

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Кафедра электротехники и электроэнергетики

# Полупроводниковые приборы силовой и информационной электроники

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине  
«Информационно-измерительная техника и электроника»

Составители  
В. И. Афонин  
Г. П. Колесник  
В. А. Шахнин



Владимир 2012

УДК 621.382

ББК 32.85

П54

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры  
приборостроения и информационно-измерительных технологий  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
*В.С. Грибакин*

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

**Полупроводниковые** приборы силовой и информационной электроники : метод. указания к лаборатор. работам по дисциплине П54 «Информационно-измерительная техника и электроника» / Владим. гос. ун-т имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; сост. : В. И. Афонин, Г. П. Колесник, В. А. Шахнин. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2012. – 134 с.

Содержат описание десяти лабораторных работ, в каждой из которых приведены цель, объект и средства исследования, рабочее задание, методические указания и контрольные вопросы.

Предназначены для студентов 3 – 4-х курсов направления 140400 – электроэнергетика и электротехника всех форм обучения.

Рекомендованы для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС 3-го поколения.

Табл. 43. Ил. 150. Библиогр.: 12 назв.

УДК 621.382

ББК 32.85

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТАХ И СРЕДСТВАХ ИССЛЕДОВАНИЯ. СОСТАВ СТЕНДА .....	6
1. Блок генераторов напряжений .....	6
2. Наборная панель .....	8
3. Набор миниблоков по теории электрических цепей и основам электроники .....	9
4. Блок мультиметров .....	10
5. Коннектор .....	11
6. Порядок работы с виртуальными амперметрами и вольтметрами .....	12
7. Измерение сопротивлений, мощностей и углов сдвига фаз с помощью виртуальных приборов .....	15
8. Виртуальный осциллограф .....	17
9. Виртуальный псевдоаналоговый прибор .....	19
10. Виртуальный прибор «Интегратор» .....	20
11. Виртуальный конденсатор .....	20
12. Виртуальный прибор «Ключ» .....	21
13. Применение виртуальных приборов при экспериментальных исследованиях .....	21
14. Условные обозначения элементов электрических цепей .....	23
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ .....	25
Лабораторная работа № 1. Исследование выпрямительных полупроводниковых диодов и выпрямительных устройств на их основе .....	25
Лабораторная работа № 2. Исследование параметрического стабилизатора напряжения .....	36
Лабораторная работа № 3. Неуправляемый выпрямитель трехфазного тока .....	45
Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик биполярного транзистора .....	55
Лабораторная работа № 5. Исследование характеристик униполярного (полевого) транзистора .....	67

Лабораторная работа № 6. Исследование схем усилителей на биполярных транзисторах .....	79
Лабораторная работа № 7. Исследование характеристик полупроводниковых диодов с особыми свойствами .....	88
Лабораторная работа № 8. Исследование характеристик тиристоров.....	98
Лабораторная работа № 9. Логические элементы .....	109
Лабораторная работа № 10. Операционные усилители .....	115
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	132

## ВВЕДЕНИЕ

При выполнении лабораторных работ студенты приобретают навыки проведения эксперимента, совершенствуют работу с измерительными приборами, учатся читать электрические и собирать соответствующие им монтажные схемы, обрабатывать результаты эксперимента.

Перед выполнением курса лабораторных работ по дисциплине «Информационно-измерительная техника и электроника» каждый студент обязан изучить правила техники безопасности и расписаться в журнале, который находится в лаборатории. Лабораторные работы выполняют бригады из 2-3 студентов. Во время выполнения задания каждая бригада заносит в бланк отчета результаты в соответствии с требованиями пп. 2, 3 лабораторной работы, а также все необходимые рисунки, графики и таблицы.

Перед выполнением лабораторной работы каждый студент должен получить у преподавателя допуск к работе, который включает в себя проверку выполнения домашней подготовки (см. п. 2 к лаборатор. работам). Студентам, допущенным к занятиям, дается разрешение на сборку схемы и включение стенда. Студенты, не подготовившиеся к занятиям, к выполнению работы не допускаются. Если студент имеет задолженность по двум незащищенным работам, то к выполнению следующей лабораторной работы он также не допускается.

После выполнения лабораторной работы бригада студентов подписывает у преподавателя результаты опытов, затем разбирает схему и приводит стенд в порядок. Студенты, выполнившие, оформившие и защитившие работу в день выполнения, предъявляют один отчет на бригаду. При защите в последующие дни отчет оформляется каждым членом бригады.

Отчеты по лабораторным работам должны быть выполнены аккуратно на листах формата А4 писчей бумаги в соответствии со стандартом предприятия СТП 71.4-84. Все электрические схемы, графики и таблицы должны быть выполнены при помощи чертежных инструментов или на компьютере. Причем все графики выполняют только на миллиметровой бумаге (или на листах формата А4 с отображением координатной сетки). Обозначения в электрических схемах должны соответствовать ГОСТ 2.105-95, ГОСТ 2.702-75 (Единая система конструкторской документации – ЕСКД), ГОСТ 2.747-68, ГОСТ 1494-77, ГОСТ 19880-74.

Отчет должен содержать:

- титульный лист с указанием кафедры, учебной группы, фамилии, имени, отчества студента, названия, номера и даты выполнения лабораторной работы;
- задание, схему соединений;
- письменные ответы на каждый вопрос п. 2 «Подготовка к работе», расчетные формулы с необходимыми вычислениями;
- таблицы измеренных и вычисленных величин;
- графики и диаграммы, краткие выводы.

## **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТАХ И СРЕДСТВАХ ИССЛЕДОВАНИЯ. СОСТАВ СТЕНДА**

Общая компоновка типового комплекта лабораторного оборудования стенда «Теоретические основы электротехники» показана на рис. 1. На лабораторном столе закреплена рама, в которой устанавливаются отдельные блоки. Расположение блоков жёстко не фиксировано. Оно может изменяться для удобства проведения того или иного конкретного эксперимента. Наборная панель, на которой собирается электрическая цепь из миниблоков, может устанавливаться и непосредственно на столе. В выдвижных ящиках хранятся наборы миниблоков и устройств, соединительные провода, перемычки и кабели, методические материалы. Ящики имеют встроенные замки.

### **1. Блок генераторов напряжений**

Лицевая панель блока генераторов напряжений показана на рис. 2. Генератор состоит из источника синусоидальных напряжений, генератора напряжений специальной формы и генератора постоянных напряжений. Все генераторы включаются и выключаются общим выключателем «СЕТЬ» и защищены от внутренних коротких замыканий плавким предохранителем с номинальным током 2 А. На лицевой панели блока генераторов напряжений указаны номинальные напряжение и ток каждого источника напряжения, а также диапазоны изменения регулируемых выходных величин. Все источники напряжений гальванически изолированы друг от друга и от корпуса блока и защищены от перегрузок и внешних коротких замыканий самовосстанавливающимися предохранителями с номинальным током 0,2 А. О срабатывании предохранителя свидетельствует индикатор «I >».

Генератор синусоидальных напряжений содержит однофазный источник напряжения 24 В (вторичная обмотка питающего трансформатора

220/24 В) и трёхфазный стабилизированный по амплитуде выходного напряжения преобразователь однофазного напряжения в трёхфазное. Выходное сопротивление трёхфазного источника в рабочем диапазоне токов близко к нулю.

Генератор напряжений специальной формы вырабатывает на выходе синусоидальный, прямоугольный двухполярный или прямоугольный однополярный сигналы в зависимости от положения переключателя «ФОРМА». Выходное сопротивление генератора в рабочем диапазоне токов также близко к нулю. Между гнездами «СИНХР» и «0 В» генератора при любом положении переключателя «ФОРМА» вырабатываются однополярные прямоугольные импульсы амплитудой 5 В, которые можно использовать для внешней синхронизации осциллографа. Частота сигнала регулируется десятиоборотным потенциометром «ЧАСТОТА» и не зависит как от формы и амплитуды сигнала, так и от тока нагрузки.

Генератор постоянных напряжений содержит три источника стабилизированного напряжения 15 В, гальванически изолированных друг от друга. Выходное напряжение одного из этих источников регулируется от 0 до 15 В десятиоборотным потенциометром. Выходные сопротивления этих источников также близки к нулю и все они допускают режим работы с обратным током (режим потребления энергии). Для получения постоянных напряжений больше 15 В они могут соединяться последовательно. Для исключения источников из собранной схемы цепи используются переключатели (тумблеры).

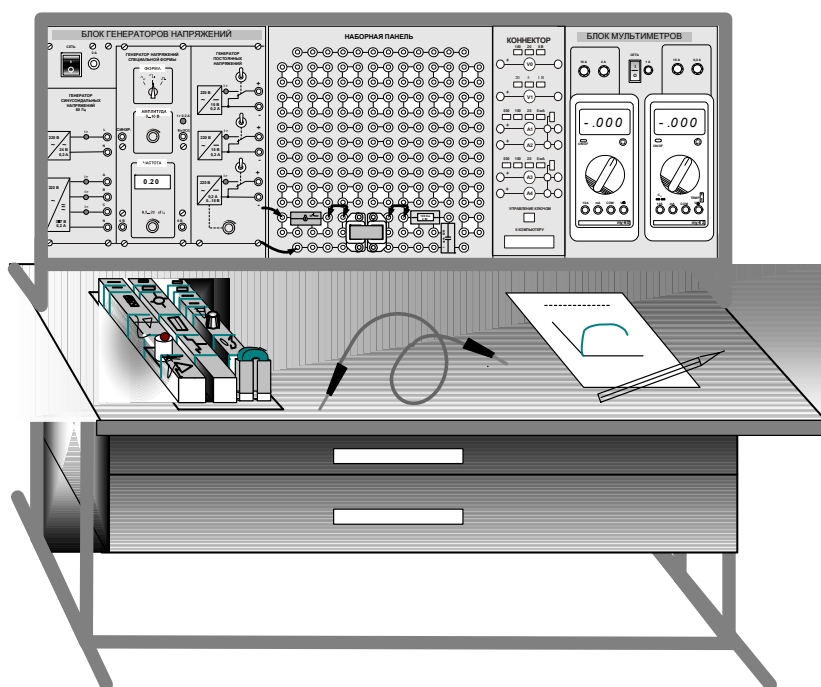


Рис. 1. Лабораторный стенд «Теоретические основы электротехники»

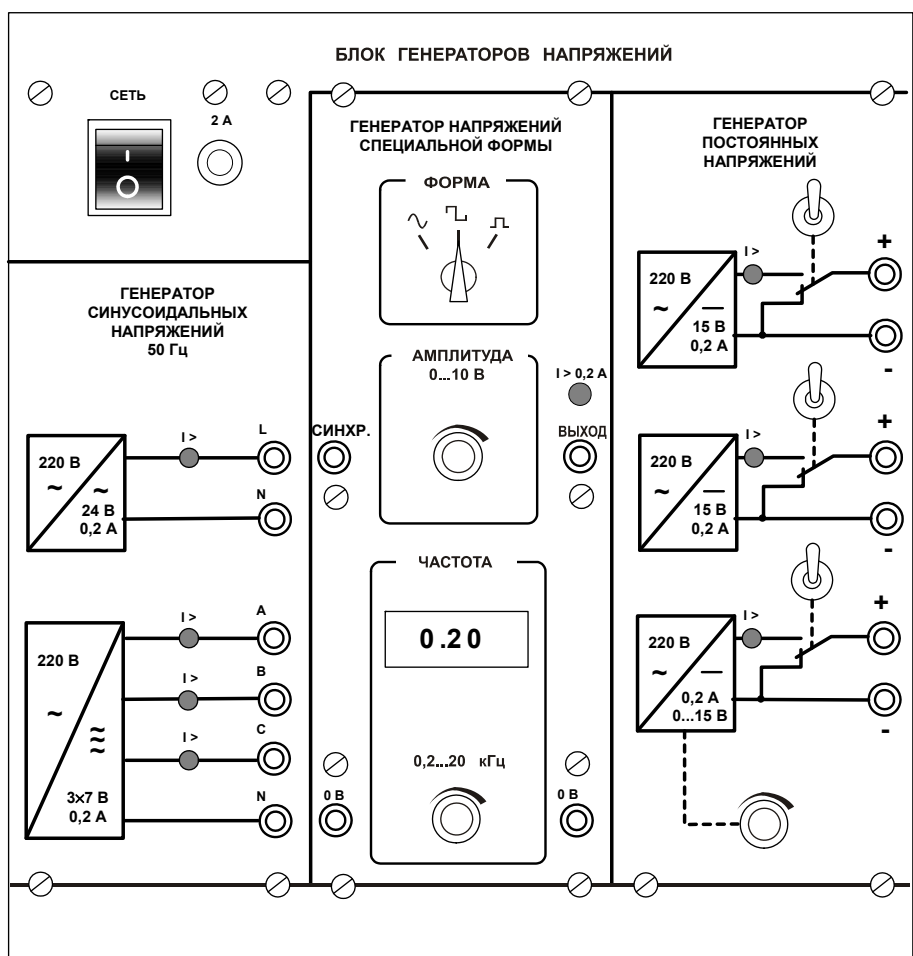


Рис. 2. Лицевая панель блока генераторов напряжений

## 2. Наборная панель

Наборная панель (рис. 3) служит для расположения на ней миниблоков в соответствии со схемой опыта. Гнёзда на наборной панели соединены в узлы, как показано на ней линиями. Поэтому часть соединений выполняется автоматически при установке миниблоков в гнёзда панели. Остальные соединения осуществляются соединительными проводами и перемычками. Так, на фрагменте цепи, показанной на рис. 3, напряжение подаётся проводами через выключатель к одной из обмоток трансформатора. К другой обмотке подключены резистор и конденсатор, соединённые последовательно. Для измерения токов в ветвях цепи удаляется одна из перемычек и вместо неё в образовавшийся разрыв включается амперметр. Для измерения напряжений на элементах цепи параллельно рассматриваемому элементу включается вольтметр.



### 3. Набор миниблоков по теории электрических цепей и основам электроники

Миниблоки представляют собой отдельные элементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и т.п.), помещённые в прозрачные корпуса, имеющие штыри для соединения с гнездами наборной панели. Некоторые миниблоки содержат несколько элементов, соединённых между собой, или более сложные функциональные блоки. На этикетках миниблоков изображены условные обозначения элементов или упрощённые электрические схемы их соединения, показано расположение выводов и приведены основные технические характеристики. Миниблоки хранятся в специальном контейнере. Большинство миниблоков комплекта «Теория электрических цепей и основы электроники» содержат по одному элементу электрических цепей. Состав этого набора приведён в табл. 1.

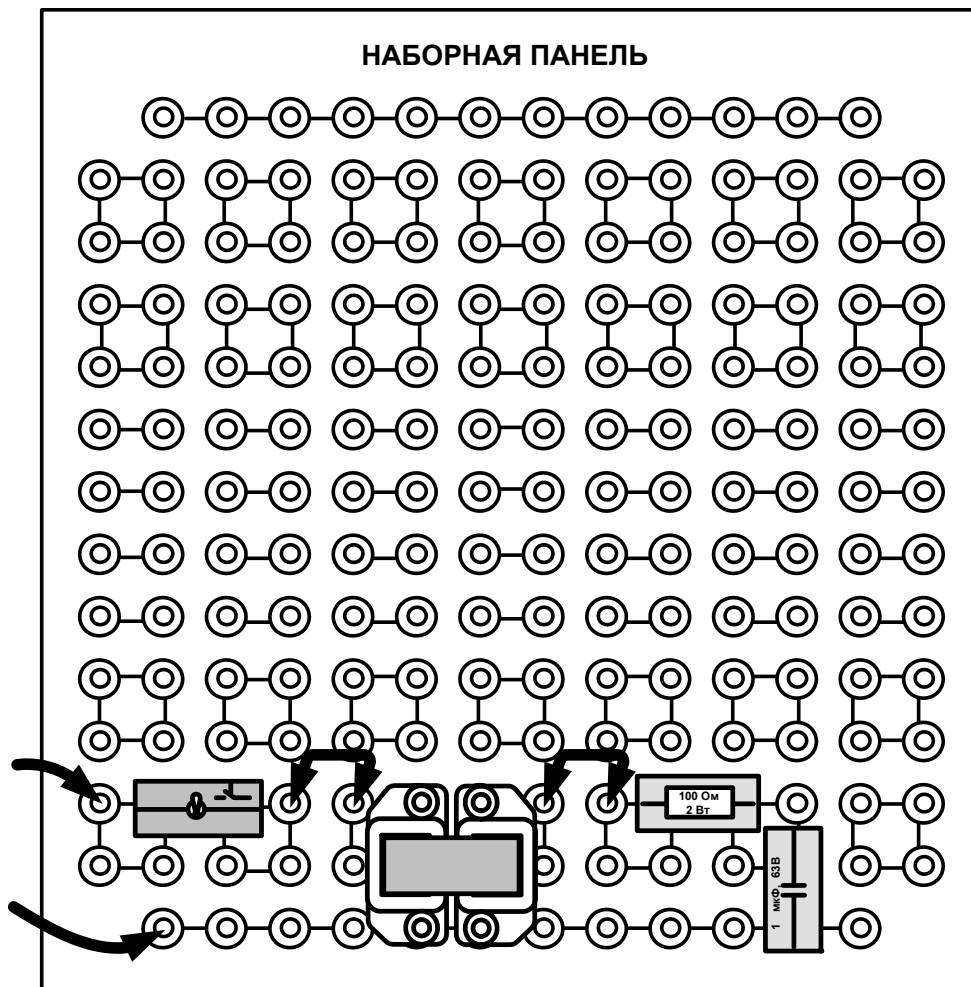


Рис. 3. Наборная панель для миниблоков

Таблица 1

Элемент и его характеристика	Количество	Характеристика	Количество
Резисторы МЛТ, 2 Вт, $\pm 5\%$ 10 Ом; 22 Ом; 33 Ом; 47 Ом; 100 Ом; 150 Ом; 220 Ом; 330 Ом; 470 Ом; 680 Ом; 1 кОм; 2,2 кОм; 4,7 кОм; 10 кОм; 22 кОм; 33 кОм; 47 кОм; 100 кОм; 1 Мом	30	Стабилитрон КС510А, 10 В Светодиод АЛ 307 Б Варикап КВ 105А, 20 мА Динистор (диодный тиристор): КН 102Б	1 1 1 1
Потенциометры СП4-2М 1 кОм; 10 кОм	2	Тиристор триодный КУ 101Е Транзисторы биполярные: КТ502 Г ( <i>p-n-p</i> ) КТ503 Г ( <i>n-p-n</i> )	1 2
Конденсаторы К-73-9, 100 В, 0,01 мкФ; 0,1 мкФ	2	Транзисторы униполярные: КП 303Е (с каналом <i>n</i> -типа) КП101Е (с каналом <i>p</i> -типа)	2
Конденсаторы К73-17, 63 В, 0,22 мкФ; 0,47 мкФ; 1 мкФ	3	Транзистор однопереходный КТ117Г	1
Конденсаторы электролитические SR-63 В, 10 мкФ; SR-63 В, 100 мкФ; SR-35 В, 470 мкФ;	3	Операционный усилитель КР 140 УД 608А Конденсаторы электролитические: SR-63 В, 100 мкФ SR-35 В, 470 мкФ	1 2
Индуктивности 10 мГн, 90 мА; 40 мГн, 65 мА 100 мГн, 50 мА	3	Термистор РТС 50 Ом Термистор NTC 6,8 кОм	1 1
Тумблер МТД-1, 250 В, 2 А	2	Варистор S07K11, 18 В, 1 мА	1
Лампа сигнальная СМН-10 55	1	Фоторезистор СФ3-4Б	1
Диоды КД 226 (1N5408) 1А, 100 В	6		

#### 4. Блок мультиметров

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Общий вид блока представлен на рис. 4. В нём установлены два серийно выпускаемых мультиметра МУ60, МУ62 или МУ64. Подробная техническая информация о них и правила применения приводятся в руководстве по эксплуатации изготовителя. В блоке установлен источник питания мультиметров от сети с выключателем и предохранителя на 1 А. На лицевую панель блока

вынесены также четыре предохранителя защиты токовых цепей мультиметров.

Для обеспечения надёжной длительной работы мультиметров соблюдайте следующие правила:

1. Не превышайте допустимых перегрузочных значений, указанных в заводской инструкции для каждого рода работы.

2. Когда порядок измеряемой величины неизвестен, устанавливайте переключатель пределов измерения на наибольшую величину.

3. Перед тем как повернуть переключатель для смены рода работы (не для изменения предела измерения!), отключайте щупы от проверяемой цепи.

4. Не измеряйте сопротивление в цепи, к которой подведено напряжение.

5. Не измеряйте ёмкость конденсаторов, не убедившись, что они разряжены.

6. Будьте внимательны при измерении тока мультиметрами МУ62 и МУ64. Предохранитель 0,2 А этих мультиметров может перегореть от источников напряжения, имеющих в данном стенде. Мультиметр МУ60 защищён предохранителем 2 А, который не может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда. До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- выбор измеряемой величины: -  $V$ ,  $\sim V$ ,  
-  $A$ ,  $\sim A$  или  $\Omega$ ;

- выбор диапазона измерений соответственно ожидаемому результату измерений и правильное подсоединение зажимов мультиметра к исследуемой цепи.

Присоединение мультиметра как вольтметра, амперметра или омметра показано на рис. 5.

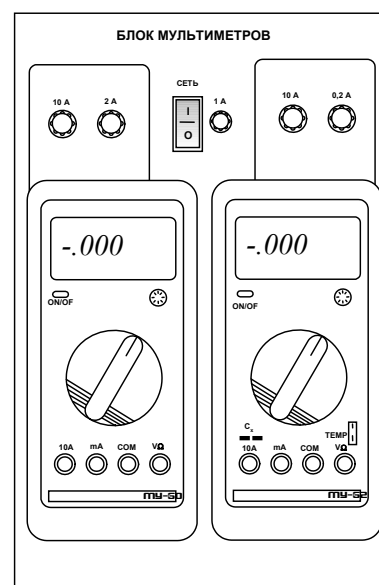


Рис. 4. Блок мультиметров

## 5. Коннектор

Коннектор входит только в компьютеризованный вариант комплекта и предназначен для ввода измеряемых токов и напряжений в компьютер на

плату PCI-6023(24) для измерений с помощью программы «ВП ТОЭ». Он содержит делители напряжений для ввода напряжений, шунты для ввода токов, блоки гальванической развязки измеряемых сигналов, разъем для вывода из компьютера сигналов управления электронным ключом и разъем для подключения плоского кабеля связи коннектора с компьютером (рис. 6). Изображенные на лицевой панели измерительные приборы  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $A_1 \dots A_4$  включаются в цепь как обычные вольтметры и амперметры. Коннектор имеет два канала для ввода напряжений в компьютер и два канала для ввода токов. Однако в цепь можно включить четыре амперметра и кнопками переключения измеряемого тока выбирать вводимое в компьютер значение  $I_1$  или  $I_2$ ,  $I_3$  или  $I_4$ . О выбранном токе сигнализирует светодиод на лицевой панели коннектора и надпись на виртуальном амперметре на экране дисплея. Кнопки переключения делителей напряжения и шунтов предназначены для выбора пределов измерения, как в обычных измерительных приборах.

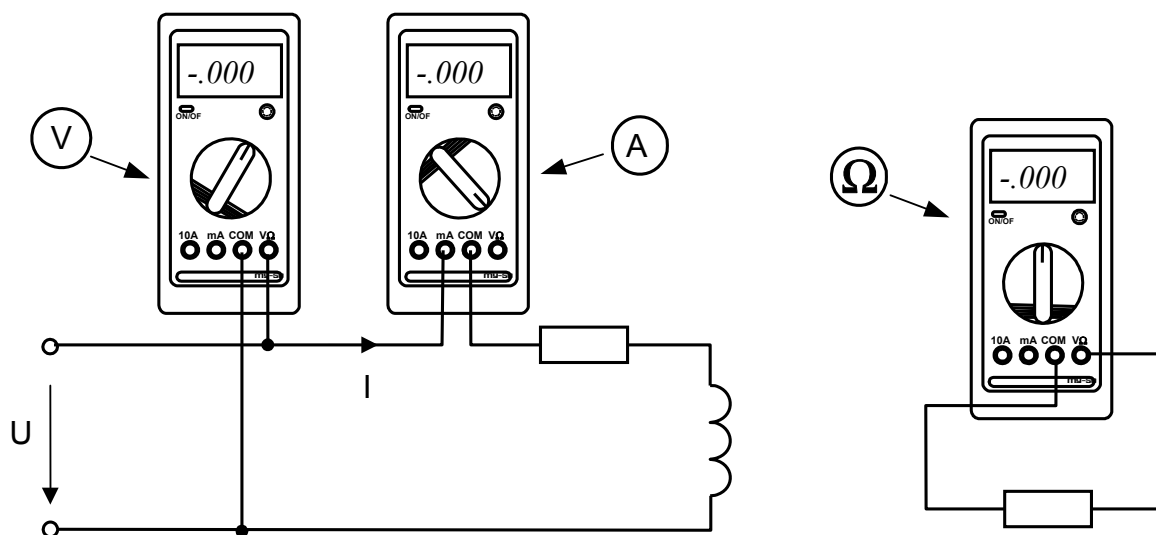


Рис. 5. Типовые схемы подключения мультиметров

## 6. Порядок работы с виртуальными амперметрами и вольтметрами

При работе с виртуальными приборами придерживайтесь следующего порядка:

1. Соберите цепь согласно схеме опыта лаборатор. работы, включив в нее вместо реальных амперметров и вольтметров виртуальные приборы, изображенные на лицевой панели коннектора.

2. Включите виртуальные приборы двойным щелчком левой кнопки мыши по ярлыку «ВП ТОЭ». В результате откроется блок «Приборы I» (рис. 7), в котором содержатся вольтметры и амперметры. Часть из них активизирована по умолчанию (т.е. включены пределы измерения). Расположение приборов в окне этого блока можно изменить, щелкнув левой кнопкой мыши по обозначению прибора и выбрав в открывшемся перечне нужный прибор. К одному и тому же каналу коннектора, таким образом, можно подключить несколько виртуальных приборов для одновременного измерения, например, действующего, амплитудного, среднего и других значений одного и того же напряжения (тока).

3. Активизируйте нужные виртуальные приборы, щелкнув в соответствующих окнах по кнопкам «Откл». Для отключения прибора щелкните в окне предела измерения. Чем больше каналов задействовано в виртуальных измерениях тока и напряжения, тем ниже частота сканирования и меньше значений вводится в компьютер за период измерения. Период измерения, в течение которого производится ввод данных в компьютер, по умолчанию равен 0,1 с. Его можно изменить, открыв меню, как показано на рис. 7, и выбрав мышью строку «Период измерения».

4. При выполнении измерений переменных напряжений и токов необходимо обращать внимание на число отсчётов в секунду, которое указано в верхней части панели «Приборы I». Необходимо, чтобы число отсчётов, приходящихся на один период измеряемого сигнала (не путать с периодом измерения!), было не менее десяти. При меньшем числе отсчётов резко возрастает погрешность измерений.

5. Выберите род измеряемой величины, щелкнув в окне «Действующее» и выбрав из открывшегося списка нужное значение. (Для цепи постоянного тока это, скорее всего, «Среднее»). В этом окне пункт «Действ. перем.» означает действующее значение сигнала, из которого исключена постоянная составляющая.

6. Выберите пределы измерения амперметров и вольтметров, нажав соответствующие кнопки на коннекторе (см. рис. 6). Выбранные пределы отображаются автоматически в соответствующих окнах виртуальных приборов. Когда измеряемый сигнал превышает допустимый для данного канала уровень, окно с показанием виртуального прибора начинает мигать красным цветом, а в верхней части панели включается надпись «Перегрузка! Перейдите на больший предел». Она гаснет, как только предел измерения становится больше измеряемой величины.

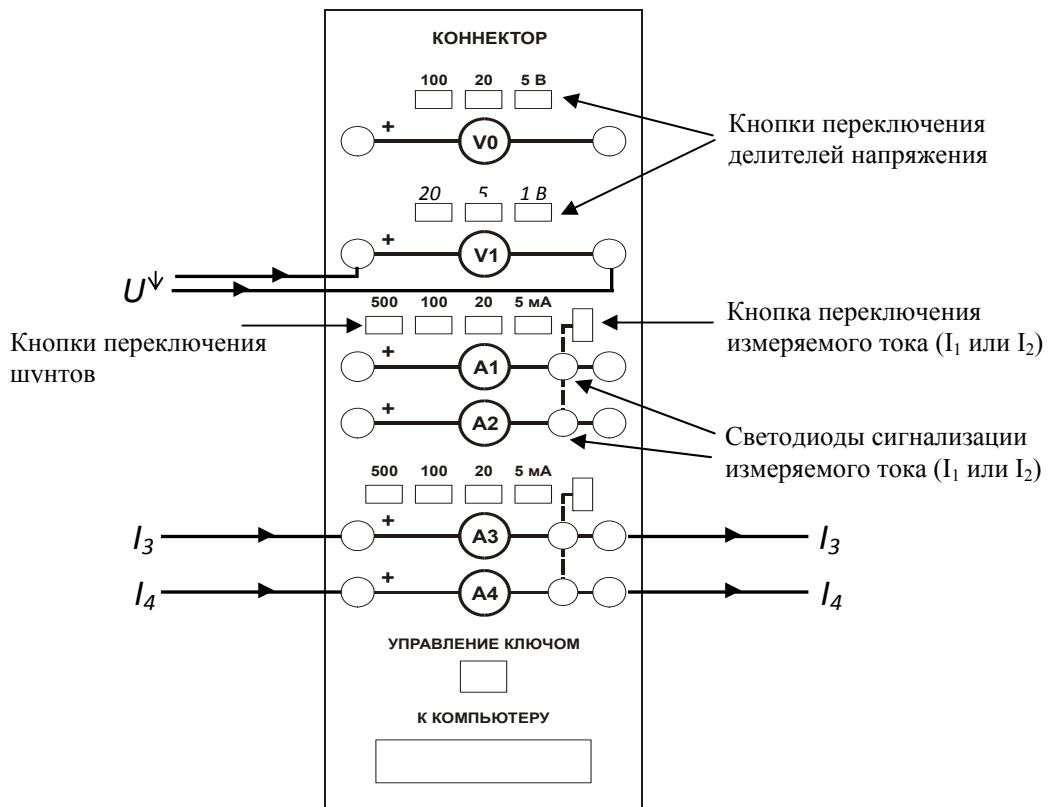


Рис. 6. Лицевая панель коннектора

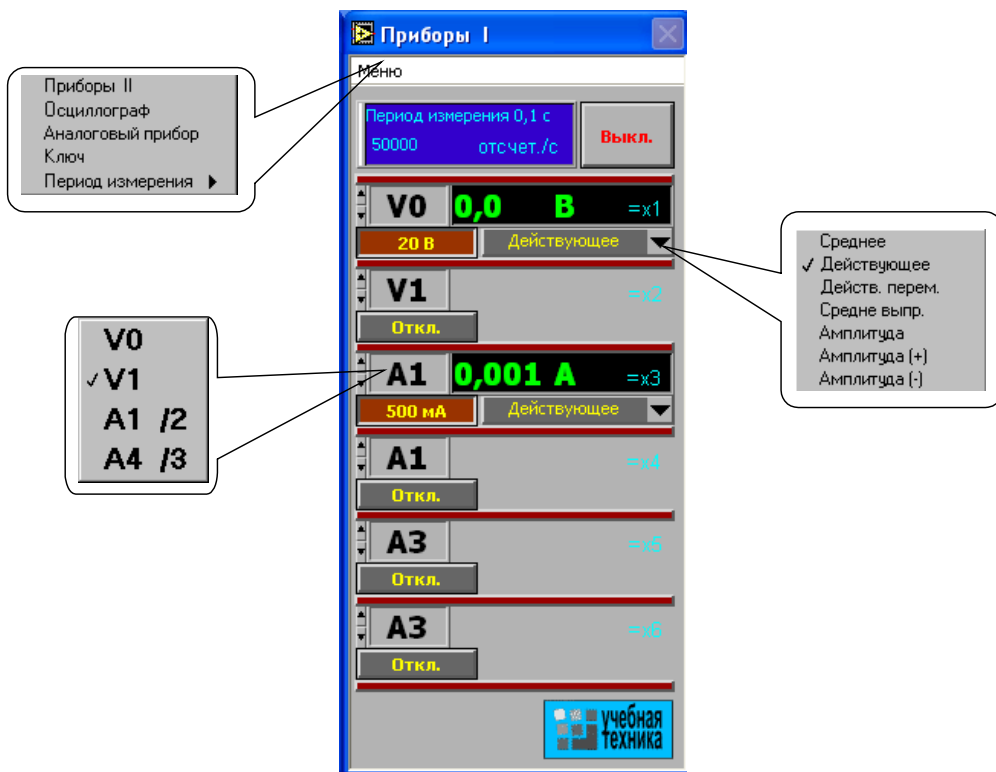


Рис. 7. Лицевая панель блока приборов

При снижении измеряемой величины ниже значения следующего (более низкого) предела измерения включается надпись «Перейдите на меньший предел». Через некоторое время она гаснет самостоятельно, но окно данного виртуального прибора продолжает мигать, предупреждая о том, что данное измерение желательно сделать точнее. Для того чтобы закрыть окно виртуальных приборов, необходимо щелкнуть по клавише «Выкл».

## 7. Измерение сопротивлений, мощностей и углов сдвига фаз с помощью виртуальных приборов

Сначала включите блок «Приборы I». Затем для «включения» виртуальных ваттметров, омметров, фазометра и т.д. выберите из меню блока «Приборы I» позицию «Приборы II». При этом откроется блок с тремя приборами, которые вычисляют сопротивления, углы сдвига фаз мощности и т.д. по мгновенным значениям токов и напряжений, введенным в компьютер через коннектор. Первые два прибора этого блока имеют свое меню, из которого выбираются измеряемые величины (рис. 8).

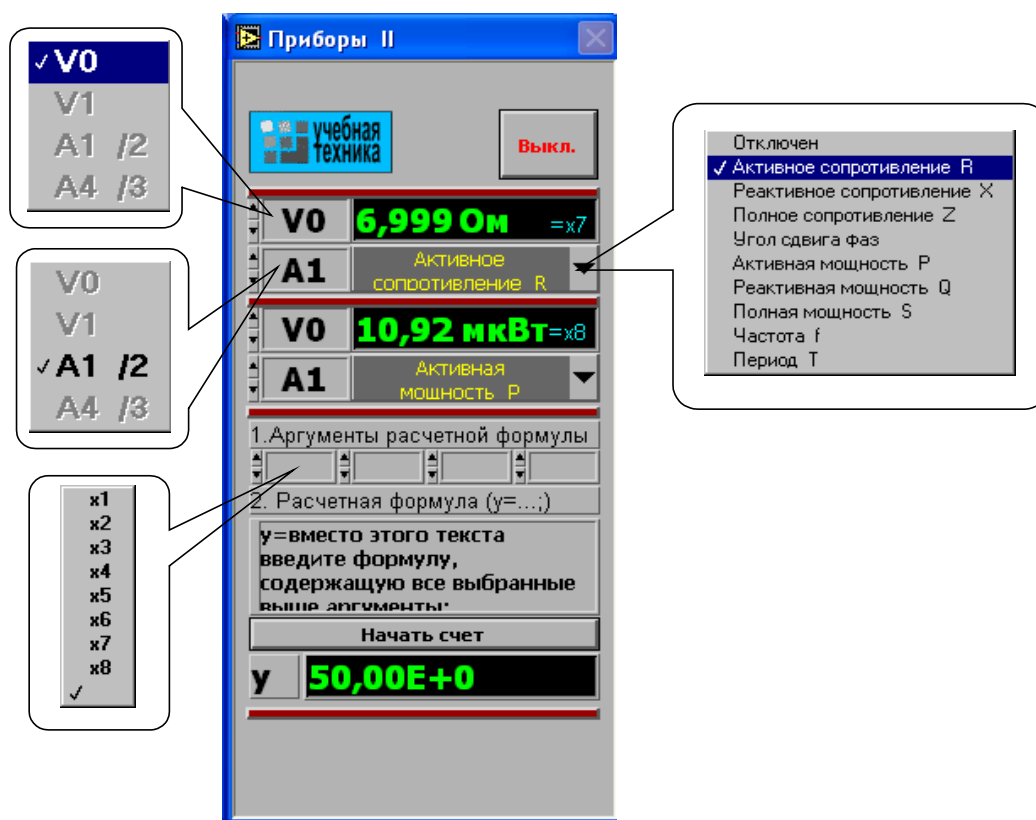


Рис. 8. Лицевая панель блока «Приборы II»

Для активизации прибора достаточно выбрать в соответствующих окнах две величины, через которые определяется искомая величина. Например, если на входе цепи включен вольтметр  $V_0$  и амперметр  $A_4$ , то для измерения входных мощностей ( $P, Q, S$ ), входных сопротивлений ( $R, X, Z$ ), а также угла сдвига фаз между напряжением и током ( $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ ), необходимо в верхнем окне прибора выбрать  $V_0$ , а в нижнем  $A_4$ . Для измерения угла сдвига фаз между токами  $I_1$  и  $I_4$  ( $\varphi = \varphi_{i1} - \varphi_{i4}$ ) в верхнем окне должно быть  $A_1$ , а в нижнем  $A_4$  (но не наоборот, иначе будет  $\varphi_{i4} - \varphi_{i1}$ ). Для измерения частоты или периода необходимо указать только одну величину (в верхнем окне). Очевидно, что для цепи постоянного тока из перечисленных здесь величин имеет смысл измерять только активное сопротивление и активную мощность.

Третий (нижний) прибор в этом блоке производит вычисления по формуле, вводимой самим пользователем. Аргументами этой формулы могут быть четыре из восьми величин  $x_1 \dots x_8$  (не более!), измеряемых приборами первого и второго блоков. Обозначения  $x_1 \dots x_8$  имеются на рис. 9.

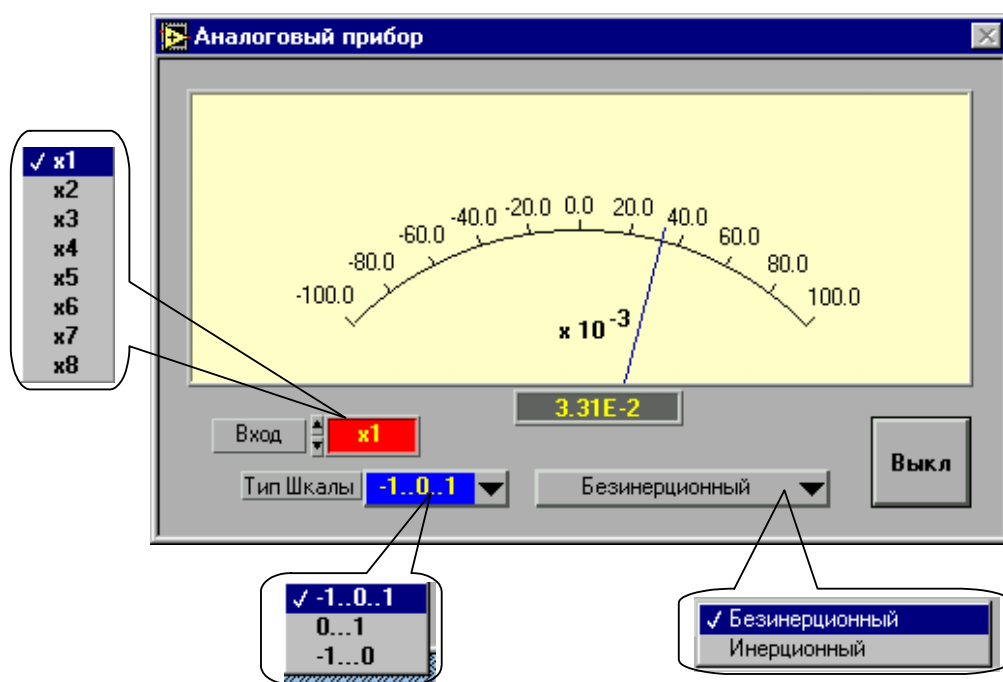


Рис. 9. Виртуальный псевдоаналоговый прибор

Например, если измеряются две активные мощности – в верхнем окне мощность источника, а в нижнем нагрузки, то третий прибор можно запрограммировать на определение КПД. Для этого нужно ввести аргументы



$x7$  и  $x8$ , напечатать формулу  $y = x8/x7$  и щелкнуть по клавише «Начать счет». В случае синтаксической ошибки во введённой формуле окно формулы начинает мигать и счёт не производится.

## 8. Виртуальный осциллограф

Виртуальный осциллограф позволяет наблюдать временные диаграммы сигналов, подаваемых на вход коннектора (двух напряжений и двух токов) в режиме «Развертка» или зависимость одного входного сигнала от любого другого в режиме «XY». Для его включения необходимо подать на вход коннектора исследуемые сигналы, включить и настроить, как описано ранее, блок «Приборы I» и выбрать в меню этого блока строку «Осциллограф». После этого на дисплее появится изображение виртуального прибора «Осциллограф» (рис. 10).

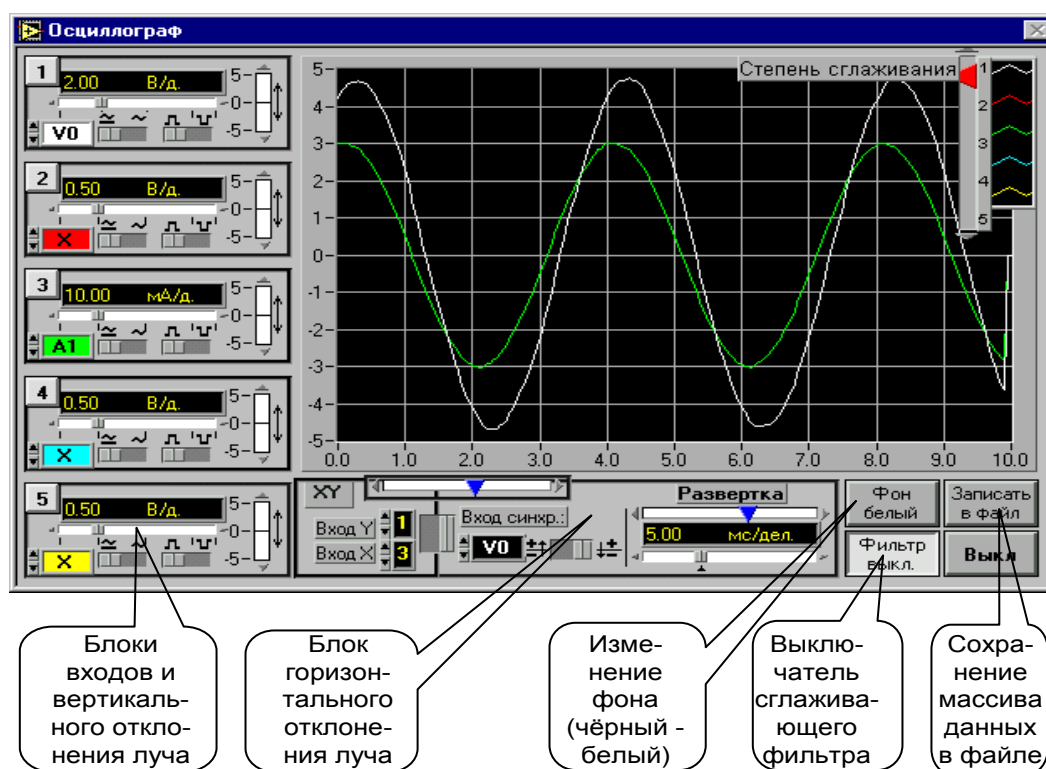


Рис. 10. Виртуальный прибор «Осциллограф»

Один из пяти блоков входов и вертикального отклонения луча с пояснениями показан на рис. 10. На любой из пяти входов осциллографа можно подать сигнал с любого входа коннектора. При этом в окне входа

осциллографа появляется соответствующее обозначение входа коннектора (виртуального прибора) и на экране возникает луч, цвет которого соответствует цвету фона переключателя исследуемого сигнала. Масштаб изображения по вертикали устанавливается автоматически и изменяется ступенчато при изменении амплитуды сигнала, но его можно зафиксировать, нажав на кнопку фиксации масштаба (рис. 11). После этого он меняться не будет. Предусмотрено и ручное плавное изменение масштаба внутри ступени. Органы управления горизонтальным перемещением луча показаны на рис. 12.

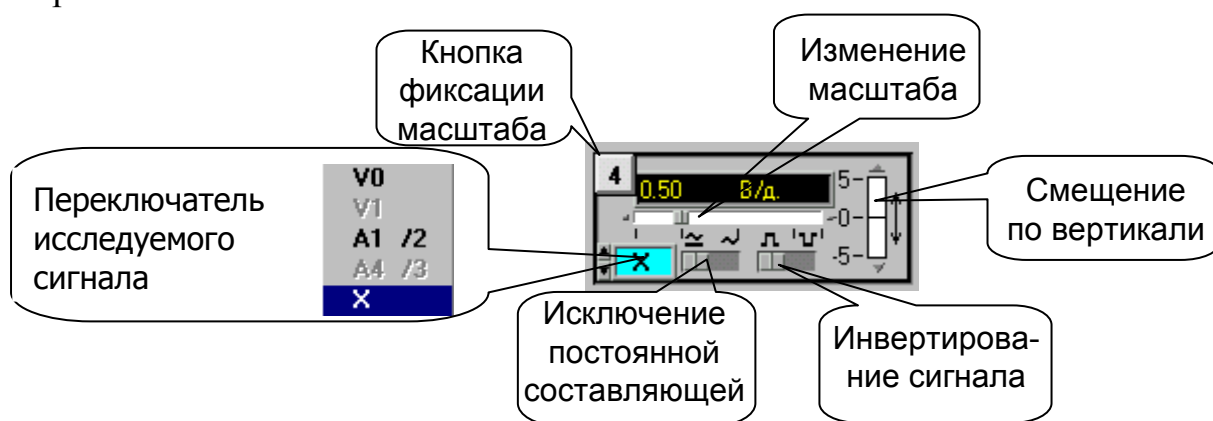


Рис. 11. Управление масштабом изображения

В правом верхнем углу осциллографа (см. рис. 10) имеется движок управления степенью сглаживания фильтра (появляется только при его включении), а также меню изменения характеристик графика: непрерывный, ступенчатый, гистограмма, точечный, размер и форма точек, толщина линий и т.п.

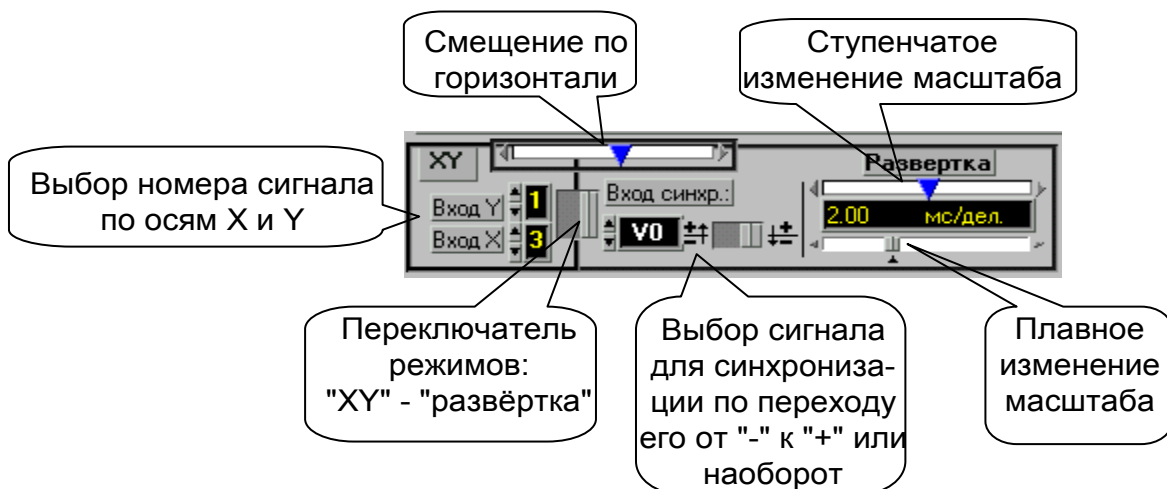


Рис. 12. Управление горизонтальным перемещением луча

Меню открывается при щелчке по любому из изображенных пяти лучей. Кнопка «Записать в файл» позволяет записать в файл таблицу мгновенных значений всех подключенных сигналов за один период измерения. Затем их можно прочитать и обработать в программах *MathCAD*, *Excel*, *Origin* и др. После щелчка по этой кнопке появляется окно диалога (рис. 13), в котором нужно выбрать диск, папку и имя файла, в который вы хотите записать данные. Выбрав имя файла, нажмите клавишу «Сохранить».

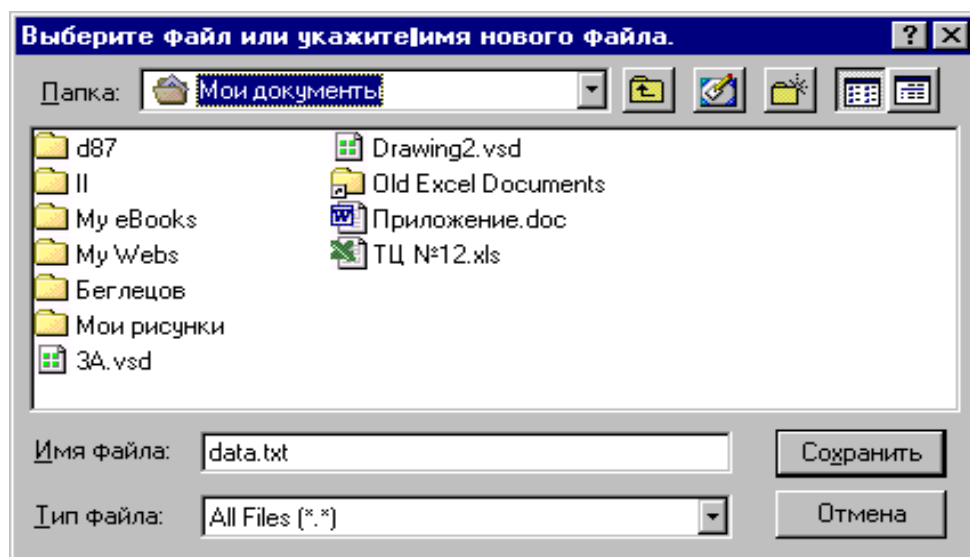


Рис. 13. Окно диалога «Записать в файл»

## 9. Виртуальный псевдоаналоговый прибор

Для наблюдения динамики изменения измеряемой величины удобен стрелочный прибор, поэтому в комплексе «ВП ТОЭ» имеется псевдоаналоговый стрелочный прибор, который может дублировать показания любого из рассмотренных выше цифровых приборов. Он открывается щелчком мыши по строке «Аналоговый прибор» в меню блока «Приборы I» и подключается к любому из восьми приборов  $x_1 \dots x_8$ . На нем имеется также окно выбора типа шкалы и клавиша «Инерционный – Безынерционный», с помощью которой можно замедлить или ускорить движение стрелки. Шкала прибора перенастраивается автоматически при выходе стрелки за ее пределы. Показания стрелки дублируются в цифровом виде в специальном окне прибора.

## 10. Виртуальный прибор «Интегратор»

Миниблок «Интегратор» предназначен для интегрирования входного сигнала  $u_{\text{вх}}(t)$  или  $i_{\text{вх}}(t)$  по времени:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{вх}}C} \int u_{\text{вх}}(t) dt = \frac{1}{C} \int i_{\text{вх}}(t) dt,$$

где  $C$  – электрическая емкость конденсатора. Параметры  $R_{\text{вх}}$  и  $C$  указаны на упрощенной принципиальной схеме интегратора (рис. 14).

Интегратор имеет два режима работы. При разомкнутом состоянии выключателя «Сброс» (нижнее положение тумблера на миниблоке) происходит интегрирование входного сигнала.

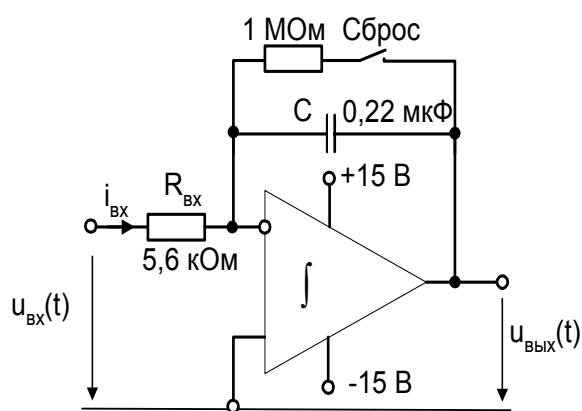


Рис. 14. Упрощенная схема интегратора

При включённом выключателе «Сброс» (верхнее положение тумблера на миниблоке) медленно изменяющаяся составляющая входного сигнала не интегрируется. Этот режим используется для возвращения интегратора в нулевое положение и для интегрирования периодических быстро протекающих процессов, например при снятии петли гистерезиса. Напряжение на выходе интегратора не может быть больше напряжения питания, поэтому, когда оно приближается к напряжению питания +15 В или –15 В, включается светодиод «Перегрузка».

Напряжение на выходе в этом режиме медленно изменяется даже при отсутствии входного сигнала, поскольку всегда есть внутренние утечки схемы и помехи. Этот режим используется для интегрирования кратковременных одиночных импульсов тока или напряжения. Перед началом интегрирования необходимо «обнулить» интегратор включив на 2...3 с выключатель «Сброс». При

## 11. Виртуальный конденсатор

Миниблок «Конденсатор» - конденсатор типа К73-17, 2,2 мкФ, 63 В; используется для компенсации реактивного сопротивления при исследовании поверхностного эффекта.

Миниблок «*Нелинейный конденсатор*» - конденсатор типа К10-17-26 или Y5V, 1 мкФ, 25 В; используется для исследования свойств нелинейных конденсаторов (при напряжениях больше 25 В).

## 12. Виртуальный прибор «Ключ»

Виртуальный прибор «Ключ» предназначен для управления электронными ключами, транзисторами, тиристорами и другими приборами, работающими в ключевом режиме. Он открывается щелчком по строке «Ключ» в меню блока «Приборы I». Его вид показан на рис. 15.

После включения прибора необходимо установить исходное состояние ключей в окнах «Ключ 1» и «Ключ 2». Значение 1 в окне первого ключа соответствует наличию сигнала управления +5 В на контакте относительно общего контакта разъема «Управление ключом» на коннекторе, значение 0 – отсутствию сигнала. Значение 1 в окне второго ключа соответствует наличию сигнала +5 В на контакте 8 разъема, 0 – отсутствию сигнала. После того как исходные состояния установлены, они переключаются каждый раз при нажатии клавиши «Переключить».

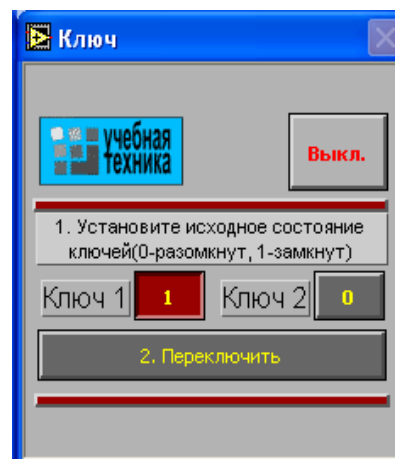


Рис. 15. Виртуальный прибор «Ключ»

## 13. Применение виртуальных приборов при экспериментальных исследованиях

В простейшей электрической цепи, изображённой на рис. 16, необходимо измерить напряжение, токи, сопротивления и мощность. Для этого соберите цепь согласно схеме (рис. 17), включив в нее вместо реальных измерительных приборов  $I_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  соответствующие пары клемм специализированного коннектора. Для измерений воспользуйтесь специализированным набором виртуальных приборов. Для этого включите компьютер и откройте программу «ВП ТОЭ». Два прибора  $I_0$  и  $A_1$  (или  $A_2$ ) включатся автоматически. Включите амперметр  $A_3$  (или  $A_4$ ), щелкнув мышью по кнопке «Откл». Установите кнопками коннектора пределы измерения. Выберите из меню виртуальных приборов род измеряемой

величины, щелкнув мышью по окошку “Действующее” и выбрав из выпадающего меню “Среднее”, при необходимости измените пределы измерения.

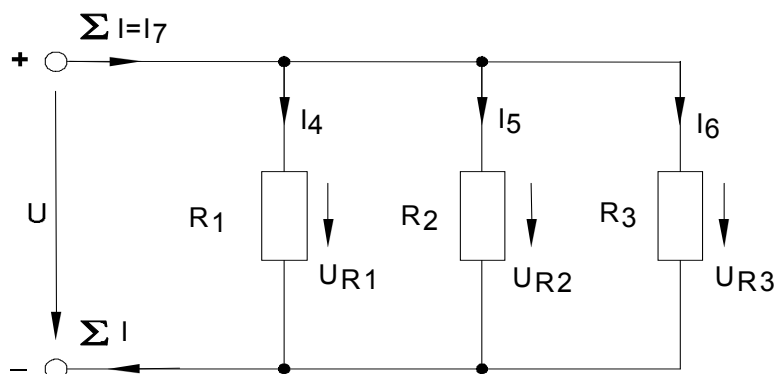


Рис. 16. Схема делителя тока

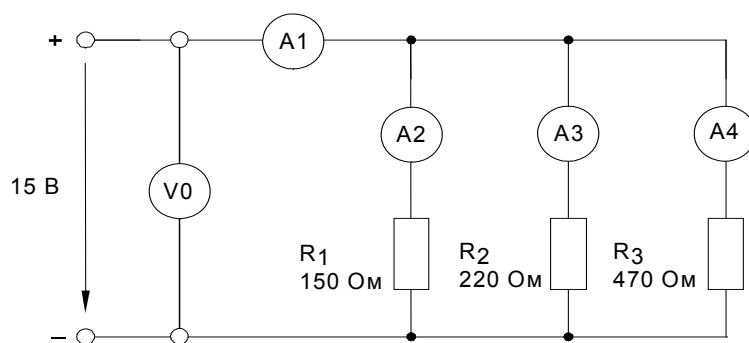


Рис. 17. Схема включения измерительных приборов

Для оценки достоверности полученных результатов измерения проверьте соотношение  $I_1 = I_2 + I_3 + I_4$ . При удовлетворительном результате проверки запишите итоги измерений и проверки в табл. 2. Вычислите погрешности.

Таблица 2

$U, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$	$I_4, мА$	$I_2 + I_3 + I_4, мА$
Погрешность: $[(I_1 - \Delta I) / \Delta I] 100\%$					

Измерьте сопротивление каждого из трех резисторов. Для этого откройте блок «Приборы II», в верхнем приборе этого блока щелкните по окошку «Отключен» и выберите из появившегося меню «Активное сопротивление». В нижнем левом окошке установите A2. (При этом на коннек-

торе кнопкой переключения измеряемого тока должен быть выбран прибор  $A2$ , иначе в окошке будет надпись  $A1!$ ). В верхнем правом окошке появится значение сопротивления  $R_1$  как результат деления  $U_0$  на  $I_2$ . Сравните это значение с номинальным значением резистора, указанным на микроблоке, и при удовлетворительном результате запишите в табл. 3. Вычислите погрешности. Аналогично измерьте сопротивления резисторов  $R_2$  и  $R_3$ , заменив  $A2$  на  $A3$  и затем на  $A4$ .

Таблица 3

Сравнительные характеристики	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$
Номинальные значения			
Измеренные значения			
Погрешность: $[(R_{\text{изм}} - R_{\text{ном}})/R_{\text{изм}}]100 \%$			

Измерьте мощность, потребляемую каждым резистором, и суммарную мощность, потребляемую от источника питания. Для этого в этом же приборе или в другом выберите из меню прибор «Активная мощность» и установите в левом нижнем окне измеряемую величину  $A1$ . Прибор покажет значение  $P_{\Sigma} = U_0 I_1$  (суммарную мощность, потребляемую цепью от источника). Запишите её в табл. 4. Аналогично измерьте мощности, потребляемые каждым из сопротивлений:  $P_1 = U_0 I_2$ ,  $P_2 = U_0 I_3$ ,  $P_3 = U_0 \cdot I_4$ . Запишите их в таблицу и проверьте соотношение  $P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3$ , вычислите погрешность.

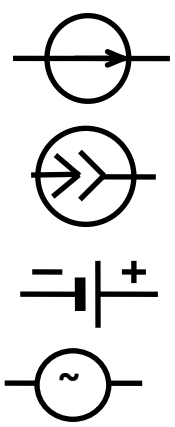
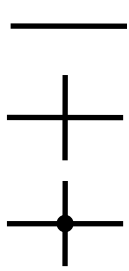
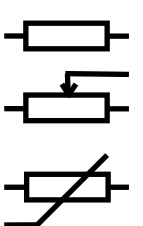
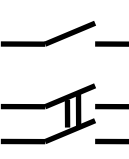
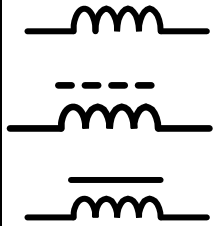
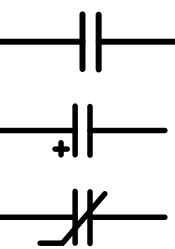
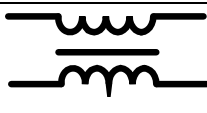
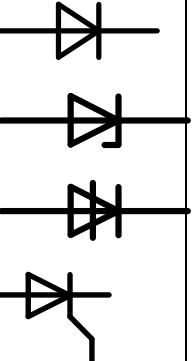
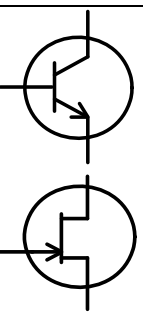
Таблица 4

$P_{\Sigma}, \text{ Вт}$	$P_1, \text{ Вт}$	$P_2, \text{ Вт}$	$P_3, \text{ Вт}$	$P_1 + P_2 + P_3, \text{ Вт}$
Погрешность: $[(P_{\Sigma} - \Delta P)/\Delta P]100 \%$				

#### 14. Условные обозначения элементов электрических цепей

Условные обозначения основных элементов электрических цепей приведены в табл. 5. В табл. 6 представлены базовые электрические величины и их единицы измерения.

Таблица 5

Элемент	Условное обозначение	Элемент	Условное обозначение
<p>Источники электрической энергии:</p> <p>источник напряжения (ЭДС) постоянного тока (идеальный)</p> <p>источник постоянного тока (идеальный)</p> <p>гальванический элемент, или аккумулятор</p> <p>источник напряжения (ЭДС) синусоидального тока</p>		<p>Проводники электрической цепи:</p> <p>одиночный</p> <p>пересекающиеся, несоединенные</p> <p>пересекающиеся, соединенные</p>	
<p>Резисторы:</p> <p>постоянный линейный</p> <p>переменный линейный</p> <p>нелинейный</p>		<p>Выключатели:</p> <p>однополюсные</p> <p>двухполюсные</p>	
<p>Индуктивности:</p> <p>линейная</p> <p>с разомкнутым магнитопроводом</p> <p>с магнитопроводом</p>		<p>Конденсаторы:</p> <p>общее обозначение</p> <p>полярный (электролитический)</p> <p>нелинейный</p>	
<p>Трансформатор</p>		<p>Диоды и тиристоры:</p> <p>выпрямительный диод</p> <p>стабилитрон</p> <p>диодный тиристор</p> <p>триодный тиристор</p>	
<p>Транзисторы:</p> <p>биполярный</p> <p>униполярный (полевой)</p>			



Окончание табл. 5

Элемент	Условное обозначение	Элемент	Условное обозначение
Лампы накаливания: осветительная сигнальная		Измерительные приборы: амперметр вольтметр ваттметр	

Таблица 6

Величина	Обозначение	Единица измерения	Другие используемые единицы измерения
Заряд	$Q$	1 К = 1 кулон	мК
Ток	$I$	1 А = 1 ампер	мА, мкА
Напряжение/ЭДС	$U/E$	1 В = 1 вольт	мВ, кВ
Сопротивление	$R$	1 Ом	кОм, МОм
Проводимость	$G$	1 См = 1 сименс	–
Индуктивность	$L$	1 Гн = 1 генри	мГн, мкГн
Ёмкость	$C$	1 Ф = 1 фарад	мкФ, нФ, пФ

## Лабораторные работы

### Лабораторная работа № 1

#### *Исследование выпрямительных полупроводниковых диодов и выпрямительных устройств на их основе*

*Цель работы:* ознакомление с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия полупроводниковых диодов и полупроводниковых однополупериодных и двухполупериодных выпрямителей. В

результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений математической модели полупроводникового диода; уметь рассчитывать параметры электрической цепи, содержащей полупроводниковые диоды; приобрести навыки экспериментального исследования параметров полупроводниковых приборов и практические навыки снятия вольтамперных характеристик.

### *1. Объект и средства исследования*

Объектом исследования являются полупроводниковые приборы, входящие в состав типового комплекта лабораторного оборудования в стендовом исполнении «Теоретические основы электротехники» (подробное описание стенда приведено во введении, общий вид показан на рис. 1).

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

### *2. Подготовка к работе*

2.1. Доказать, что в электрической цепи, содержащей выпрямительный полупроводниковый диод, включенный последовательно или параллельно с нагрузкой, напряжение на нагрузке будет пульсирующим, с одним полупериодом напряжения питающей сети.

2.2. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов для исследования параметров и снятия вольтамперных характеристик однополупериодных и двухполупериодных выпрямителей со сглаживающим фильтром и без него с учетом расположения приборов и оборудования на стенде. Узловые точки схемы согласовать с обозначениями на блоках стенда. Предусмотреть в схемах всех опытов включение соответствующих виртуальных измерительных приборов.

2.3. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда и принципом действия, а также составом виртуальных приборов, используемых при проведении лабораторной работы.

2.4. Изучить теоретический материал, указанный в библиографическом списке.

2.5. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе на листах формата А-4, содержащий ответы на вопросы п. 2 и заготовки таблиц, схем, графиков и расчетных формул к п. 3.

### 3. Рабочее задание

3.1. Соберите электрическую цепь согласно схеме п. 2.2 для исследования выпрямительного действия полупроводникового диода в составе однополупериодного выпрямителя без сглаживающего фильтра, используя виртуальные приборы. При сборке параметры элементов схемы выбрать, руководствуясь схемой рис. 18; особое внимание обратите на полярность электролитического конденсатора. На схеме рис. 18 в соответствии с обозначениями на блоках стенда верхние узлы виртуальных вольтметров  $V0$  и  $V1$  являются узлами  $V0$  и  $V1$  – входами коннектора.

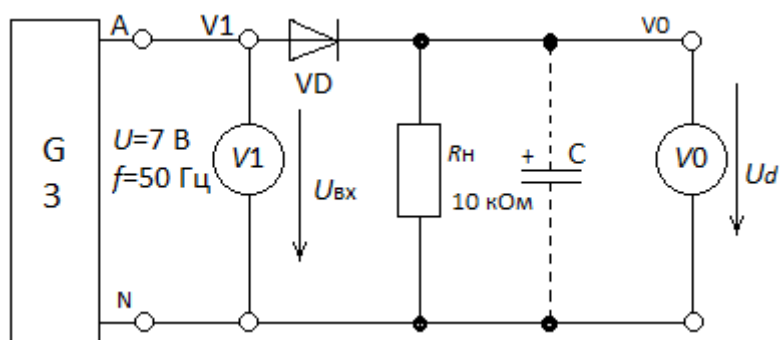


Рис. 18. Схема однополупериодного выпрямителя

3.2. После проверки схемы преподавателем включите виртуальные приборы  $V0$  и  $V1$  и осциллограф. Подключите два любых входа осциллографа к каналам  $V0$  и  $V1$ . Установите развертку 5 мс/дел.

3.3. Перенесите на график (рис. 19) осциллограммы входного и выходного напряжений.

3.4. Сделайте измерения и запишите в табл. 7 значения:  $U_{вх}$  – действующее,  $U_d$  – среднее,  $\Delta U_{пульс}$ ,  $m = f_{пульс} / f_{вх}$ .

3.5. Рассчитайте и запишите в табл. 7 коэффициенты  $U_d / U_{вх}$  и  $k_{пульс}$ .

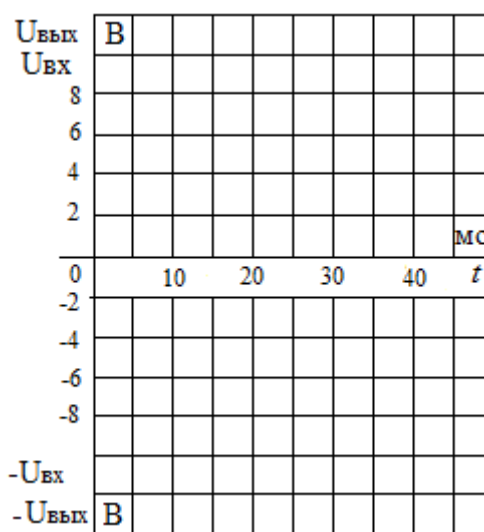


Рис. 19. Форма для нанесения осциллограммы входного и выходного напряжений

Таблица 7

$C$ , мкФ	0	1	10	100
$U_{\text{ВХ}}$ , В				
$U_d$ , В				
$\Delta U_{\text{пульс}}$ , В				
$m$				
$U_d / U_{\text{ВХ}}$				
$k_{\text{пульс}}$				

3.6. Параллельно нагрузочному резистору  $R_H$  подключите сглаживающие конденсаторы  $C$  с емкостями, указанными в табл. 7, повторите измерения и дорисуйте графики выпрямленного напряжения (см. рис.19).

3.7. Соберите схему двухполупериодного выпрямителя без сглаживающего фильтра, используя виртуальные приборы. При сборке параметры элементов схемы выберите, руководствуясь схемой рис. 20; особое внимание обратите на полярность электролитического конденсатора. На схеме рис. 20 в соответствии с обозначениями на блоках стенда верхние узлы виртуальных вольтметров  $V0$  и  $V1$  являются узлами  $V0$  и  $V1$  – входами коннектора.

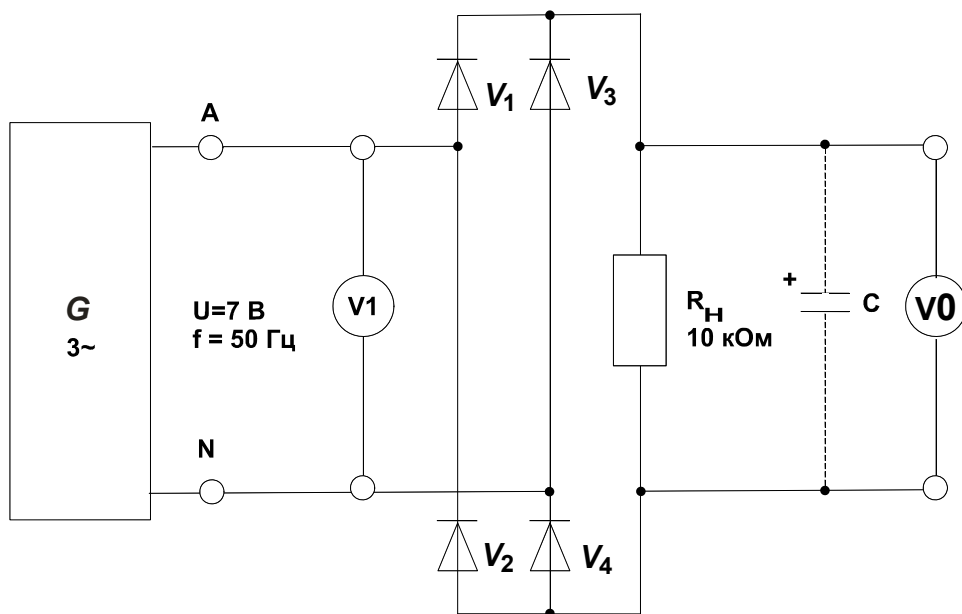


Рис. 20. Схема двухполупериодного выпрямителя

3.8. После проверки схемы преподавателем включите виртуальные приборы  $U0$  и  $U1$  и осциллограф. Подключите два любых входа осциллографа к каналам  $U0$  и  $U1$ . Установите развертку 5 мс/дел.

3.9. Перенесите на график (рис. 21) осциллограммы входного и выходного напряжений.

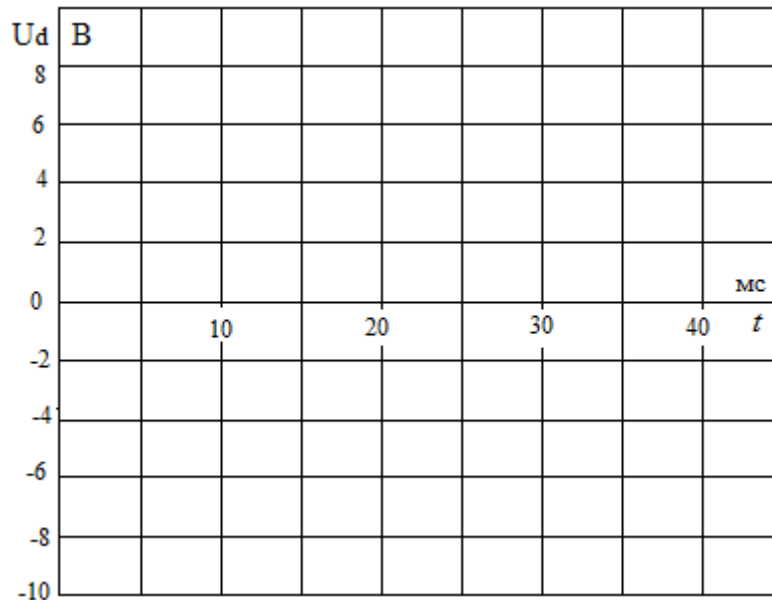


Рис. 21. Форма для нанесения графиков выпрямленного напряжения

3.10. Сделайте измерения и запишите в табл. 8 значения:  $U_{вх}$  – действующее,  $U_d$  – среднее,  $\Delta U_{\text{пульс}}$ ,  $m = f_{\text{пульс}}/f_{вх}$ .

3.11. Рассчитайте и запишите в табл. 8 коэффициенты  $U_d/U_{вх}$ ,  $k_{\text{пульс}}$ .

3.12. Параллельно нагрузочному резистору  $R_n$  подключите сглаживающие конденсаторы  $C$  с емкостями, указанными в табл. 8, повторите измерения и дорисуйте графики выпрямленного напряжения (см. рис. 21).

Таблица 8

$C$ , мкФ	0	1	10	100
$U_{вх}$ , В				
$U_d$ , В				
$\Delta U_{\text{пульс}}$ , В				
$m$				
$U_d / U_{вх}$				
$k_{\text{пульс}}$				

#### 4. Методические указания

4.1. При исследовании выпрямителей применяют следующие обозначения:

-  $u_{вх}, U_{вх}$  – мгновенное и действующее значения синусоидального входного напряжения;  $u_d, U_d, U_{dmax}, U_{dmin}$  – мгновенное, среднее, максимальное, минимальное значения выходного (выпрямленного) напряжения;  $f_{п}$  – частота пульсации выходного напряжения;

-  $m = f_{пульс}/f_{вх}$  – число пульсаций выпрямленного напряжения за один период напряжения питания;  $k_{пульс} = \Delta U_{пульс}/U_d = (U_{dmax} - U_{dmin})/U_d$  – коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения.

В данной работе используется одна фаза трёхфазного источника напряжения.

4.2. Общие сведения о полупроводниковых диодах. Полупроводниковый диод – это прибор с двумя выводами и одним  $p-n$  переходом. Двух-электродный полупроводниковый элемент – диод содержит  $n$ - и  $p$ -проводящий слои (рис. 22). В  $n$ -проводящем слое в качестве свободных носителей заряда преобладают электроны, а в  $p$ -проводящем слое – дырки. Существующий между этими слоями  $p-n$  переход имеет внутренний потенциальный барьер, препятствующий соединению свободных носителей заряда. Таким образом, диод блокирован. При прямом приложении напряжений («+» к слою  $p$ , «-» к слою  $n$ ) потенциальный барьер уменьшается, и диод начинает проводить ток (диод открыт). При обратном напряжении потенциальный барьер увеличивается (диод заперт). В обратном направлении протекает только небольшой ток утечки, обусловленный неосновными носителями.

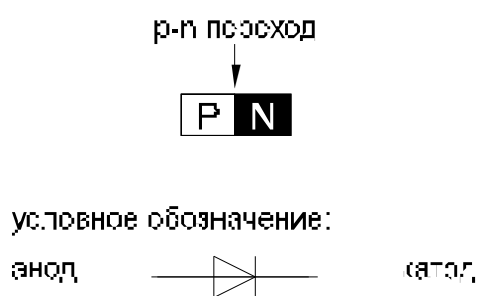


Рис. 22. Структура, обозначение и уравнение вольт-амперной характеристики (ВАХ) полупроводникового диода

Конструктивно различают плоскостные и точечные диоды. Точечные диоды используются на сверхвысоких частотах (СВЧ) из-за малой емкости  $p-n$  перехода и как выпрямительные для малых токов. Плоскостные диоды бывают: выпрямительные, стабилитроны, варикапы, светодиоды. Различают две группы диодов: выпрямительные и специальные. Плотность тока в выпрямительных диодах достигает  $10 \text{ А/мм}^2$ . Предельная рабочая температура германиевого диода –  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ , а кремниевого  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . В первом приближении

вольтамперная характеристика диода определяется идеализированным описанием характеристики  $p-n$  перехода. Реальная ВАХ отличается от идеальной вследствие влияния на прямую ветвь - сопротивления слоев полупроводника, сопротивления контактов металл-полупроводник, на обратную ветвь ВАХ - термогенерации носителей непосредственно в области  $p-n$  перехода; поверхностные утечки (рис. 23).

На графике 1 -  $E_{вн} < E_{зап}$ , прямой ток мал; 2 -  $E_{вн} > E_{зап}$ , запирающий слой отсутствует, ток определяется только сопротивлением полупроводника; 3 - запирающий слой препятствует движению основных носителей, небольшой ток определяется движением неосновных носителей зарядов; 4 - пробой  $p-n$  перехода, обратный ток быстро возрастает.

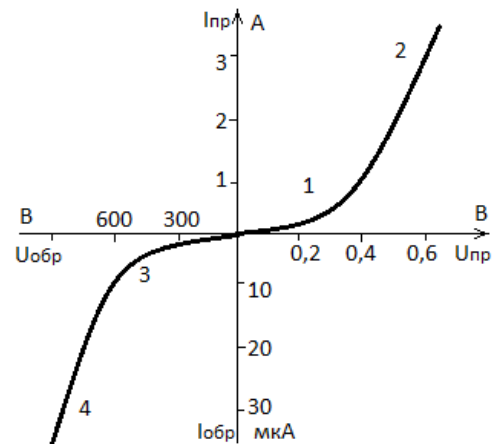


Рис. 23. Реальная вольтамперная характеристика диода

Обычно для кремниевых приборов тепловой ток с повышением температуры удваивается на каждые  $5^\circ\text{C}$ , а ток термогенерации – на каждые  $10^\circ\text{C}$ . При температуре в  $100^\circ\text{C}$  тепловой ток и ток термогенерации примерно равны. На практике принимают, что общий обратный ток кремниевого диода увеличивается в 2 – 2,5 раза на каждые 10 градусов.

4.3. Математические модели диодов. Это совокупность эквивалентной схемы диода и математических выражений, описывающих элементы эквивалентной схемы. Наиболее простая модель используется в пакете программ для анализа схем *MicroCap-2* (рис. 24). Эта модель достаточно универсальна и хорошо моделирует диод как в статическом, так и в динамическом режимах, а также учитывает температурный фактор.

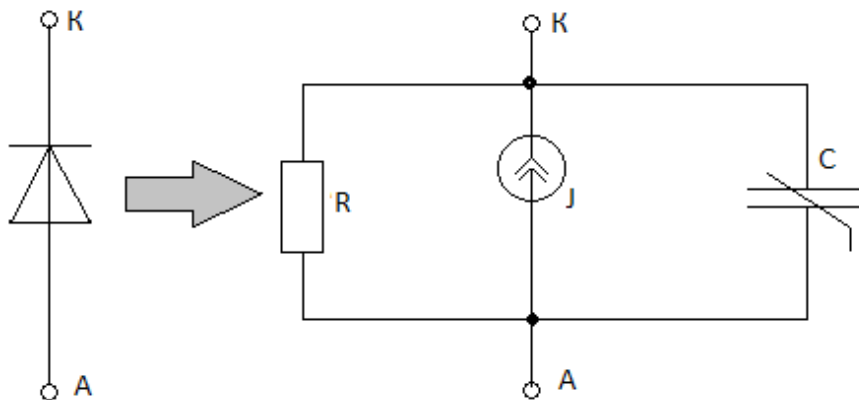


Рис. 24. Математическая модель диода в пакете программ для анализа схем *MicroCap – 2*

В упрощенных расчетах используют кусочно-линейные аппроксимации ВАХ диода (рис. 25 – 28).

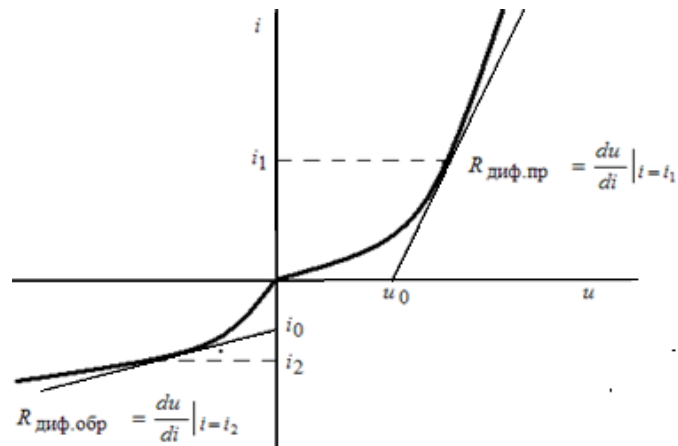


Рис. 25. Кусочно-линейная аппроксимация ВАХ диода

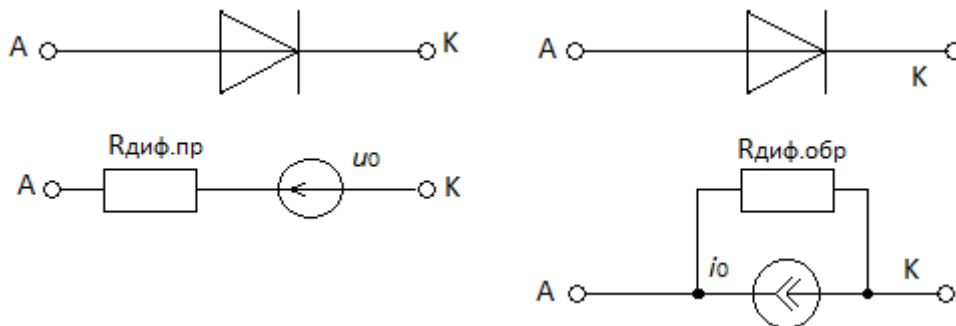


Рис. 26. Эквивалентные схемы диодов для прямого и обратного включения при кусочно-линейной аппроксимации

Анализ электрической цепи при кусочно-линейной аппроксимации предполагает составление эквивалентной схемы замещения для прямого и обратного включения диода.

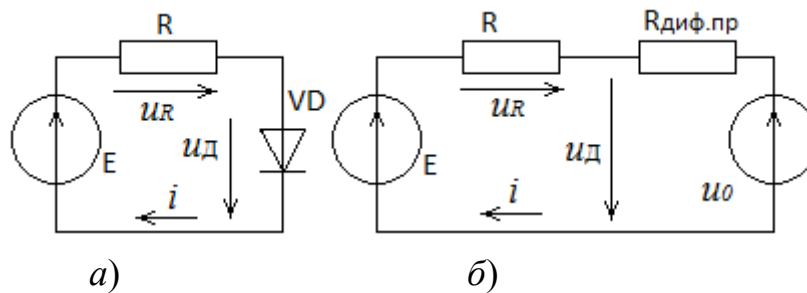


Рис. 27. Электрическая цепь с диодом (а) и эквивалентная схема замещения для прямого включения диода (б)



Вольтамперные характеристики и схемы замещения идеальных диодов показаны на рис. 28.

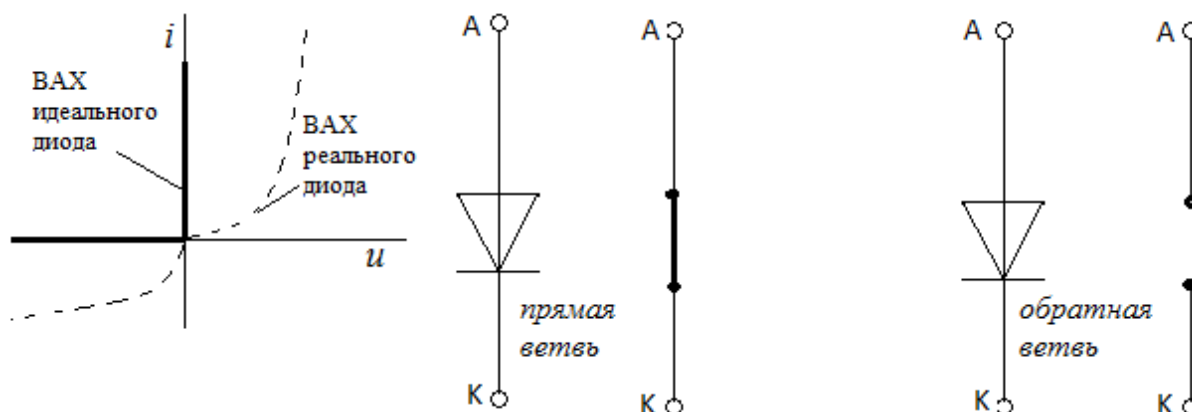


Рис. 28. ВАХ и схемы замещения идеального диода

4.4. Система обозначений полупроводниковых диодов установлена отраслевым стандартом ОСТ 11336.919-81, силовых п/п приборов – ГОСТ 20859.1-89 (рис. 29). В основу системы обозначений положен буквенно-цифровой код: первый элемент (цифра или буква) обозначает исходный полупроводниковый материал; второй (буква) – подкласс приборов; третий (цифра) – основные функциональные возможности прибора; четвертый (число) – порядковый номер разработки; пятый (буква) – условную разбраковку параметров приборов, изготовленных по единой технологии.



Рис. 29. Графические обозначения полупроводниковых приборов

*Исходный материал:* Г или 1 – германий или его соединения; К или 2 – кремний или его соединения; А или 3 – соединения галлия; И или 4 – индий или его соединения.

*Подклассы диодов:* Д – диоды выпрямительные и импульсные; Ц – выпрямительные столбы и блоки; В – варикапы; И – туннельные диоды; А – СВЧ диоды; С – стабилитроны; Г – генераторы шума; О – оптопары; Л – излучающие оптоэлектронные приборы.

4.5. Общие сведения о выпрямителях на полупроводниковых диодах. Электрический выпрямитель широко применяют как наиболее простой преобразователь переменного тока в постоянный. В цепи с полупроводниковым диодом (рис. 30) установившийся ток может протекать только при определённой полярности приложенного к диоду напряжения. При изменении полярности напряжения диод запирается и ток прекращается. В цепи переменного (синусоидального) напряжения ток протекает только в течение той полуволны, когда диод открыт. Полуволна другой полярности подавляется. В результате в цепи имеет место ток одного направления. Порог выпрямления кремниевых диодов лежит в пределах 0,4...0,8 В, а германиевых – 0,15...0,20 В. Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяются сглаживающие фильтры. Простейшим фильтром является конденсатор, подключенный параллельно нагрузке (см. рис. 20).

Однополупериодный выпрямитель использует только одну полуволну переменного напряжения. Как следствие, постоянное напряжение низкое по величине и имеет значительные пульсации.

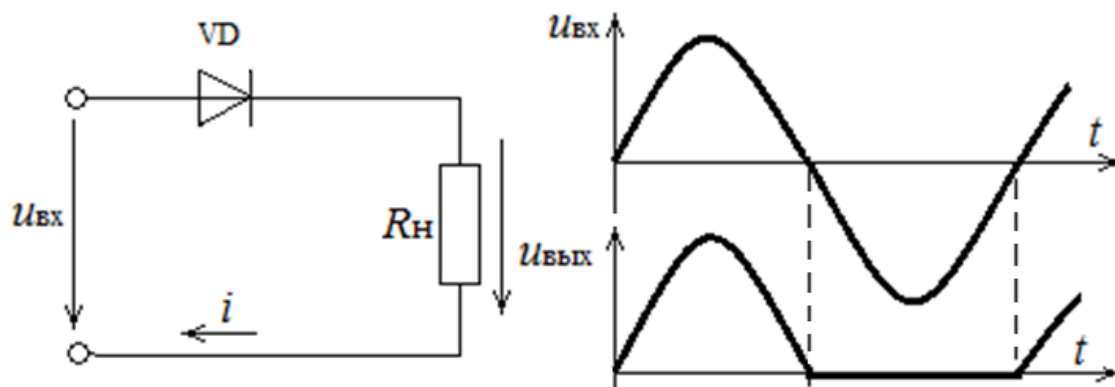


Рис. 30. Электрическая цепь с полупроводниковым диодом

Этого недостатка удастся избежать в случае мостового выпрямителя со схемой (рис. 31). Здесь полуволны противоположной полярности суммируются, и среднее значение выпрямленного напряжения увеличивается в два раза.

Мостовая схема (см. рис. 31) строится на одной вторичной обмотке трансформатора. К преимуществам схемы можно отнести также обратное напряжение на вентиль, хорошие энергетические характеристики трансформатора, простую конструкцию двухобмоточного трансформатора и отсутствие вынужденного подмагничивания.

Недостатками мостовых схем являются искажение выпрямленного напряжения и увеличение выходного сопротивления из-за последовательного сопротивления вентилей, а также возникновение постоянного потенциала, равного половине выпрямленного, на второй обмотке трансформатора. Выпрямленный ток в мостовой схеме проходит через два вентиля, которые для него образуют последовательное соединение. Именно поэтому расчётное значение выходного напряжения для мостовой схемы больше чем для основной. Из-за этого возрастает и сопротивление фазы по сравнению с сопротивлением у основной схемы. Рост сопротивления фазы приводит к увеличению угла отсечки выходного сопротивления выпрямителя. Порог выпрямления у кремниевых вентилей достигает 0,7 В. Для низковольтных выпрямителей такое увеличение расчетного напряжения существенно, поэтому для выпрямления напряжений, меньших 5...7 В, часто применяют не мостовую, а однополупериодную схему. При повышенных напряжениях недостатки мостовой схемы не проявляются.

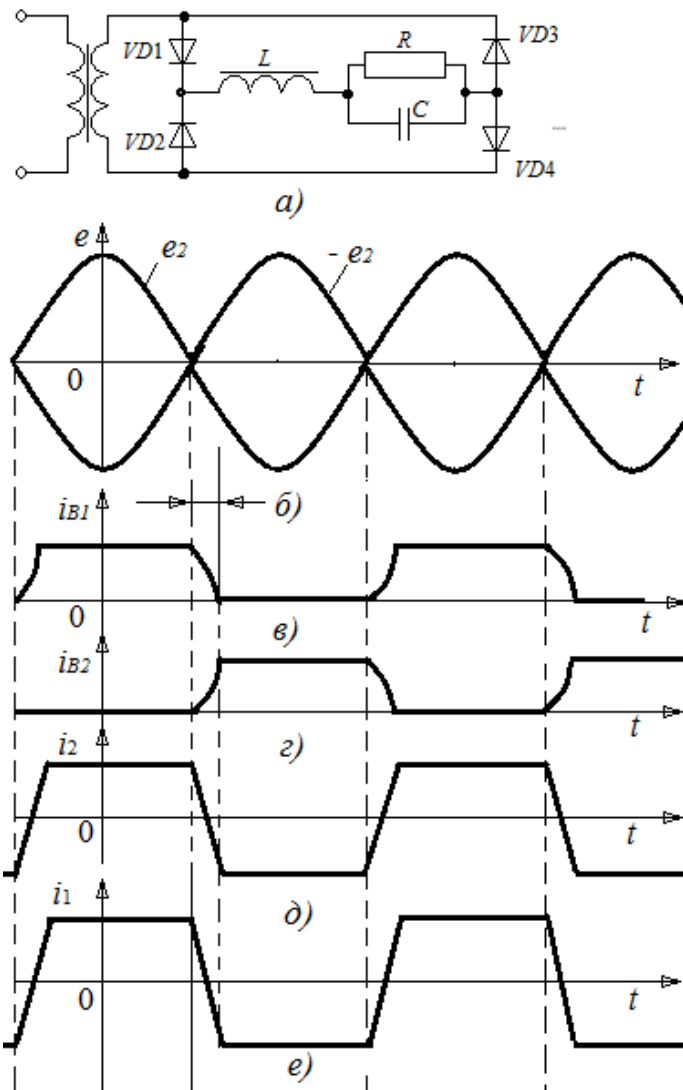


Рис. 31. Двухполупериодный выпрямитель:  
а – схема; б – е – эюры токов и напряжений

## 5. Контрольные вопросы

5.1. Определите по вольтамперной характеристике диода его основные параметры.

5.2. В чём отличие параметров и свойств кремниевых и германиевых диодов?

- 5.3. Каков принцип действия выпрямительного диода?
- 5.4. Почему максимальное значение выпрямленного напряжения  $U_{dmax}$  не совпадает с амплитудой входного напряжения?
- 5.5. Что произойдёт при изменении полярности диода в цепи однополупериодного выпрямителя?
- 5.6. Каково обратное напряжение диода в схеме со сглаживающим амплитуду пульсаций напряжения фильтром?
- 5.7. Что произойдет при изменении полярности диода в мостовой схеме выпрямителя (см. рис. 31)?
- 5.8. Каково обратное напряжение диода в мостовой схеме выпрямителя с ёмкостным фильтром?
- 5.9. Какое действие оказывает сглаживающий конденсатор на амплитуду пульсаций напряжения?

## Лабораторная работа № 2

### *Исследование параметрического стабилизатора напряжения*

*Цель работы:* ознакомление с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия полупроводниковых стабилизаторов и полупроводниковых параметрических стабилизаторов напряжения на их основе. В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений математической модели полупроводниковых параметрических стабилизаторов напряжения; уметь рассчитывать параметры электрической цепи, содержащей полупроводниковые стабилизаторы; приобрести навыки экспериментального исследования параметров полупроводниковых параметрических стабилизаторов напряжения и практические навыки снятия вольтамперных характеристик.

#### *1. Объект и средства исследования*

Объектом исследования являются полупроводниковые приборы, входящие в состав типового комплекта лабораторного оборудования в стендовом исполнении «Теоретические основы электротехники» (подробное описание стенда приведено во введении, общий вид показан на рис. 1).

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

## *2. Подготовка к работе*

2.1. Доказать, что в электрической цепи, содержащей полупроводниковый стабилитрон, включенный параллельно с нагрузкой, напряжение на нагрузке будет практически равным напряжению стабилизации стабилитрона при номинальном токе стабилизации, на порядок меньшим тока нагрузки.

2.2. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов для исследования параметров и снятия вольтамперных характеристик стабилитрона и полупроводниковых параметрических стабилизаторов напряжения с учетом расположения приборов и оборудования на стенде. Узловые точки схемы согласовать с обозначениями на блоках стенда. Предусмотреть в схемах всех опытов включение соответствующих виртуальных измерительных приборов.

2.3. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда и принципом действия, а также составом виртуальных приборов, используемых при проведении лабораторной работы.

2.4. Изучить теоретический материал, указанный в библиографическом списке.

2.5. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе на листах формата А-4, содержащий ответы на вопросы п. 2 и заготовки таблиц, схем, графиков и расчетных формул к п. 3.

## *3. Рабочее задание*

3.1. Соберите электрическую цепь согласно схеме п. 2.2 для снятия с помощью осциллографа вольтамперной характеристики и определения напряжения стабилизации  $U_{ст}$  стабилитрона. Эксперимент выполнить, используя виртуальные приборы. При сборке параметры элементов схемы выбрать, руководствуясь схемой рис. 32, на которой в соответствии с обозначениями на блоках стенда верхние узлы виртуальных вольтметров  $V0$  и  $V1$  являются узлами  $V0$  и  $V1$  – входами коннектора.

3.2. После проверки схемы преподавателем включите виртуальные приборы  $V0$  и  $V1$  и осциллограф. Подайте на вход синусоидальное напряжение 24 В частотой 50 Гц. На схеме  $A$  и  $V$  – входы коннектора.

3.3. Включите и настройте виртуальный осциллограф в режиме  $X$ - $Y$  ( $A$  – горизонтальный вход,  $V$  – вертикальный вход). Перенесите изображение с экрана осциллографа на график (рис. 33).

3.4. Соберите цепь для исследования зависимости выходного напряжения и тока стабилитрона от выходного напряжения в цепи параметрического стабилизатора напряжения согласно схеме (рис. 34). Устанавливая последовательно величины входного напряжения постоянного тока по табл. 9, измерьте соответствующие выходные напряжения и токи стабилитрона посредством мультиметров. Результаты занесите в табл. 9. Постройте кривую зависимости напряжения  $U_{\text{вых}}$  от входного  $U_{\text{вх}}$  (рис. 35).

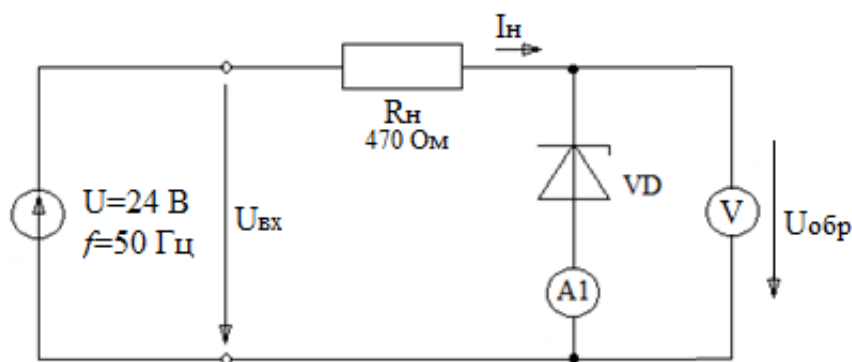


Рис. 32. Схема для снятия ВАХ стабилитрона

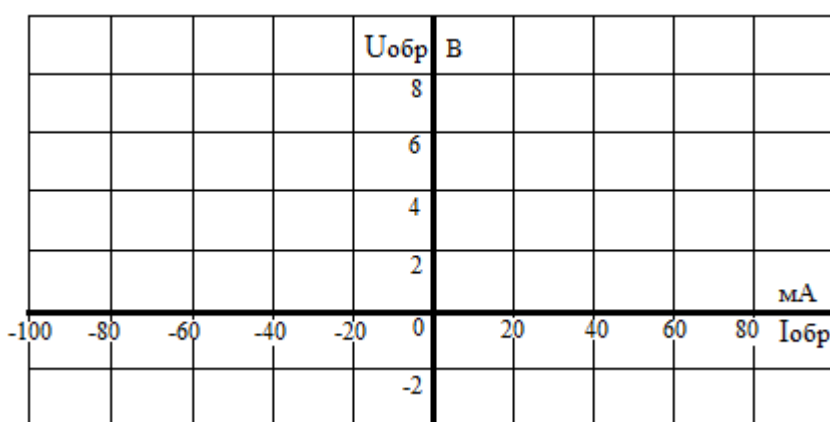


Рис. 33. Форма для нанесения графиков ВАХ стабилитрона

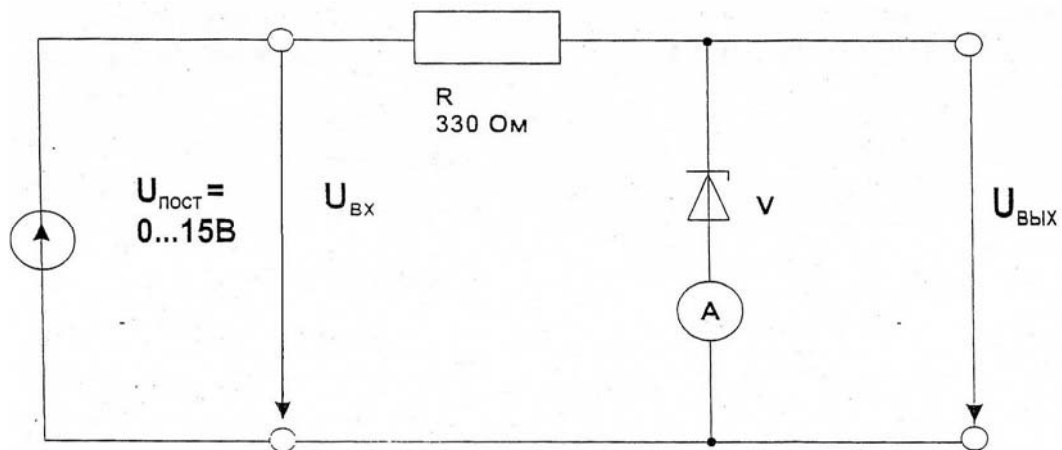


Рис. 34. Схема для снятия ВАХ параметрического стабилизатора

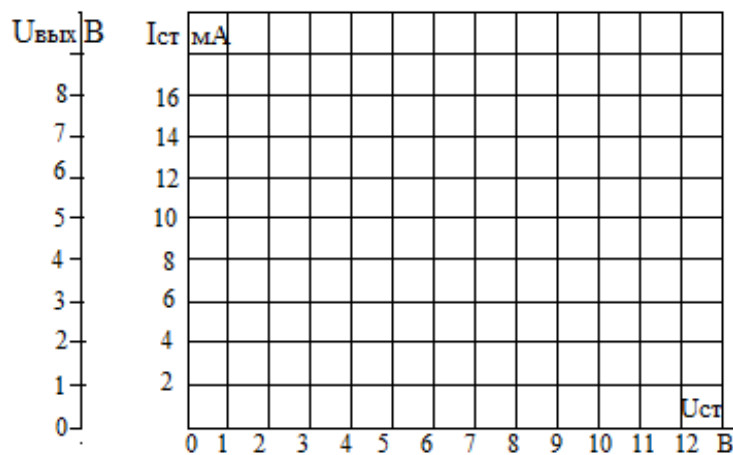


Рис. 35. Форма для нанесения графиков ВАХ параметрического стабилизатора

Таблица 9

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{\text{вых}}, \text{В}$																
$I_{\text{ст}}, \text{мА}$																

3.5. Соберите цепь для исследования влияния тока нагрузки  $I_{\text{н}}$  на величину тока стабилитрона согласно схеме (рис. 36), устанавливая последовательно сопротивления нагрузки 10; 4,7; 2,2; 1; 0,68; 0,47 кОм. Измерьте посредством мультиметра соответствующие значения токов  $I_{\text{ст}}$  и  $I_{\text{н}}$  и занесите их в табл. 10. Постройте на графике (рис. 37) кривую зависимости тока  $I_{\text{ст}}$  от тока нагрузки  $I_{\text{н}}$ .

Таблица 10

$R_H, \text{кОм}$	10	4,7	2,2	1,0	0,68	0,47
$I_H, \text{мА}$						
$I_{CT}, \text{мА}$						

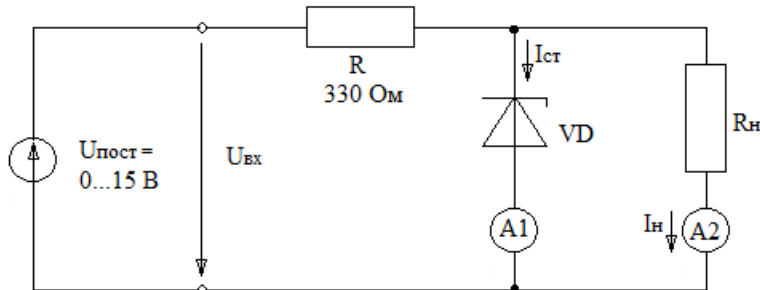


Рис. 36. Схема для исследования влияния тока нагрузки на величину тока стабилитрона

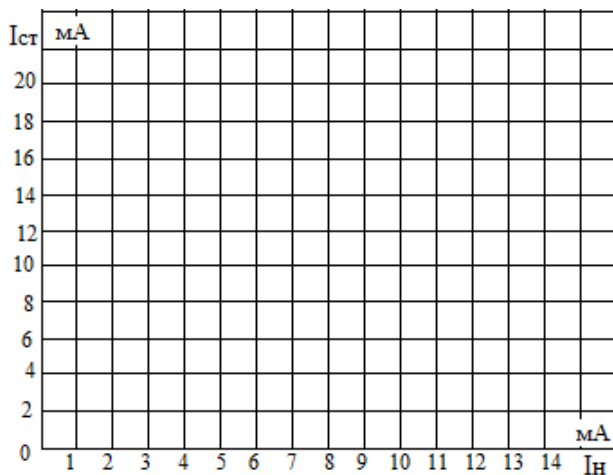


Рис. 37. Форма для нанесения графиков зависимости тока стабилитрона от тока нагрузки

3.6. Соберите цепь согласно схеме рис. 38 для исследования стабилизирующего действия диода Зенера в случае выпрямленного напряжения с заметными пульсациями. На схеме  $V0$  и  $V1$  – входы коннектора.

3.7. Включите и настройте виртуальный осциллограф. Перенесите осциллограммы входного и выходного напряжений на график (рис. 39).

3.8. Исключите из кривых постоянную составляющую, щелкнув мышью на соответствующих кнопках виртуального осциллографа. Перерисуйте кривые напряжений  $u_{ВХ}$  и  $u_{ВЫХ}$  на график (рис. 40) без постоянных составляющих, укажите масштабы.  $U_{ВХ}$  и  $U_{ВЫХ}$  измерьте с помощью мультиметра либо виртуальных вольтметров  $V0$  и  $V1$ .

с помощью мультиметра либо виртуальных вольтметров  $V0$  и  $V1$ .

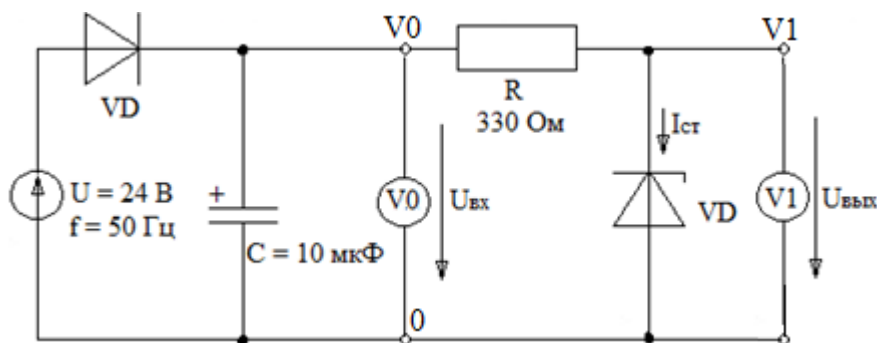


Рис. 38. Схема стабилизатора пульсирующего напряжения



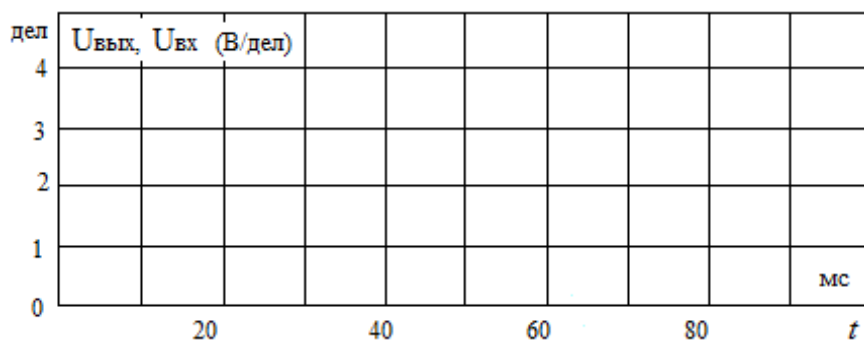


Рис. 39. Форма для нанесения осциллограмм входного и выходного напряжений

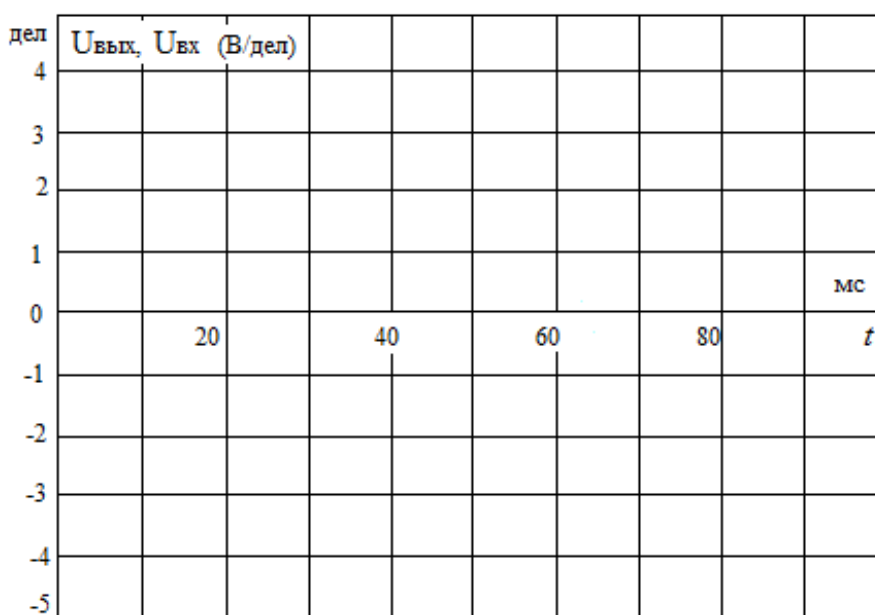


Рис. 40. Форма для нанесения графиков пульсаций выходного напряжения параметрического стабилизатора

#### 4. Методические указания

4.1. Общие сведения о полупроводниковых стабилитронах. Стабилитрон представляет собой кремниевый диод, характеристика которого в открытом состоянии такая же, как у выпрямительного диода. Отличие стабилитрона – в относительно низком напряжении пробоя при обратном напряжении. Когда это напряжение превышено, ток обратного направления возрастает скачком (эффект Зенера). В выпрямительных диодах такой режим является аварийным, а стабилитроны нормально рабо-

тают при обратном токе, не превышающем максимально допустимого значения. Для того чтобы избежать перегрузки, последовательно со стабилитроном включают балластный резистор. Величина его вычисляется следующим образом:

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

где  $U_{\text{раб}}$  – приложенное рабочее напряжение;

$U_{\text{ст}}$  – напряжение стабилизации стабилитрона испытываемого типа;

$I_{\text{ст}}$  – допустимый ток стабилизации;

$I_{\text{нагр}}$  – ток в резисторе нагрузки  $R_{\text{н}}$ , включенном параллельно стабилитрону.

Свойства стабилитронов делают их пригодными для стабилизации и ограничения напряжений.

4.2. Использование параметрических стабилизаторов в источниках питания. В источниках питания аппаратуры систем телекоммуникаций находят применение как простейшие стабилизаторы, состоящие из одного-двух компонентов, так и сложные, включающие в себя десятки транзисторов и диодов. В простых схемах стабилизаторов напряжения используют стабилитроны. Характеристика кремниевого стабилитрона и схема включения даны на рис. 41. Если рабочая точка при колебаниях входного напряжения  $E$  и тока нагрузки  $I_{\text{н}}$  не выходит за пределы пологого участка вольтамперной характеристики ( $I_1 < I < I_2$ ), то выходное напряжение  $U$  меняется очень мало и получается стабилизированным. В схему стабилизатора помимо стабилитрона и нагрузки включают гасящий резистор  $R_{\text{г}}$ , служащий для удержания рабочей точки на пологом участке характеристики стабилитрона. При изменении входного напряжения  $E$  меняются токи, проходящие через стабилитрон и гасящий резистор, а напряжение на выходе и ток нагрузки практически постоянные из-за нелинейности вольтамперной характеристики стабилитрона. Таким образом, изменение входного напряжения сопровождается изменением падения напряжения на гасящем резисторе  $R_{\text{г}}$ , вызванным приростом или уменьшением тока стабилитрона. Изменение тока (сопротивления) нагрузки вызывает почти такое же по значению, но противоположное по знаку изменение тока стабилитрона. Поэтому падение напряжения на га-

сящем резисторе и, следовательно, выходное напряжение зависят от тока нагрузки очень мало.

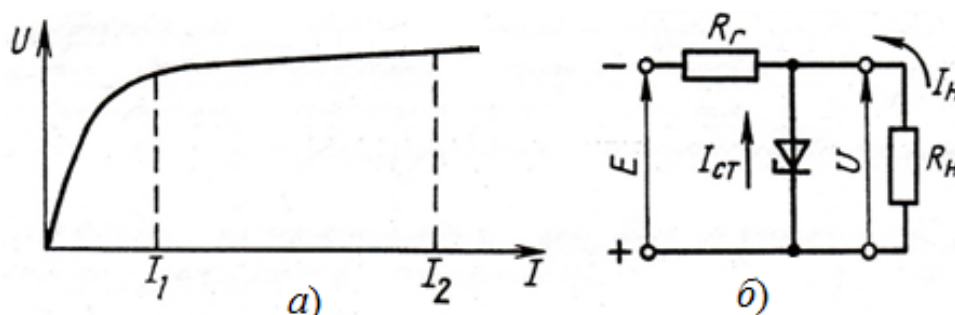


Рис. 41. ВАХ стабилитрона (а); схема включения (б)

Полупроводниковый (кремниевый) стабилитрон имеет вольтамперную характеристику (см. рис. 47) с достаточно протяженным участком, на котором значительным приращением тока соответствуют малые приращения напряжения. Этот участок получается при обратном смещении  $p-n$  перехода в нем и характерен для режима электрического пробоя  $p-n$  перехода.

Стабилитроны применяют как самостоятельные стабилизаторы напряжения на нагрузках, потребляющих относительно небольшую мощность. По конструктивному выполнению кремниевые стабилитроны аналогичны выпрямительным полупроводниковым диодам.

Простые стабилизаторы не могут обеспечить стабильное напряжение на нагрузке, если изменения её тока велики и выводят рабочую точку за пределы полого участка характеристики стабилитрона. К тому же часто требуется получить и иное по значению или более стабильное напряжение, чем позволяет стабилитрон. Большую стабильность и большой диапазон токов нагрузки и стабилизируемых напряжений обеспечивают стабилизаторы, в которых используются регулируемые сопротивления и обратная связь, управляющая их значением.

4.3. Стабилизаторы с регулируемым балластным сопротивлением. В качестве регулируемых сопротивлений на постоянном токе применяют транзисторы, так как эти приборы, во-первых, управляются электрически-

ми сигналами и, во-вторых, малоинерционны. Транзистор включают либо последовательно либо параллельно с нагрузкой (рис. 42).

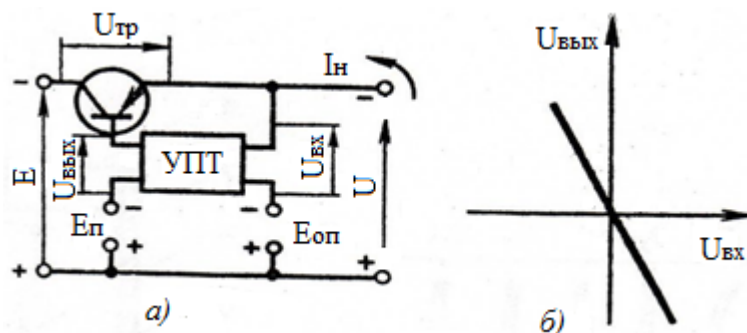


Рис. 42. Стабилизатор с последовательным включением транзистора: а – структурная схема стабилизатора напряжения; б – амплитудная характеристика

Сигнал обратной связи поступает от источника выходного напряжения стабилизатора и усиливается в усилителе постоянного тока (УПТ), затем воздействует на регулируемое сопротивление. Падение напряжения на транзисторе (рис. 42, а) меняется согласно формуле (1) и приведено на рис. 42, б. В схеме рис. 43, а падение напряжения на транзисторе изменяется согласно формуле (2) и приведено на рис. 43, б:

$$\Delta E = \Delta U_{TP}(t) + \Delta U(t), \quad (1)$$

$$\Delta E = [\Delta I_H(t) + \Delta I_{TP}(t)] R_r + \Delta U(t). \quad (2)$$

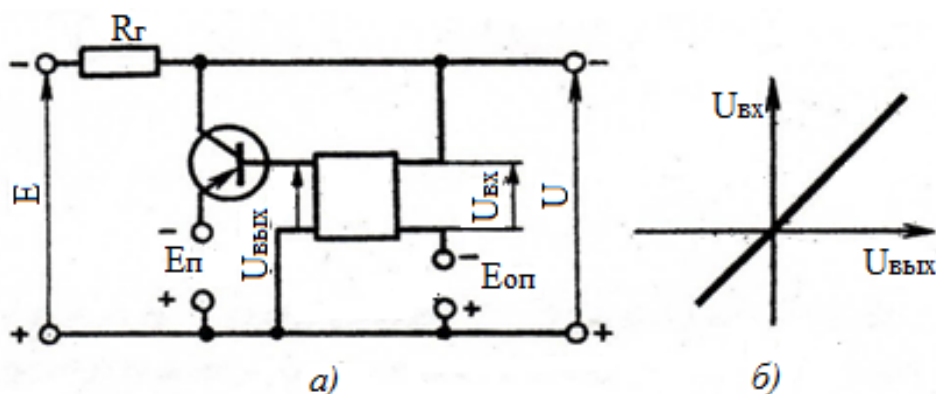


Рис. 43. Стабилизатор с параллельным включением транзистора: а – структурная схема стабилизатора напряжения; б – амплитудная характеристика

Выводы:

1. Выходное напряжение регулируется с некоторым запаздыванием, определяемым инерциальностью как усилителя, так и регулируемого триода.
2. В выходном напряжении остается некоторая остаточная неустойчивость, зависящая от коэффициента усиления усилителя, стоящего в цепи обратной связи. Это свойственно всем схемам с обратной связью.
3. Стабилизаторы с обратной связью обладают хорошими внешними характеристиками, высокими динамическими показателями и высокой стабильностью выходного напряжения при изменении внешних условий.

#### *5. Контрольные вопросы*

- 5.1. При каких условиях выходное напряжение параметрического стабилизатора остается постоянным?
- 5.2. Когда возникает ток стабилизации  $I_{ст}$ ?
- 5.3. При каких условиях эффект стабилизации сохраняется даже под нагрузкой?
- 5.4. Какова величина напряжения стабилизации  $U_{ст}$ ?
- 5.5. Каков максимальный обратный ток стабилитрона?
- 5.6. Какова величина прямого напряжения стабилитрона  $U_{пр}$ ?
- 5.7. Каков максимальный прямой ток стабилитрона?
- 5.8. Какова пульсация входного напряжения  $\Delta U_{вх}$  за сглаживающим конденсатором?
- 5.9. Какова пульсация выходного напряжения  $\Delta U_{вых}$  за стабилитроном?
- 5.10. Какова величина коэффициента сглаживания  $G$  (абсолютного коэффициента стабилизации  $G = \Delta U_{вх} / \Delta U_{вых}$ )?
- 5.11. Какова величина относительного коэффициента стабилизации  $S = (\Delta U_{вх} \cdot U_{вых}) / \Delta U_{вых} \cdot U_{вх} = G \cdot (U_{вых} / U_{вх}) = ?$

### **Лабораторная работа № 3**

#### ***Неуправляемый выпрямитель трехфазного тока***

*Цель работы:* ознакомление с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия полупроводниковых трехфазных выпрямителей большой мощности. В результате проведения работы студенты

должны знать основные формы записи уравнений математической модели полупроводниковых трехфазных выпрямителей большой мощности; уметь рассчитывать параметры электрической цепи, содержащей полупроводниковые трехфазные выпрямители большой мощности; приобрести навыки экспериментального исследования параметров полупроводниковых трехфазных выпрямителей большой мощности и практические навыки снятия вольтамперных характеристик.

### *1. Объект и средства исследования*

Объектом исследования являются полупроводниковые приборы, входящие в состав типового комплекта лабораторного оборудования в стендовом исполнении «Теоретические основы электротехники» (подробное описание стенда приведено во введении, общий вид показан на рис. 1).

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

### *2. Подготовка к работе*

2.1. Доказать, что в электрической цепи, содержащей полупроводниковый трехфазный выпрямитель большой мощности, включенный последовательно с нагрузкой, напряжение на нагрузке будет практически постоянным с минимальными пульсациями при номинальном токе.

2.2. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов для исследования параметров и снятия вольтамперных характеристик полупроводниковых трехфазных выпрямителей большой мощности с учетом расположения приборов и оборудования на стенде. Узловые точки схемы согласовать с обозначениями на блоках стенда. Предусмотреть в схемах всех опытов включение соответствующих виртуальных измерительных приборов.

2.3. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда и принципом действия, а также составом виртуальных приборов, используемых при проведении лабораторной работы.

2.4. Изучить теоретический материал, указанный в библиографическом списке.

2.5. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе на листах формата А-4, содержащий ответы на вопросы п. 2 и заготовки таблиц, схем, графиков и расчетных формул к разделу 3.

### 3. Рабочее задание

3.1. Соберите электрическую цепь согласно схеме п. 2.2 трехфазного выпрямителя с нулевым выводом для снятия осциллограмм и определения его параметров. Эксперимент выполнить, используя виртуальные приборы. При сборке параметры элементов схемы выбрать, руководствуясь схемой рис. 44, на которой в соответствии с обозначениями на блоках стенда верхние узлы виртуальных вольтметров  $V0$  и  $V1$  являются узлами  $V0$  и  $V1$  – входами коннектора.

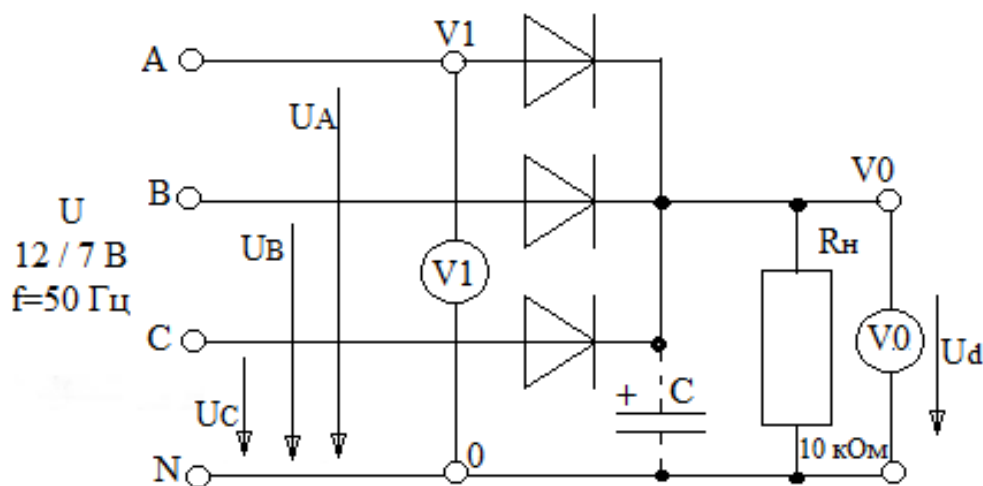


Рис. 44. Схема трехфазного выпрямителя с нулевой точкой

3.2. После проверки схемы преподавателем включите виртуальные приборы  $V0$  и  $V1$  и осциллограф. Подайте на ее вход переменное трехфазное напряжение с действующим значением, равным 7 В, частотой 50 Гц. На схеме  $V0$  и  $V1$  – входы коннектора. При сборке схемы обратите внимание на полярность электролитического конденсатора. В начале исследования емкость конденсатора нулевая  $C = 0$  (конденсатор отсутствует).

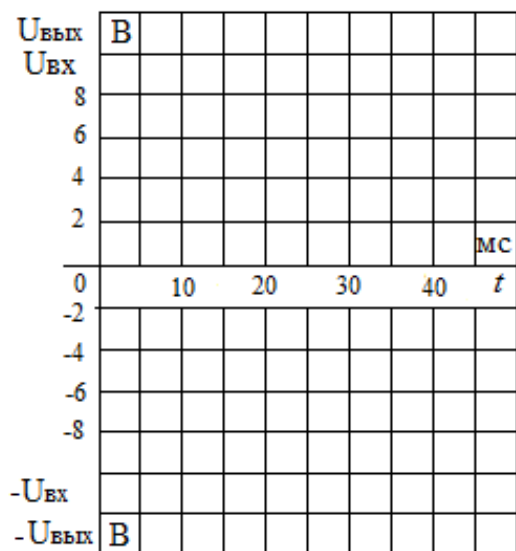


Рис. 45. Форма для нанесения графиков входных и выходных напряжений

3.3. Включите виртуальные приборы  $I_0$  и  $I_1$  и осциллограф. Подключите два любых входа осциллографа к каналам  $I_0$  и  $I_1$ . Установите развертку 5 мс/дел. Перенесите на график (рис. 45) осциллограммы входного и выходного напряжений.

3.4. Сделайте измерения и запишите в табл. 11 значения:  $U_{ВХ}$  – действующее,  $U_d$  – среднее,  $\Delta U_{\text{пульс}}$ ,  $m = f_{\text{пульс}}/f_{ВХ}$ . Рассчитайте и запишите в табл. 11 коэффициенты  $U_d / U_{ВХ}$  и  $k_{\text{пульс}}$ .

Таблица 11

$C$ , мкФ	0	1	10	100
$U_{ВХ}$ , В				
$U_d$ , В				
$\Delta U_{\text{пульс}}$ , В				
$m$				
$U_d / U_{ВХ}$				
$k_{\text{пульс}}$				

3.5. Параллельно нагрузочному резистору  $R_H$  подключите сглаживающие конденсаторы  $C$  с емкостями, указанными в табл. 11, повторите измерения и дорисуйте графики выпрямленного напряжения (см. рис. 45).

3.6. Теперь соберите цепь трехфазного мостового выпрямителя согласно схеме (рис. 46) и повторите все измерения, выполненные для трехфазного выпрямителя с нулевым входом. Результаты представьте в таблице, аналогичной табл. 11, и на графиках (рис. 47). Исследованные параметры обоих выпрямителей сравнить с параметрами однофазных выпрямителей.



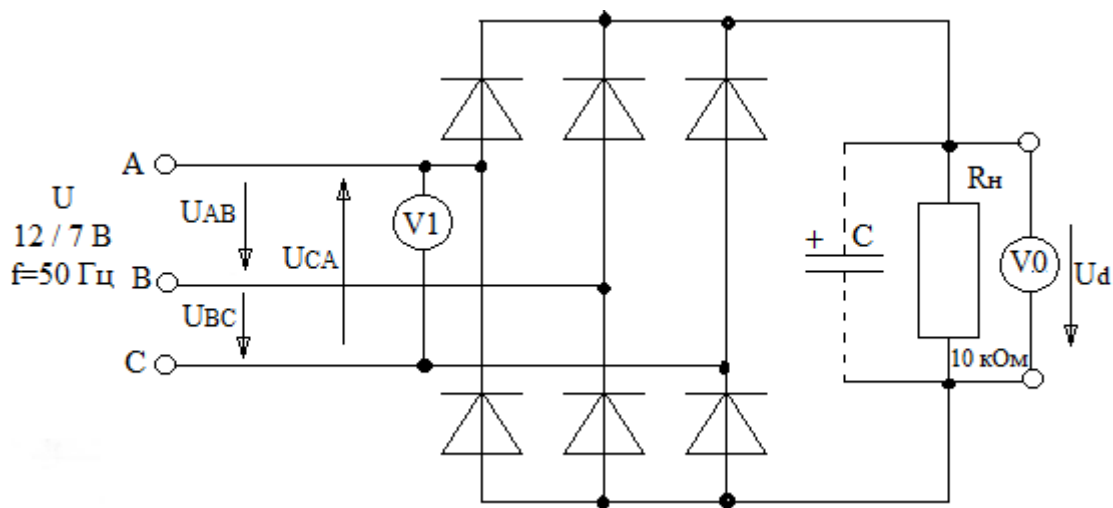


Рис. 46. Трехфазный выпрямитель по схеме Ларионова

#### 4. Методические указания

4.1. Общие сведения о трехфазных выпрямителях. Потребители большой мощности питаются выпрямленным трехфазным переменным током. Несколько большая в сравнении с однофазным выпрямителем стоимость трехфазного выпрямителя многократно окупается за счет более простого сглаживания выходного напряжения при использовании источника трехфазного переменного напряжения.

Трехфазная схема с нулевым выводом. Трехфазная схема выпрямления с выводом нулевой точки применяется довольно редко, так как трансформатор в ней имеет низкие энергетические характеристики и вентили должны выбираться на относительно высокое обратное напряжение. При этом токи вентиля протекают через обмотки, расположенные на одном стержне, в противоположном направлении и постоянные составляющие компенсируются.

Шестипульсные схемы выпрямления. Шестипульсные схемы выпрямления (табл. 12) имеют большое значение для силовой (и не си-

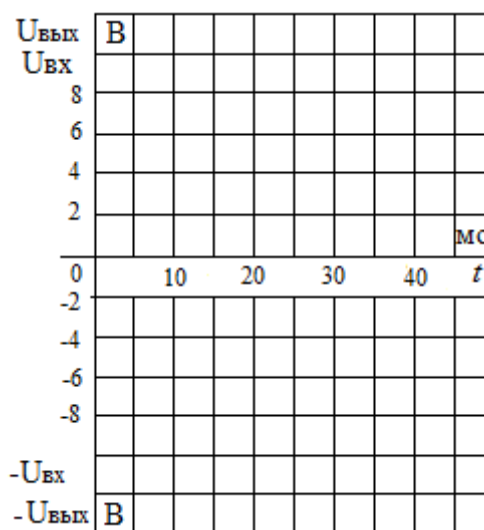


Рис. 47. Форма для нанесения графиков входных и выходных напряжений по схеме Ларионова

ловой) электроники, так как они дают весьма малые пульсации выпрямленного напряжения и характеризуются высокими энергетическими показателями вентилей и трансформатора. Применяя параллельное или последовательное соединение шестипульсных схем выпрямления, можно получить преобразовательные устройства с большим числом фаз выпрямления ( $p = 12, 18$  и т.д.).

Трехфазная мостовая схема. Эту схему (рис. 48) можно рассматривать как последовательное включение двух трехфазных нулевых выпрямителей  $V_1 - V_3$  и  $V_4 - V_6$ . Кривая выпрямленного напряжения в этой

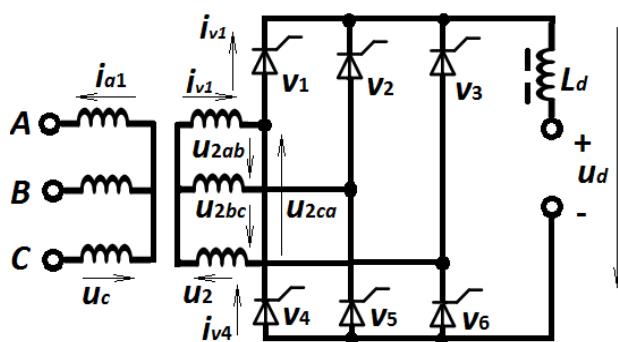


Рис. 48. Мостовая схема (схема Ларионова)

схеме образуется из отрезков кривых линейных напряжений  $U_{2ab}, U_{2bc}, U_{2ca}$ , (рис. 49), причем на каждом интервале  $\pi/3$  на выходе выпрямителя действует то напряжение, которое в данный момент времени наибольшее. В дальнейшем предполагается, что выпрямленный ток идеально сглажен.

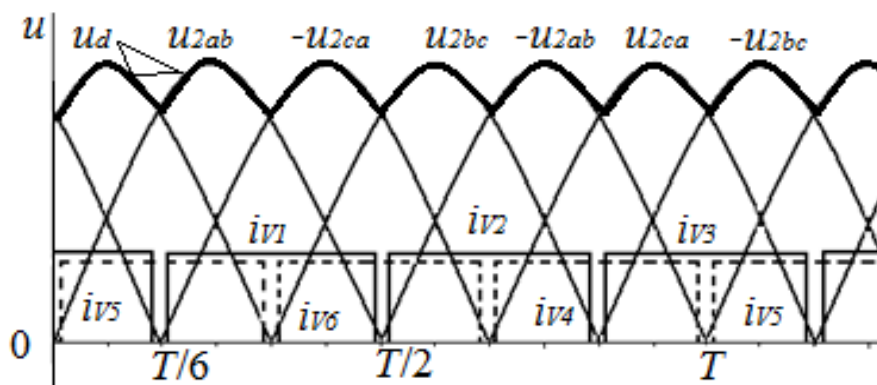


Рис. 49. Эюры напряжений и токов схемы рис. 48

Среднее значение выпрямленного напряжения неуправляемого выпрямителя (при  $\alpha = 0$ ):

$$U_{di0} = 2,34U_2,$$

где  $U_2$  – действующее значение фазного напряжения.

Гармонические составляющие в кривой  $U_d$  имеют порядок  $v = 6, 12, 18$  и т.д. Действующее значение напряжения пульсаций составляет всего

4 % выпрямленного напряжения. Если выпрямитель должен обеспечить номинальный выпрямленный ток  $I_{dn}$ , то необходимо выбирать вентиль на средний ток:  $I_{dn}/3$ .

Положительным фактором является и то, что через вентильные обмотки трансформатора протекают чисто переменные токи (без постоянной составляющей)  $i_{2a,b,c}$ . Токи  $i_{1a,b,c}$  первичных обмоток трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда – звезда» имеют такую же форму, что и токи вторичных обмоток (рис. 50), при соединении обмоток по схеме «треугольник – звезда» форма первичного тока показана на рис. 51. В обоих случаях трансформатор успешно используется. Мостовая схема выпрямления может быть подключена к сети также и без трансформатора, но при этом чаще всего необходимы токоограничивающие реакторы в цепи переменного тока для ограничения токов короткого замыкания.

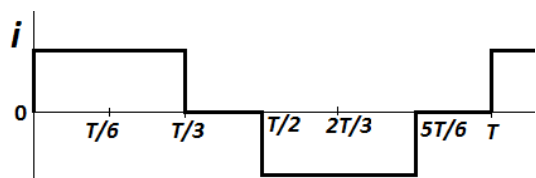


Рис. 50. Ток в первичной обмотке для группы соединения «звезда – звезда»

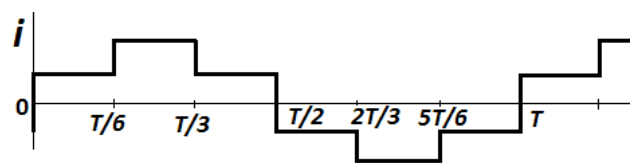


Рис. 51. Ток в первичной обмотке для группы соединения «треугольник – звезда»

Приведенные в табл. 12 параметры показывают, что трехфазная мостовая схема имеет высокие показатели. Существуют два варианта построения трехфазной мостовой схемы для регулирования выпрямленного напряжения: симметрическая (полностью управляемая) и несимметрическая (полууправляемая) схемы.

В симметрической мостовой схеме все вентили  $V_1 \div V_6$  – тиристоры. При непрерывном токе нагрузки среднее значение выпрямленного напряжения определяется  $U_{di\alpha} = U_{di0} \cdot \cos\alpha$ . Требования к вентилям по обратному напряжению невысоки (см. табл. 12).

С помощью нулевого диода (рис. 52) можно или улучшить сглаживание выпрямленного тока, или уменьшить индуктивность сглаживающего реактора при сохранении режима непрерывного тока.

В полууправляемой схеме тиристоры  $V_4 \div V_6$  заменены на диоды. Как видно из временной диаграммы выпрямленного напряжения  $U_d$  (рис. 53), при этом возникают гармоники 3, 6, 9 и т.д.

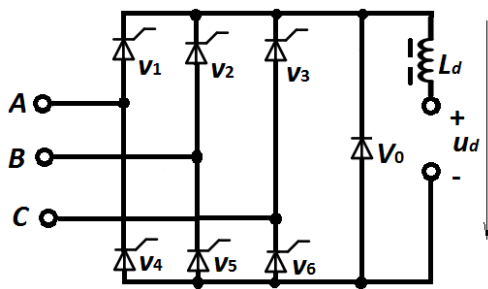


Рис. 52. Трехфазная мостовая схема выпрямления с нулевым диодом

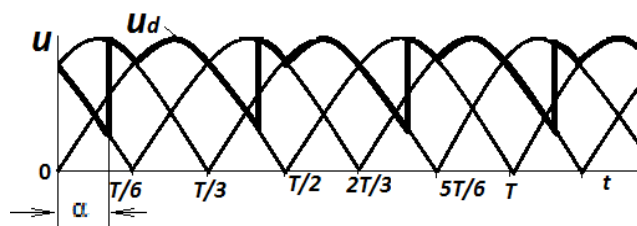


Рис. 53. Диаграммы выпрямленного напряжения  $U_d$  в полупроводящей трехфазной мостовой схеме

Среднее значение выпрямленного напряжения определяется напряжениями управляемого и неуправляемого трехфазных нулевых выпрямителей, на которые схема может быть разделена, и рассчитывается по формулам

$$U_{dia} = U_{dio} (1 + \cos\alpha)/2 \text{ и } U_{dio} = 1,17U_2.$$

В области  $0 \leq U_{dia} \leq U_{dio}/2$  и  $\alpha > 90^\circ$  управляемая вентильная группа  $V_1 - V_3$  работает в инверторном режиме, создавая противоэдс. Инвертор не может быть отрегулирован до напряжения идеального холостого хода (в рассматриваемом случае до  $1,17U_2$ ). Если необходимо данным способом снизить выходное напряжение до нуля, напряжение  $U_2$ , подаваемое на вентили  $V_1 \div V_3$ , должно быть несколько большим, чем напряжение  $U_2$ , подводимое к вентилям  $V_4 \div V_6$ . Это достигается за счет отпаек от вторичных обмоток трансформатора (рис. 54). Сравнение двух вариантов мостовой схемы позволяет сделать выводы, что полупроводящая схема требует меньших затрат на вентили и систему управления и имеет более высокий коэффициент мощности.

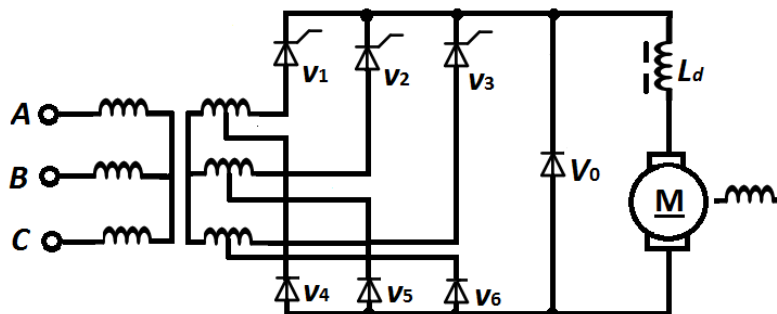


Рис. 54. Трехфазная мостовая полупроводящая схема с выводами от вторичных отпаек трансформатора и нулевым диодом

Схема выпрямления с уравнительным реактором. Эта схема (рис. 55) состоит из двух трехфазных нулевых выпрямителей  $V_1 \div V_3$  и  $V_4 \div V_6$ , которые питаются от двух трехфазных систем напряжения  $U_{2a,b,c}$  и  $U_{2\acute{a},\acute{b},\acute{c}}$ , сдвинутых относительно друг друга на  $60^\circ$  и работающих параллельно на общую нагрузку. Уравнительный реактор имеет сердечник, на котором размещена обмотка с выводом от средней точки. Он воспринимает (при токе нагрузки, превышающем примерно 1% номинального) разность мгновенных значений выпрямленных напряжений двух трехфазных выпрямителей и обеспечивает тем самым их параллельную работу. При этом в выпрямленном напряжении исключаются некоторые гармонические составляющие напряжения, так что схема работает как шестипульсная.

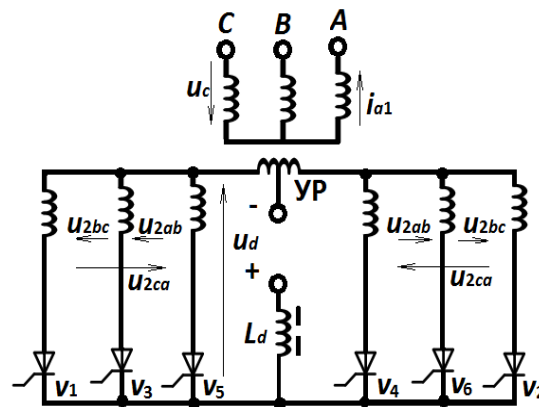


Рис. 55. Схема с уравнительным реактором

Таблица 12

Название схемы и обозначение	Для вентиля ток $I_{V(AV)}/I_d$	Для вентиля и предохранителей действующий ток $I_Y/I_d$	Для трансформатора действующий ток на вентиляльной стороне $I_2/I_d$	Коэффициент использования $C_t = S_t/P_{d0}$	Коэффициент наклона внешней характеристики $A$
Однофазная однополупериодная с шунтирующим (нулевым) вентилем (однопульсная) М1Ф	0,5	0,71	0,71	1,34	—
Однофазная двухполупериодная со средней точкой (двухпульсная) М2	0,5	0,71	0,71	1,34	0,71
Однофазная мостовая (двухпульсная) В2	0,5	0,71	1,0	1,11	0,71
Трехфазная «звезда – зигзаг» со средней точкой (трехпульсная) М3/30	0,33	0,58	0,58	1,46	0,87
Трехфазная мостовая звезда – звезда (шестипульсная) В6*	0,33	0,58	0,82	1,05	0,5

Название схемы и обозначение	Для вентиля ток $I_{V(AV)}/I_d$	Для вентиля и предохранителей действующий ток $I_Y/I_d$	Для трансформатора действующий ток на вентильной стороне $I_2/I_d$	Коэффициент использования $C_t = S_t/P_{d0}$	Коэффициент наклона внешней характеристики $A$
Две трехфазные звезды со средней точкой и с уравнивательным реактором (шестипульсная) М3.2/30	0,17	0,29	0,29	1,32	0,5
12-пульсная с параллельным включением мостов В6.2/15	0,17	0,29	0,41	1,03	0,51
12-пульсная с последовательным включением мостов В6.2S15	0,33	0,58	0,82	1,03	0,52

\*Данные, указанные для этой схемы, справедливы и при соединении обмоток трансформатора на сетевой и (или) вентильной стороне в треугольнике, за исключением отношения  $I_2/I_d$ , вместо которого для расчета действующего тока в обмотках на вентильной стороне трансформатора при соединении их в «треугольник» необходимо принимать равным 0,48.

### 5. Контрольные вопросы

5.1. Какова частота пульсаций выходного напряжения  $u_{\text{ВЫХ}}$  трехфазного выпрямителя с нулевым выводом?

5.2. Каково отношение выходного напряжения постоянного тока  $U_{\text{ВЫХ}}$  к действующему значению входного напряжения переменного тока  $U_{\text{ВХ}}$  в трехфазном выпрямителе с нулевым выводом?

5.3. Какова частота пульсаций выходного напряжения  $u_{\text{пульс}}$  в трехфазном мостовом выпрямителе?

5.4. Каково отношение напряжения постоянного тока  $U_{\text{ВЫХ}}$  к действующему значению входного напряжения переменного тока  $U_{\text{ВХ}}$  в трехфазном мостовом выпрямителе?

## Лабораторная работа № 4

### *Исследование характеристик биполярного транзистора*

*Цель работы:* ознакомление с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия полупроводниковых биполярных транзисторов (БТ). В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений математической модели полупроводниковых биполярных транзисторов; уметь рассчитывать параметры электрической цепи, содержащей полупроводниковые биполярные транзисторы; приобрести навыки экспериментального исследования параметров полупроводниковых биполярных транзисторов и практические навыки снятия вольтамперных характеристик.

#### *1. Объект и средства исследования*

Объектом исследования являются полупроводниковые приборы, входящие в состав типового комплекта лабораторного оборудования в стендовом исполнении «Теоретические основы электротехники» (подробное описание стенда приведено во введении, общий вид показан на рис. 1).

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

#### *2. Подготовка к работе*

2.1. Доказать, что в электрической цепи, содержащей два встречно включенных полупроводниковых диода, эффект усиления тока, втекающего в оба катода, будет отсутствовать.

2.2. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов для исследования параметров и снятия вольтамперных характеристик полупроводниковых биполярных транзисторов с учетом расположения приборов и оборудования на стенде. Узловые точки схемы согласовать с обозначениями на блоках стенда. Предусмотреть в схемах всех опытов включение соответствующих виртуальных измерительных приборов.

2.3. Ознакомьтесь с устройством лабораторного стенда и принципом действия, а также составом виртуальных приборов, используемых при проведении лабораторной работы.

2.4. Изучить теоретический материал, указанный в библиографическом списке.

2.5. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе на листах формата А-4, содержащий ответы на вопросы п. 2 и заготовки таблиц, схем, графиков и расчетных формул к п. 3.

### 3. Рабочее задание

3.1. Соберите электрическую цепь согласно схеме п. 2.2 для снятия вольтамперных характеристик эмиттерного и коллекторного  $p-n$  переходов транзисторов типа  $p-n-p$  и типа  $n-p-n$  в прямом направлении. Убедитесь, что в обратном направлении токи через эти  $p-n$  переходы ничтожно малы. Эксперимент выполнить, используя виртуальные приборы. При сборке параметры элементов схемы выбрать, руководствуясь схемой рис. 56, на которой в соответствии с обозначениями на блоках стенда верхние узлы виртуальных вольтметров  $V0$  и  $V1$  являются узлами  $V0$  и  $V1$  – входами коннектора.

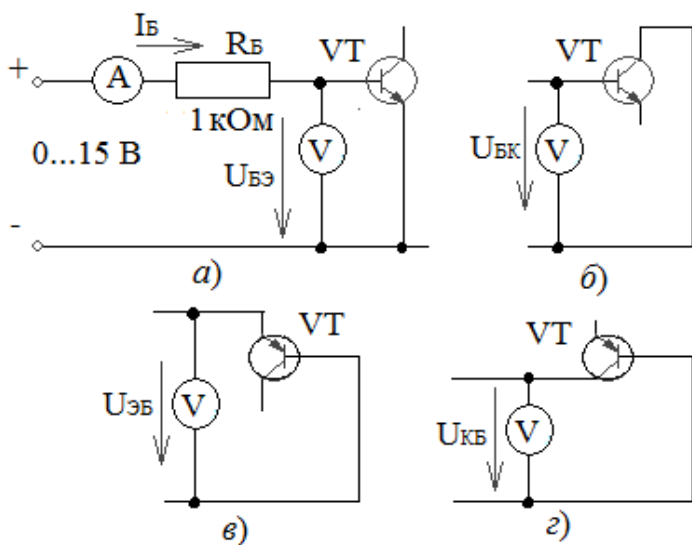


Рис. 56. Схемы включения: а – эмиттерно-базового  $p-n$  перехода; б – коллекторно-базового  $p-n$  перехода; в – базо-эмиттерного  $p-n$  перехода; г – базо-коллекторного  $p-n$  перехода

3.2. Поочередно устанавливая значения токов  $I_{пр}$  регулятором напряжения источника, измерьте соответствующие значения напряжения на  $p-n$  переходе  $U_{БЭ}$  и занесите их в табл. 13.

3.3. Измените схему в соответствии сначала с рис. 56, б, затем рис. 56, в – г и повторите все измерения.

3.4. Используя формулу (рис. 57) постройте графики  $I_{пр}(U_{пр})$  для каждого случая и убедитесь, что вольтамперные характеристики всех  $p-n$  переходов практически совпадают.



3.5. Установите входное напряжение источника равным нулю, поменяйте его полярность (зажим «+» на «-») и, увеличивая напряжение до 5 В (но не выше!), убедитесь, что ток в  $p-n$  переходе практически остается равным нулю (не превышает 1 мкА).

3.6. Прodelайте опыт с остальными  $p-n$  переходами согласно схеме (см. рис. 56) при обратной полярности источника питания.

Таблица 13

$I_{пр}$ , мА	Транзистор $n-p-n$		Транзистор $p-n-p$	
	$U_{БЭ}$ , В	$U_{БК}$ , В	$U_{ЭБ}$ , В	$U_{КБ}$ , В
0				
1				
2				
4				
8				
14				

3.7. Для исследования влияния тока базы на вольтамперную характеристику  $I_K(U_{ЭК})$  для  $n-p-n$  транзистора с помощью осциллографа соберите цепь согласно схеме (рис. 58). В этой цепи в качестве источника синусоидального напряжения используется линейное напряжение трехфазного генератора, а диод служит для исключения обратного напряжения на транзисторе. Приборы А1 и V0 – входы коннектора, необходимые для вывода тока  $I_K$  и напряжения  $U_{ЭК}$  на виртуальный осциллограф. Миллиамперметр А служит для измерения тока базы и может быть как мультиметром, так и виртуальным прибором.

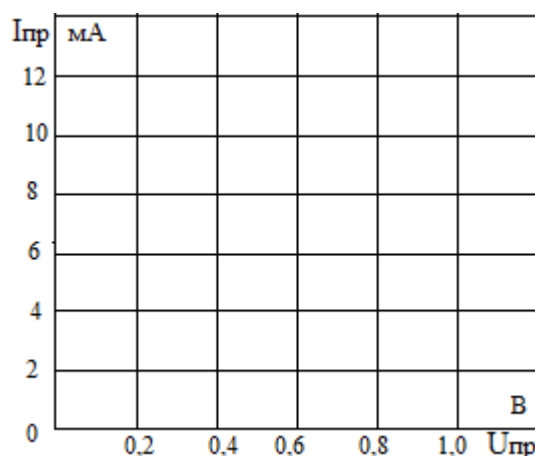


Рис. 57. Форма для нанесения вольтамперных характеристик  $p-n$  переходов

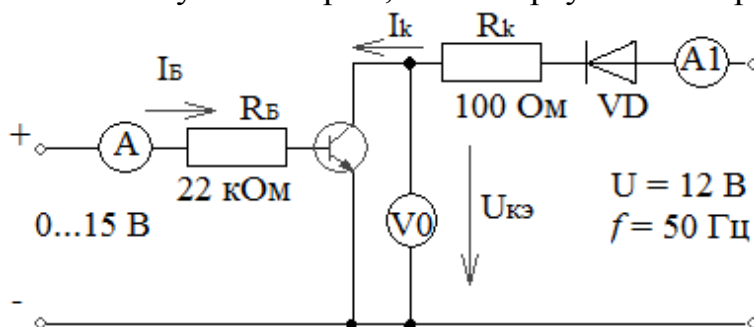


Рис. 58. Схема для снятия зависимости тока коллектора от тока базы

3.8. Включите виртуальные приборы А1, V0 и виртуальный осциллограф, на котором установите режим XY. В качестве входа Y выберите ток коллектора, т.е. А1 (по умолчанию это канал 3). В качестве входа X выберите  $U_{КЭ}$ , т.е. V0 (по умолчанию – канал 1).

3.9. Установите регулятор постоянного напряжения на ноль и зафиксируйте кнопкой 1 осциллографа масштаб по напряжению. Затем установите регулятор постоянного напряжения на максимум и зафиксируйте кнопкой 3 осциллографа масштаб тока. Теперь при регулировании тока базы масштабы по осям осциллографа автоматически изменяться не будут.

3.10. Регулируя ток базы от 0 до максимального значения и наоборот, наблюдайте за изменением кривой  $I_K(U_{ЭК})$  на осциллографе. При нескольких значениях тока базы (включая нулевое и максимальное) перерисуйте кривую  $I_K(U_{ЭК})$  с осциллографа на график (рис. 59). Не забудьте указать масштабы по осям и токи базы для каждой кривой.

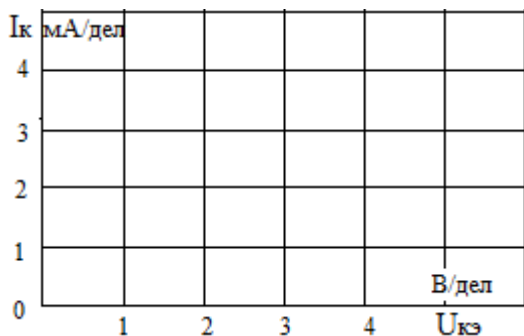


Рис. 59. Форма для нанесения выходных характеристик биполярного транзистора

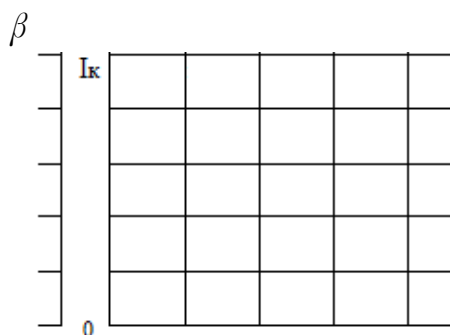


Рис. 60. Форма для нанесения графика зависимости статического коэффициента передачи базового тока

3.11. На семействе кривых  $I_K(U_{ЭК})$  выберите какое-либо постоянное напряжение  $U_{ЭК}$  (например, 5 В) и постройте зависимость  $I_K(I_B)$  для этого значения напряжения  $U_{ЭК}$  (рис. 59). Рассчитайте и постройте график  $\beta(I_B) = \Delta I_K / \Delta I_B$ . Нанесите шкалы по осям (рис. 60).

3.12. Соберите цепь согласно схеме (рис. 61). Снимите экспериментально и постройте графики четырех семейств характеристик биполярного транзистора  $n-p-n$  типа. Потенциометр 1 кОм используется для регулирования тока базы, резисторы 100 и 47 кОм – для ограничения максимального тока базы. Измерение тока базы  $I_B$  и напряжения  $U_{БЭ}$  производится мультиметрами на пределах 200 мкА и 2 В соответственно. Регулирование напряжения  $U_{КЭ}$  осуществляется регулятором источника постоянного напряжения, ток коллектора  $I_K$  и напряжение  $U_{КЭ}$  измеряются виртуальными приборами

(пределы измерения коннектора изменяются в ходе работы по мере необходимости или по подсказкам компьютера).

3.13. Установите первое значение тока базы 20 мкА и, изменяя напряжение  $U_{КЭ}$  согласно значениям, указанным в табл. 14, снимите зависимости  $I_{К}(U_{КЭ})$  и  $U_{БЭ}(U_{КЭ})$ . Повторите эти измерения при каждом значении  $I_{Б}$ , указанном в табл. 14.

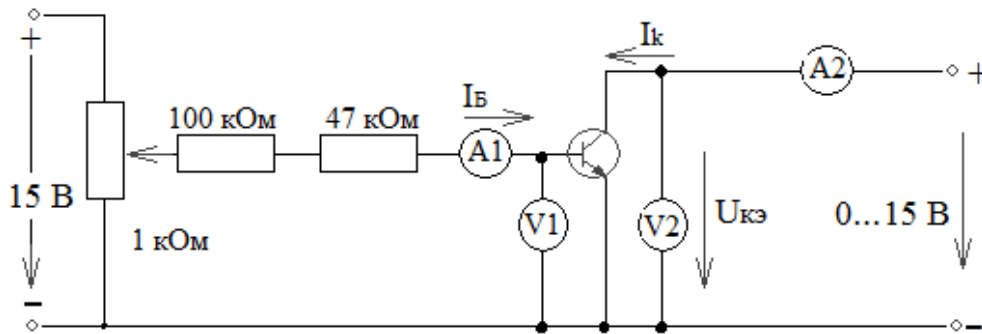


Рис. 61. Схема для снятия семейства выходных характеристик биполярного транзистора

*Примечание.* Характеристики транзистора изменяются в ходе работы из-за его нагрева. Для большей определенности рекомендуется установить нужные значения  $U_{БЭ}$  и  $U_{КЭ}$ , выключить на 30 секунд блок генераторов напряжений, затем включить его и быстро записать показания приборов  $V1$  и  $A2$ .

Таблица 14

$U_{КЭ}$ , В	$I_{Б} = 20$ мкА		$I_{Б} = 40$ мкА		$I_{Б} = 60$ мкА		$I_{Б} = 80$ мкА	
	$I_{К}$ , 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								

3.14. На рис. 4.6 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.

3.15. Установите  $U_{КЭ} = 0$  и, изменяя ток базы в соответствии со значениями, указанными в табл. 15, снимите зависимость  $U_{БЭ}(I_{Б})$ . Увеличьте напряжение  $U_{КЭ}$  до 5 В и снова снимите зависимость  $U_{БЭ}(I_{Б})$ , а также и

$I_K(I_B)$ . Повторите этот опыт также при  $U_{КЭ} = 15$  В (при проведении этих измерений также учитывайте примечание к предыдущему опыту).

3.16. На рис. 62 постройте графики входных  $I_B(U_{БЭ})$  и регулировочных  $I_K(I_B)$  характеристик, указав для каждой кривой соответствующие значения  $U_{КЭ}$ .

Таблица 15

$I_B$ , мкА	$U_{КЭ} = 0$ В		$U_{КЭ} = 5$ В		$U_{КЭ} = 15$ В	
	$U_{БЭ}$ , В	$I_K$ , мА	$U_{БЭ}$ , В	$I_K$ , мА	$U_{БЭ}$ , В	$I_K$ , мА
0						
5						
10						
20						
50						
80						

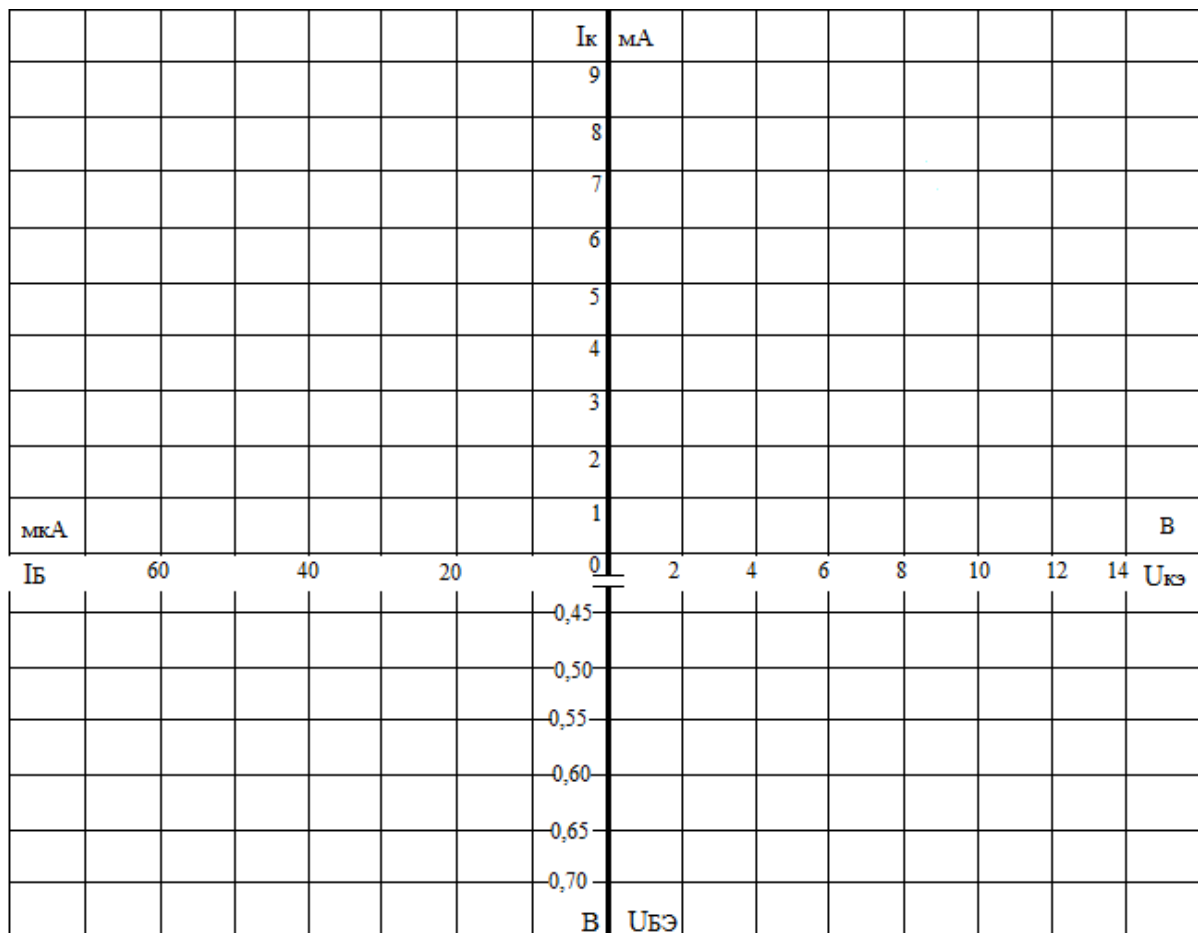


Рис. 62. Форма для нанесения графиков входных и выходных характеристик биполярного транзистора

#### 4. Методические указания

4.1. Испытание слоев и выпрямительного действия биполярных транзисторов. Транзистор (рис. 63) представляет собой полупроводниковый триод, у которого тонкий  $p$ -проводящий слой помещен между двумя  $n$ -проводящими слоями ( $n$ - $p$ - $n$  транзистор) или  $n$ -проводящий слой помещен между двумя  $p$ -проводящими слоями ( $p$ - $n$ - $p$  транзистор).

$p$ - $n$  переходы между средним слоем (база) и двумя крайними слоями (эмиттер и коллектор) обладают выпрямительным свойством, которое можно исследовать как в случае любого выпрямительного диода.

4.2. Распределение тока в транзисторе и управляющий эффект тока базы. В транзисторе  $p$ - $n$ - $p$  типа (рис. 64) ток эмиттера к коллектору через базу обусловлен неосновными для базы носителями заряда –

дырками. При положительном направлении напряжения  $U_{ЭБ}$  эмиттерный  $p$ - $n$  переход открывается, и дырки из эмиттера проникают в область базы. Часть из них уходит к источнику напряжения  $U_{ЭБ}$ , а другая часть достигает коллектора. Возникает так называемый транзитный ток от эмиттера к коллектору. Он резко возрастает с увеличением  $U_{ЭБ}$  и тока базы.

В транзисторе  $n$ - $p$ - $n$  типа (рис. 64, б) транзитный ток через базу обусловлен также неосновными для нее носителями заряда – электронами. Так они появляются из эмиттера, если к эмиттерному  $p$ - $n$  переходу прикладывается напряжение  $U_{БЭ}$ , полярность которого показана на рис. 64, б. Токи эмиттера, коллектора и базы связаны между собой уравнением первого закона Кирхгофа:

$$I_{К} = I_{Э} - I_{Б}.$$

Обычно ток базы существенно меньше  $I_{К}$  и  $I_{Э}$ , но от него сильно зависит как  $I_{К}$ , так и  $I_{Э}$ . Отношение приращения тока коллектора к приращению тока базы называется коэффициентом усиления по току:

$$\beta = \Delta I_{К} / \Delta I_{Б}.$$

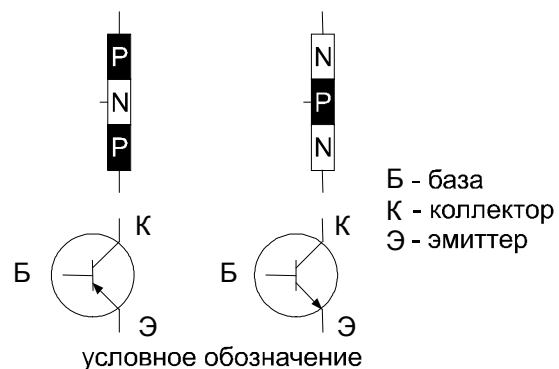


Рис. 63. Структура полупроводникового триода

Коэффициент может иметь значения от нескольких десятков до нескольких сотен, поэтому с помощью сравнительно малого тока базы можно регулировать относительно большие токи коллектора (и эмиттера).

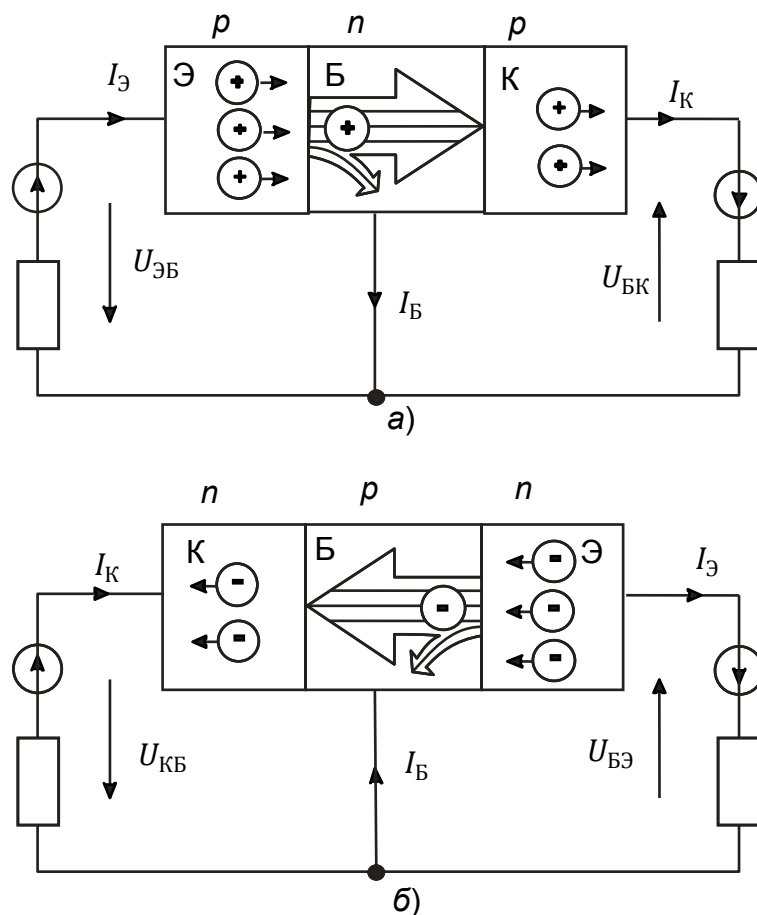


Рис. 64. Перемещение носителей заряда в биполярном транзисторе: а – перемещение дырок; б – перемещение электронов

4.3. Характеристики транзистора. Свойства транзисторов описываются следующими четырьмя семействами характеристик.

Входная характеристика показывает зависимость тока базы  $I_B$  от напряжения в цепи база/эмиттер  $U_{БЭ}$  (при  $U_{КЭ} = \text{const}$ ).

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

Характеристика управления представляет собой зависимость тока коллектора  $I_K$  от тока базы  $I_B$  (при  $U_{КЭ} = \text{const}$ ).

Характеристика обратной связи есть зависимость напряжения цепи база/эмиттер  $U_{БЭ}$ , соответствующего различным неизменным значениям тока базы, от напряжения цепи коллектор/эмиттер  $U_{КЭ}$  при различных фиксированных значениях тока базы.

#### 4.4. Математические модели БТ

Модель Эберса – Молла с двумя источниками тока, управляемыми токами (ИТУТ), отражает взаимодействие переходов транзистора (рис. 65).

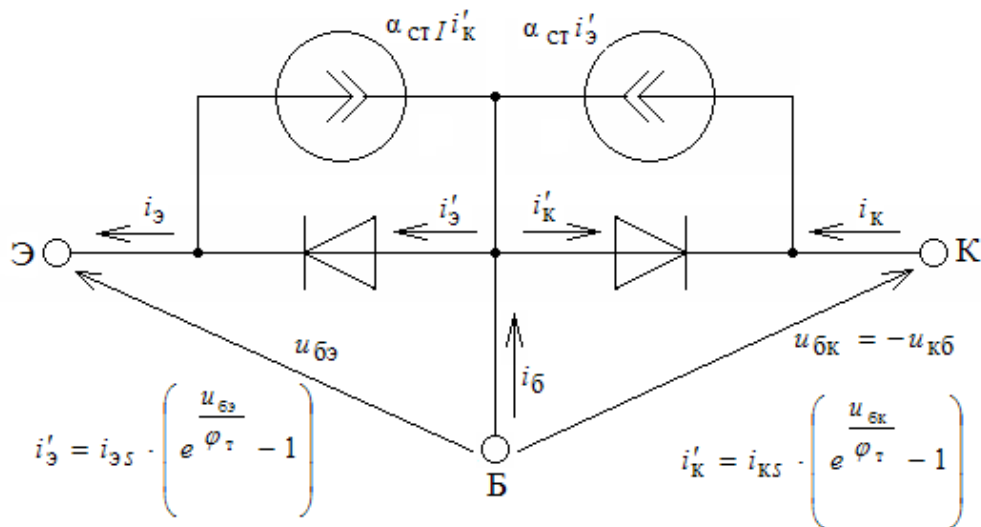


Рис. 65. Модель Эберса – Молла с двумя ИТУТ

Токи коллектора и эмиттера:

$$i_K = \alpha_{CT} i_{ЭС} \left( e^{\frac{u_{БЭ}}{\varphi_T}} - 1 \right) - i_{КС} \left( e^{\frac{u_{БК}}{\varphi_T}} - 1 \right); \quad i_Э = i_{ЭС} \left( e^{\frac{u_{БЭ}}{\varphi_T}} - 1 \right) - \alpha_{CT} i_{КС} \left( e^{\frac{u_{БК}}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

где  $\alpha_{CT}$  - коэффициент передачи коллекторного тока в инверсном включении транзистора;  $i_{ЭС}, i_{КС}$  - соответственно тепловые токи эмиттера и коллектора (токи насыщения);  $e$  - основание натурального логарифма;  $\varphi_T$  - температурный потенциал.

Модель Эберса – Молла с одним ИТУТ. Упрощенная модель Эберса – Молла с одним ИТУТ показана на рис. 66.

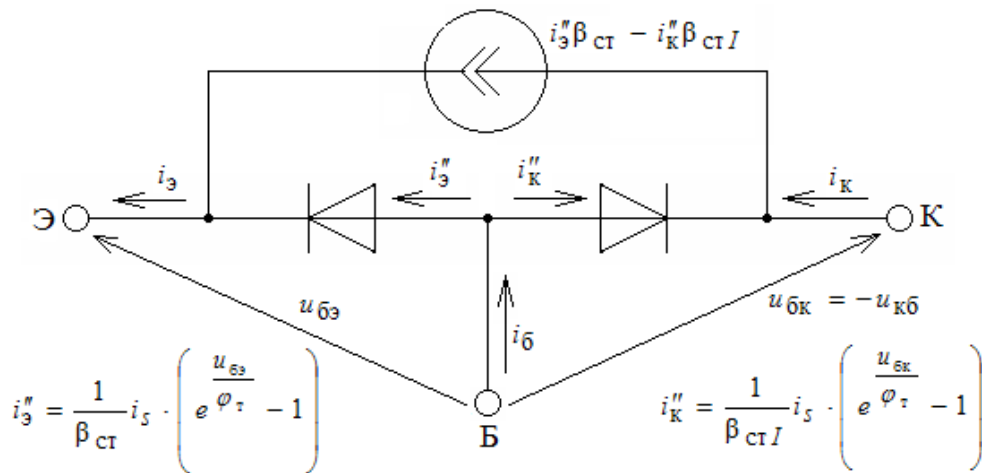


Рис. 66. Модель Эберса – Молла с одним ИТУТ

В приближенных расчетах с большой погрешностью можно считать, что

$$\alpha_{CT} I i_{KS} = \alpha_{CT} i_{ES}.$$

Далее с учетом соотношений между статическими коэффициентами

$$\alpha_{CT} = \frac{\beta_{CT}}{1 + \beta_{CT}}, \quad \beta_{CT} = \frac{\alpha_{CT}}{1 - \alpha_{CT}},$$

получим

$$i_K = i_s \left( e^{\frac{u_{бк}}{\phi_T}} - 1 \right) - i_s \left( e^{\frac{u_{бэ}}{\phi_T}} - 1 \right) - \frac{1}{\beta_{CT} I} i_s \left( e^{\frac{u_{бк}}{\phi_T}} - 1 \right);$$

$$i_3 = i_s \left( e^{\frac{u_{бэ}}{\phi_T}} - 1 \right) - i_s \left( e^{\frac{u_{бк}}{\phi_T}} - 1 \right) + \frac{1}{\beta_{CT}} i_s \left( e^{\frac{u_{бэ}}{\phi_T}} - 1 \right).$$

4.5. Эквивалентная схема транзистора для расчета схем с общим эмиттером. Схема, изображенная на рис. 67, используется при прямом включении транзистора в режиме малого сигнала (области активной работы и отсечки). При этих условиях входные и выходные характеристики транзистора можно считать линейными. Резистивные элементы отражают факт наличия сопротивления всех слоев полупроводника. Иногда вместо эмиттерного сопротивления включают идеальный диод.



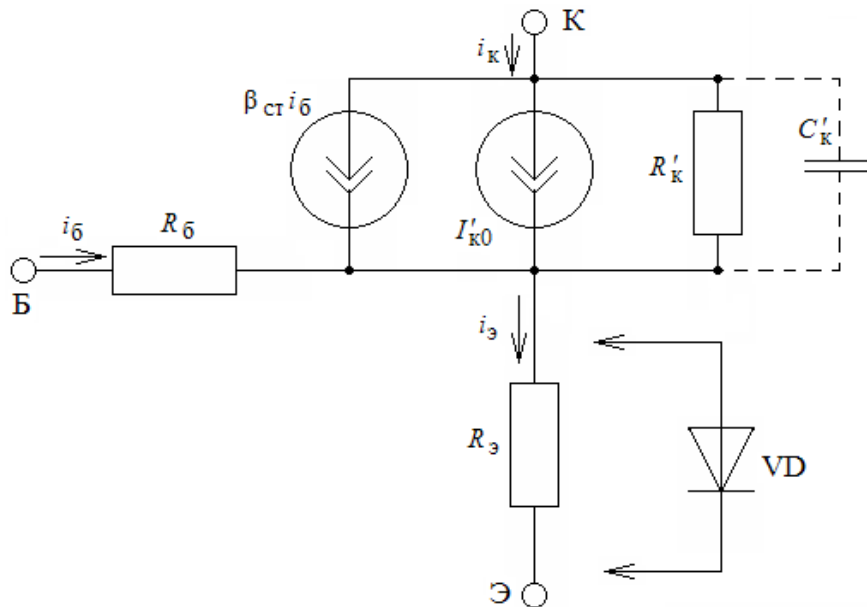


Рис. 67. Схема замещения биполярного транзистора для инженерных расчетов

Емкость учитывает влияние на ток коллектора переменной составляющей напряжения между коллектором и эмиттером:

$$C'_к = (1 + \beta) \cdot C_к.$$

Математическая модель схемы замещения выглядит следующим образом:

$$i_к = \beta_{ст} i_б + I'_{к0} + \frac{u_{кэ}}{R'_к},$$

где  $\beta_{ст}$  – статический коэффициент передачи тока;  $i_б$  – ток базы;  $I'_{к0}$  – начальный ток коллектора;  $R'_к$  – омическое сопротивление коллекторной области.

4.6. Классификация и система обозначений БТ. Система обозначений полупроводниковых диодов и транзисторов установлена отраслевым стандартом ОСТ 11336.919-81. В основу системы обозначений положен буквенно-цифровой код.

Первый элемент (цифра или буква) обозначает исходный полупроводниковый материал; второй (буква) – подкласс приборов; третий (цифра) – основные функциональные возможности прибора; четвертый (число) – порядковый номер разработки; пятый (буква) – условную разбраковку параметров приборов, изготовленных по единой технологии.

Исходный материал:

Г или 1 – германий или его соединения;

К или 2 – кремний или его соединения;

А или 3 – соединения галлия;

И или 4 – соединения индия.

Подклассы транзисторов:

Т – биполярные транзисторы;

П – полевые транзисторы.

В качестве классификационной литеры используются буквы русского алфавита за исключением З, О, Ч, Ы, Ш, Щ, Ю, Ъ, Ь, Э.

### 5. Контрольные вопросы

5.1. Каковы общие свойства обоих  $p-n$  переходов биполярных транзисторов двух типов?

5.2. Каковы отличия  $p-n$  переходов в двух типах биполярных транзисторов?

5.3. В чем отличие основных носителей заряда  $p-n$  перехода от неосновных?

5.4. Каковы причины появления прямого и обратного токов  $p-n$  переходов?

5.5. Какими факторами обусловлены усилительные свойства биполярного транзистора?

5.6. Как влияет ширина базы биполярного транзистора на его характеристики?

5.7. Что такое температурный потенциал и его влияние на параметры биполярного транзистора?

5.8. Какова взаимосвязь обратного тока коллектора с материалом полупроводника?

5.9. Как влияют емкости  $p-n$  переходов на частотные свойства биполярного транзистора?

5.10. В чем проявляется зависимость характеристик биполярного транзистора от схемы его включения?

5.11. Каковы причины появления паразитных емкостей  $p-n$  переходов биполярного транзистора?

5.12. Какие параметры биполярного транзистора учитываются упрощенными моделями Эберса – Молла?

5.13. Является ли биполярный транзистор источником тока, управляемого током? При каких условиях?

5.14. Каковы пути увеличения статического коэффициента передачи тока?

5.15. Какие факторы ограничивают частотный и динамический диапазоны биполярного транзистора?

## Лабораторная работа № 5

### *Исследование характеристик униполярного (полевого) транзистора*

*Цель работы:* ознакомление с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия полупроводниковых униполярных транзисторов. В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений математической модели полупроводниковых униполярных транзисторов; уметь рассчитывать параметры электрической цепи, содержащей полупроводниковые униполярные транзисторы; приобрести навыки экспериментального исследования параметров полупроводниковых униполярных транзисторов и практические навыки снятия вольт-амперных характеристик.

#### *1. Объект и средства исследования*

Объектом исследования являются полупроводниковые приборы, входящие в состав типового комплекта лабораторного оборудования в стендовом исполнении «Теоретические основы электротехники» (подробное описание стенда приведено во введении, общий вид показан на рис. 1).

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

#### *2. Подготовка к работе*

2.1. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов для исследования параметров и снятия вольтамперных характеристик полупроводниковых униполярных транзисторов с учетом расположения приборов и оборудования на стенде. Узловые точки схемы согласовать с обозначениями на блоках стенда. Предусмотреть в схемах всех опытов включение соответствующих виртуальных измерительных приборов.

2.2. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда и принципом действия, а также составом виртуальных приборов, используемых при проведении лабораторной работы.

2.3. Изучить теоретический материал, указанный в библиографическом списке.

2.4. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе на листах формата А-4, содержащий ответы на вопросы п. 2 и заготовки таблиц, схем, графиков и расчетных формул к п. 3.

### 3. Рабочее задание

3.1. Для исследования свойства  $p-n$  переходов между электродами затвора и главными электродами (истоком и стоком) полевого транзистора с каналом  $n$ -типа соберите цепь согласно схеме (рис. 68, диаграмма 1) и с помощью мультиметра (в режиме миллиамперметра) определите состояние  $p-n$  перехода (проводящее/запертое). Повторите измерения согласно диаграммам 2, 3 и 4. Результаты занесите в табл. 16. Эксперимент выполните, используя виртуальные приборы.



Рис. 68. Диаграммы переходов полевого транзистора

Таблица 16

Диаграмма	1	2	3	4
Канал $n$ -типа				
Канал $p$ -типа				

3.2. Для измерения и изучения характеристик включения  $p-n$  перехода между затвором и каналом полевого транзистора соберите цепь согласно схеме для контура затвор/исток (рис. 69). Установите последовательно величины прямого напряжения  $U_{пр}$ , указанные в табл. 17. Измерьте мультиметром ток  $I_{пр}$  и запишите его в табл. 17.

тиметром соответствующие значения тока  $I_{пр}$  и занесите их в таблицу. Этот опыт нужно выполнить только для транзистора  $n$ -типа. Результаты справедливы также для транзисторов  $p$ -типа с учетом изменения полярности.

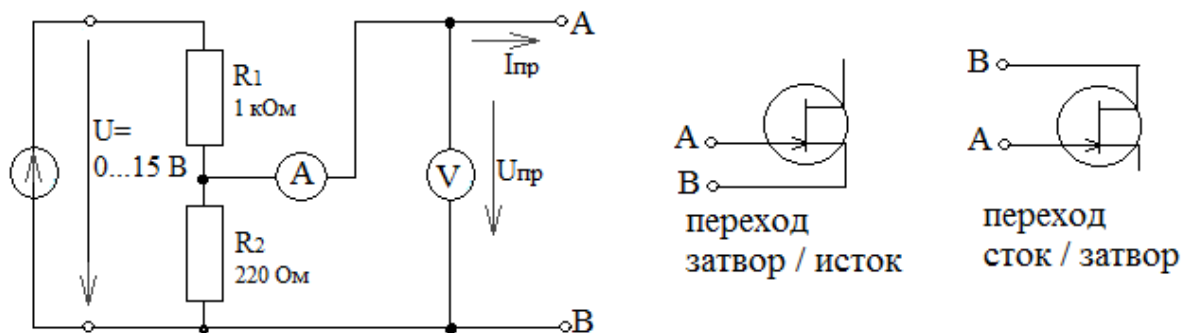


Рис. 69. Схема для исследования контура затвор/исток

Таблица 17

Контур затвор/исток										
$U_{пр}, В$	0	0,5	0,4	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	1,0
$I_{пр}, мА$										

3.3. Повторите измерения для контура сток/затвор и занесите измеренные значения тока в табл. 18. На графике (рис. 70) постройте характеристику включения  $p-n$  переходов  $I_{пр} = f(U_{пр})$ .

Таблица 18

Контур сток /затвор										
$U_{пр}, В$	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	1,0
$I_{пр}, мА$										

3.4. Для экспериментального исследования влияния напряжения затвор/исток на токи затвора и стока соберите цепь согласно схеме (рис. 71) и установите поочередно значения напряжения затвор/исток  $U_{зи}$ , указанные в табл. 19. Измерьте виртуальными приборами или мультиметрами соответствующие значения токов затвора  $I_3$  и стока  $I_c$  и занесите их в табл. 19.

Таблица 19

$U_{зи}, В$	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	+0,2	+0,4	+0,6
$I_c, мА$									
$I_3, мА$									

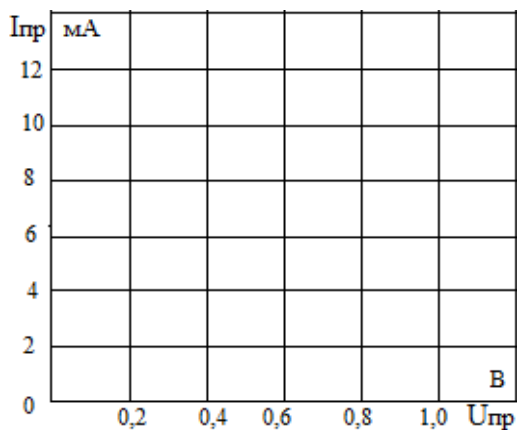


Рис. 70. Форма для нанесения характеристик включения р-п переходов

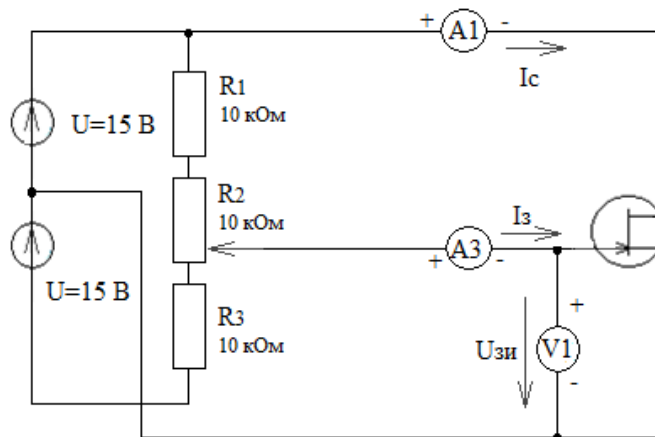


Рис. 71. Схема для исследования стоко-затворных характеристик

Постройте характеристики управления  $I_c = f(U_{зи})$  и  $I_z = f(U_{зи})$ .

3.5. На графиках (рис. 72, 73) постройте кривые зависимостей тока затвора  $I_z$  и тока стока  $I_c$  от напряжения  $U_{зи}$ . По графикам определите напряжение отсечки  $U_{зи0}$  и крутизну стоко-затворной характеристики  $S$ , мА/В:

$$S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$$

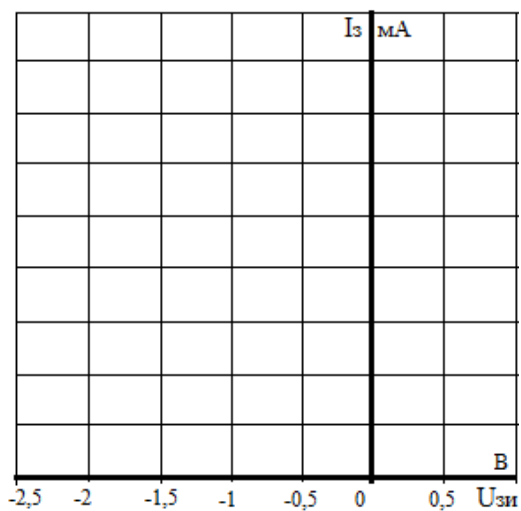


Рис. 72. Форма для нанесения входных характеристик униполярного транзистора

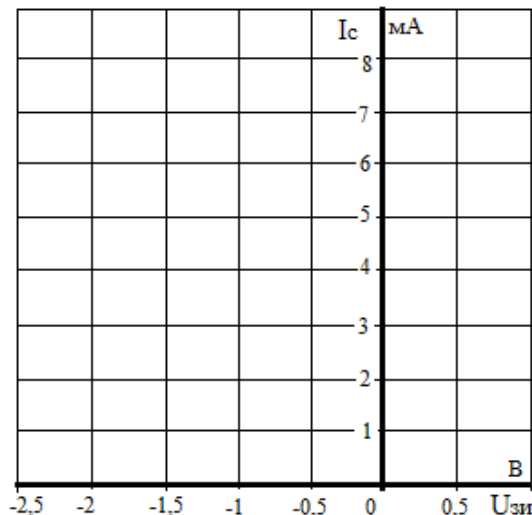


Рис. 73. Форма для нанесения стоко-затворных характеристик униполярного транзистора

3.6. Для построения в статике зависимости тока стока от напряжения сток/исток  $I_c = f(U_{си})$  при различных значениях напряжения затвор/исток соберите цепь согласно схеме (рис. 74). Установите значения напряжений затвор/исток  $U_{зи}$  и сток/исток  $U_{си}$ , указанные в табл. 20, и измерьте виртуальными приборами или мультиметрами соответствующие значения тока стока  $I_c$ . Измените на противоположную полярность источника питания 15 В для измерения напряжения сток/исток при  $U_{зи} = 0,5$  В. Внесите значения тока стока  $I_c$  в таблицу.

Таблица 20

$U_{си}, \text{В}$	0	0,5	1	1,5	2	3	4	6	8	10	12	14	15
$I_c, \text{мА}$ , при $U_{зи} = -1,5 \text{ В}$													
$I_c, \text{мА}$ , при $U_{зи} = -1 \text{ В}$													
$I_c, \text{мА}$ , при $U_{зи} = -0,5 \text{ В}$													
$I_c, \text{мА}$ , при $U_{зи} = +0,5 \text{ В}$													

3.7. На графике (рис. 75) постройте кривые зависимости тока стока  $I_c$  от напряжения сток/исток  $U_{си}$  при различных фиксированных значениях напряжения затвор/исток  $U_{зи}$ .

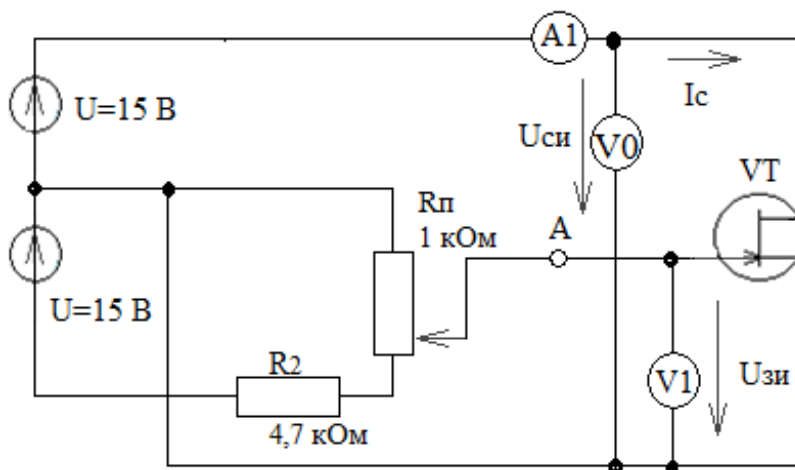


Рис. 74. Схема для исследования статических выходных характеристик униполярного транзистора

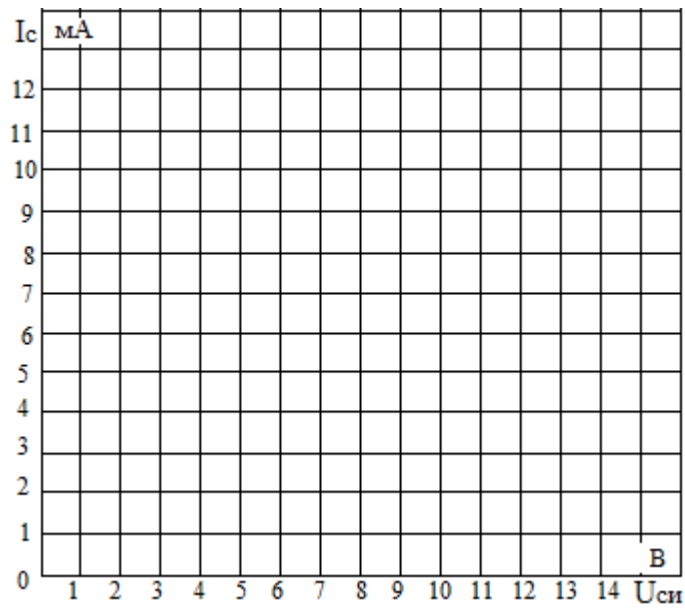


Рис. 75. Статические выходные характеристики униполярного транзистора

3.8. Для изучения влияния нагрузочного сопротивления на коэффициент усиления напряжения соберите цепь согласно схеме (рис. 76). Установите сопротивление нагрузки  $R_H$  и поочередно различные значения входного напряжения  $U_{вх}$ , указанные в табл. 21, и измерьте мультиметрами или виртуальными приборами соответствующие значения выходного напряжения  $U_{вых}$ . Все результаты занесите в таблицу. Рассчитайте коэффициент усиления по напряжению  $\nu$  для каждого значения  $R_H$  и также занесите в табл. 21. На графике (рис. 77) постройте кривую зависимости коэффициента усиления по напряжению  $\nu$  от сопротивления нагрузки  $R_H$ .

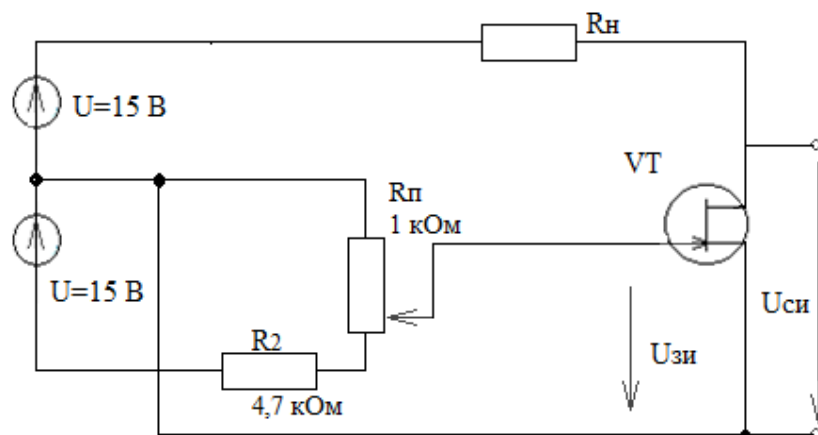


Рис. 76. Схема для изучения влияния нагрузочного сопротивления на коэффициент усиления напряжения



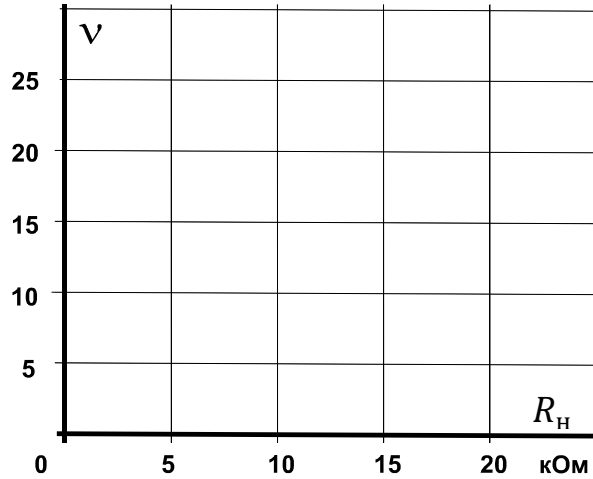


Рис. 77. Форма для нанесения графиков зависимости коэффициента усиления напряжения от нагрузочного сопротивления

3.9. Выполните измерения и определите следующие электрические показатели основных схем усилителей:

- коэффициент усиления по напряжению,
- угол фазового сдвига
- ,
- входное сопротивление  $R_{ВХ}$ ,
- выходное сопротивление  $R_{ВЫХ}$ .

Для этого соберите цепь усилителя по схеме с общим истоком (рис. 78). При этом не перепутайте полярность подключения электролитического конденсатора  $C_3$ , который служит для исключения отрицательной обратной связи для переменного напряжения. Установите частоту синусоидального напряжения 1 кГц и действующее значение 200...300 мВ.

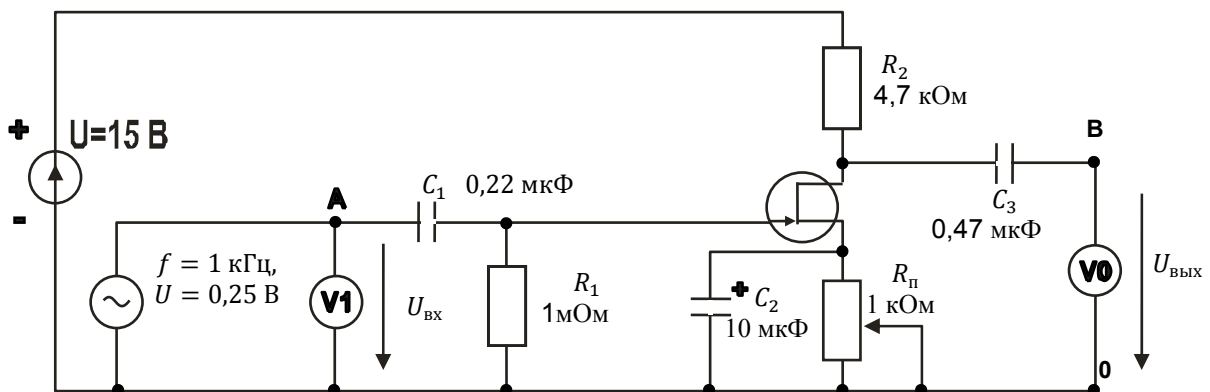
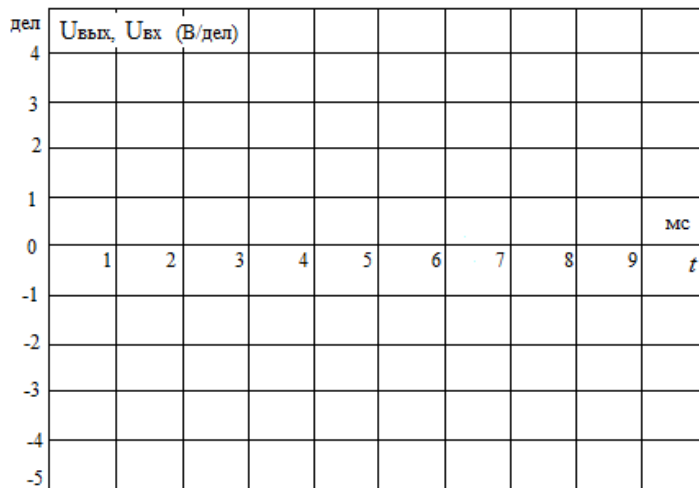


Рис. 78. Схема для исследования влияния параметров транзистора на искажение формы выходного напряжения

3.10. Используя потенциометр  $R_{\text{п}}$ , настройте рабочую точку транзистора так, чтобы напряжение на выходе усилителя было наименее искаженным. Измерьте входное  $U_{\text{вх}}$  и выходное  $U_{\text{вых}}$  напряжения, используя виртуальные приборы и осциллограф, и постройте их кривые на графике (рис. 79). Определите угол фазового сдвига этих напряжений  $\varphi$  и вычислите коэффициент усиления по напряжению, используя соотношение  $\nu_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ .



Масштабы:  
 $m_t = \dots$  мкс/дел  
 $m_{U_{\text{вх}}} = \dots$  В/дел  
 $m_{U_{\text{вых}}} = \dots$  В/дел

Рис. 79. Форма для нанесения осциллограмм выходного напряжения усилительного каскада на униполярном транзисторе

3.11. Определите входное сопротивление усилителя  $R_{\text{вх}}$ . Для этого включите последовательно во входную цепь усилителя (см. рис. 76, точка А) резистор  $R_{\text{доб}} = 10$  кОм. Это вызовет снижение выходного напряжения усилителя от  $U_1$  до  $U_2$ . Тогда входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  можно рассчитать следующим образом:

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{доб}} / \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right).$$

Таблица 21

$R_{\text{н}}$ , кОм	1	2,2	4,7	10	22
$-U_{\text{вх1}}$ , В	-0,5	-0,5	-1,0	-1,2	-1,5
$-U_{\text{вх2}}$ , В	-1,0	-1,0	-1,5	-1,8	-2,0
$U_{\text{вых1}}$ , В					
$U_{\text{вых2}}$ , В					
$\Delta U_{\text{вх}}$ , В					
$\Delta U_{\text{вых}}$ , В					
$\nu = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$					

3.12. Определите выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$ . Для этого включите нагрузочный резистор  $R_{\text{н}} = 10$  кОм параллельно выходу усилителя (см. рис. 78, точки В - 0). Это также вызовет снижение выходного напряжения

усилителя от  $U_1$  до  $U_2$ . Выходное сопротивление можно вычислить, используя соотношение

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{Н}} \left( U_1 / U_2 - 1 \right).$$

Занесите результаты в табл. 22.

3.13. Соберите цепь усилителя по схеме с общим стоком (рис. 80). Установите действующее значение напряжения на входе 2...3 В и потенциометром  $R_{\text{П}}$  настройте рабочую точку транзистора по условию минимального искажения сигнала.

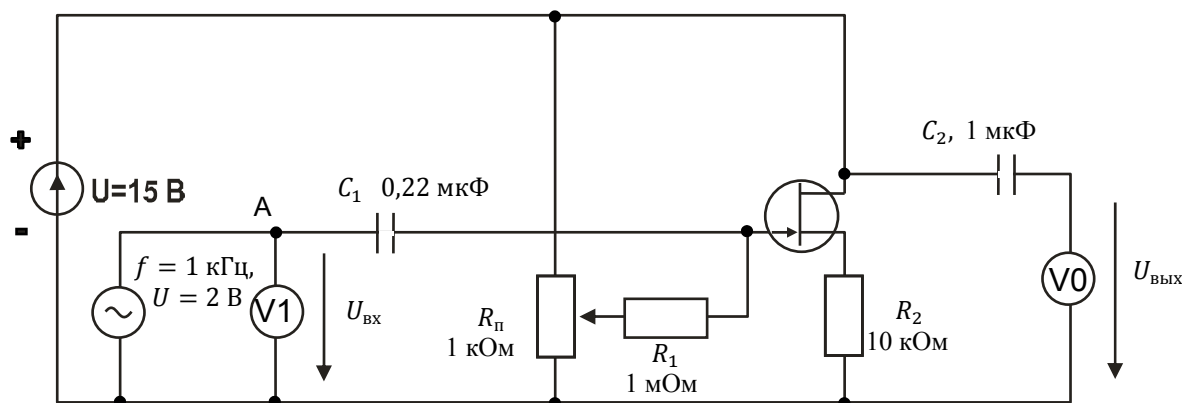
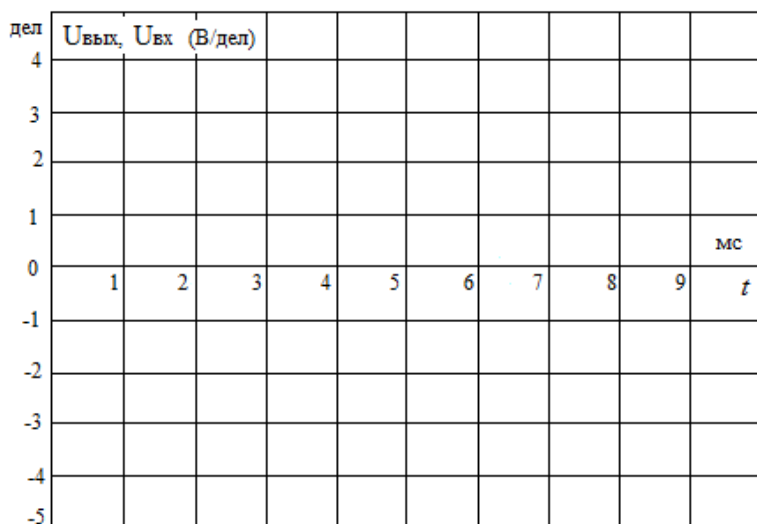


Рис. 80. Схема усилительного каскада с общим стоком

3.14. Повторите описанные выше измерения, постройте кривые на графике (рис. 81) и занесите результаты измерений в табл. 22. При этом  $R_{\text{доб}} = 47 \text{ кОм}$ , а  $R_{\text{Н}} = 10 \text{ кОм}$ .



Масштабы:  
 $m_t = \dots \text{ мкс/дел}$   
 $m_{U_{\text{ВХ}}} = \dots \text{ В/дел}$   
 $m_{U_{\text{ВЫХ}}} = \dots \text{ В/дел}$

Рис. 81. Форма для нанесения осциллограмм выходного напряжения каскада с общим стоком

3.15. Соберите цепь усилителя по схеме с общим затвором (рис. 82). Отрегулируйте входное напряжение так, чтобы на входе усилителя было  $U_{\text{ВЫХ}} = 2 \dots 3 \text{ В}$ , а потенциометром  $R_{\text{П}}$  добейтесь минимальных искажений этого напряжения. Повторите измерения, постройте кривые на графике (рис. 83) и занесите результаты в табл. 22. При этом  $R_{\text{доб}} = 1 \text{ кОм}$ , а  $R_{\text{Н}} = 47 \text{ кОм}$ .

Таблица 22

Параметр	Схема включения полевого транзистора		
	с общим истоком	с общим стоком	с общим затвором
$U_{\text{ВХ}}$	0,25 В, 1кГц	2 В, 1кГц	0,15 В, 1 кГц
$U_{\text{ВЫХ}}$			
$\nu_U$			
$\varphi$			
$R_{\text{ВХ}}$			
$R_{\text{ВЫХ}}$			

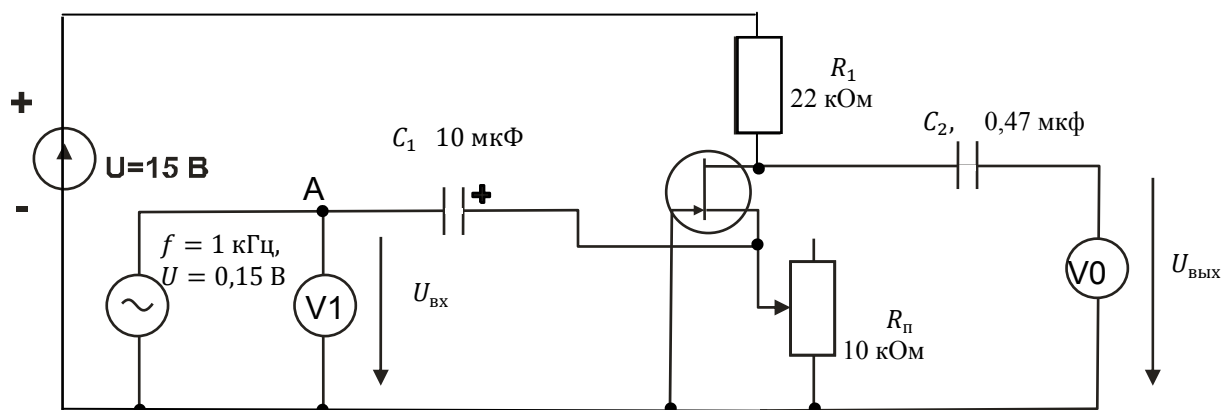
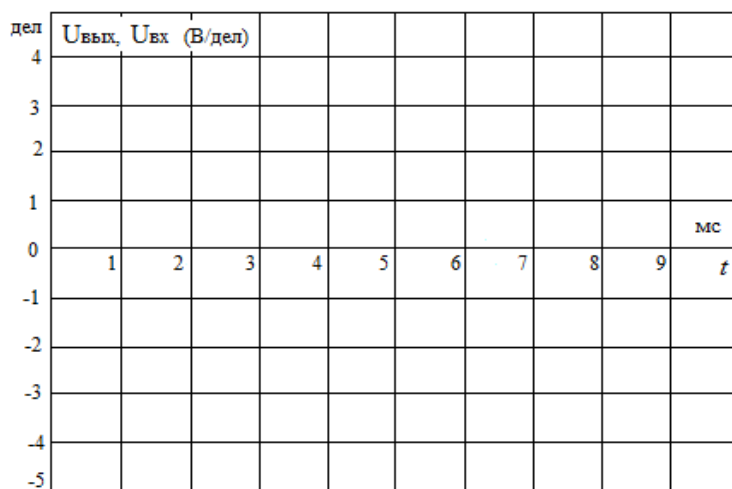


Рис. 82. Схема усилительного каскада с общим затвором



Масштабы:  
 $m_t = \dots \text{ мкс/дел}$   
 $m_{U_{\text{ВХ}}} = \dots \text{ В/дел}$   
 $m_{U_{\text{ВЫХ}}} = \dots \text{ В/дел}$

Рис. 83. Форма для нанесения осциллограмм выходного напряжения каскада с общим затвором

#### 4. Методические указания

4.1. Испытание слоев и выпрямительного действия униполярных транзисторов. В полевых транзисторах (рис. 84) ток обеспечивается носителями заряда одного знака (электронами или дырками) и протекает по каналу под воздействием прикладываемого извне электрического поля (отсюда название транзисторов этого типа). Электроды канала принято называть истоком и стоком. Управление током транзистора осуществляется посредством электрода, называемого затвором, который изолирован от канала  $p-n$  переходом или по-иному.

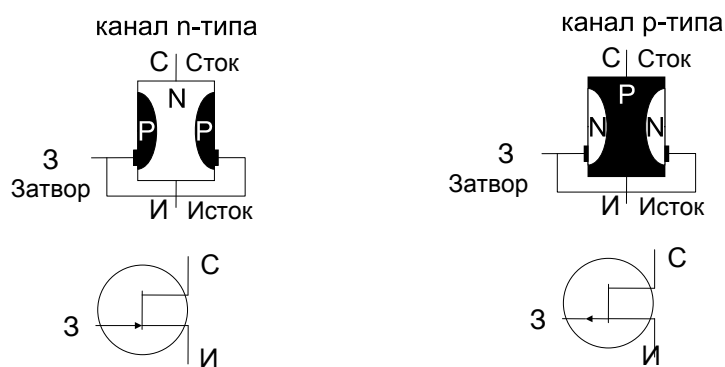


Рис. 84. Структура и условное обозначение полевого транзистора

4.2. Характеристика включения затвора полевого транзистора. Переход между затвором и каналом полевого транзистора обладает выпрямительным действием. Хотя это и не имеет практического значения, его характеристику включения следует знать, чтобы понимать особенности управления полевыми транзисторами.

4.3. Управляющий эффект затвора полевого транзистора  $n$ -типа. Током в канале (контур исток/сток) полевого транзистора можно управлять с помощью потенциала затвора. В отличие от биполярных транзисторов для этого не требуется мощность, так как  $p-n$  переход между затвором и каналом остается запертым.

Входная характеристика или характеристика управления полевого транзистора выражает соотношение между напряжением затвор/исток  $U_{зи}$  и током стока  $I_c$ . Зависимость  $I_c(U_{зи})$  называется стоко-затворной характеристикой. Важными параметрами полевого транзистора являются крутизна стоко-затворной характеристики:  $S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$  и напряжение отсечки  $U_{зио}$ , при котором ток стока становится близким к нулю.

4.4. Выходные характеристики полевого транзистора. Выходными характеристиками полевого транзистора называют зависимости тока стока от напряжения сток/исток при различных фиксированных значениях напряжения затвор/исток. Выходные характеристики снимают без нагрузочного сопротивления в статике.

4.5. Усилители на полевых транзисторах. Полевые транзисторы могут быть использованы как управляющие элементы 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),
- с общим затвором (ОЗ).

Усилители используются для усиления напряжения переменного тока. Конденсаторы  $C_1, C_2$  установлены для развязывания рабочего и управляющего напряжений. На практике измеряют и определяют следующие электрические показатели основных схем усилителей:

- коэффициент усиления по напряжению  $\nu_U$ ,
- угол фазового сдвига  $\varphi$ ,
- входное сопротивление  $R_{вх}$ ,
- выходное сопротивление  $R_{вых}$ .

## 5. Контрольные вопросы

5.1. Какой из трех усилителей имеет инвертирующий эффект?

5.2. Почему усилитель с общим стоком не имеет такой же значимости, что и усилитель с общим коллектором на биполярном транзисторе?

5.3. По каким параметрам усилитель с общим затвором отличается от усилителя с общим истоком?

5.4. Когда  $p$ - $n$  переходы полевого транзистора с каналом  $n$ -типа заперты?

5.5. Когда  $p$ - $n$  переходы полевого транзистора с каналом  $p$ -типа заперты?

5.6. Какое значение имеют расхождения между двумя полученными характеристиками включения?

5.7. Каков наклон характеристики  $S$  полевого транзистора, когда изменение напряжения затвористок составляет 1,5 В, а соответствующее изменение тока стока равно 4,5 мА?

5.8. Когда полевой транзистор управляется без потерь мощности?

5.9. Как ведет себя коэффициент усиления  $\nu$  при увеличении сопротивления нагрузки  $R_n$ ?

## Лабораторная работа № 6

### *Исследование схем усилителей на биполярных транзисторах*

*Цель работы:* ознакомление с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия усилительных устройств на полупроводниковых биполярных транзисторах. В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений усилительного устройства с учетом математической модели полупроводникового биполярного транзистора; уметь рассчитывать параметры электрической цепи, содержащей полупроводниковые биполярные транзисторы; приобрести навыки экспериментального исследования параметров усилительных устройств на полупроводниковых биполярных транзисторах и практические навыки определения коэффициента усиления, фазовых сдвигов, входного и выходного сопротивлений в зависимости от схемы включения транзистора.

#### *1. Объект и средства исследования*

Объектом исследования являются полупроводниковые приборы, входящие в состав типового комплекта лабораторного оборудования в стендовом исполнении «Теоретические основы электротехники» (подробное описание стенда приведено во введении, общий вид показан на рис. 1).

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

#### *2. Подготовка к работе*

2.1. Доказать, что в электрической цепи, содержащей полупроводниковый биполярный транзистор, возможен эффект усиления тока, втекающего в базу транзистора.

2.2. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов для исследования параметров и снятия характеристик усилителей на полупроводниковых биполярных транзисторах с учетом их схемы включения и расположения приборов и оборудования на стенде. Узловые точки схемы согласовать с обозначениями на блоках стенда. Предусмотреть в схемах всех опытов включение соответствующих виртуальных измерительных приборов.

2.3. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда и принципом действия, а также составом виртуальных приборов, используемых при проведении лабораторной работы.

2.4. Изучить теоретический материал, указанный в библиографическом списке.

2.5. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе на листах формата А-4, содержащий ответы на вопросы п. 2 и заготовки таблиц, схем, графиков и расчетных формул к п. 3.

### *3. Рабочее задание*

3.1. Соберите цепь согласно схеме (рис. 85). Для начала установите  $R_k = 220 \text{ Ом}$ . Подайте на вход делителя  $1 \text{ кОм}/100 \text{ Ом}$  синусоидальное напряжение ( $2 \dots 3 \text{ В}$ ) частотой  $1 \dots 2 \text{ кГц}$ .

*Примечание.* К выходу источника переменного тока подключен делитель напряжения ( $1 \text{ кОм}/100 \text{ Ом}$ ), чтобы обеспечить более точную регулировку и измерение входного напряжения. Это означает, что при напряжении источника  $U = 2 \text{ В}$  на входе усилителя будет напряжение  $U_{\text{вх}} = 0,2 \text{ В}$ .

3.2. Включите виртуальные приборы  $V0$  и  $V1$ , установите на них род измеряемой величины – «действующее значение переменной составляющей» и период измерения  $0,02 \text{ с}$ .

3.3. Включите виртуальный осциллограф, активизируйте каналы  $V0$  и  $V1$  и установите длительность развертки  $200 \text{ мкс}$ .

3.4. Установите потенциометром ток покоя коллектора таким образом, чтобы среднее значение выходного напряжения составляло примерно  $7,5 \text{ В}$  (по осциллографу), а регулятором синусоидального напряжения установите максимально возможную амплитуду выходного напряжения, при которой еще нет сильных искажений синусоиды.

3.5. Запишите в табл. 23 значения  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$ , учитывая то, что напряжение, измеряемое вольтметром  $V1$ , в 10 раз больше, чем  $U_{\text{вх}}$ . Вычислите коэффициент усиления.



3.6. Прodelайте этот опыт при всех значениях сопротивления  $R_K$ , указанных в табл. 23, и на рис. 86 постройте график зависимости  $\nu_U$  от  $R_K$ .

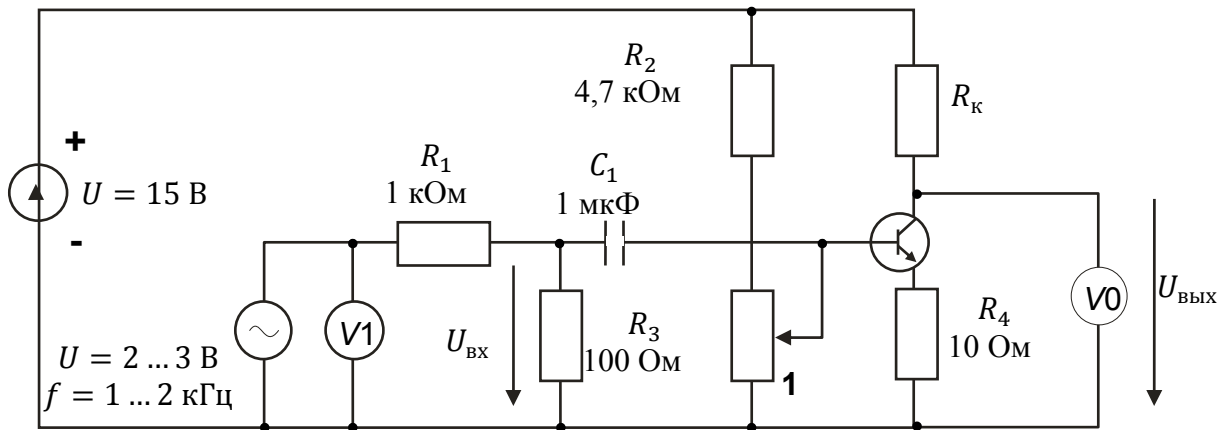


Рис. 85. Схема усилителя напряжения на транзисторе с общим эмиттером (ОЭ) и регулировкой тока базы

Таблица 23

$R_K$ , кОм	0,22	0,33	0,47	1	1,47	2,2
$U_{BX}$ , мВ						
$U_{ВЫХ}$ , В						
$\nu_U$						

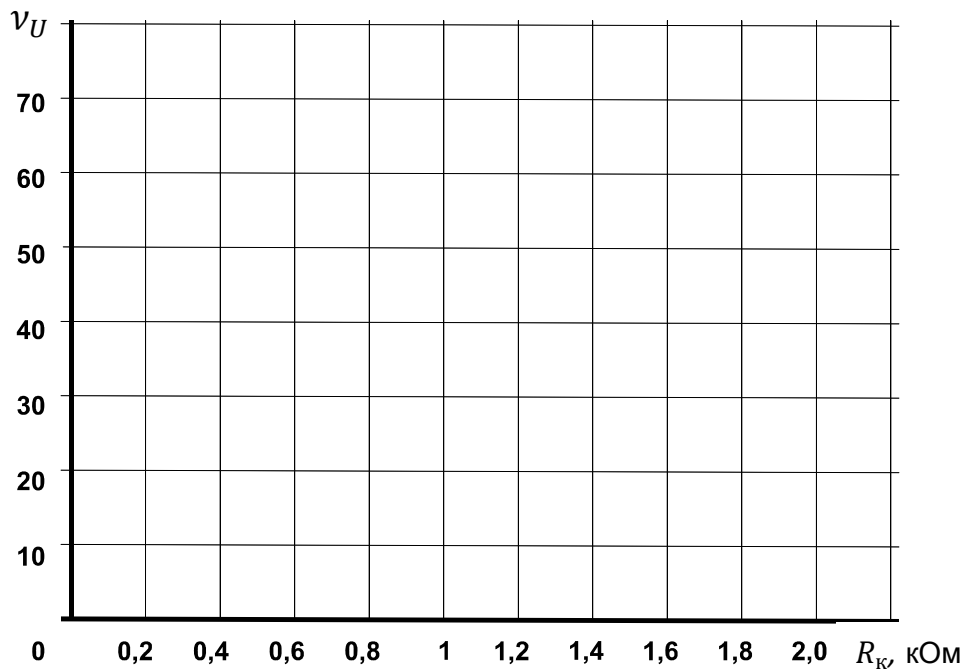


Рис. 86. График зависимости коэффициента усиления от нагрузки в цепи коллектора

3.7. Соберите цепь усилителя по схеме с общим эмиттером (рис. 87) и установите частоту синусоидального напряжения  $f = 1$  кГц и действующее значение напряжения 2 В. Для измерений включите виртуальные приборы и осциллограф.

*Примечание.* К выходу источника переменного тока подключен делитель напряжения (1 кОм/100 Ом), чтобы обеспечить более точную регулировку и измерение входного напряжения. Это означает, что при напряжении источника  $U = 2$  В на входе усилителя будет напряжение  $U_{\text{вх}} = 0,2$  В.

3.8. Перерисуйте осциллограммы входного и выходного напряжений (рис. 88) и укажите масштабы по осям. Измерьте входное и выходное напряжения, определите угол фазового сдвига этих напряжений  $\varphi$  и вычислите коэффициент усиления по напряжению, используя соотношение

$$v_U = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$$

Результаты этих и последующих измерений и вычислений занесите в табл. 24.

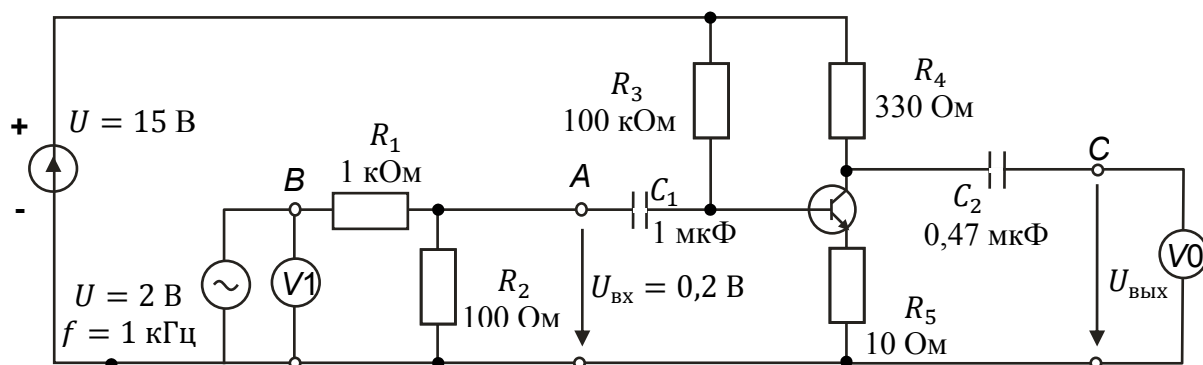
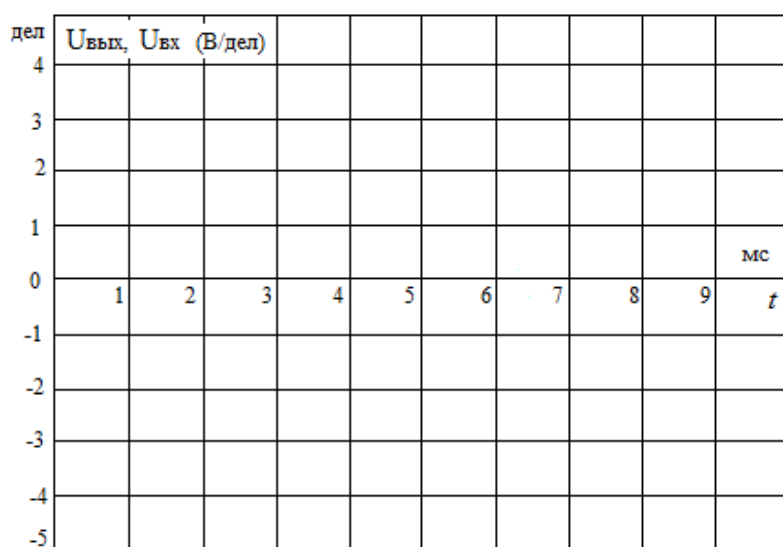


Рис. 87. Схема усилителя с общим эмиттером



Масштабы:  
 $m_t = \dots$  мкс/дел  
 $m_{U_{\text{ВХ}}} = \dots$  В/дел  
 $m_{U_{\text{ВЫХ}}} = \dots$  В/дел

Рис. 88. Форма для нанесения осциллограмм входных и выходных напряжений

Таблица 24

Параметр	Схема включения транзистора		
	с общим эмиттером	с общим коллектором	с общей базой
$U_{\text{вх}}, \text{В}$	0,2 В, 1кГц	0,3 В, 1кГц	0,3 В, 10 кГц
$U_{\text{вых}}, \text{В}$			
$\nu_U$			
$\varphi$			
$R_{\text{вх}}, \text{кОм}$			
$R_{\text{вых}}, \text{кОм}$			

3.9. Определите входное сопротивление усилителя  $R_{\text{вх}}$ . Для этого включите последовательно во входную цепь усилителя (см. рис. 87, точка А) резистор  $R_{\text{доб}} = 1 \text{ кОм}$ . Это вызовет снижение выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  усилителя от  $U_1$  до  $U_2$ . Тогда входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  можно рассчитать следующим образом:

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{доб}} / \left( U_1 / U_2 - 1 \right).$$

3.10. Определите выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$ . Для этого включите нагрузочный резистор  $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$  параллельно выходу усилителя (см. рис. 87, точки С – 0). Это также вызовет снижение выходного напряжения усилителя от  $U_1$  до  $U_2$ . Выходное сопротивление можно вычислить, используя соотношение

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{н}} \left( U_1 / U_2 - 1 \right).$$

3.11. Соберите цепь усилителя по схеме с общим коллектором (рис. 89). Конденсатор  $C_2$  в схеме служит для подавления высокочастотных помех. Повторите описанные выше измерения, постройте кривые (рис. 90) и занесите результаты измерений в табл. 24. При этом  $R_{\text{доб}} = 10 \text{ кОм}$ , а  $R_{\text{н}} = 100 \text{ Ом}$ .

3.12. Соберите цепь усилителя по схеме с общей базой (рис. 91). Соблюдайте полярность подключения электролитического конденсатора  $10 \text{ мкФ}$ .

Повторите измерения, постройте кривые (рис. 92) и занесите результаты в табл. 24 (при этом  $R_{\text{доб}} = 220 \text{ Ом}$ , а  $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$ ).

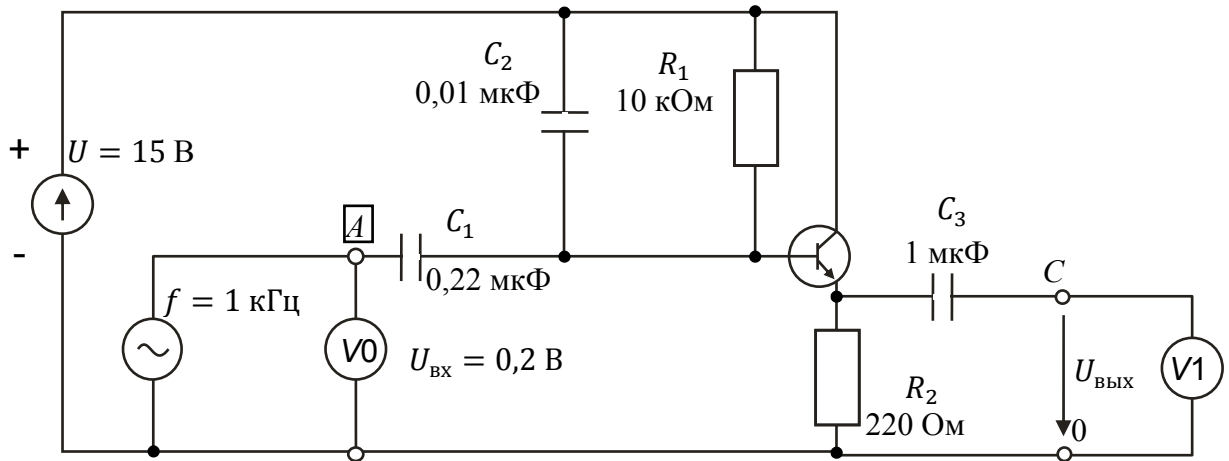
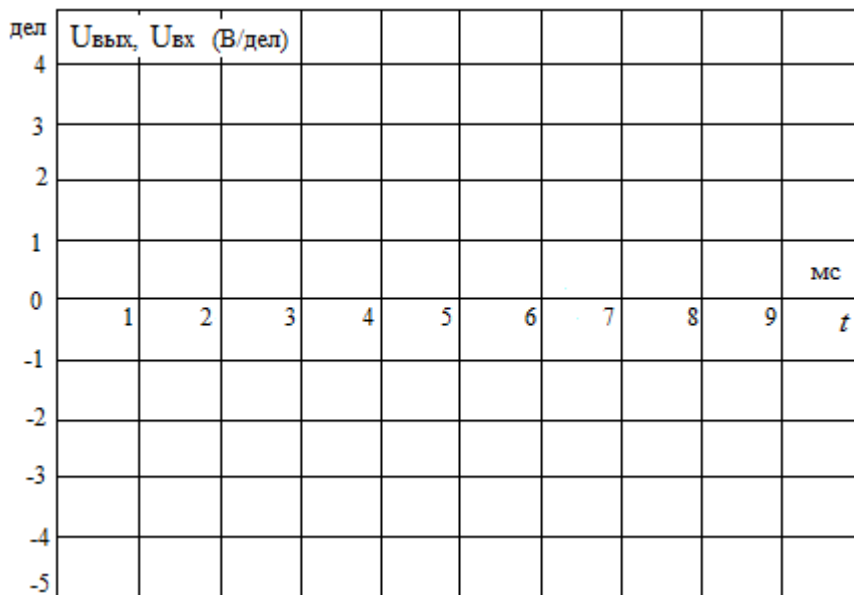


Рис. 89. Схема с общим коллектором



Масштабы:  
 $m_t = \dots$  мкс/дел  
 $m_{U_{ВХ}} = \dots$  В/дел  
 $m_{U_{ВЫХ}} = \dots$  В/дел

Рис. 90. Форма для нанесения осциллограмм входных и выходных напряжений

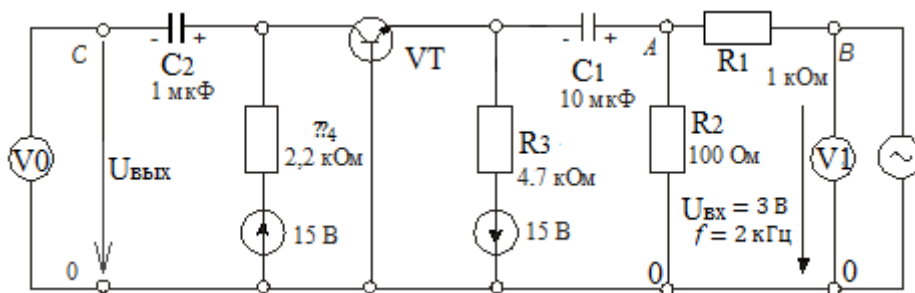


Рис. 91. Схема с общей базой

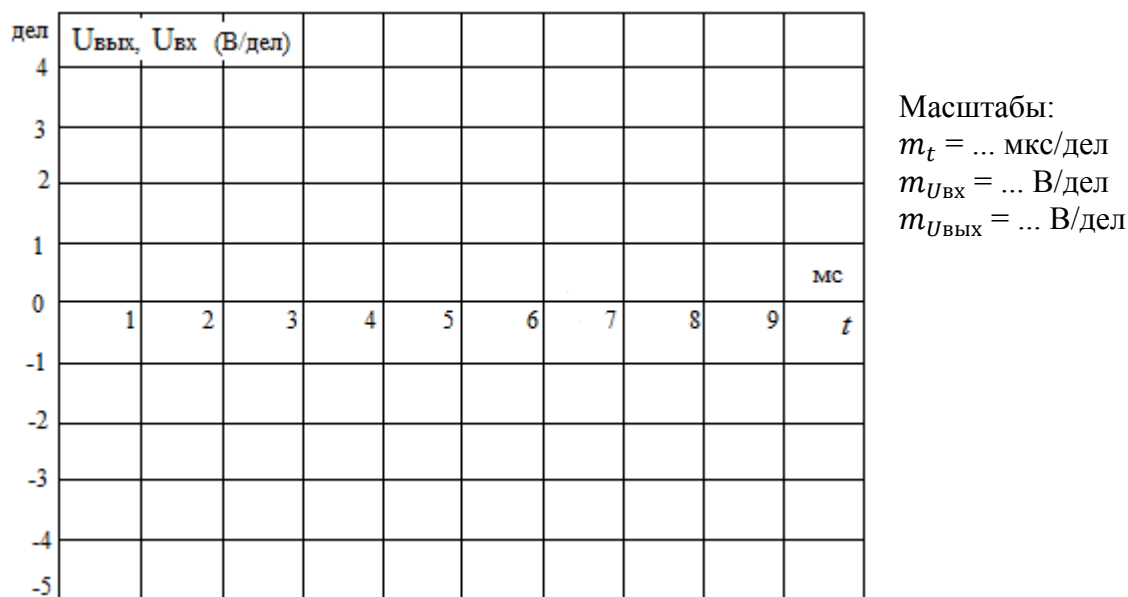


Рис. 92. Форма для нанесения осциллограмм входных и выходных напряжений

#### 4. Методические указания

4.1. Установка рабочей точки транзистора и исследование влияния резистора в цепи коллектора на коэффициент усиления по напряжению усилительного каскада с общим эмиттером. Изменение тока коллектора  $I_K$  транзистора, вызванное изменением тока базы  $I_B$ , приводит к изменению падения напряжения на последовательно включенном резисторе  $R_K$  и изменению напряжения  $U_{KЭ}$  на транзисторе. В свою очередь изменение тока коллектора вызывается изменением напряжения в цепи база/эмиттер  $U_{БЭ}$ . Отношение этих напряжений есть коэффициент усиления транзистора по напряжению:

$$\nu_U = \Delta U_{KЭ} / \Delta U_{БЭ}.$$

Поскольку изменение напряжения цепи коллектор-эмиттер  $U_{KЭ}$  зависит от резистора  $R_K$ , то этот резистор также влияет на усиление по напряжению.

4.2. Усилители на биполярных транзисторах. Транзисторы используются как управляющие элементы в усилительных цепях. По названию того электрода транзистора, который используется как общая точка для напряжений входного и выходного сигналов, различают три основные схемы усилителей на биполярных транзисторах:

- с общим эмиттером (ОЭ),
- общим коллектором (ОК),
- общей базой (ОБ).

В наиболее распространенных схемах усилителей используются *n-p-n* транзисторы. Однако *p-n-p* транзисторы также можно использовать, но тогда нужно изменить полярность рабочего напряжения.

При исследовании усилителей выполняются измерения и определяются следующие электрические показатели основных схем усилителей:

- коэффициент усиления по напряжению  $\nu_U$ ,
- угол фазового сдвига  $\varphi$ ,
- входное сопротивление  $R_{вх}$ ,
- выходное сопротивление  $R_{вых}$ .

Усилители используются для усиления напряжения переменного тока. Конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$  установлены для развязывания рабочего и управляющего напряжений, делитель напряжения 100 кОм/100 Ом – для удобства регулирования и измерения малых значений входного напряжения.

#### 4.3. Примеры использования биполярных транзисторов в различных схемах включения

Регулятор напряжения (линейный). Поскольку ток коллектора зависит от разности потенциалов между базой и эмиттером, транзистор может служить как электронный регулятор (рис. 93). Как известно, регулятор формирует управляющий сигнал как разность между постоянной величиной задаваемого параметра (уставка) и текущей величиной регулируемого параметра. Управляющий сигнал воздействует на исполнительный элемент таким образом, что отклонение регулируемого параметра от величины уставки устраняется.

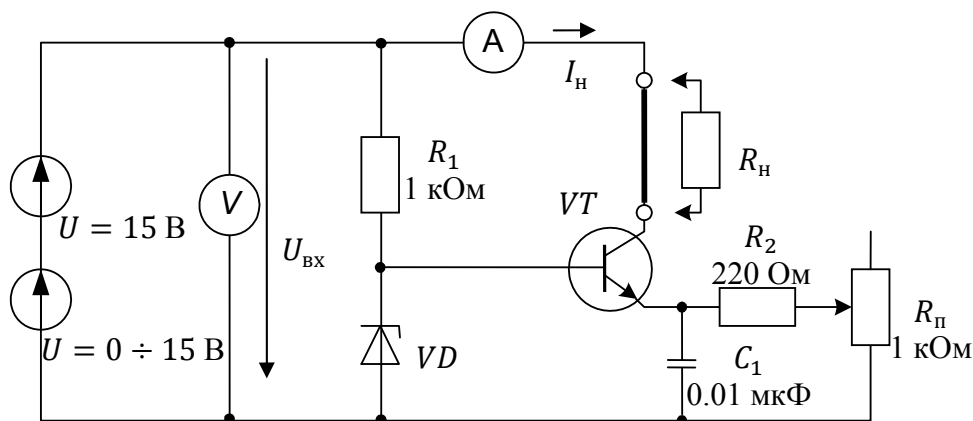


Рис. 93. Схема регулятора тока

В качестве уставки обычно используется постоянное напряжение стабилитрона или операционного усилителя в режиме компаратора. В на-

стоящее время широко применяются интегральные схемы для стабилизации напряжения.

Регулятор тока. Регулятор тока также формирует управляющий сигнал как разность между постоянной величиной задаваемого параметра (уставка) и текущей величиной регулируемого параметра. Он воздействует на исполнительный элемент таким образом, что отклонение регулируемого параметра от величины уставки устраняется.

В электронных регуляторах тока в качестве уставки также используется постоянное напряжение стабилитрона, которое сравнивается с зависящим от выходного тока падением напряжения на резисторе. В рассматриваемой ниже цепи (рис. 94) сравнение имеет место непосредственно между базой и эмиттером регулирующего транзистора. Одна из сфер применения стабилизаторов тока – зарядные устройства аккумуляторов.

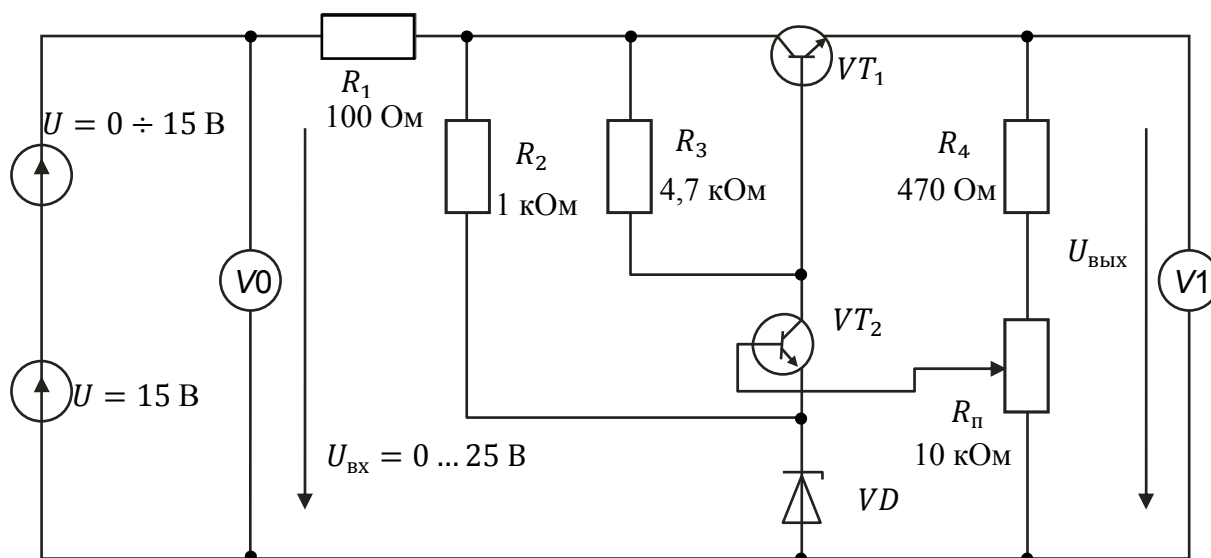


Рис. 94. Схема стабилизатора напряжения

*Примечание.* Резистор  $R_1$  является защитным и служит для предотвращения повреждения полупроводниковых элементов в случае коротких замыканий или перегрузок.

## 5. Контрольные вопросы

5.1. Какой из трех усилителей имеет инвертирующий эффект?

5.2. В каких случаях используются усилители с общим коллектором?

- 5.3. По каким параметрам усилитель с общей базой отличается от усилителя с общим эмиттером?
- 5.4. Какое влияние оказывает сопротивление в цепи коллектора на коэффициент усиления?
- 5.5. Какое влияние оказывает сопротивление в цепи коллектора на форму выходного напряжения?
- 5.6. Какой элемент цепи (см. рис. 94) можно использовать для задания максимального выходного напряжения?
- 5.7. Из каких компонентов состоит линейный регулятор напряжения?
- 5.8. Как можно объяснить термин «стабилизация тока»?
- 5.9. Приведите примеры использования регулятора напряжения.
- 5.10. Приведите примеры использования регулятора тока.
- 5.11. Назначение и принцип действия разделительных конденсаторов.

## Лабораторная работа № 7

### *Исследование характеристик полупроводниковых диодов с особыми свойствами*

*Цель работы:* ознакомление с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия полупроводниковых светодиодов и варикап. В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений математической модели полупроводниковых диодов с особыми свойствами; уметь рассчитывать параметры электрической цепи, содержащей полупроводниковые диоды с особыми свойствами; приобрести навыки экспериментального исследования параметров полупроводниковых диодов с особыми свойствами и практические навыки снятия вольтамперных характеристик.

#### *1. Объект и средства исследования*

Объектом исследования являются полупроводниковые приборы, входящие в состав типового комплекта лабораторного оборудования в стендовом исполнении «Теоретические основы электротехники» (под-



робное описание стенда приведено во введении, общий вид показан на рис. 1).

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

## *2. Подготовка к работе*

2.1. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов для исследования параметров и снятия вольтамперных характеристик полупроводниковых диодов с особыми свойствами с учетом расположения приборов и оборудования на стенде. Узловые точки схемы согласовать с обозначениями на блоках стенда. Предусмотреть в схемах всех опытов включение соответствующих виртуальных измерительных приборов.

2.2. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда и принципом действия, а также составом виртуальных приборов, используемых при проведении лабораторной работы.

2.3. Изучить теоретический материал, указанный в библиографическом списке.

2.4. Заготовить бланк отчета по лабораторной работе на листах формата А-4, содержащий ответы на вопросы п. 2 и заготовки таблиц, схем, графиков и расчетных формул к п. 3.

## *3. Рабочее задание*

3.1. Соберите электрическую цепь согласно схеме пункта 2.2 для снятия вольтамперной характеристики светодиода посредством осциллографа. Эксперимент выполнить, используя виртуальные приборы. При сборке параметры элементов схемы выбрать, руководствуясь схемой рис. 95, на которой в соответствии с обозначениями на блоках стенда верхние узлы виртуальных вольтметров  $V_0$  и  $V_1$  являются узлами  $V_0$  и  $V_1$  – входами коннектора.

3.2. Подведите одно из линейных напряжений 12 В, 50 Гц трехфазного источника к цепи (см. рис. 95) и наблюдайте зависимость напряжения от тока. На схеме  $A_1$  и  $V_1$  – входы коннектора. Для получения на виртуаль-

ном осциллографе зависимости напряжения от тока включите режим X-Y переключателем «XY-развертка».

3.3. Перенесите осциллограмму на график (рис. 96).

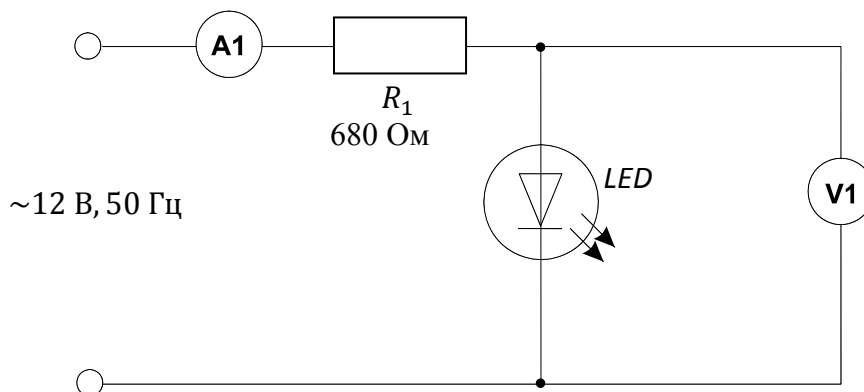


Рис. 95. Схема для снятия ВАХ светодиода

				U	В					
				20						
				15						
				10						
				5						мА
-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	I	
				-5						
				-10						
				-15						
				-20						

Рис. 96. Форма для нанесения вольтамперных характеристик светодиода

3.4. Для исследования влияния напряжения  $U_{сд}$ , тока  $I_{сд}$  светодиода и его полярности на световую эмиссию соберите цепь согласно схеме (рис. 97) и изменяйте входное напряжение последовательно, как указано в табл. 25. Измерьте прямое напряжение  $U_{сд}$ , и ток  $I_{сд}$ , светодиода с помо-

щью мультиметра и установите степень светоизлучения (отсутствует, слабое, среднее, сильное). Занесите данные в таблицу.

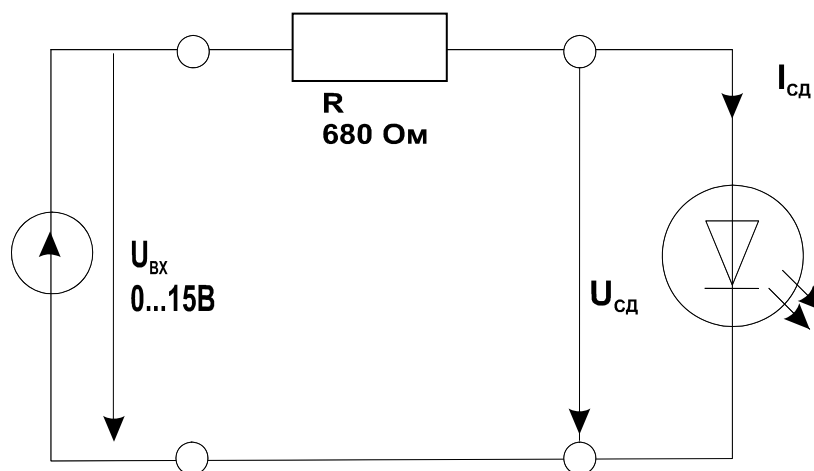


Рис. 97. Схема для исследования световой эмиссии светодиода

Таблица 25

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

Поменяйте полярность диода и убедитесь, что светоизлучения не наблюдается.

3.5. Для снятия с помощью осциллографа вольтамперной характеристики варикапа приложите синусоидальное напряжение 12 В, 50 Гц (одно из линейных напряжений трехфазного источника) к цепи (рис. 98) и наблюдайте зависимость напряжения от тока. На схеме  $A1$  и  $V1$  – входы коннектора. Для получения на виртуальном осциллографе зависимости напряжения от тока включите режим  $X-Y$  переключателем « $XU$ -развертка». Перенесите осциллограмму на график (рис. 99).

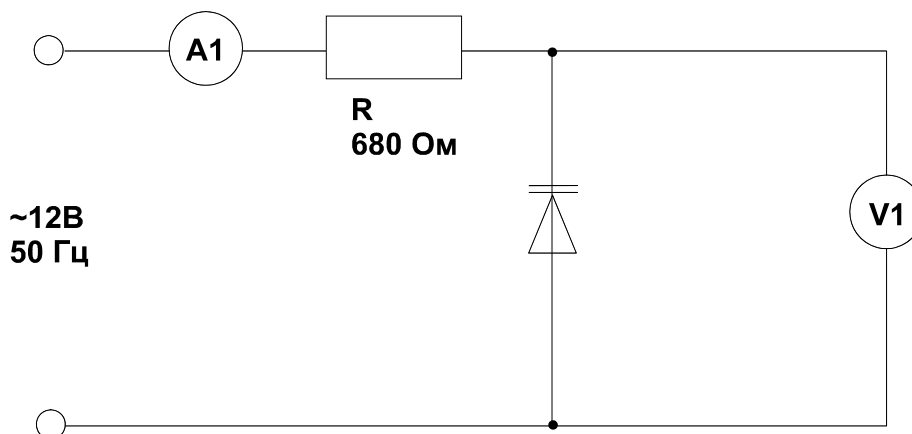


Рис. 98. Схема для снятия вольтамперных характеристик варикапа

					U В					
					20					
					15					
					10					
					5					мА
-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	I	
					-5					
					-10					
					-15					
					-20					

Рис. 99. Форма для нанесения вольтамперных характеристик варикапа

3.6. Для изучения зависимости резонансной частоты параллельного резонансного контура от обратного напряжения варикапа и влияния этого напряжения на емкость обедненного (запирающего) слоя приложите синусоидальное напряжение амплитудой 10 В к цепи (рис. 100). Частота напряжения должна быть между 10 и 20 кГц. На схеме  $V1$  – вход коннектора или мультиметр,  $V2$  – только мультиметр. Индуктивность 200 мГн получается путем последовательного соединения двух индуктивностей по 100 мГн, постоянное напряжение больше 15 В – путем последовательного соединения регулируемого и нерегулируемого источников напряжения.

*Примечание.* В схеме нельзя использовать два канала коннектора, т.к. при этом частота отсчетов оказывается недостаточной. 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.

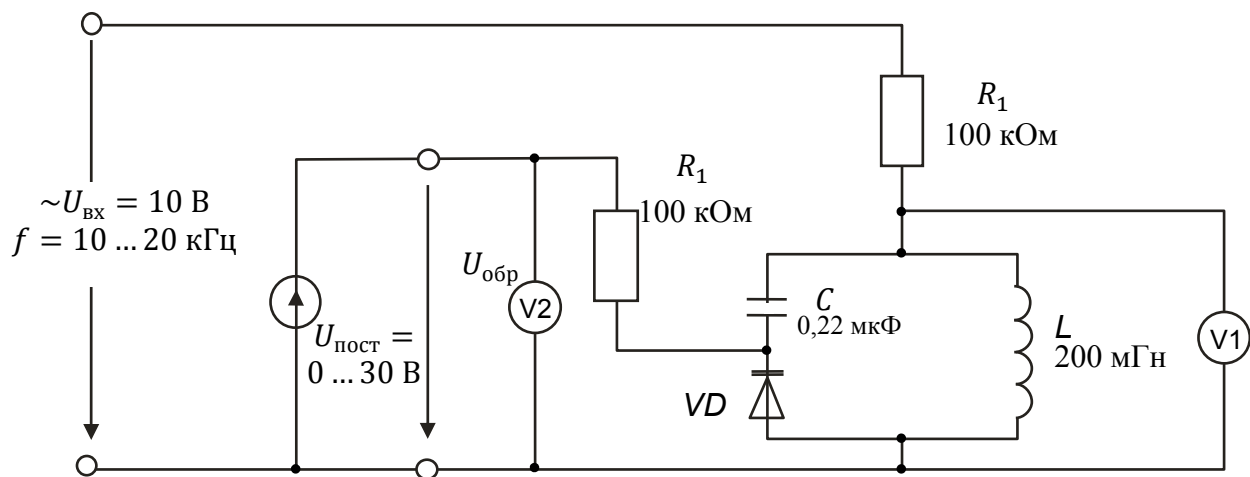


Рис. 100. Схема для снятия частотной зависимости обратного напряжения варикапа

3.7. Измените обратное постоянное напряжение варикапа ступенями согласно табл. 26 и найдите значения резонансной частоты  $f_{рез}$  для каждого значения обратного напряжения. Резонансная частота в данном случае – это та частота, при которой напряжение между концами параллельной цепочки достигает максимума. Занесите результаты измерений в табл. 26 и по ее данным постройте график зависимости резонансной частоты от обратного напряжения  $U_{обр}$  (рис. 101).

3.8. Вычислите емкость резонансной цепи по измеренным резонансным частотам и индуктивности, занесите значения в табл. 26:

$$C = 1 / (2\pi f_{рез})^2 L,$$

где  $C$  – емкость варикапа, Ф;  $f_{рез}$  – резонансная частота, Гц;  $L$  – индуктивность катушки, Гн.

3.9. Занесите значения емкости варикапа в табл. 26. Затем постройте зависимость емкости варикапа  $C$  от обратного напряжения  $U_{обр}$  (рис. 102).

Таблица 26

$U_{обр}, В$	$f_{рез}, кГц$	$L, мГн$	$C, пФ$
2		200	
5		200	
10		200	
15		200	
20		200	
25		200	
30		200	
15		200	

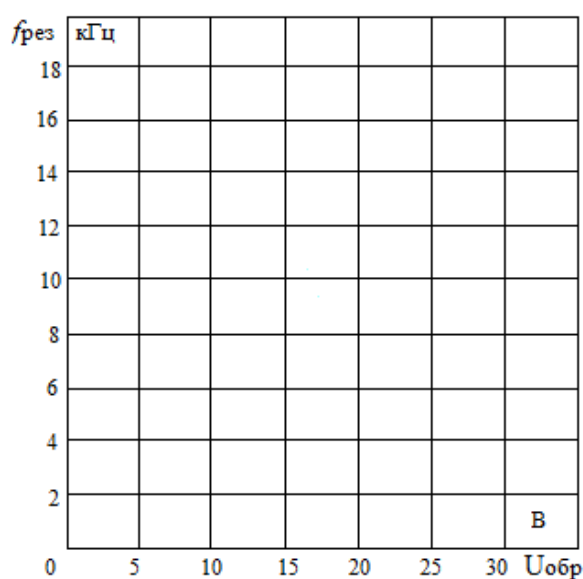


Рис. 101. Форма для нанесения частотной зависимости обратного напряжения варикапа

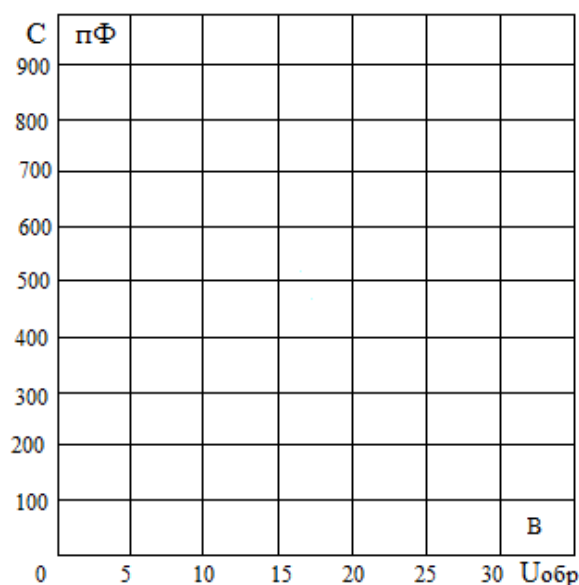


Рис. 102. Форма для нанесения зависимости емкости варикапа от обратного напряжения

#### 4. Методические указания

4.1. Светодиоды. Светодиод (LED) - полупроводниковый прибор, излучающий некогерентный свет при воздействии электрического тока. Цвет излучаемого света зависит от химического состава полупроводника, который был использован в светодиоде. 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 даже голубым.

Обычные светодиоды обладают небольшой мощностью и малой светотдачей и используются, преимущественно, в качестве индикаторов в технике. Первые образцы светодиодов появились в 1960-х годах и их светотдача составляла не более 0,1 лм/Вт, а срок службы – несколько сотен часов. Такие светодиоды имели только красный и зеленый цвета излучения.

К концу 1980-х годов выросли мощность, светотдача и срок службы светодиодов, появились светодиоды желтого и оранжевого цвета. После изобретения в 1994 году светодиодов синего цвета были разработаны светодиоды белого цвета. Эту дату можно считать началом истории светодиодов как самостоятельных источников освещения. В настоящее время их срок службы вырос до 100 000 часов, а максимальная светотдача составляет 170 лм/Вт и уверенно приближается к возможному пределу 265 лм/Вт. Мощность может достигать 100 Вт. Именно благодаря высокой яркости и мощности современные светодиоды стали называть сверхъяркими и сверхмощными, хотя данное разделение условно.

Вольтамперная характеристика мощного светодиода и схема его включения показаны на рис. 103, а устройство обычного и сверхъяркого светодиодов – на рис. 104.

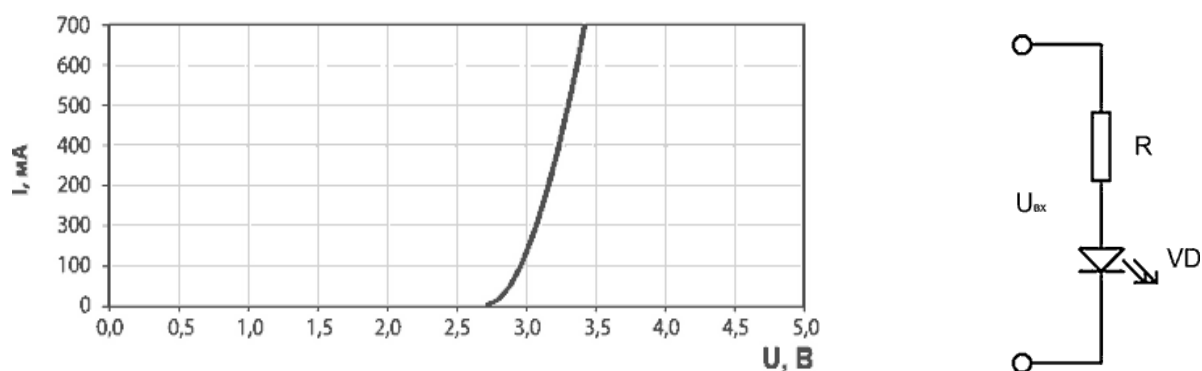


Рис. 103. Вольтамперная характеристика и схема включения мощного светодиода

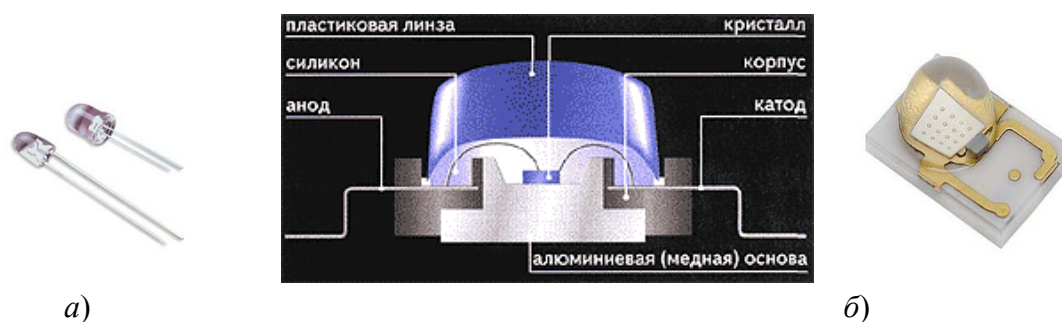


Рис. 104. Конструкция светодиода: а – обычного; б – мощного

Эффективность светодиода, как это видно из вольтамперной характеристики, сильно зависит от протекающего тока, поэтому подключение его к питающей сети на практике осуществляется через стабилизатор тока (драйвер). Причин изменения падения напряжения на кристалле светодиода может быть несколько – это и температурная зависимость падения напряжения, которая лежит в довольно широких пределах (достигая значения 7 мВ/К), и естественная деградация полупроводникового материала в процессе эксплуатации. Учитывая это, следует стабилизировать именно протекающий через светодиод ток, а не приложенное к нему напряжение. На сегодняшний день производители драйверов для светодиодов предлагают огромный ассортимент продукции: от маломощных для подключения одного или нескольких светодиодов до мощных (в несколько сотен ватт) и током до нескольких ампер. При выборе драйвера руководствуются диапазоном рабочих напряжений, энергоэффективностью драйвера, степенью IP-защиты, температурным режимом работы, источником питания (электросеть 220 В/50 Гц, аккумуляторы, батареи, блоки питания). Из всех возможных схем включения светодиодов наиболее целесообразна схема с использованием драйверов с несколькими параллельными выходами с постоянным током. Они хоть и немного дороже, но позволят осуществить независимое и надежное питание нескольких цепочек одновременно, и выход одной цепи из строя никак не скажется на работе других. Приемлемой является схема с матричным включением светодиодов (рис. 105).

4.2. Диоды с переменной емкостью (варикапы). В области *p-n* перехода вследствие диффузии электронов и дырок возникают нескомпенсированные объемные (пространственные) заряды ионизированных атомов примесей (неподвижно закрепленные в узлах кристаллической решетки полупроводника и не участвующие в процессе протекания тока). *p-n* переход запертого кремниевого диода ведет себя как изолятор и, таким образом, подобен диэлектрику конденсатора. Приложенное обратное напряжение влияет на толщину *p-n*-перехода и, соответственно, на емкость. Электрическое поле объемных зарядов существенным образом влияет на процесс протекания тока.

Различают:

а) барьерную емкость: обусловлена изменением пространственных зарядов при изменении модуля приложенного обратного напряжения. Увеличение обратного напряжения приводит к увеличению объемного заряда. Эта зависимость нелинейная (рис. 106). В практических расчетах и моделях используют не значение объемного заряда, а скорость его изменения. Модуль производной по напряжению называется барьерной емкостью:

$$C_{\text{диф}} = |dQ/du|; \quad C_{\text{бар}} = |dQ/du|;$$



б) диффузионную емкость: это следствие рекомбинации неосновных носителей заряда и появление объемного заряда при прямом смещении  $p-n$  перехода (рис. 107). Диффузионная емкость – это скорость изменения объемного заряда неравновесных (неосновных) носителей в базе при изменении прямого напряжения на  $p-n$  переходе  $Q_{\text{неосн}} = f(u)$ .

Общая емкость  $p-n$  перехода – это сумма барьерной и диффузионной емкостей. При прямом смещении диффузионная емкость практически равна нулю.

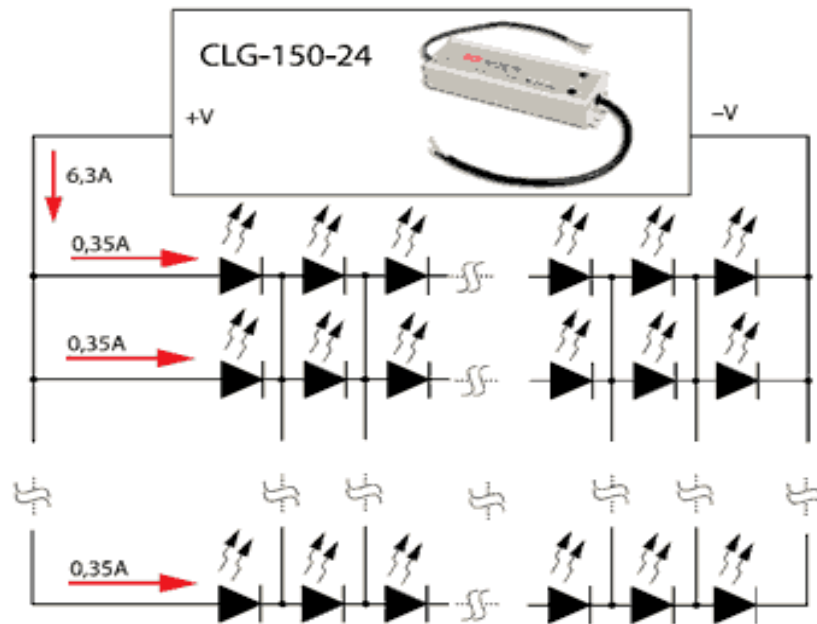


Рис. 105. Матричное включение светодиодов

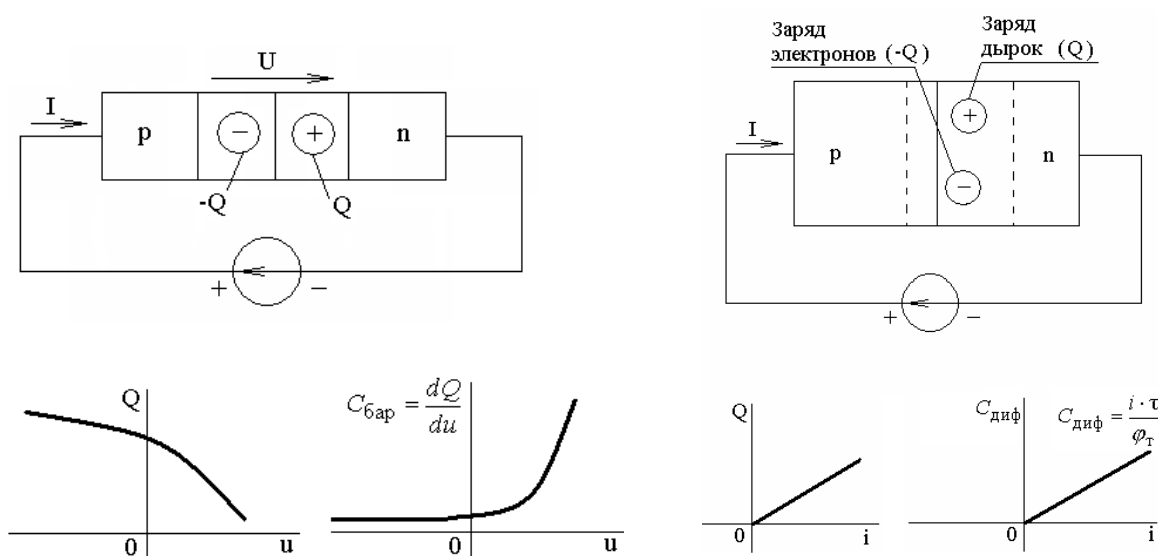


Рис. 106. Барьерная емкость

Рис. 107. Диффузионная емкость

## *5. Контрольные вопросы*

- 5.1. Какова величина порогового напряжения варикапа?
- 5.2. Как ведет себя емкость варикапа при увеличении обратного напряжения?
- 5.3. Какой минимальный ток необходим светодиоиду для слабого светоизлучения?
- 5.4. Как ведет себя светоизлучение при изменении полярности прикладываемого напряжения к диоду?
- 5.5. Напряжение питания светодиода 5 В. Какой добавочный резистор необходим при токе 15 мА?
- 5.6. Почему необходимо стабилизировать ток светодиода, а не напряжение?
- 5.7. В чем основное отличие полупроводникового диода от полупроводникового светодиода и факторы, его определяющие?
- 5.8. Приведите примеры использования диодов с особыми свойствами.
- 5.9. Как зависит емкость варикапа от полярности приложенного напряжения?
- 5.10. В чем особенности полупроводниковой гетероструктуры применительно к диодам с особыми свойствами?

## **Лабораторная работа № 8**

### ***Исследование характеристик тиристоров***

*Цель работы:* ознакомление с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия полупроводниковых многопереходных структур – тиристоров. В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений математической модели полупроводниковых тиристоров; уметь рассчитывать параметры электрической цепи, содержащей полупроводниковые тиристоры; приобрести навыки экспериментального исследования параметров полупроводниковых тиристоров и практические навыки снятия вольтамперных характеристик.

#### *1. Объект и средства исследования*

Объектом исследования являются полупроводниковые приборы, входящие в состав типового комплекта лабораторного оборудования в

стендовом исполнении «Теоретические основы электротехники» (подробное описание стенда приведено во введении, общий вид показан на рис. 1).

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

## 2. Подготовка к работе

2.1. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов для исследования параметров и снятия вольтамперных характеристик полупроводниковых тиристоров с учетом расположения приборов и оборудования на стенде. Узловые точки схемы согласовать с обозначениями на блоках стенда. Предусмотреть в схемах всех опытов включение соответствующих виртуальных измерительных приборов.

2.2. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда и принципом действия, а также составом виртуальных приборов, используемых при проведении лабораторной работы.

2.3. Изучить теоретический материал, указанный в библиографическом списке.

2.4. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе на листах формата А-4, содержащий ответы на вопросы п. 2 и заготовки таблиц, схем, графиков и расчетных формул к п. 3.

## 3. Рабочее задание

3.1. Для снятия статической характеристики симистора соберите цепь согласно схеме (рис. 108). Если вы используете виртуальные приборы, то установите период измерения 0,02 с.

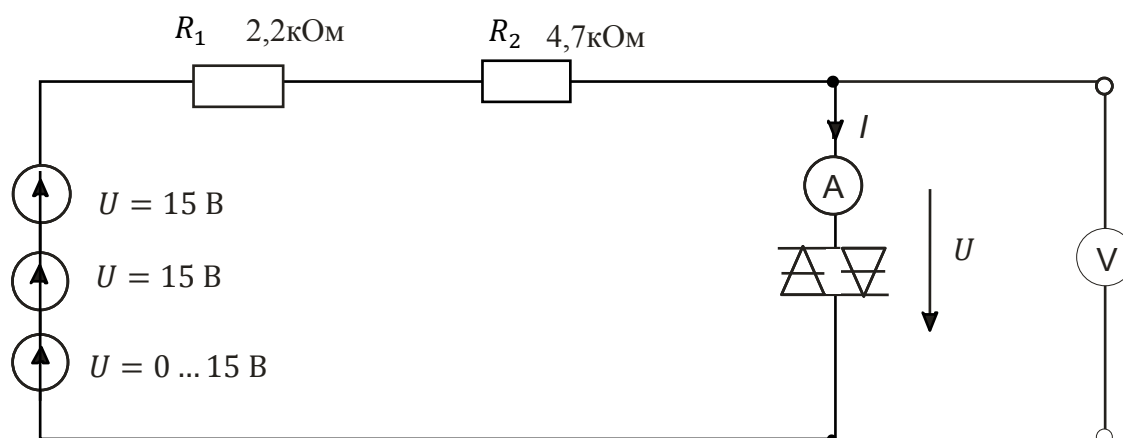


Рис. 108. Схема для исследования статической характеристики симистора

3.2. Плавно увеличивая напряжение регулируемого источника напряжения, определите напряжение отпирания симистора (это наибольшее напряжение, при котором ток еще равен нулю, при дальнейшем увеличении напряжения источника ток возрастает скачком, а напряжение на симисторе скачком уменьшается). Запишите значение  $U_{отп}$  в табл. 27.

Таблица 27

+I, мА	$I_{уд} =$ мА	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
+U, В	$U_{отп} =$ В						

3.3. Плавно уменьшая напряжение регулируемого источника напряжения, определите ток удержания симистора (это наименьшее значение тока, при котором симистор еще остается включенным, при дальнейшем снижении напряжения источника ток скачком падает до нуля, а напряжение на симисторе скачком возрастает). Запишите значение  $I_{уд}$  в табл. 27.

3.4. Изменяя напряжение регулируемого источника, поочередно установите значения тока, указанные в табл. 27, и запишите в нее соответствующие напряжения на симисторе. Постройте кривую зависимости тока от напряжения (рис. 109).

					I	мА				
					2,0					
					1,5					
					1,0					
					0,5					В
-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	U	
					-0,5					
					-1,0					
					-1,5					
					-2,0					

Рис. 109. Статические характеристики симистора

3.5. Повторите измерения для обратной полярности симистора и результаты занесите в табл. 28. Постройте кривую зависимости тока от напряжения (см. рис. 109).

Таблица 28

$-I, \text{ мА}$	$I_{\text{уд}} = \text{ мА}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$-U, \text{ В}$	$U_{\text{отп}} = \text{ В}$							

3.6. Для снятия динамической характеристики симистора с использованием осциллографа соберите цепь, схема которой показана на рис. 110. Включите виртуальные приборы  $V0$ ,  $A1$  и «Осциллограф». На осциллографе включите режим  $XU$  (вход  $X$  – канал 3, вход  $Y$  – канал 1).

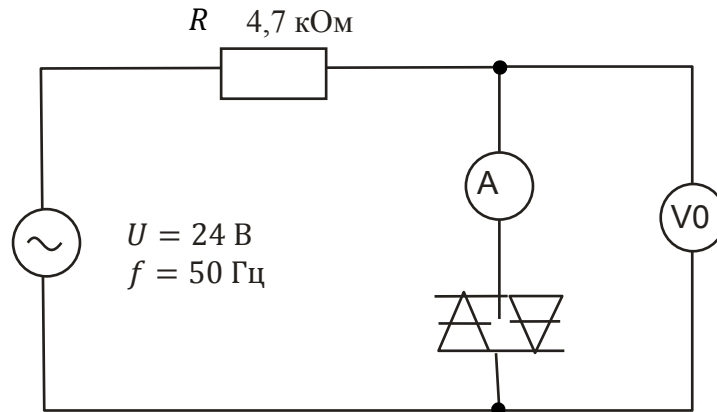


Рис. 110. Схема для снятия динамической характеристики симистора

3.7. На графике (рис. 111) отобразите характеристику, полученную на мониторе осциллографа, и сравните ее со статической характеристикой.

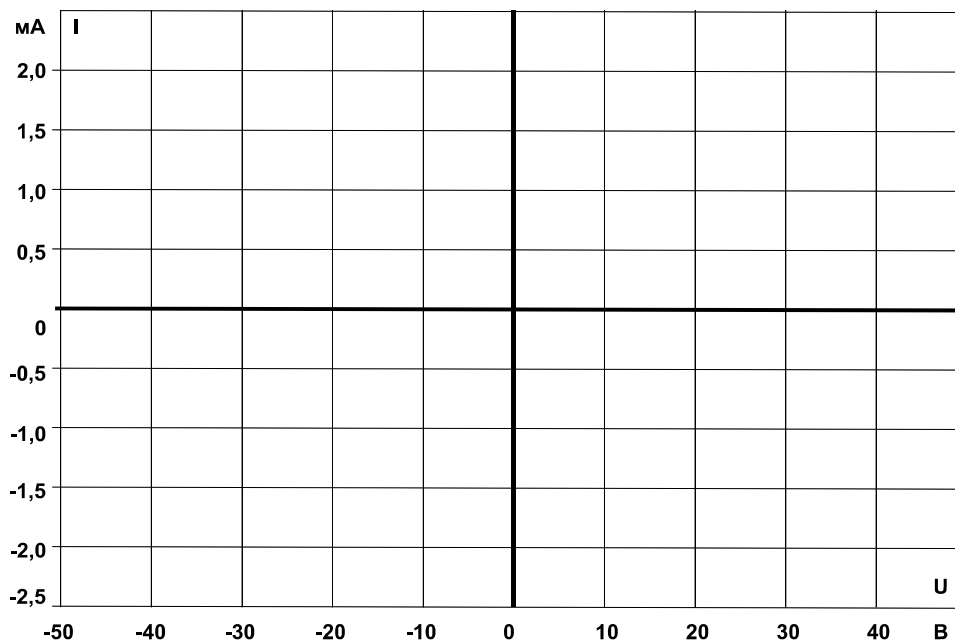


Рис. 111. Форма для нанесения осциллограммы напряжения на симисторе

3.8. Для исследования влияния напряжения цепи управляющий электрод/катод тиристора на ток управления и анодный ток соберите цепь, как показано на рис. 112, и подайте на нее максимальное напряжение 15 В, при напряжении управляющий электрод/катод  $U_{ук} = 0$  В. Увеличивайте напряжение  $U_{ук}$  и измеряйте соответствующие значения тока управления  $I_y$  мультиметром. Занесите данные измерений в табл. 29. Заметьте и запишите, при каком напряжении  $U_{ук}$  отпирается тиристор (загорается лампочка).

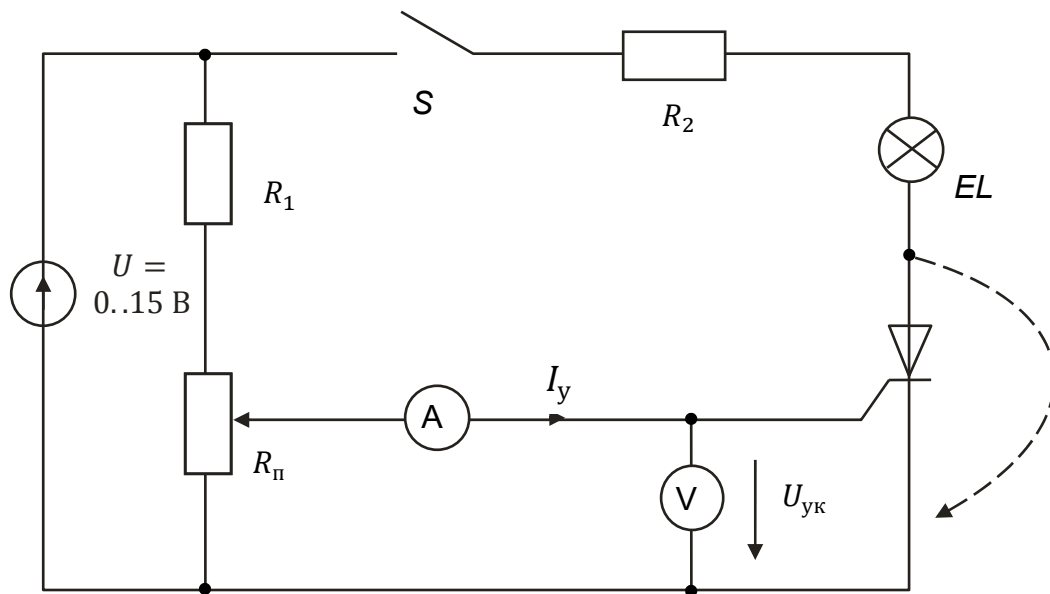


Рис. 112. Схема для исследования триодного тиристора

Таблица 29

$U_{ук}, В$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
$I_{y1}, мА$										
$I_{y2}, мА$										

Примечание.  $I_{y1}$  – при увеличении  $U_{ук}$ ,  $I_{y2}$  – при уменьшении.

3.9. Снижайте напряжение  $U_{ук}$  до нуля и снова записывайте значения  $I_y$  в табл. 29. На рис. 113 постройте графики  $I_y(U_{ук})$  при увеличении и уменьшении напряжения. На графике отметьте напряжения  $U_{отп}$  и ток  $I_{отп}$ .

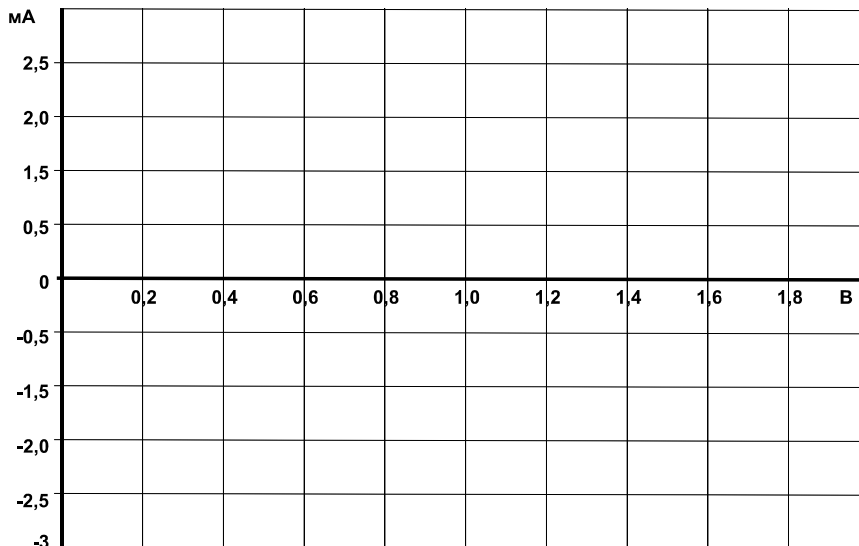


Рис. 113. Форма для нанесения вольтамперных характеристик триодного тиристора

3.10. Убедитесь, что снижение напряжения управления до нуля не приводит к выключению тиристора и что для его запирания необходимо либо кратковременно прервать цепь (выключить выключатель  $S$ ), либо зашунтировать тиристор (на рис. 112 показано пунктиром), либо снизить ток до значения меньше тока удержания.

3.11. Определите ток удержания  $I_{уд}$ . Для этого переключите миллиамперметр в цепь нагрузки и при нулевом токе управления плавно снижайте напряжение питания до тех пор, пока ток нагрузки скачком не упадет до нуля. Последнее значение тока перед этим скачком и есть ток удержания.

3.12. Соберите цепь (рис. 114) для снятия вольтамперной характеристики  $I_a(U_{ак})$  тиристора с помощью осциллографа (виртуального или электронного). Установите максимальную амплитуду синусоидального напряжения и максимальное значение постоянного напряжения 15 В.

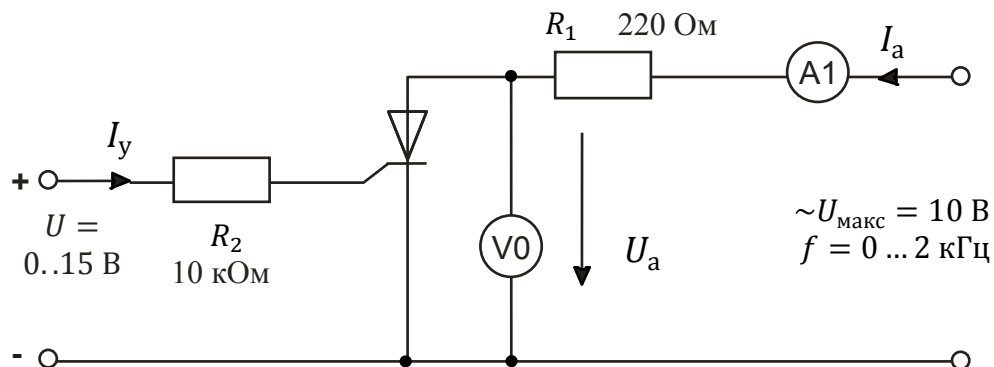


Рис. 114. Схема для снятия вольтамперной характеристики  $I_a(U_{ак})$  тиристора с помощью осциллографа

3.13. Включите виртуальный осциллограф и получите на экране изображение одного-двух периодов тока и напряжения на тиристоре.

3.14. Снижая и увеличивая напряжение управления, убедитесь, что тиристор выключается (ток становится равным нулю, а напряжение на тиристоре синусоидальное) и включается (появляется положительная полуволна тока, а напряжение имеет только отрицательную полуволну). При необходимости замените резистор 10 кОм на 4,7 кОм. При токе управления, близком к минимальному току отпирания, можно заметить включение тиристора при нарастании анодного напряжения.

3.15. Включите режим XY осциллографа (канал I0 по входу X и канал A1 по входу Y), получите на экране изображение вольтамперной характеристики  $I_a(U_{ак})$ . Проследите за ее изменением при увеличении и уменьшении тока управления и перерисуйте на график (рис. 115) при  $I_y > I_{отп}$  и  $I_y < I_{отп}$ . Не забудьте указать масштабы.

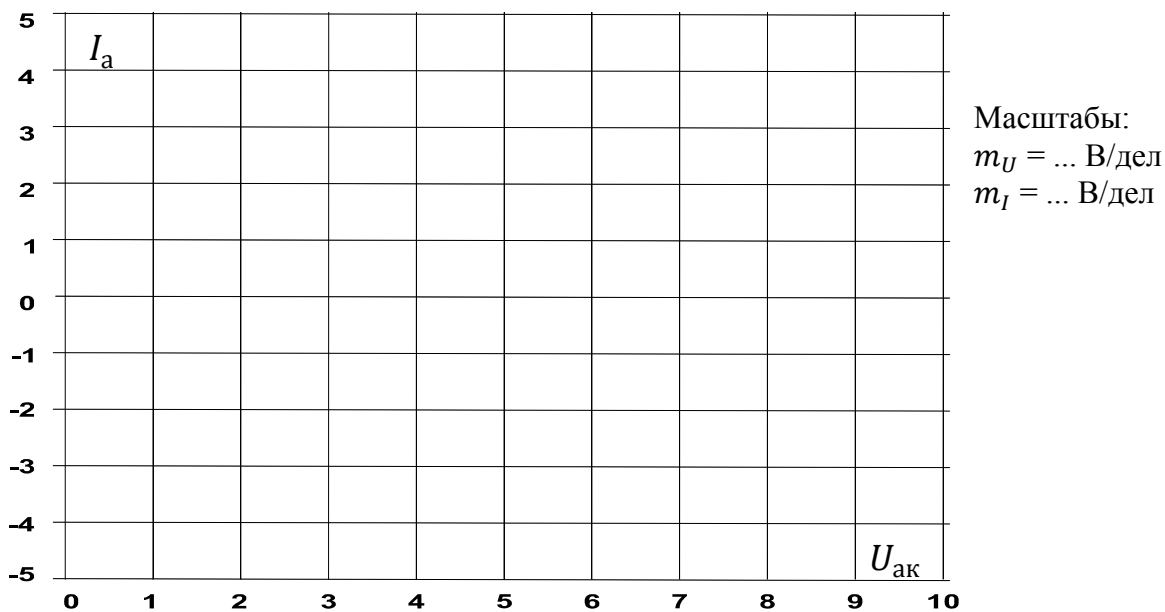


Рис. 115. Форма для нанесения осциллограммы напряжения на триодном тиристоре

3.16. Для измерения параметров и изучения свойства тиристора как управляемого выпрямителя с однопереходным транзистором в цепи управления соберите цепь согласно схеме (рис. 116) и подайте на вход этой цепи синусоидальное напряжение 24 В, 50 Гц. Для измерения тока в цепи нагрузки и угла задержки отпирания тиристора включите виртуальные приборы I0, A1 и виртуальный осциллограф. Не забудьте установить род измеряемой величины – «Среднее значение».



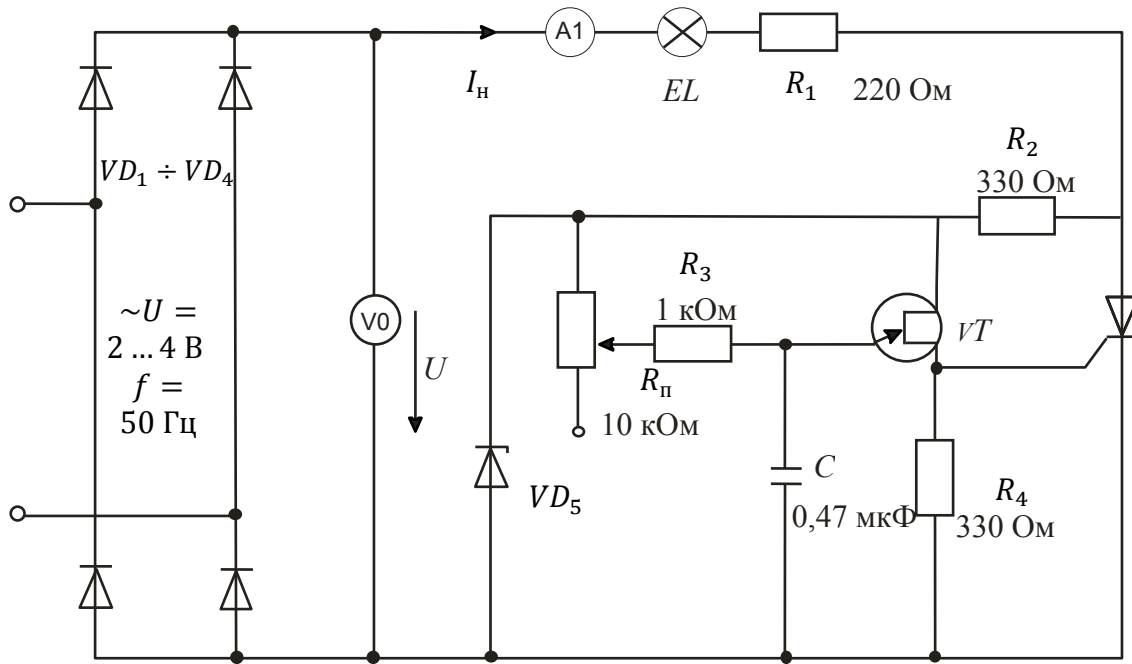


Рис. 116. Схема управляемого выпрямителя с однопереходным транзистором в цепи управления

3.17. Включите блок генераторов напряжений, настройте осциллограф и, вращая ручку потенциометра, убедитесь, что регулируются угол задержки отпирания тиристора и среднее значение выпрямленного тока. При одном из положений потенциометра перерисуйте кривые выпрямленных напряжения и тока на рис. 117. Определите и запишите масштабы.

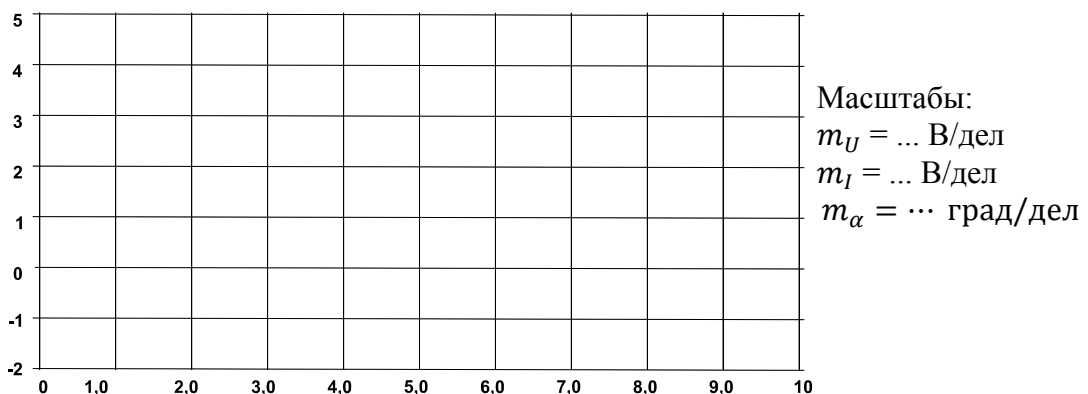


Рис. 117. Форма для нанесения осциллограмм напряжения управляемого выпрямителя

3.18. Изменяя угол задержки отпирания от минимально возможного значения до максимального, снимите зависимость  $I_H(\alpha)$ , занесите результаты измерений в табл. 30, и на рис. 118 постройте график.

*Примечание.* Для уменьшения минимально возможного угла  $\alpha$  замените конденсатор  $C = 0,47$  мкФ на  $0,1$  мкФ. Для увеличения максимального угла задержки увеличьте сопротивление  $R_3$ .

Таблица 30

$\alpha, ^\circ$	18	36	72	108	144	180
$I_H, \text{мА}$						

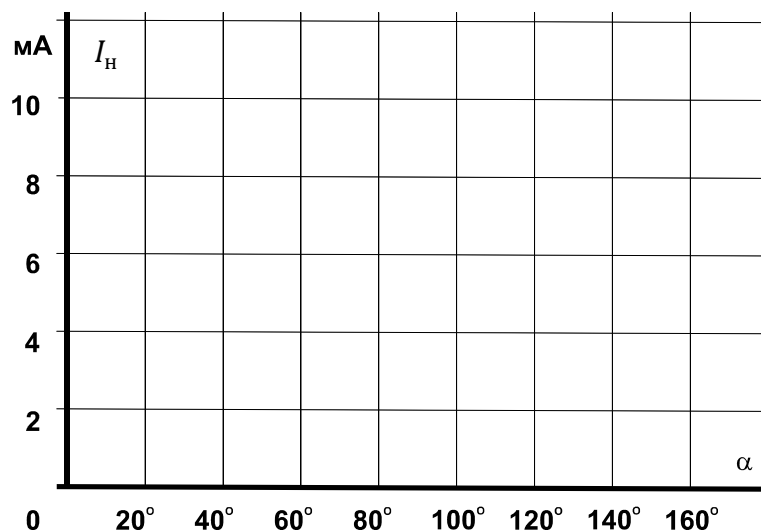
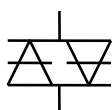


Рис. 118. Форма для нанесения зависимости тока нагрузки от угла управления тиристора

#### 4. Методические указания

4.1. Диодный тиристор (симистор). Диодные тиристоры, именуемые также динисторами, изменяют свое состояние соответственно приложенному напряжению. При некотором граничном напряжении (напряжении отпирания) динистор

симистор



условное обозначение

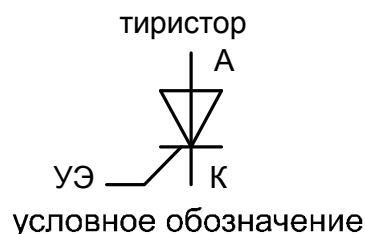
Рис. 119. Симистор

переходит от состояния с высоким сопротивлением к состоянию с низким сопротивлением. Он сохраняет состояние низкой резистивности до тех пор, пока ток в нем не упадет ниже величины тока удержания. Так называемый симистор

(рис. 119) призван выполнять функции двух динисторов, включенных встречно-параллельно. Состояние симистора изменяется при обеих полярностях приложенного напряжения, обеспечивая проведение тока в обоих

направлениях. Симисторы используются главным образом для включения мощных триодных тиристоров.

4.2. Триодный тиристор. Триодные тиристоры, обычно называемые просто тиристорами (рис. 120), имеют четыре слоя  $p-n-p-n$ , один из которых соединен с внешним управляющим электродом (УЭ). Это позволяет приводить цепь катод (К) / анод (А) тиристора в открытое состояние.



Тиристор может быть также переведен в открытое состояние катодно-анодным напряжением. Однако этого способа, если возможно, следует избегать, чтобы не разрушить тиристор. Будучи открытым, тиристор сохраняет проводящее состояние, даже когда напряжение на управляющем электроде выключается. Цепь катод/анод возвращается к запертому состоянию, когда анодный ток становится ниже минимальной величины (ток удержания  $I_{уд}$ ).

Рис. 120. Триодный тиристор

4.3. Фазовое управление тиристора. При фазовом способе управления на управляющий электрод тиристора подаются короткие импульсы напряжения, отпирающие тиристор в определенной точке полуволны приложенного напряжения. Запирается тиристор автоматически в момент перехода тока через ноль. Изменение точки (фазового угла) отпирания приводит к изменению среднего за полупериод значения тока нагрузки (рис. 121).



Рис. 121. Осциллограмма напряжения при фазовом способе управления

В данной работе исследуется тиристорный регулятор выпрямления тока. Последовательно с нагрузкой, состоящей из лампы накаливания  $EL$  и

добавочного резистора  $R_1$ , включен тиристор, управляемый от генератора импульсов.

Генератор импульсов выполнен на однопереходном транзисторе  $VT$ . При подаче полуволны напряжения на анод запертого тиристора конденсатор  $C$  заряжается через сопротивления  $R_2$ ,  $R_{\Pi}$  и  $R_3$ . Когда напряжение на конденсаторе достигает значения  $0,7 \dots 0,8 U_{ст}$ , транзистор открывается и конденсатор разряжается по цепи эмиттер – база – управляющий электрод – катод тиристора. Тиристор отпирается, создает цепь для протекания тока через нагрузку и одновременно шунтирует генератор импульсов. Скорость заряда конденсатора и, следовательно, задержка подачи отпирающего импульса по отношению к моменту подачи положительного напряжения на анод тиристора регулируется потенциометром  $R_{\Pi}$ .

### *5. Контрольные вопросы*

- 5.1. Какова величина напряжения отпирания симистора (по рис. 108)?
- 5.2. Каковы величины дифференциального сопротивления симистора в запертом и отпертом состояниях при токе  $2 \dots 3$  мА?
- 5.3. Какие причины «заставляют» симистор вернуться к запертому состоянию?
- 5.4. Как проходит процесс запираания тиристора?
- 5.5. Запирается ли отпертый тиристор, когда отключается напряжение цепи управляющий электрод/катод?
- 5.6. Что случится с отпертым тиристором при размыкании выключателя в цепи (см. рис. 112), если  $U_{ук} > U_{отп}$ ? Если  $U_{эк} < U_{отп}$ ?
- 5.7. Как поведет себя тиристор, если к цепи (см. рис. 112) вместо постоянного напряжения приложить синусоидальное напряжение при  $U_{ук} > U_{отп}$ ? при  $U_{ук} < U_{отп}$ ? при  $U_{ук} = 0 \dots 0,5$  В?
- 5.8. Что произойдет с отпертым тиристором при его кратковременном шунтировании перемычкой в цепи (см. рис. 112), если  $U_{ук} > U_{отп}$ ? Если  $U_{ук} < U_{отп}$ ?
- 5.9. Какие свойства проявляет тиристор, работая при измененной на противоположную полярности напряжения?
- 5.10. Как изменяется ток нагрузки при увеличении угла отпирания тиристора?

## Лабораторная работа № 9

### *Логические элементы*

*Цель работы:* ознакомление с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия полупроводниковых логических элементов. В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений математической модели полупроводниковых логических элементов; уметь рассчитывать параметры электрической цепи, содержащей полупроводниковые логические элементы; приобрести навыки экспериментального исследования параметров полупроводниковых логических элементов и практические навыки реализации логических функций.

#### *1. Объект и средства исследования*

Объектом исследования являются полупроводниковые приборы, входящие в состав типового комплекта лабораторного оборудования в стендовом исполнении «Теоретические основы электротехники» (подробное описание стенда приведено во введении, общий вид показан на рис. 1).

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

#### *2. Подготовка к работе*

2.1. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов для исследования параметров логических элементов с учетом расположения приборов и оборудования на стенде. Узловые точки схемы согласовать с обозначениями на блоках стенда. Предусмотреть в схемах всех опытов включение соответствующих виртуальных измерительных приборов.

2.2. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда и принципом действия, а также составом виртуальных приборов, используемых при проведении лабораторной работы.

2.3. Изучить теоретический материал, указанный в библиографическом списке.

2.4. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе на листах формата А-4, содержащий ответы на вопросы п. 2 и заготовки таблиц, схем, графиков и расчетных формул к п. 3.

### 3. Рабочее задание

3.1. Для исследования свойств элемента И с тремя входами соберите цепь согласно схеме (рис. 122). Подайте последовательно: 0 В  $\equiv$  сигнал 0  $\equiv$  уровень низкого потенциала, +15 В  $\equiv$  сигнал 1  $\equiv$  уровень высокого потенциала, ко входам  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ , как указано в табл. 31. Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в таблицу.

*Примечание.* Разомкнутые входы логического элемента не имеют состояния определенного сигнала. Именно поэтому состояния выходной переменной при разомкнутых входах не несут какой-либо определенной информации.

3.2. Для исследования свойства элемента ИЛИ с тремя входами соберите цепь согласно схеме (рис. 123). Подайте последовательно: 0 В  $\equiv$  сигнал 0  $\equiv$  уровень низкого потенциала, +15 В  $\equiv$  сигнал 1  $\equiv$  уровень высокого потенциала, ко входам  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ , как указано в табл. 32. Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в таблицу.

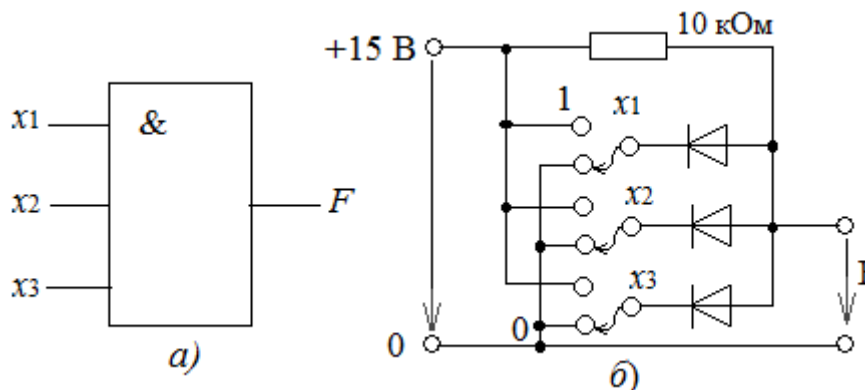


Рис. 122. Логический элемент И: а – условное обозначение; б – схема электрическая принципиальная

Таблица 31

Входные сигналы			Выходные сигналы
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$F$
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

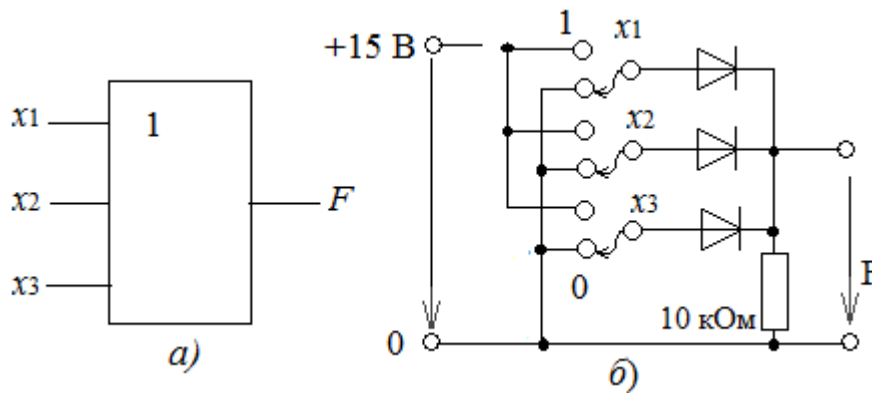


Рис. 123. Логический элемент ИЛИ: а – условное обозначение;  
б – схема электрическая принципиальная

3.3. Проведя необходимые измерения, исследуйте свойства элемента НЕ. Для этого соберите цепь согласно схеме (рис. 124). Подайте на вход сначала 0 В (сигнал 0), а затем +15 В (сигнал 1). Занесите соответствующие значения выходного сигнала (1/0) в табл. 33.

Таблица 32

Входные сигналы			Выходные сигналы
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$F$
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

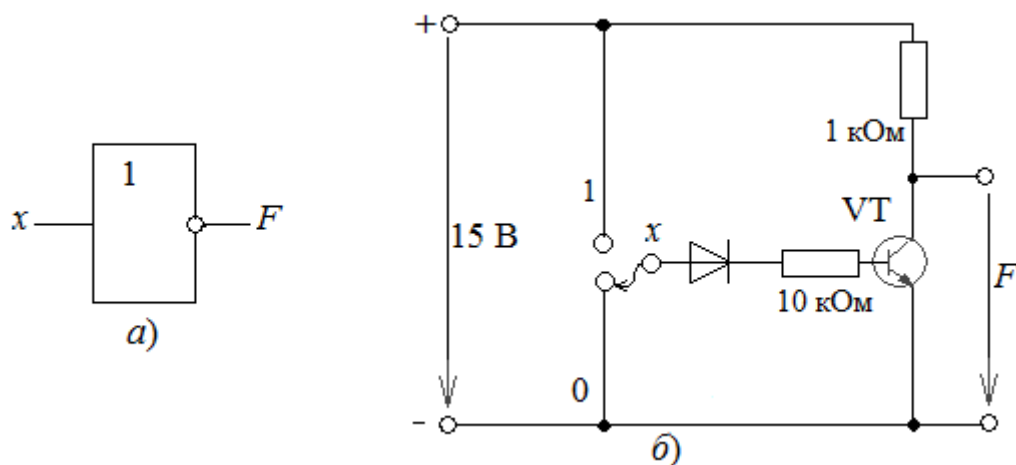


Рис. 124. Логический элемент НЕ: а – условное обозначение;  
б – схема электрическая принципиальная

Таблица 33

Входной сигнал	Выходной сигнал
$x$	$F$
0	
1	

3.4. Производя измерения, исследуйте свойства элемента И – НЕ с тремя входами. Для этого соберите цепь согласно схеме (рис. 125). Подайте последовательно: 0 В  $\equiv$  сигнал 0  $\equiv$  уровень низкого потенциала, +15 В  $\equiv$  сигнал 1  $\equiv$  уровень высокого потенциала, ко входам  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ , как указано в табл. 34. Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в таблицу.

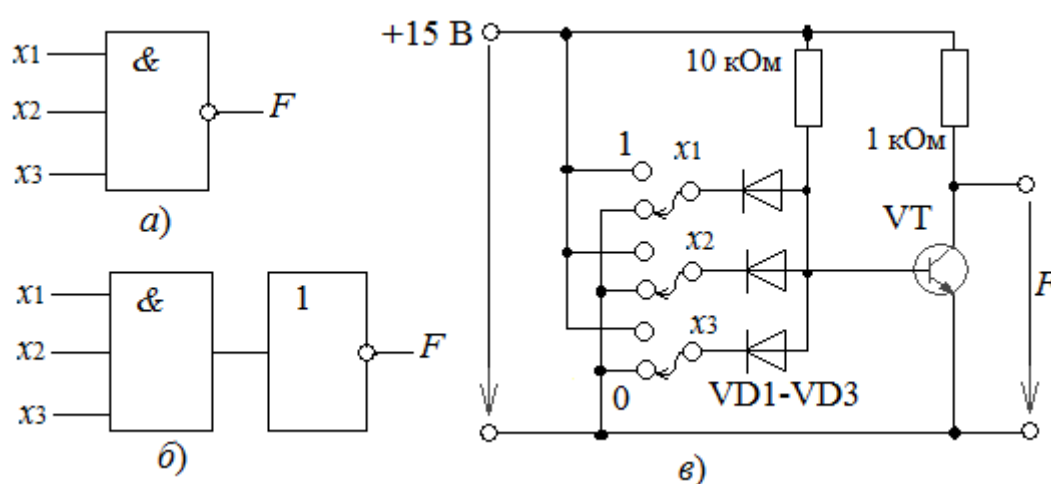


Рис. 125. Логический элемент И – НЕ: а – условное обозначение; б – схема электрическая принципиальная; в – схемная реализация

Таблица 34

Входные сигналы			Выходные сигналы
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$F$
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	



3.5. Производя измерения, исследуйте свойства элемента ИЛИ – НЕ с тремя входами. Для этого соберите цепь согласно схеме (рис. 126). Подайте последовательно: 0 В  $\equiv$  сигнал 0  $\equiv$  уровень низкого потенциала, +15 В  $\equiv$  сигнал 1  $\equiv$  уровень высокого потенциала, к входам  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ , как указано в табл. 35. Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в таблицу.

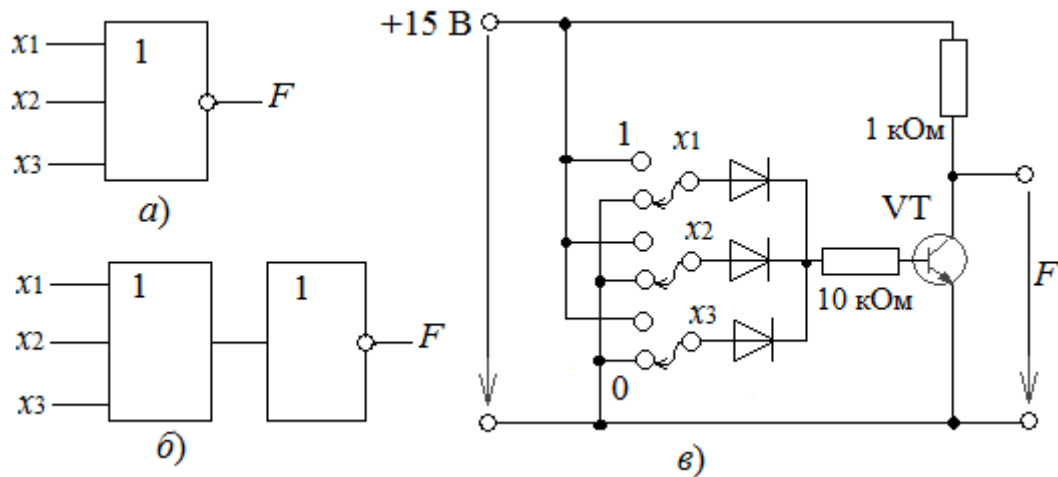


Рис. 126. Логический элемент ИЛИ – НЕ: а – условное обозначение; б – схема электрическая принципиальная; в – схемная реализация

4

Таблица 35

Входные сигналы			Выходные сигналы
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$F$
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

#### 4. Методические указания

4.1. Логические элементы. Логические (двоичные) элементы служат для выполнения различных логических операций над цифровыми сигналами при двоичном способе их представления. Существенная особенность двоичных цепей в том, что в них рассматриваются не столько величины напряжений, сколько двоичные сигналы. Соответствие между напряже-

ниями и двоичными сигналами устанавливается произвольно. Чаще всего используются дискретные сигналы, нулевому значению которых соответствует уровень низкого электрического потенциала, а единичному значению – уровень высокого потенциала (положительного или отрицательного). Возможны и другие соответствия.

Свойства логических элементов подчиняются правилам булевой алгебры. Это означает, в частности, что входные переменные логических элементов следует обозначать строчными, а выходные переменные – прописными буквами.

Основные булевы (логические) функции следующие:

- функция AND (И) – конъюнкция (логическое умножение);
- функция OR (ИЛИ) – дизъюнкция (логическое сложение);
- функция NOT (НЕ) – инверсия (логическое отрицание).

Дополнительно существуют такие комбинации, как:

- функция NOT AND (И – НЕ);
- функция NOT OR (ИЛИ – НЕ) и др.

4.2. Логический элемент AND (И). Элемент И имеет несколько входов и один выход. Выход приобретает значение 1 только тогда, когда все входы данного логического элемента имеют значение 1. Его условное обозначение показано на рис. 122.

4.3. Логический элемент OR (ИЛИ). Элемент ИЛИ имеет несколько входов и один выход. Выход приобретает значение 1, когда хотя бы один вход данного логического элемента имеет значение 1. Его условное обозначение показано на рис. 123.

4.4. Логический элемент NOT (НЕ). Логические элементы НЕ отрицают входной сигнал, т.е. они преобразуют сигналы 1 в сигналы 0 и наоборот. Они всегда имеют по одному входу и одному выходу. Используются наряду с другими элементами в цифровых инверторах и логических устройствах. Условное обозначение элемента НЕ показано на рис. 124.

4.5. Логический элемент NOT AND (И – НЕ). Элемент И – НЕ состоит из элемента И, сопровождаемого элементом НЕ. Элементы И – НЕ предпочтительны для использования в цифровых цепях, так как все основные цепи (И, ИЛИ и НЕ) можно смоделировать с помощью этого элемента. Условное обозначение элемента И – НЕ и его функциональный эквивалент показаны на рис. 125.

4.6. Логический элемент NOT OR (ИЛИ – НЕ). Элемент ИЛИ – НЕ состоит из элемента ИЛИ, сопровождаемого элементом НЕ. Как и элемент И – НЕ, элемент ИЛИ – НЕ предпочтителен к использованию в цифровых цепях, поскольку с его помощью можно строить основные элементы И,

ИЛИ и НЕ. Условное обозначение элемента ИЛИ – НЕ и его функциональный эквивалент показаны на рис. 126.

#### 4.7. Неиспользуемые входы логических устройств:

- *объединяют с используемыми* (при этом предыдущее логическое устройство, нагрузкой которого являются эти входы, не перегружается);

- в зависимости от логики работы устройства *подключают либо к шине питания «земля» (логический ноль), либо к источнику питания микросхем через резисторы* (для предотвращения их пробоя) номинальным значением несколько килоом (логическая единица). При этом реализация логических функций не искажается. Например:

- при реализации логической функции И  $x \cdot 1 = x$ ;
- при реализации логической функции ИЛИ  $x + 0 = x$ .

#### 5. *Контрольные вопросы*

- 5.1. Какова формула операции элемента И?
- 5.2. Когда выходной сигнал элемента И имеет величину 1?
- 5.3. Какова формула операции элемента ИЛИ?
- 5.4. При каких условиях на входах выходной сигнал элемента ИЛИ имеет величину 1?
- 5.5. Какова формула операции элемента НЕ?
- 5.6. Какова формула операции элемента И – НЕ?
- 5.7. При каких входных сигналах выходной сигнал элемента И – НЕ имеет величину 0?
- 5.8. Какова формула операции элемента ИЛИ – НЕ?
- 5.9. При каких условиях на входах выходной сигнал элемента ИЛИ – НЕ имеет величину 0?

## Лабораторная работа № 10

### *Операционные усилители*

*Цель работы:* ознакомление с устройством, параметрами, характеристиками и принципом действия операционных усилителей (ОУ). В результате проведения работы студенты должны знать основные формы записи уравнений математической модели операционных усилителей; уметь

рассчитывать параметры электрической цепи, содержащей операционные усилители; приобрести навыки экспериментального исследования параметров операционных усилителей и практические навыки реализации устройств на их основе.

### *1. Объект и средства исследования*

Объектом исследования являются полупроводниковые приборы и интегральные компоненты, входящие в состав типового комплекта лабораторного оборудования в стендовом исполнении «Теоретические основы электротехники» (подробное описание стенда приведено во введении, общий вид показан на рис. 1).

При сборке схемы и выполнении работы следует руководствоваться инструкциями по технике безопасности № 1 и № 42 (находятся в лаборатории).

### *2. Подготовка к работе*

2.1. Составить электрические принципиальные и электромонтажные схемы опытов для исследования параметров операционных усилителей с учетом расположения приборов и оборудования на стенде. Узловые точки схемы согласовать с обозначениями на блоках стенда. Предусмотреть в схемах всех опытов включение соответствующих виртуальных измерительных приборов.

2.2. Ознакомиться с устройством лабораторного стенда и принципом действия, а также составом виртуальных приборов, используемых при проведении лабораторной работы.

2.3. Изучить теоретический материал, указанный в библиографическом списке.

2.4. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе на листах формата А-4, содержащий ответы на вопросы п. 2 и заготовки таблиц, схем, графиков и расчетных формул к п. 3.

### *3. Рабочее задание*

3.1. Для построения кривой, показывающей зависимость выходного напряжения от входного, и изучения влияния величины сопротивления нагрузки на выходное напряжение соберите цепь, как показано на рис. 127. С помощью мультиметра измерьте величины выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи  $R_{\text{ос}}$  и входных напряжениях  $U_{\text{вх}}$  согласно табл. 36. Занесите результаты измерений в табл. 36. Постройте



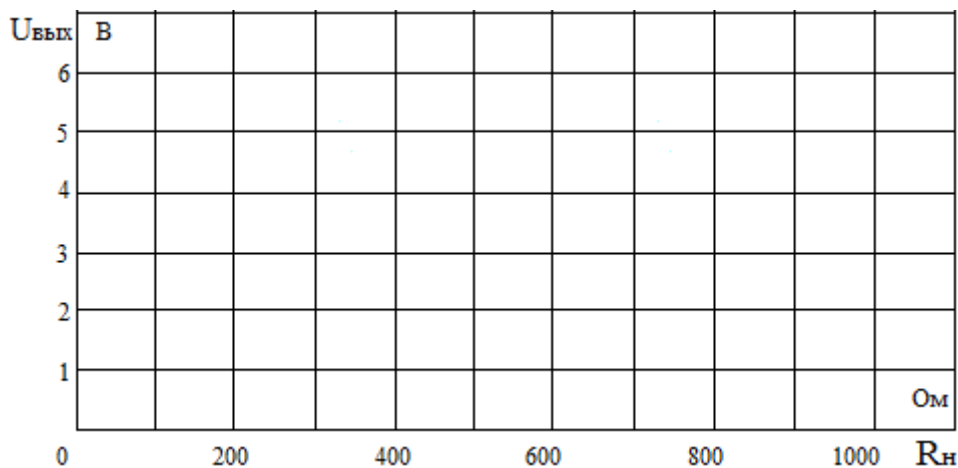


Рис. 129. Форма для нанесения графиков зависимости выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}$

Таблица 36

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
$U_{\text{вых}}$ при $R_{\text{ос}} = 10 \text{ кОм}$											
$U_{\text{вых}}$ при $R_{\text{ос}} = 22 \text{ кОм}$											
$U_{\text{вых}}$ при $R_{\text{ос}} = 47 \text{ кОм}$											

Таблица 37

$R_{\text{н}}, \text{Ом}$	1000	680	470	330	220	100	47
$U_{\text{вых}}, \text{В}$							

3.3. Соберите цепь по схеме (рис. 130). Используя мультиметр, измерьте выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  при различных значениях сопротивления отрицательной обратной связи  $R_{\text{ос}}$  и входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  согласно табл. 38. Занесите результаты измерений в таблицу. Постройте зависимости выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи  $R_{\text{ос}}$  (рис. 131).

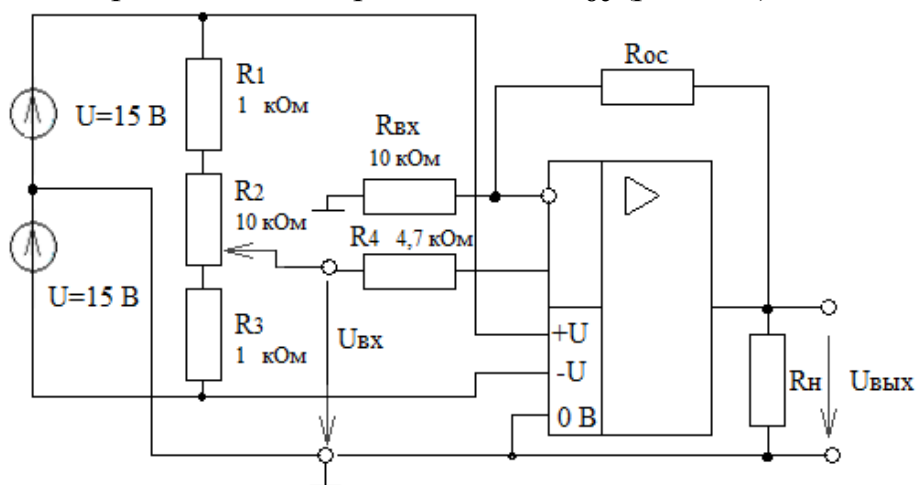


Рис. 130. Схема неинвертирующего усилителя на ОУ

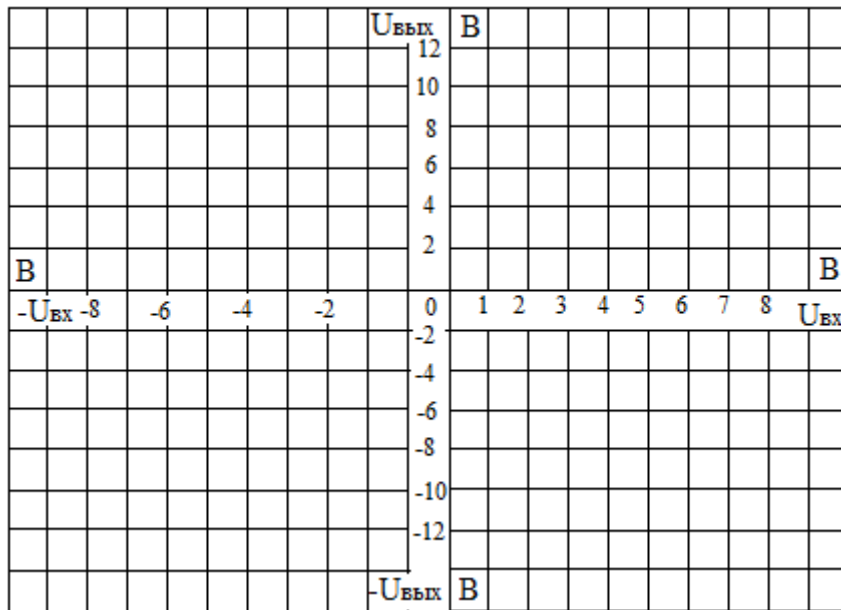


Рис. 131. Форма для нанесения амплитудных характеристик неинвертирующего усилителя

Таблица 38

$U_{ВХ}$ , В	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
$U_{ВЫХ}$ при $R_{ОС} = 10$ кОм											
$U_{ВЫХ}$ при $R_{ОС} = 22$ кОм											
$U_{ВЫХ}$ при $R_{ОС} = 47$ кОм											

3.4. Для исследования свойств суммирующего усилителя соберите цепь, показанную на рис. 132, и установите входное напряжение  $U_{ВХ2} = 2$  В. Изменяйте входное напряжение  $U_{ВХ1}$  при  $R_{ВХ1} = R_{ВХ2} = 1$  кОм согласно табл. 39, измеряя соответствующие значения выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  мультиметром. Повторите измерения для входного напряжения  $U_{ВХ2} = -2$  В. Результаты измерений занесите в табл. 39. На графике (рис. 133) постройте зависимость выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  от входного  $U_{ВХ1}$ .

Таблица 39

$U_{ВХ2}$ , В	0	2	4	6	8	10
$U_{ВЫХ}$ , В при $U_{ВХ2} = 2$ В						
$U_{ВЫХ}$ , В при $U_{ВХ2} = -2$ В						

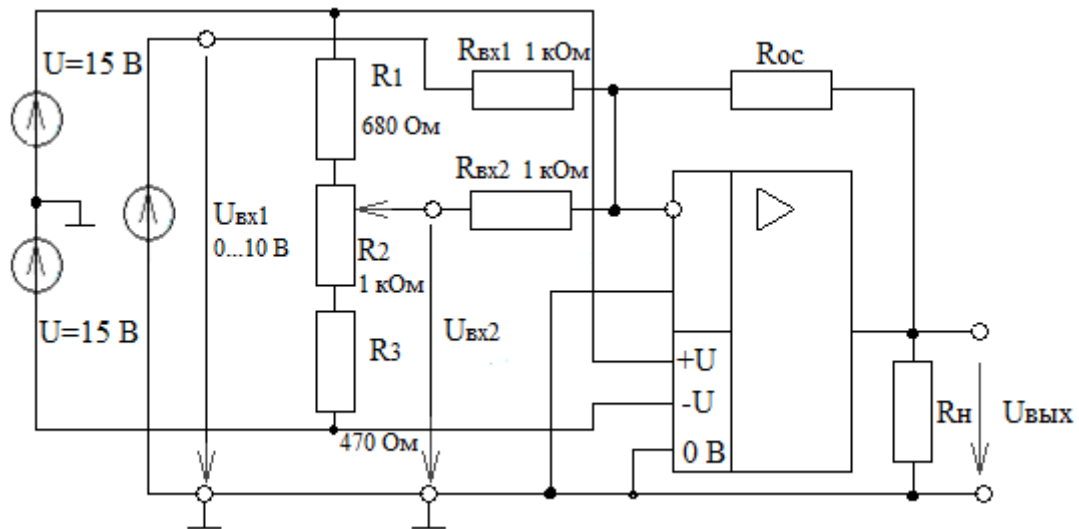


Рис. 132. Схема инвертирующего суммирующего усилителя

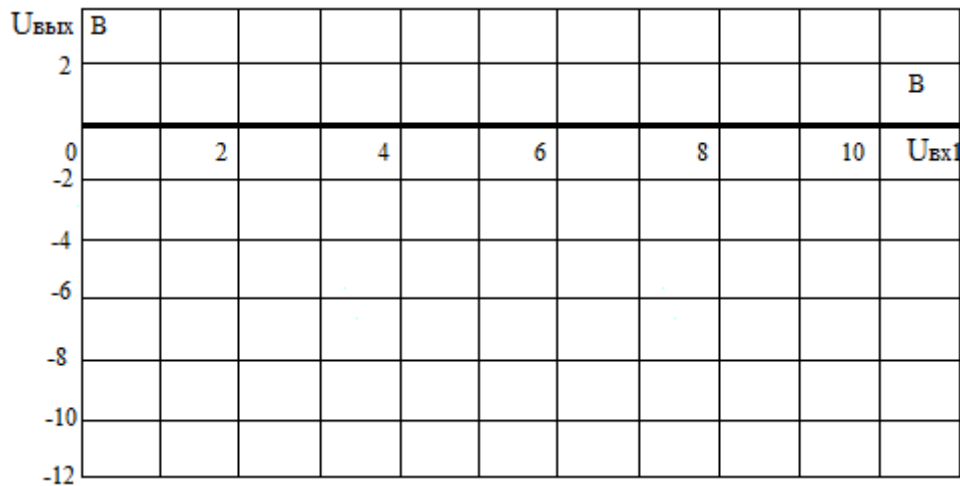


Рис. 133. Форма для нанесения графиков зависимости выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от входного  $U_{\text{вх1}}$ . при  $R_{\text{вх1}} = R_{\text{вх2}} = 1 \text{ кОм}$

3.5. Повторите все измерения для  $R_{\text{вх1}} = R_{\text{вх2}} = 4,7 \text{ кОм}$ , занесите результаты измерений в таблицу 40 и постройте соответствующие зависимости на графике (рис. 134).

Таблица 40

$U_{\text{вх2}}, \text{ В}$	0	2	4	6	8	10
$U_{\text{вх2}}, \text{ В}$ при $U_{\text{вх2}} = 2 \text{ В}$						
$U_{\text{вх2}}, \text{ В}$ при $U_{\text{вх2}} = -2 \text{ В}$						



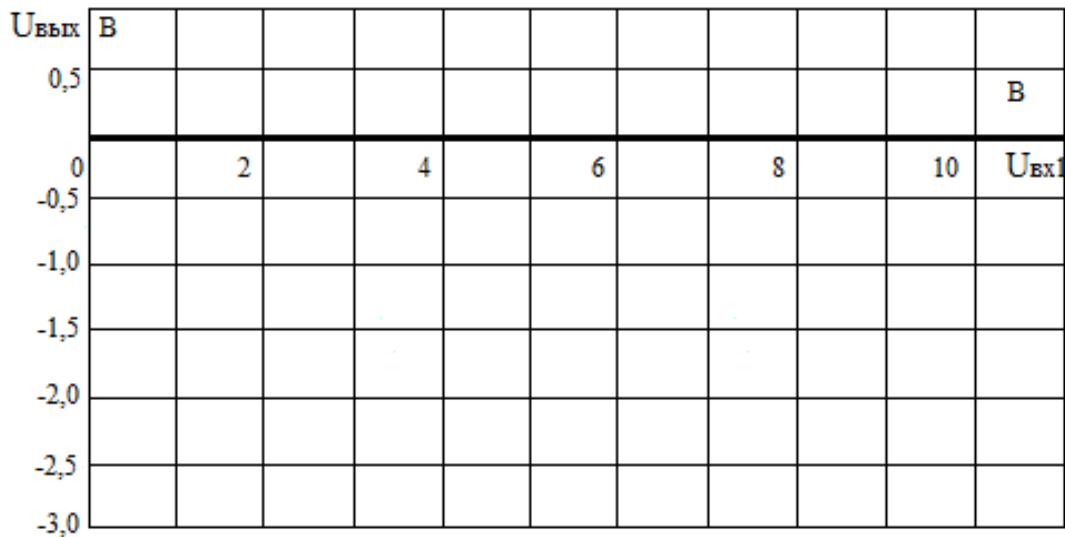


Рис. 134. Форма для нанесения графиков зависимости выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  от входного  $U_{\text{ВХ1}}$  при  $R_{\text{ВХ1}} = R_{\text{ВХ2}} = 4,7 \text{ кОм}$

3.6. Для изучения и экспериментального определения ослабления синфазного сигнала дифференциального усилителя соберите цепь, схема которой приведена на рис. 135. С помощью потенциометра  $R_7$  установите входные напряжения  $U_{\text{ВХ1}}$  и  $U_{\text{ВХ2}}$  согласно табл. 41 и измерьте соответствующие значения выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Занесите их в таблицу и постройте на графике (рис. 136) зависимость выходного напряжения от входных напряжений  $U_{\text{ВХ1}}$  и  $U_{\text{ВХ2}}$ .

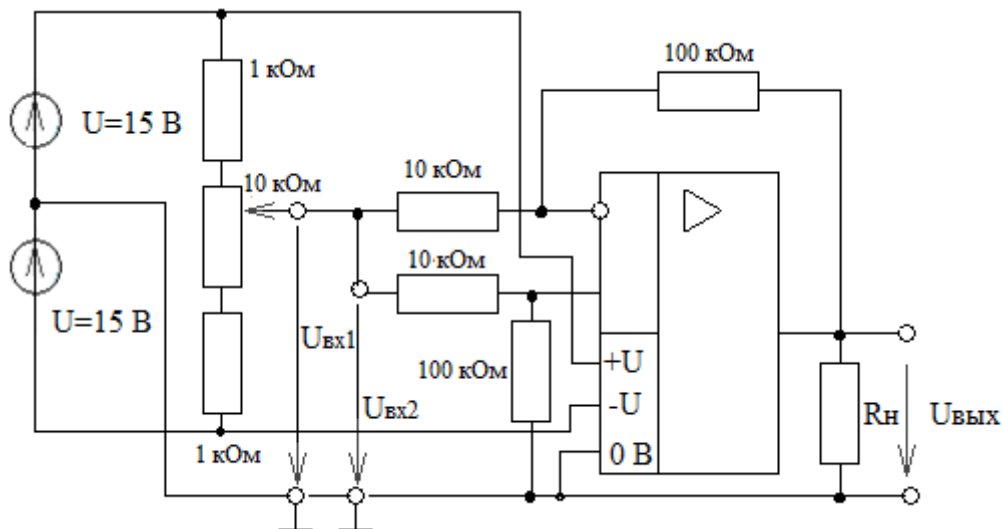


Рис. 135. Схема для измерения синфазного сигнала дифференциального усилителя

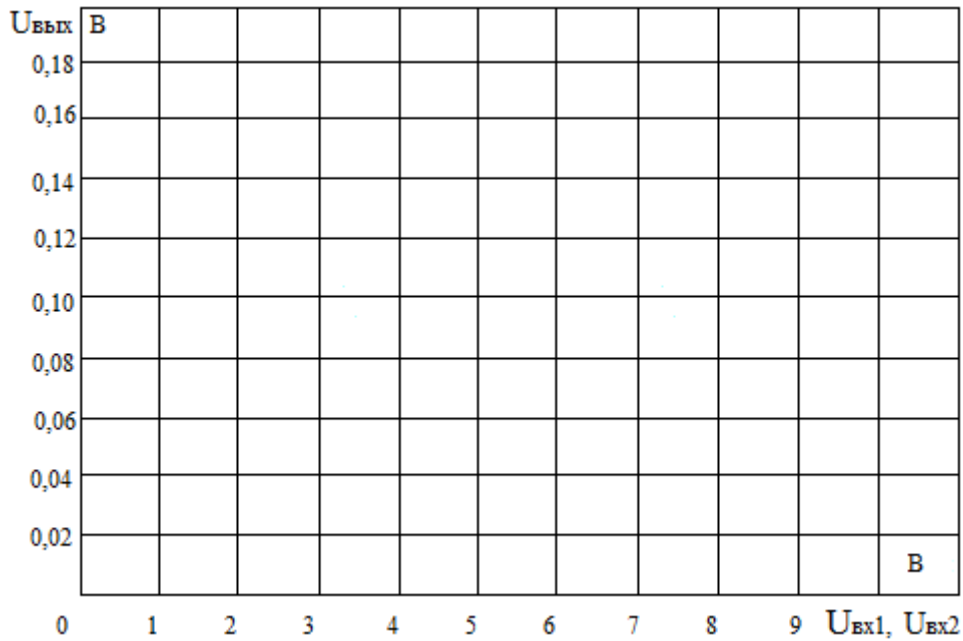


Рис. 136. Форма для нанесения графиков зависимости выходного напряжения от входных напряжений  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$

Таблица 41

$U_{вх1} = U_{вх2}, \text{ В}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{вых}, \text{ В}$											

3.7. Соберите цепь по рис. 137. Измерьте значения выходного напряжения  $U_{вых}$  при различных входных напряжениях  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$ , приведенных в табл. 42. Занесите результаты измерений в таблицу и на графике (рис. 138) постройте зависимость выходного напряжения  $U_{вых}$  от входных напряжений  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$ .

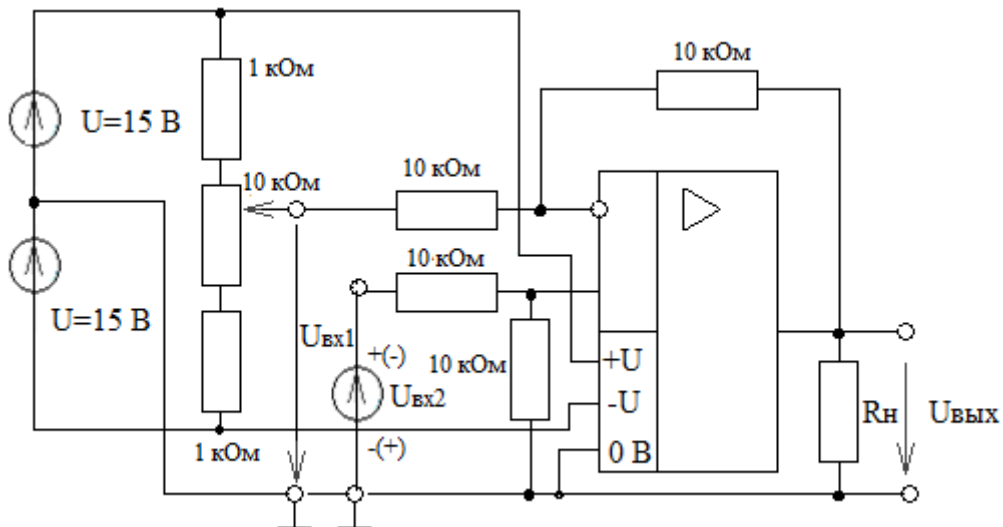


Рис. 137. Схема дифференциального усилителя

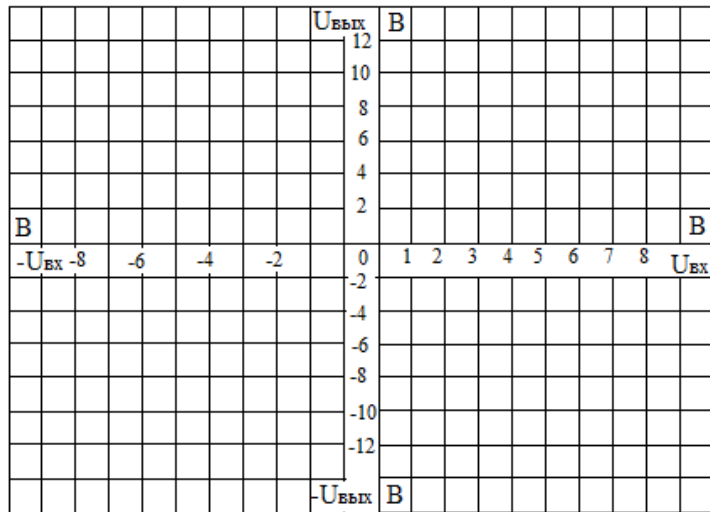


Рис. 138. Форма для нанесения амплитудных характеристик дифференциального усилителя

Таблица 42

$U_{ВХ1}, В$	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6
$U_{ВЫХ}, В$ при $U_{ВХ2} = -4 В$							
$U_{ВЫХ}, В$ при $U_{ВХ2} = 0 В$							
$U_{ВЫХ}, В$ при $U_{ВХ2} = 4 В$							

3.8. Исследуйте поведение операционного усилителя, когда он управляется синусоидальным напряжением. Для этого соберите цепь широкополосного усилителя (рис. 139) и установите на входе действующее значение синусоидального напряжения 3 В частотой 1кГц. Для измерения напряжений  $U_{ВХ}$  и  $U_{ВЫХ}$  включите виртуальные приборы, выберите род измеряемых величин «Действ. перем.» и выведите эти величины на виртуальный осциллограф. Перенесите кривые на график (рис. 140).

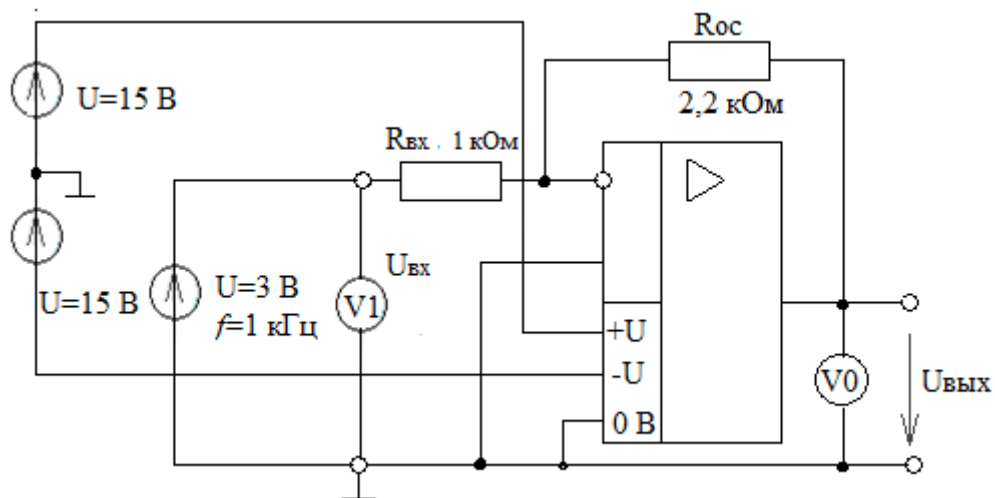
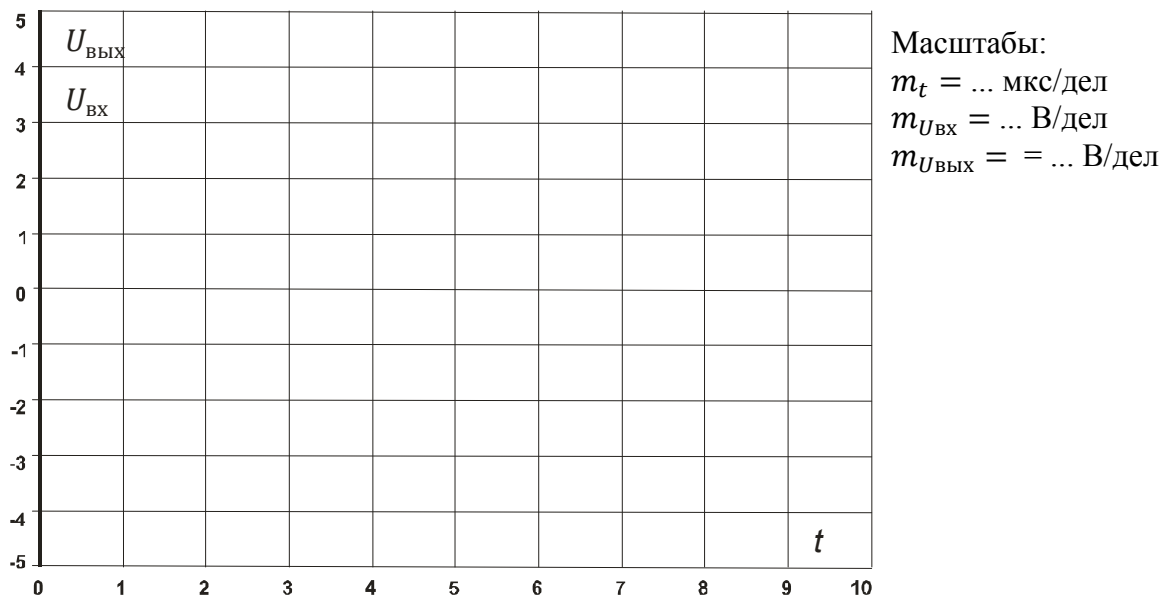
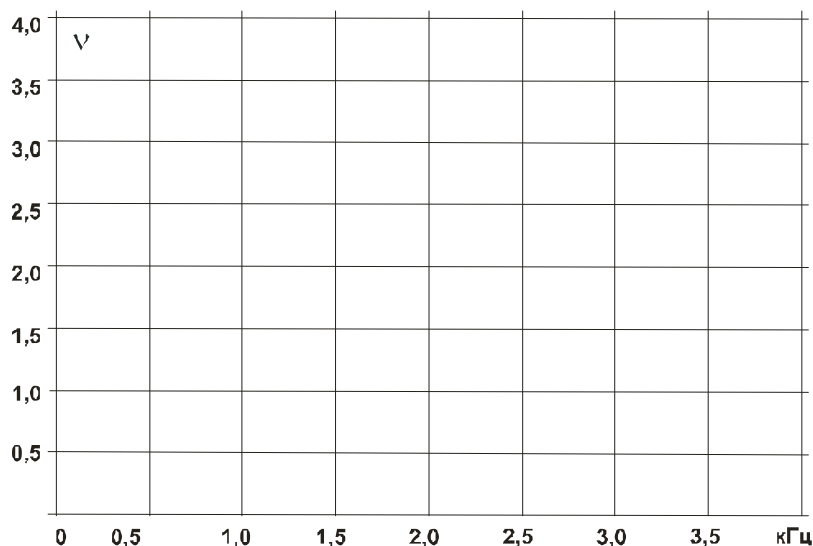


Рис. 139. Схема широкополосного инвертирующего усилителя



*Рис. 140. Форма для нанесения амплитудно-частотных характеристик широкополосного инвертирующего усилителя*

3.9. Изменяя частоту от 0,2 до 4 кГц, как указано в табл. 43, снимите зависимость  $U_{ВЫХ}$  (+), рассчитайте значения коэффициента усиления  $\nu$  для каждой частоты, и на рис. 141 постройте график  $\nu(+)$  для данного усилителя.



*Рис. 141. Форма для нанесения частотной зависимости коэффициента усиления по напряжению усилителя средних частот*

Таблица 43

$U_{\text{ВХ}} = \dots\dots\dots$ В во всех опытах								
$f$ , кГц	Широкополосный усилитель: $R_{\text{ВХ}} = 1 \text{ кОм}$ $R_{\text{ОС}} = 2,2 \text{ кОм}$		Интегрирующий усилитель: $R_{\text{ВХ}} = 1 \text{ кОм}$ $C_{\text{ОС}} = 0,1 \text{ мкФ}$ $R_{\text{ОС}} = 100 \text{ кОм}$		Дифференцирующий усилитель: $R_{\text{ВХ}} = 10 \text{ Ом}$ $C_{\text{ВХ}} = 0,1 \text{ мкФ}$ $R_{\text{ОС}} = 1 \text{ кОм}$		Усилитель средних частот: $R_{\text{ВХ}} = 220 \text{ кОм}$ $C_{\text{ВХ}} = 0,47 \text{ мкФ}$ $C_{\text{ОС}} = 0,1 \text{ мкФ}$ $R_{\text{ОС}} = 1 \text{ кОм}$	
	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В	$\nu$	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В	$\nu$	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В	$\nu$	$U_{\text{ВЫХ}}$ , В	$\nu$
0,2								
0,5								
1,0								
1,5								
2,0								
2,5								
3,0								
3,5								
4,0								

3.10. Для получения интегрирующего усилителя замените резистор  $R_{\text{ОС}}$  на конденсатор  $C_{\text{ОС}} = 1 \text{ мкФ}$ . Параллельно конденсатору подключите резистор с большим сопротивлением  $100 \text{ кОм}$  для исключения дрейфа выходного напряжения при интегрировании постоянной составляющей входного сигнала.

Повторите с этим усилителем те же опыты, что и с первым. Результаты отобразите на осциллограмме (рис. 142) и в табл. 43.

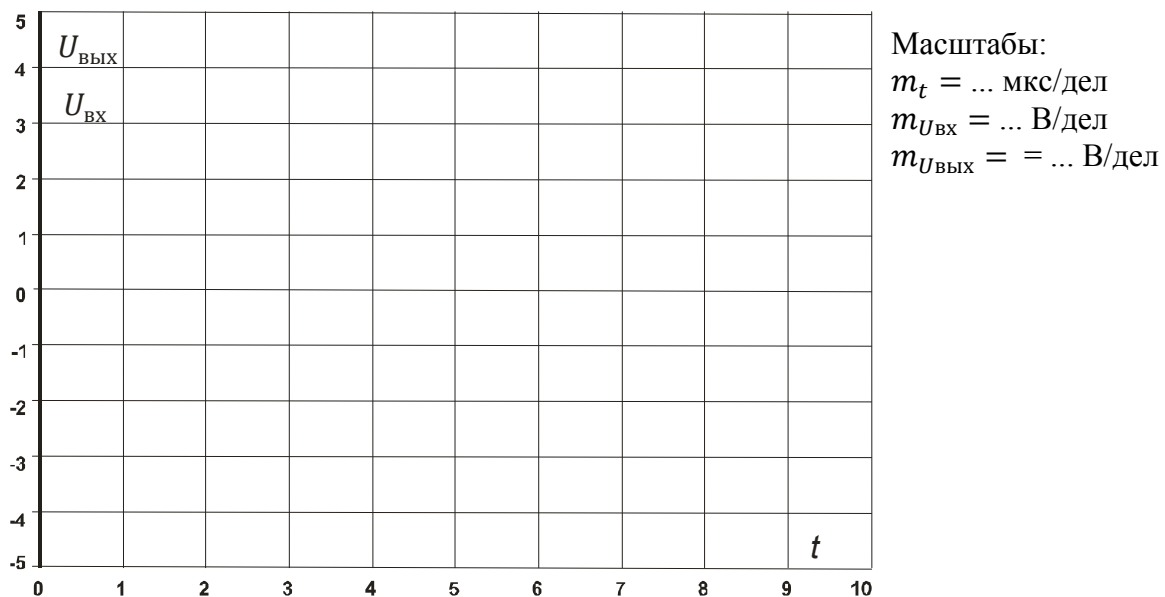


Рис. 142. Форма для нанесения осциллограмм выходного напряжения интегрирующего усилителя

3.11. Прodelайте те же опыты с дифференцирующим усилителем, заменив  $R_{\text{вх}} = 1 \text{ кОм}$  на цепочку из последовательно соединенных конденсатора  $C_{\text{вх}} = 0,1 \text{ мкФ}$  и резистора сопротивлением  $10 \text{ Ом}$  для устранения самовозбуждения усилителя. В обратную связь включите резистор  $R_{\text{ос}} = 1 \text{ кОм}$ . Результаты также отобразите на рис. 141, 143 и в табл. 43.

3.12. Наконец, повторите опыты с усилителем средних частот, в котором во входную цепь включены последовательно  $R_{\text{вх}} = 0,22 \text{ кОм}$  и  $C_{\text{вх}} = 0,47 \text{ мкФ}$ , а в цепь обратной связи включены параллельно  $R_{\text{ос}} = 1 \text{ кОм}$  и  $C_{\text{ос}} = 0,1 \text{ мкФ}$ . Результаты представьте на рис. 144 и в табл. 43.

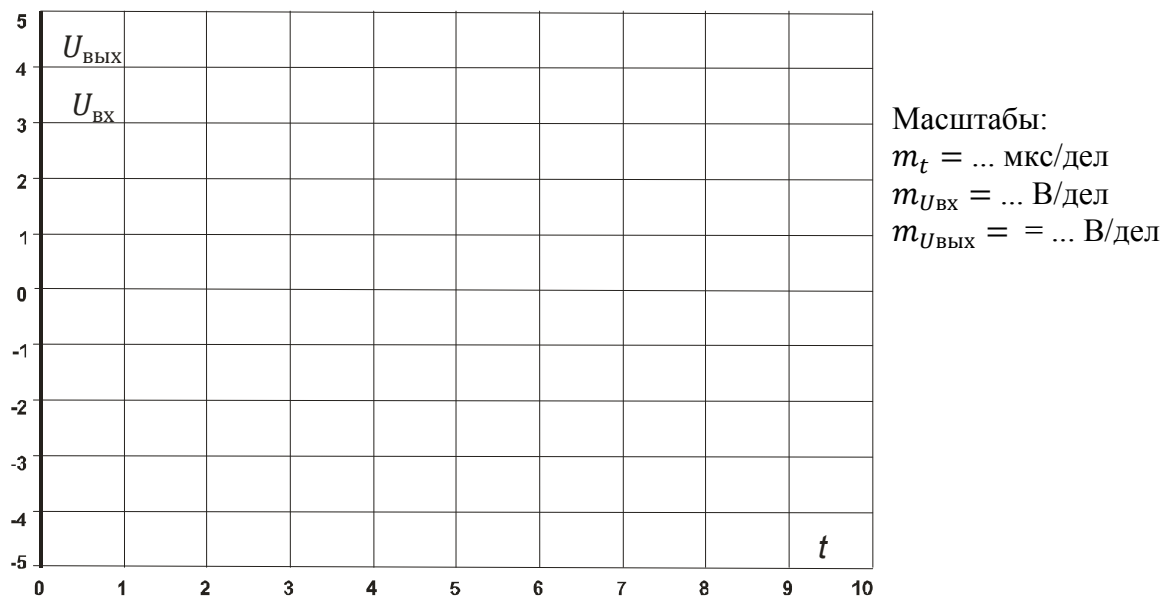


Рис. 143. Форма для нанесения осциллограмм выходного напряжения дифференцирующего усилителя

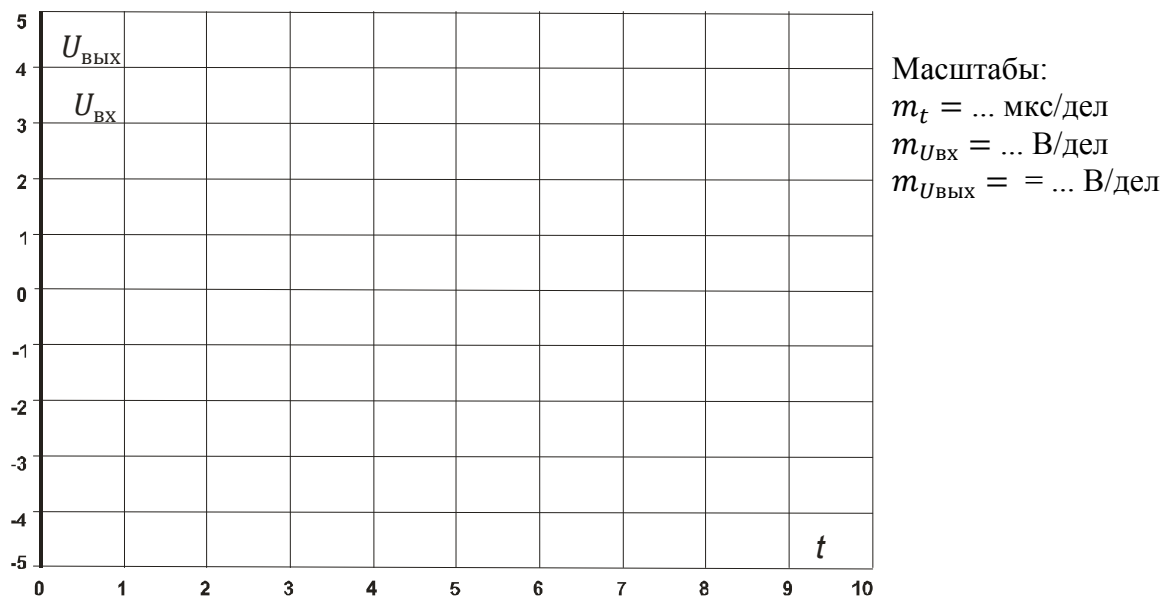


Рис. 144. Форма для нанесения осциллограмм выходного напряжения усилителя средних частот



пряжения образуется фазово-временной сдвиг  $180^\circ$  между входным и выходным сигналами. Инвертирующий усилитель, принципиальная схема которого показана на рис. 146, может быть использован для усиления или ослабления входного сигнала с коэффициентом усиления, равным

$$\nu = -U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = -R_{\text{ОС}}/R_{\text{ВХ}}.$$

Для упрощения расчетов делаются следующие допущения:

- в режиме усиления разность потенциалов между двумя входами равна 0;
- входной ток усилителя равен 0;
- коэффициент усиления  $\nu = -1$  (когда  $R_{\text{ОС}} = R_{\text{ВХ}}$ ), то есть амплитуды входного и выходного сигналов равны.

4.3. Неинвертирующий усилитель. В операционном усилителе без инвертирования входное и выходное напряжения имеют одинаковую полярность, то есть фазовый сдвиг по напряжению равен  $0^\circ$ . Как показано на принципиальной схеме (рис. 147), входное напряжение подается на неинвертирующий вход. В диапазоне модуляции усилителя разность потенциалов между двумя входами равна 0. Коэффициент усиления вычисляется по формуле

$$\nu = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = 1 + R_{\text{ОС}}/R_{\text{ВХ}}.$$

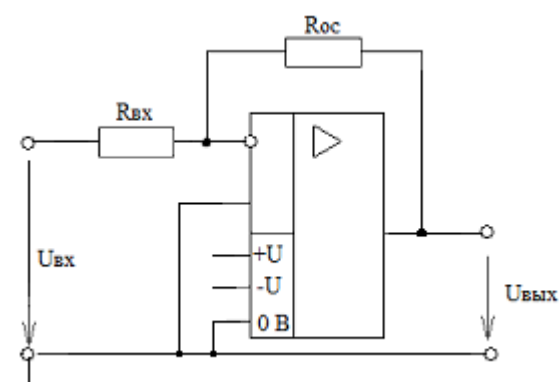


Рис. 146. Инвертирующий усилитель

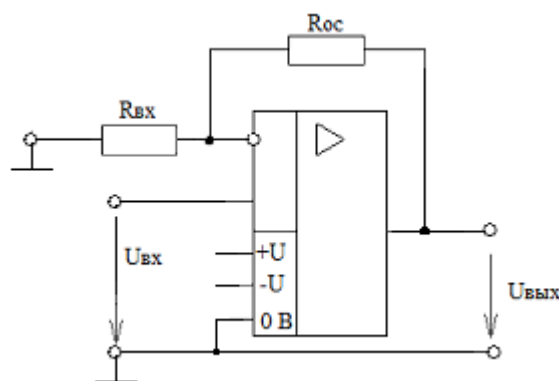


Рис. 147. Неинвертирующий усилитель

4.4. Операционный суммирующий усилитель. Суммирующий усилитель складывает любое требуемое число напряжений в аналоговой форме, учитывая их знаки. В принципе, суммирующие усилители можно строить на резисторах. Один недостаток такого подхода, однако, состоит в том, что входные резисторы гальванически не развязаны друг с другом.

Принципиальная схема инвертирующего сумматора показана на рис. 148. Если входное напряжение подано только на первый вход, мы имеем инвертор с коэффициентом усиления

$$\nu = -U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = -R_{\text{ОС}}/R_{\text{ВХ}} \text{ и } U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВХ1}} R_{\text{ОС}}/R.$$



Важно отметить, что наличие других входов не влияет на коэффициент усиления по любому входу, т.к. точка 0 имеет потенциал земли (разность потенциалов между входами операционного усилителя всегда равна нулю). Например, если на все входы поданы напряжения, то в каждом входном резисторе возникает ток  $I_n = U_{вxn}/R$ , а через резистор обратной связи протекает сумма токов, т.к. входной ток операционного усилителя всегда остается равным нулю:

$$I_{oc} = -(U_{вx1} + U_{вx2} + \dots + U_{вxn})/R.$$

В результате выходное напряжение усилителя

$$U_{вых} = -R_{oc} (U_{вx1} + U_{вx2} + \dots + U_{вxn})/R.$$

Частный случай при  $R_{oc} = R$

$$U_{вых} = -(U_{вx1} + U_{вx2} + \dots + U_{вxn}).$$

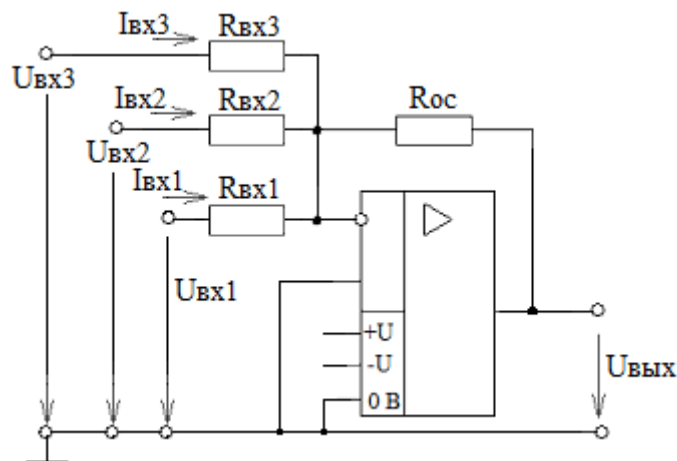


Рис. 148. Операционный суммирующий усилитель

#### 4.5. Операционный дифференциальный усилитель.

Дифференциальный усилитель (рис. 149) представляет собой элемент вычитания с усилением. Оба входных напряжения усиливаются с одним и тем же коэффициентом усиления. Ослабление синфазного сигнала удовлетворительно, только когда коэффициенты усиления по обоим входам одинаковы, т.е. и

$$R_{вx1} = R_{вx2} = R_{вx} \text{ и } R_{oc1} = R_{oc2} = R_{oc}.$$

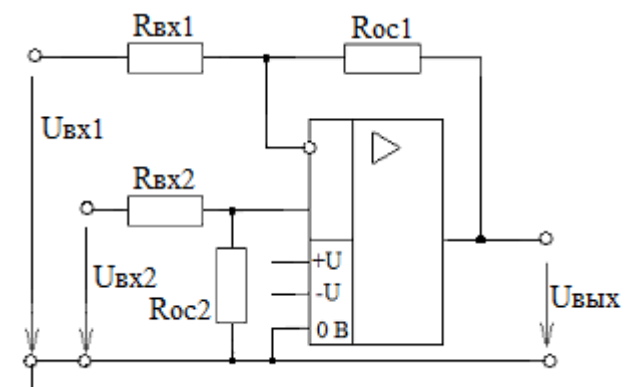


Рис. 149. Операционный дифференциальный усилитель

Тогда 
$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}}) R_{\text{ОС}}/R_{\text{ВХ}}.$$

Ослабление синфазного сигнала ухудшается при увеличении коэффициента усиления  $R_{\text{ОС}}/R_{\text{ВХ}}$ . Операционные дифференциальные усилители применяются, например, как измерительные усилители.

4.6. Поведение операционного усилителя в динамике. Операционные усилители представляют собой широкополосные усилители напряжения постоянного тока, которые в определенном частотном диапазоне усиливают также и напряжения переменного тока. Зависимость коэффициента усиления от частоты  $\nu(\omega)$  называется амплитудно-частотной характеристикой усилителя, которая зависит как от внешних сопротивлений и емкостей, подключаемых к операционному усилителю, так и от «паразитных» сопротивлений и емкостей внешних проводников и внутренней схемы самого операционного усилителя.

Операционные усилители используются в схемах фильтров, интегрирующих и дифференцирующих цепей и других устройств. На рис. 150, *а* приведена простейшая схема интегрирующего усилителя (фильтра низких частот), на рис. 150, *б* – схема дифференцирующего усилителя (фильтра высоких частот), на рис. 150, *в* – схема усилителя средних частот (простейшего полосового фильтра).

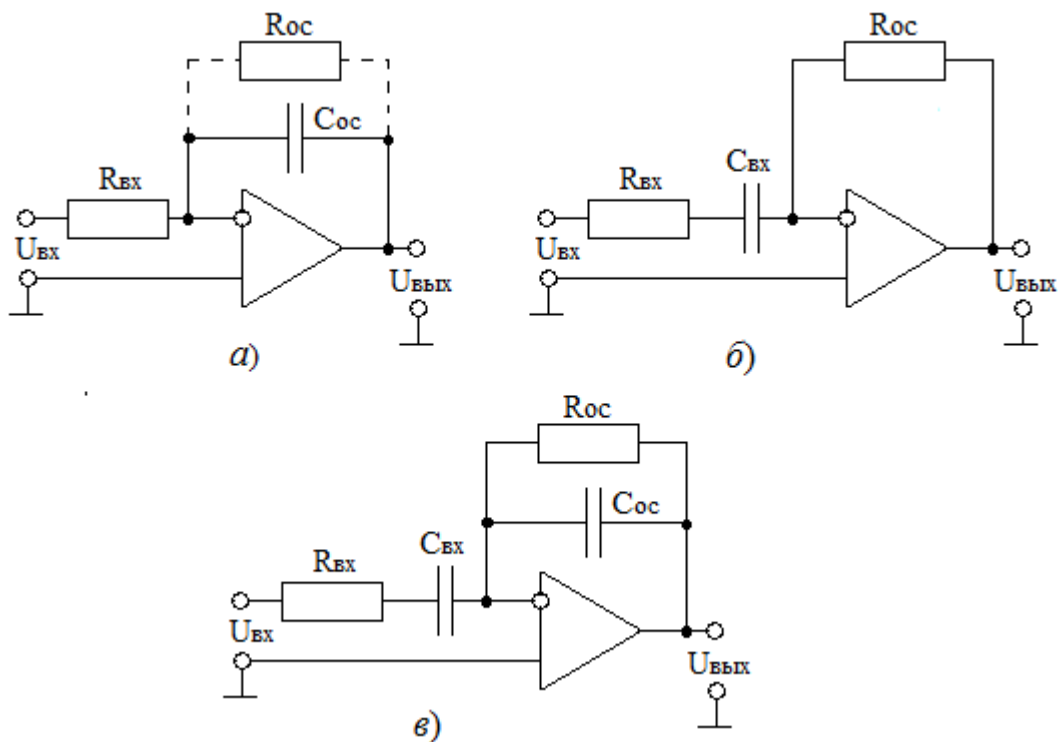


Рис. 150. Варианты схем на операционном усилителе:  
*а* – интегратор – псевдоинтегратор; *б* – дифференциатор;  
*в* – усилитель средних частот

## 5. Контрольные вопросы

5.1. Какова полярность входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  инвертирующего усилителя по сравнению с выходным напряжением  $U_{\text{вых}}$ ?

5.2. Какие компоненты определяют коэффициент усиления  $\mathbf{v}$  инвертирующего усилителя?

5.3. Какова величина коэффициента усиления при  $R_{\text{ос}} = 100 \text{ кОм}$  и  $R_{\text{вх}} = 10 \text{ кОм}$ ?

5.4. Какое утверждение можно сделать относительно характеристики на рис. 141?

5.5. Какие компоненты усилителя определяют величину коэффициента усиления?

5.6. Какова величина выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  при  $R_{\text{ос}} = 47 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{вх}} = 10 \text{ кОм}$  и  $U_{\text{вх}} = 2 \text{ В}$ ?

5.7. Какова полярность входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  в сравнении с выходным напряжением  $U_{\text{вых}}$ ?

5.8. Как изменяется выходное напряжение при увеличении входных сопротивлений  $R_{\text{вх1}}$  и  $R_{\text{вх2}}$  от 1 кОм до 4,7 кОм и почему?

5.9. Какой тип цепи получается, когда использован только один вход усилителя?

5.10. Каково результирующее выходное напряжение, когда одно входное напряжение положительно, а другое отрицательно?

5.11. Когда получается удовлетворительное значение ослабления синфазного сигнала?

5.12. Какому типу цепи соответствует дифференциальный усилитель?

5.13. Какое значение выходного напряжения имеет место при равных сигналах на входах?

5.14. Какова величина фазового сдвига между входным и выходным напряжениями в каждом из четырех усилителей и как зависит она от частоты?

5.15. Как и почему изменяется коэффициент усиления каждого из рассмотренных усилителей при изменении частоты?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Беглецов, Н.Н.* Электронные приборы и устройства. Руководство по выполнению базовых экспериментов ЭПУ.001 РБЭ (903) / Н.Н. Беглецов, Ю.П. Галишников, П.Н. Сенигов. – Челябинск: Учеб. техника, 2006. – 77 с.
2. Теоретические основы электротехники : учеб. для вузов. В 2 т. / К.С. Демирчян [и др.]. – СПб.: Питер, 2004.
3. Основы теории цепей : учеб. для вузов / Г.В. Зевеке [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. *Гусев, В.Г.* Электроника : учеб. пособие для вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1991. – 622 с. – ISBN 5-06-000681-6.
5. *Лачин, В.И.* Электроника: учеб. пособие для вузов / В.И. Лачин, Н.С. Савёлов. – 4-е изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 576 с. – ISBN 5-222-04768-7.
6. Электротехника и электроника : учеб. для студентов неэлектротехн. специальностей вузов. В 3 кн. / В.Г. Герасимов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 752 с. – ISBN 5-060003737-1.
7. *Опадчий, Ю.Ф.* Аналоговая и цифровая электроника: учеб. для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; под ред. О.П. Глудкина. – М.: Радио и связь, 1996. – 768 с.
8. *Тугов, Н.М.* Полупроводниковые приборы / Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
9. *Хоровиц, П.* Искусство схемотехники. В 3 т. / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Мир, 1993. – 1151 с.
10. *Миловзоров, В.П.* Элементы информационных систем / В.П. Миловзоров. – М.: Высш. шк., 1989. – 440 с.
11. *Резвиг, В.Д.* Система схемотехнического моделирования MICRO-Cap V / В.Д. Резвиг. – М.: Солон, 1997. – 280 с.
12. Электроника: справ. кн. / Ю.А. Быстров [и др.]; под ред. Ю.А. Быстрова. – СПб.: Энергоатомиздат, 1996. – 544 с.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ  
СИЛОВОЙ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания к лабораторным работам  
по дисциплине «Информационно-измерительная техника и электроника»

Составители

АФОНИН Валерий Иванович  
КОЛЕСНИК Григорий Платонович  
ШАХНИН Вадим Анатольевич

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор С.А. Сбитнев

Подписано в печать 20.11.12.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 7,90. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.