точке С (стоку полевого транзистора). Номиналы элементов представлены в таблице 9.4.

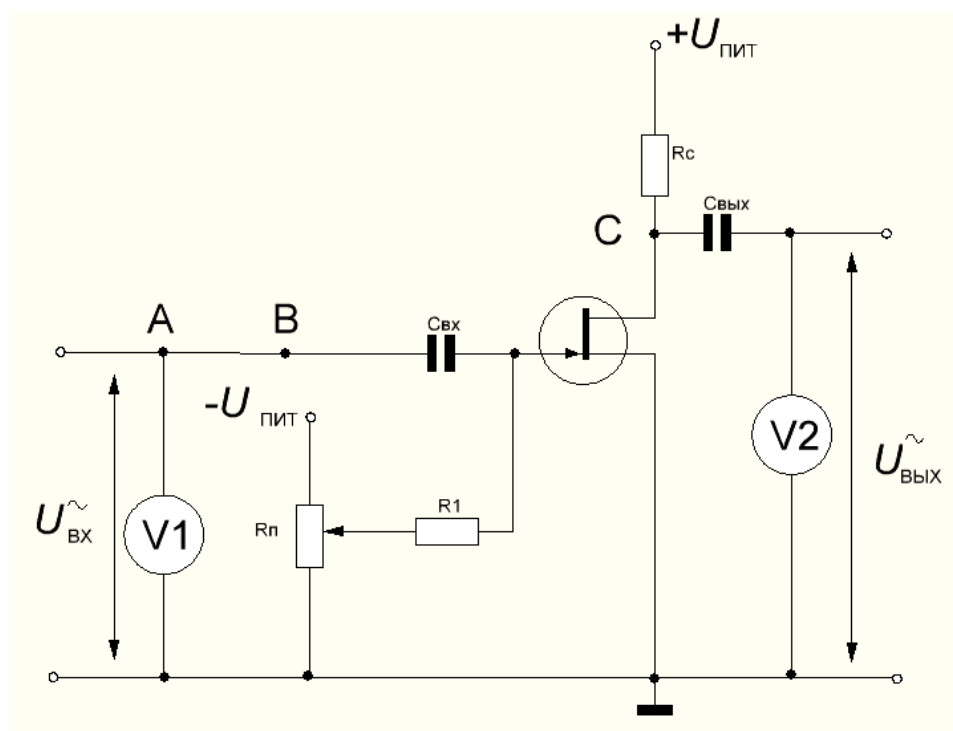


Рис. 9.8

Таблица 9.4

Элемент	R1	Rп	Rc	Cвх	Cвых
Номинал	1 МОм	10 кОм	4,7 кОм	0,22 мкФ	0,47 мкФ

- Включите блок генераторов напряжений и установите частоту синусоидального напряжения 1 кГц, регулируя его амплитуду, установите на входе максимальный сигнал, соответствующий неискажённому напряжению на выходе. При необходимости уточните положение точки покоя.
- Осциллограф должен быть настроен для наблюдения по двум каналам одновременно (канал I – 5 В/дел., канал II – 0,5 В/дел.).
- Мультиметры должны быть включены для измерения переменных напряжений.
- Запишите в таблицу 9.5 входное и выходное напряжения и определите коэффициент усиления по напряжению.

Таблица 9.5

	Схема с ОИ	Схема с ОС	Схема с ОЗ
$U_{ВХ}$ , В			
$U_{ВЫХ}$ , В			
$U_{ВЫХ1}$ , В	(при $R_H=10$ кОм)	(при $R_H=22$ кОм)	(при $R_H=22$ кОм)
$U_{ВЫХ2}$ , В	(при $R_{доб}=100$ кОм)	(при $R_{доб}=100$ кОм)	(при $R_{доб}=22$ Ом)
$k_U$			
$R_{ВЫХ}$ , кОм			
$R_{ВХ}$ , кОм			

- Для определения выходного сопротивления подключите к выходу (параллельно вольтметру V2) нагрузочное сопротивление  $R_H = 10$  кОм. При этом напряжение на выходе уменьшится от  $U_{ВЫХ}$ , которое уже записано в таблицу 9.5, до  $U_{ВЫХ1}$ . Запишите это значение также в таблицу и вычислите выходное сопротивление по формуле:

$$R_{ВЫХ} = R_H \left( \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ1}} - 1 \right).$$

- Уберите нагрузочное сопротивление, а для определения входного сопротивления включите добавочное сопротивление  $R_{доб}$  (100 кОм) во входную цепь (вместо перемычки АВ). При этом напряжение на выходе уменьшится от  $U_{ВЫХ}$  до  $U_{ВЫХ2}$ . Запишите это значение также в табл. и вычислите входное сопротивление по формуле:



$$R_{BX} = \frac{R_{ДОБ}}{\left( \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ2}} - 1 \right)}.$$

- Теперь соберите цепь усилительного каскада с ОС (Рис. 4.9). Номиналы элементов представлены в таблице 9.6.

Таблица 9.6

Элемент	R1	Rп	Rи	Cвх	Cвых
Номинал	1 МОм	10 кОм	10 кОм	0,22 мкФ	0,47 мкФ

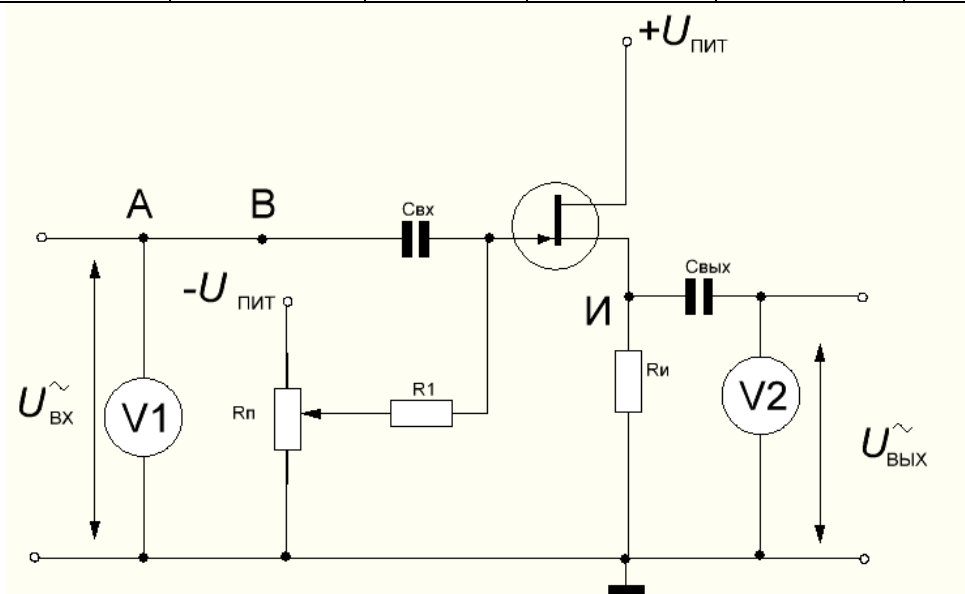


Рис. 9.9

- Установите усиление осциллографа по каналу I – 5 В/дел., канал II – тоже 5 В/дел).
- Снова подайте на вход синусоидальное напряжение, соответствующее максимальному неискажённому напряжению на выходе, отрегулировав предварительно точку покоя потенциометром.
- Прodelайте все те же опыты, что и в схеме сообщим эмиттером, и заполните второй столбец таблицы 9.5.
- Прodelайте аналогичные опыты в схеме усилителя с ОЗ (Рис. 4.10) и сравните результаты. Номиналы элементов представлены в таблице 9.7.

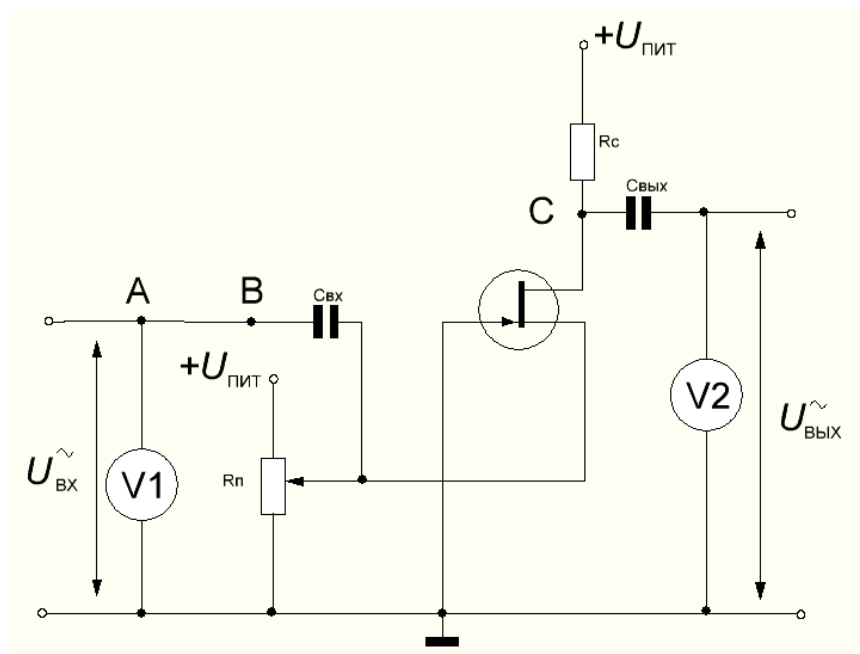


Рис. 9.10

Таблица 9.7

Элемент	$R_P$	$R_C$	$C_{BX}$	$C_{ВЫХ}$
Номинал	10 кОм	4,7 кОм	10 мкФ	0,47 мкФ

➤ **Основные понятия:** полевой транзистор, сток, исток, затвор, встроенный канал, индуцированный канал, крутизна,  $Y$ -параметры.

Вопросы для допуска к выполнению и защиты лабораторной работы:

1. Перечислите виды полевых транзисторов и нарисуйте их УГО.
2. Почему полевые транзисторы также называются униполярными?
3. Нарисуйте статические характеристики полевых транзисторов с управляющим  $p$ - $n$ -переходом.
4. Какой из трёх усилителей инвертирует входной сигнал?
5. Почему усилитель с общим стоком не имеет такой же значимости, как усилитель с общим коллектором на биполярном транзисторе?
6. В каких отношениях усилитель с общим затвором отличается от усилителя с общим истоком?
7. Что такое крутизна полевого транзистора?
8. Объясните физический смысл  $Y$ -параметров.

9. Объясните, как были получены формулы для определения входного и выходного сопротивлений.
10. Сравните полевые и биполярные транзисторы, какие достоинства и недостатки имеют полевые транзисторы?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9 «ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХТАКТНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ»**

*Цель работы* – ознакомление с принципами работы двухтактного усилителя мощности на биполярных транзисторах.

*Задачи:*

- Проанализировать принципы работы парафазного усилителя мощности, определить основные характеристики и оценить уровень нелинейных искажений.

### **Основные теоретические положения**

Поскольку характеристики транзистора существенно нелинейны, в процессе усиления входного сигнала имеют место искажения, которые называют нелинейными. Величина искажений в большой степени зависит от выбора начальной рабочей точки на линии нагрузки и от амплитуды входного сигнала. В зависимости от этого различают следующие основные режимы работы усилителя:

- режим класса *A* ;
- режим класса *B* ;
- режим класса *AB* ;
- режим класса *C* ;
- режим класса *D* .

Количественно режим работы усилителя характеризуется углом отсечки  $\alpha$  – половиной той части периода входного сигнала, в течение которого в выходной цепи транзистора протекает ток нагрузки. Угол отсечки выражают в градусах или радианах.

### **Режим класса *A***

Начальная рабочая точка, находится в середине линейного участка входной характеристики, а, следовательно, и характеристики передачи по току. Амплитуда входного сигнала здесь такова, не имеет отрицательных значений, а поэтому базовый ток  $i_b$ , и коллекторный ток  $i_k$  нигде не имеют нулевых значений (Рис. 10.1). Ток в выходной цепи протекает в течение всего периода, а угол отсечки  $\theta$  равен  $180^\circ$ .

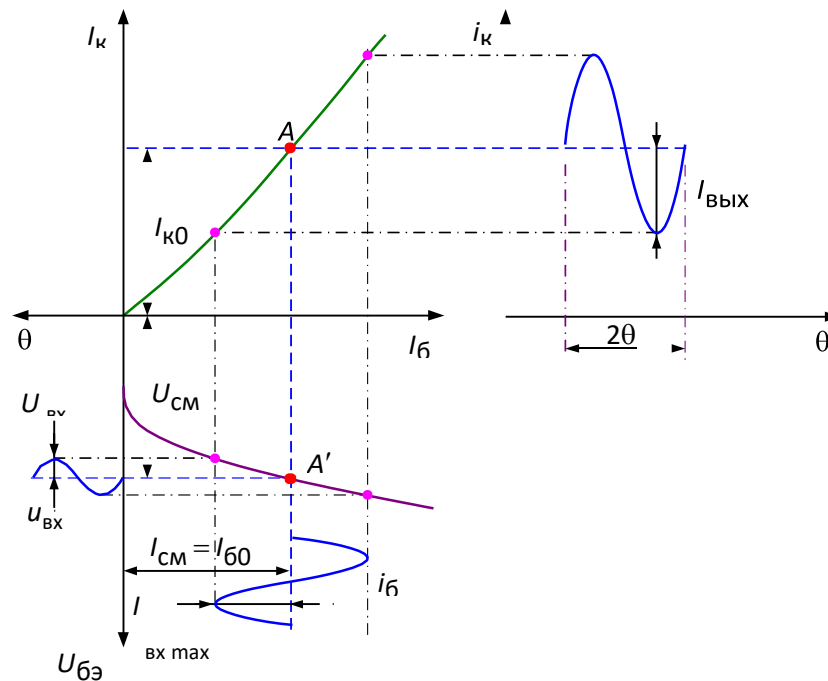


Рис. 10.1

Транзистор работает в активном режиме на близких к линейным участках характеристик, поэтому искажения усиленного сигнала здесь минимальны. Однако из-за большого значения начального коллекторного тока  $I_{k0}$  КПД такого усилителя низкий, теоретически не более 25 %.

### Режим класса В

Начальная рабочая точка находится в начале характеристики передачи по току (Рис. 10.2). Ток нагрузки протекает по коллекторной цепи транзистора только в течение одного полупериода входного сигнала, а в течение второго полупериода транзистор закрыт, так как его рабочая точка будет находиться в зоне отсечки. КПД усилителя в режиме класса В значительно выше (составляет 60...70%), чем в режиме класса А, так как начальный коллекторный ток  $I_{k0}$  равен нулю.

Угол отсечки  $\theta$  равен  $90^\circ$ . Однако у усилителей класса В есть и существенный недостаток – большой уровень нелинейных искажений (колоколообразные искажения), вызванные повышенной нелинейностью усиления транзисторов.

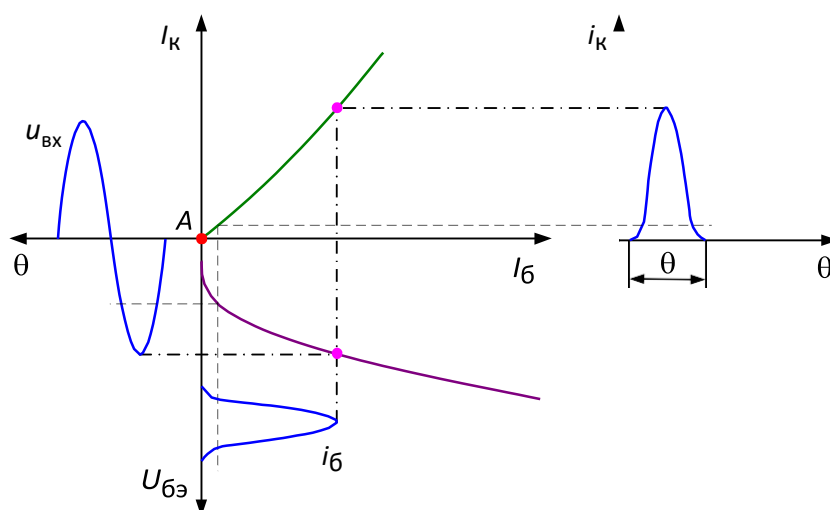


Рис. 10.2

Для передачи значительного тока и мощности в нагрузку выходные каскады усилителей, как правило, работают в классе В, т. е. каждая полуволна синусоиды формируется своим транзистором. Простой и часто используемый эмиттерный повторитель на комплементарных транзисторах показан на рис. 10.3 а. В результате передаточная характеристика каскада имеет излом в области малого входного сигнала (Рис. 10.3 в). При индуктивной и ёмкостной нагрузке искажения смещаются в область максимального выходного напряжения.

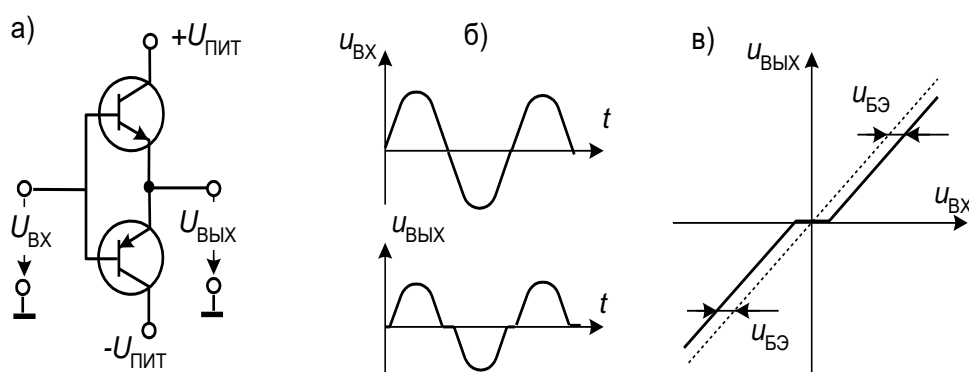


Рис. 5.3

Исключить или уменьшить эти искажения можно, выбрав точку покоя транзисторов в области активного усиления вблизи зоны отсечки. Тогда при нулевом входном сигнале оба транзистора будут слегка приоткрыты, потребляя некоторый незначительный ток от источника. Один из возможных способов реализации этого решения исследуется в лабораторной работе. В этой схеме между базами включены два диода, падение напряжения на которых компенсирует потенциальные барьеры эмиттер – база двух транзисторов. Кроме того, в этой схеме в цепь коллектора каждого

транзистора включено небольшое сопротивление, создающее отрицательную обратную связь для компенсации температурной неустойчивости характеристик транзисторов.

### Режим класса *AB*

Режиму усиления класса *AB* соответствует режим работы усилительного каскада, при котором ток в выходной цепи протекает больше половины периода изменения напряжения входного сигнала. Этот режим используется для уменьшения нелинейных искажений усиливаемого сигнала, которые возникают из-за нелинейности начальных участков входных ВАХ транзисторов (Рис. 10.3).

При отсутствии входного сигнала в режиме покоя транзистор немного приоткрыт и через него протекает ток, составляющий 10-15% от максимального тока при заданном входном сигнале. Угол отсечки в этом случае составляет  $120-130^\circ$ . При работе двухтактных усилительных каскадов в режиме класса *AB* происходит перекрытие положительной и отрицательной полуволн тока плеч двухтактного каскада, что приводит к компенсации нелинейных искажений, возникающих за счет нелинейности начальных участков ВАХ транзисторов.

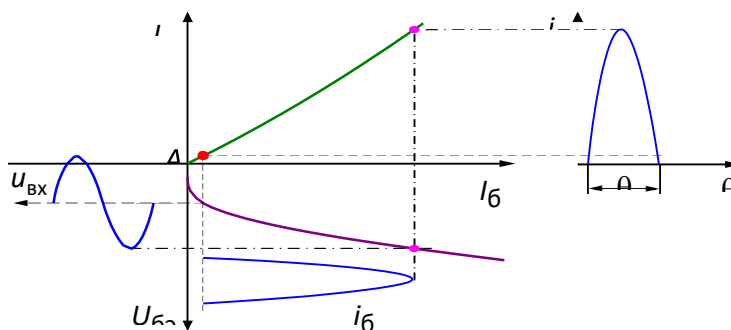


Рис. 10.3

Чем ближе работа усилительного каскада к классу А (чем больше угол отсечки), тем меньше КПД, но лучше линейность усиления. КПД каскадов при таком классе усиления выше, чем для класса А, но меньше, чем в классе В, за счет наличия малого коллекторного тока  $I_{k0}$ .

### Режим класса *C*

В режиме класса *C* рабочая точка А располагается выше начальной точки характеристики передачи по току (Рис. 10.4). Здесь ток коллекторной цепи протекает в течение времени, которое меньше половины периода входного сигнала, поэтому угол отсечки  $90^\circ$ . Поскольку больше половины рабочего времени транзистор закрыт (коллекторный ток равен нулю),

мощность, потребляемая от источника питания, снижается, так что КПД каскада приближается к 100%. Из-за больших нелинейных искажений режим класса *C* не используется в усилителях звуковой частоты, этот режим нашел применение в мощных резонансных усилителях (например, радиопередатчиках).

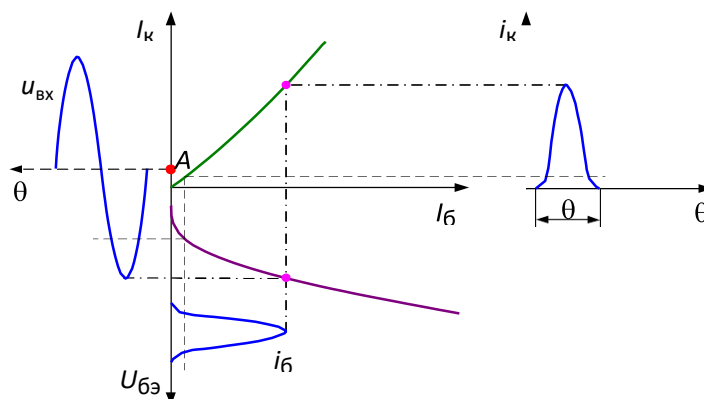


Рис. 10.4

### Режим класса *D*

Иначе этот режим называется *ключевым* режимом. В этом режиме рабочая точка может находиться только в двух возможных положениях: либо в зоне отсечки (транзистор заперт и его можно рассматривать как разомкнутый ключ), либо в зоне насыщения (транзистор полностью открыт и его можно рассматривать как замкнутый ключ). В активной зоне рабочая точка находится только в течение короткого промежутка времени, необходимого для перехода её из одной зоны в другую.

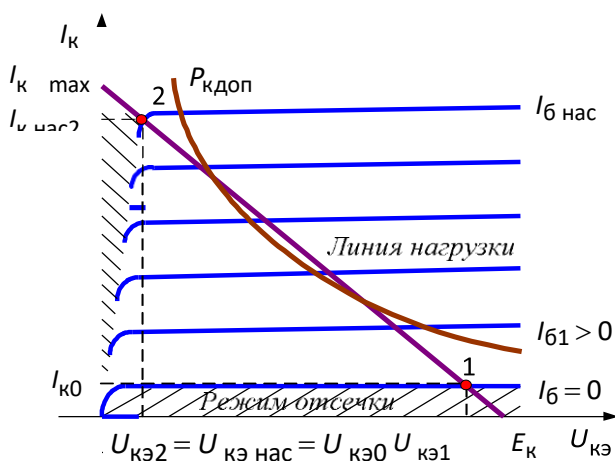


Рис. 10.5

Поэтому при работе в ключевом режиме линия нагрузки может на среднем своем участке выходить за пределы гиперболы допустимых мощностей, при условии, что переход транзистора из закрытого состояния в

открытое и наоборот производится достаточно быстро.

В ключевом режиме КПД близок к 100 %. Основные сравнительные характеристики классов усиления представлены в таблице 10.1.

Таблица 10.1

Режим класса	Угол отсечки, °	КПД, %	Уровень нелинейных искажений
A	180	$\approx 25$	минимальный
B	90	60-70	большой
AB	120-130	50-60	средний
C	90	$\approx 100$	большой
D	90	$\approx 100$	-

### Порядок выполнения экспериментов

- Соберите цепь двухтактного усилителя (Рис. 10.6). Номиналы элементов представлены в таблице 5.2. Используйте выпрямительные диоды типа КД226.

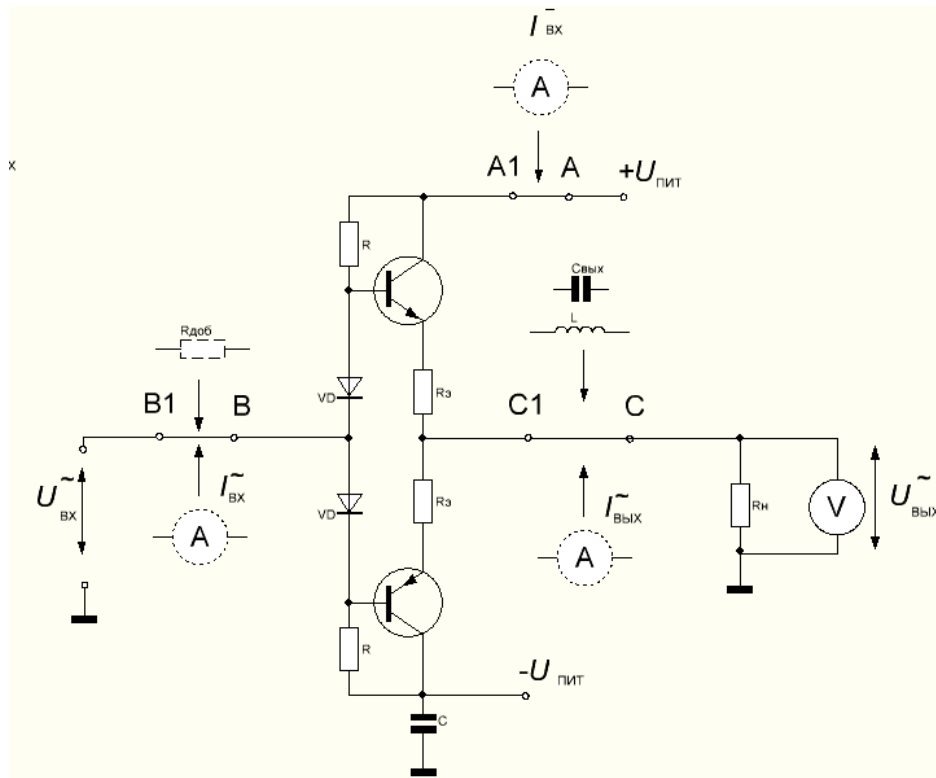


Рис. 10.6



Таблица 10.2

Элемент	R	$R_3$	$R_H$	C	$C_{\text{вых}}$	L	$R_{\text{доб}}$
Номинал	4,7 кОм	10 Ом	220 Ом	0,47 мкФ	1 мкФ	33 мГн	1 кОм

- В случае появления искажений подключите конденсатор 0,47 мкФ к источнику питания +15 В или -15 В. Один канал осциллографа подключите на вход, другой – на выход.
- Включите генератор, установите частоту 1 кГц, убедитесь, что усилитель работает (наличие сигнала на входе и выходе), и установите **максимальную амплитуду** сигнала.
- Прделайте измерения всех величин, указанных в таблице 10.3 при **активной нагрузке и максимальной амплитуде сигнала** на частоте 1 кГц. Рассчитайте основные характеристики усилителя.
  - Добавочное сопротивление  $R_{\text{доб}}$  включается в цепь входного сигнала последовательно с генератором (точки В-В1)
  - Входной ток  $I_{\text{ВХ}}$  измеряется путем подключения амперметра вместо  $R_{\text{доб}}$  (точки В-В1)
  - Ток источника питания  $I_{\text{ВХ}}$  измеряется путем подключения амперметра в цепь питания источника постоянного напряжения +15В или -15 В (точки А-А1)
  - Ёмкостная и индуктивная нагрузки подключаются последовательно с сопротивлением  $R_H$  (точки С-С1).

Таблица 10.3

Измеренная или рассчитанная величина	Обозначение	Формула	Результат
Входное напряжение	$U_{\text{ВХ}}$ , В	-	
Вых. напр. при $R_H=220$ Ом (норм. режим)	$U_H$ , В	-	
Вых. напр. при ХХ ( $R_H \rightarrow \infty$ )	$U_{\text{ХХ}}$ , В	-	
Вых. напр. при $R_H=220$ Ом и $R_{\text{доб}}=1$ кОм	$U_{H1}$ , В	-	

Входной ток (норм. режим)	$I_{BX} \sim$ , мА	-	
Ток источника питания ( $I_{ист}$ ) +15В или -15 В	$I_{BX}^-$ , мА	-	
Ток нагрузки ( $I_{вых} \sim$ , норм. режим)	$I_H$ , мА	-	
Коэффициент усиления напряжения	$k_U$	$U_H/U_{BX}$	
Коэффициент усиления тока	$K_I$	$I_H/I_{BX}$	
Коэффициент усиления мощности	$K_P$	$k_U \cdot K_I$	
Мощность нагрузки	$P_H$ , мВт	$U_H \cdot I_H$ ,	
Мощность источников питания $\pm 15В$	$P_{ист}$ , мВт	$30 \cdot I_{ист}$	
Коэффициент полезного действия	КПД	$P_H/P_{ист}$	
Выходное сопротивление	$R_{вых}$	$(U_{xx}/U_H - 1) \cdot R_H$	
Входное сопротивление	$R_{BX}$	$R_{доб}/(U_H/U_{H1} - 1)$	

- Перерисуйте **осциллограммы** входного и выходного сигналов при активной (резистивной) нагрузке (Рис. 10.7 а), указав масштабы.
- Переключите осциллограф в режим X-Y и перерисуйте **передаточную характеристику** (Рис. 10.7 б.). Проанализируйте зависимость формы передаточной характеристики от частоты и амплитуды сигнала.
- Исключите из схемы диоды, соединив проводом базы транзисторов и подав входной сигнал непосредственно на базы. Убедитесь, что в выходном сигнале появились специфические искажения.
- Перерисуйте осциллограммы входного и выходного сигналов при активной (резистивной) нагрузке (Рис. 10.7 а), указав масштабы.
- Переключите осциллограф в режим X-Y и перерисуйте передаточную характеристику (Рис. 10.7 б.). Проанализируйте зависимость формы передаточной характеристики от частоты и амплитуды сигнала.

- Проверьте, как видоизменяются эти искажения при подключении сначала для активно-ёмкостной нагрузки, а затем для активно-индуктивной. Для этого сначала включите последовательно с нагрузкой 220 Ом ёмкость 1 мкФ, а затем индуктивность 33 мГн.

Масштабы:		По каналу X: $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$								По каналу Y: $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$								По времени: $m_t = \dots\dots\dots \text{мс/дел.}$									
а)																		б)									

Рис. 10.7

➤ **Основные понятия:** парафазный усилитель мощности, класс усиления, угол отсечки, КПД, нелинейные искажения, комплементарная пара транзисторов, ключевой режим.

Вопросы для допуска к выполнению и защиты лабораторной работы:

1. Почему двухтактный усилитель мощности имеет название парафазный усилитель мощности?
2. Перечислите классы усиления усилительных элементов и охарактеризуйте их особенности (КПД, уровень нелинейных искажений, положение рабочей точки, иллюстрация на графиках)
3. Что такое комплементарная пара транзисторов?
4. В чём заключаются преимущества двухтактного усилительного каскада?
5. Как действует обратная связь в цепи эмиттера?
6. Какие есть ещё двухтактные схемы?
7. Как влияет вид нагрузки (индуктивная, резистивная) на вид выходного сигнала?
8. На что влияет наличие в схеме диодов?
9. Для чего в цепи коллектора находится сопротивление 10 Ом?
10. Выведите формулы для определения входного и выходного сопротивлений.

## Требования к оформлению отчета

Отчет должен быть выполнен в печатном виде согласно шаблону по оформлению отчета по лабораторной работе, размещенному на сайте СПбГЭТУ «ЛЭТИ»: <https://etu.ru/ru/studentam/dokumenty-dlya-ucheby/>

и ГОСТ 7.32-2017 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления» с поправками от 2018 года.

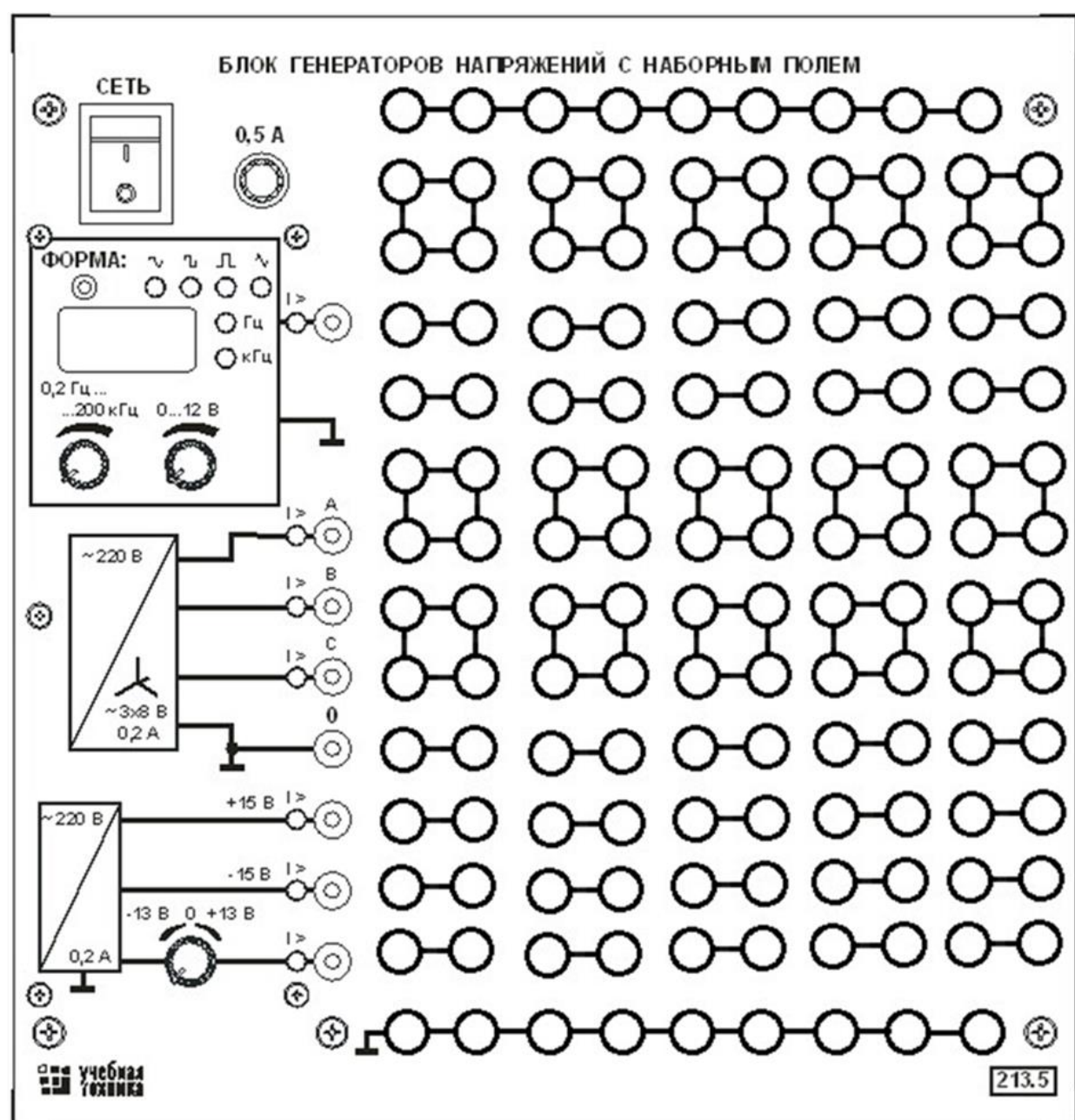
Подготовка к выполнению включает в себя:

- титульный лист, оформленный согласно шаблону;
- основные теоретические сведения, которые являются отражением подготовки студента к лабораторной работе, а не только скопированными сведениями из методических указаний (1-2 страницы). В разделе может быть приведено описание исследуемых физических явлений (с иллюстрациями), основные теоретические положения (в том числе – математический аппарат, описывающий исследуемые явления), схемы измерений, сведения об используемом при проведении работы лабораторном оборудовании. В данном разделе студенты должны привести цель выполнения работы, основные сведения об изучаемых объектах (транзистор, усилитель и т.д.): условно-графические обозначения, принципы работы, физические явления, которые лежат в основе функционирования, схемы включения, области применения, основные характеристики (ВАХ и т.д.). Объем раздела 1-2 страницы.
- протокол наблюдений, содержащий название лабораторной работы, а также таблицы занесения измеренных значений и иные сведения, которые описаны в методических указаниях, ФИО всех студентов, выполняющих лабораторную работу в рамках бригады и ФИО преподавателей;
- схемы размещения элементов на наборном поле;

Отчет должен содержать:

- подготовку к выполнению лабораторной работы;
- обработку экспериментальных данных. Структура обработки экспериментальных данных обязательно включает в себя схему измерений, соответствующие ей таблицы, графики, расчеты и выводы;

- общий вывод к лабораторной работе, который содержит анализ полученных результатов, их достоверность, сходимость с теоретическими данными. В выводе не должны присутствовать формулы, рисунки или таблицы. Объем вывода должен составлять не менее половины страницы.



## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника и микропроцессорная техника. М.: Высшая школа, 2005.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Т.1, М.: Додека-XXI, 2008.
3. Прянишников В.А. Электроника. Полный курс лекций. СПб.: КОРОНА-Век, 2009.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Мир, М.: 2003.
5. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. Учебн. Пособие для вузов. СПб: Питер, 2003.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКТА ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	3
1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ» .....	9
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ» .....	20
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ» .....	30
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 «ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДА С ПЕРЕМЕННОЙ ЁМКОСТЬЮ (ВАРИКАПА)» .....	37
5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ - АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРОВ» .....	42
6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «СНЯТИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ» .....	48
7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. «СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОДИНОЧНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ» .....	59
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 «ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ОДИНОЧНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ» .....	69
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9 «ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХТАКТНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ» .....	83
Требования к оформлению отчета .....	92
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	95

**Дурукан Ясемин**  
**Сидоренко Ирина Геннадьевна**  
**Шевелько Михаил Михайлович**

**ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ:**  
**лабораторный практикум**

**Редактор**

---

**Подписано в печать 00.00.00. Формат 60×84 1/16.**  
**Бумага офсетная. Печать цифровая. Печ. Л. 0,0.**  
**Гарнитура «Times NEW Roman». Тираж 000 экз. Заказ 000.**

---

**Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**  
**197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5**