

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Фурсов Владимир Александрович

Должность: И.о. директора Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 08.06.2026 13:36:26

Уникальный программный ключ:

1c378726a41fd0143ae5bccc8ba81860b00daa62

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ
Колледж Пятигорского института (филиал) СКФУ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ
Основы электротехники и электронной техники
Специальность СПО
09.02.01 Компьютерные системы и комплексы

Методические указания для практических занятий по дисциплине Основы электротехники и электронной техники составлены в соответствии с ФГОС СПО. Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 09.02.01 «Компьютерные системы и комплексы»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Данные методические указания предназначены для закрепления теоретических знаний и приобретения необходимых практических навыков и умений по программе дисциплины " Основы электротехники и электронной техники" для специальности СПО 09.02.01 Компьютерные системы и комплексы

Практические занятия составлены в соответствии с требованиями ФГОС по специальности.

Целями проведения практических занятий являются:

- обобщение, систематизацию, углубление, закрепление полученных теоретических знаний
- формирование умений применять полученные знания на практике, реализацию единства интеллектуальной и практической деятельности;

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен **уметь**:

- использовать контрольно-измерительное оборудование для проверки электрических соединений устройств инфокоммуникационных систем;
- идентифицировать основные узлы устройств инфокоммуникационных систем и определять их параметры;
- измерять основные параметры электронных устройств и электрических сигналов;
- распознавать типовые неисправности устройств инфокоммуникационных систем;
- применять безопасные методы измерений с учетом сохранения окружающей среды.

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен **знать**:

- устройство и назначение применяемых испытательных и измерительных приборов;
- правила эксплуатации электроизмерительных приборов;
- основные параметры типовых устройств инфокоммуникационных систем;
- виды и параметры электрических сигналов;
- основные термины, понятия и единицы измерения в области электротехники;
- основные понятия и принцип действия полупроводниковых приборов и устройств;
- основы электробезопасности.

Практическая работа №1.

Тема 1. 1. Основы электротехники и электронной техники.

Организация рабочего места для выполнения заданного вида работ.

Цель работы: Ознакомление с оборудованием, основными правилами техники безопасности при выполнении практических работ в лаборатории «Электронной техники» и порядком выполнения практических работ.

Теоретическая часть:

Все практические работы по дисциплине «Основы электротехники и электронной техники», проводятся в лаборатории «Электронной техники». Особенностью проведения этих лабораторных работ является то, что испытываемые устройства собраны уже заранее, остается к ним подключить сеть, а также приборы для измерений и наблюдений. Именно они постоянно находятся в фокусе внимания и контроля

Аналоговые измерительные приборы – амперметры, вольтметры и ваттметры. Снятие показаний этих приборов следует производить внимательно и точно. На щитовых приборах угол зрения должен совпадать с направлением стрелки. Обычно отклонение стрелки отсчитывается в делениях, а далее по цене деления прибора делается пересчет показания в измеряемую величину. Цена деления определяется отношением предела измерения к полному количеству делений шкалы. У приборов, рассчитанных на один предел, предел измерения совпадает с числом делений в конце шкалы.

У некоторых амперметров и вольтметров имеется несколько пределов, в таком случае следует с помощью переключателя выбрать один из пределов.

У ваттметров для вычисления предела измерения по мощности используется перемножение пределов измерения по току и напряжению.

Цифровые измерительные приборы - тахометры и мультиметры (амперметры, вольтметры и омметры). Измерение следует начинать с выбора наивысшего из ожидаемых пределов, постепенно переходя для повышения точности показаний к меньшим пределам. В качестве единицы измерения следует выбирать ту, которая стоит рядом с выбранным пределом. В начале измерения показания в цифрах слегка «пляшут», поэтому для отсчета показания нужна временная выдержка примерно 2с.

Приборы наблюдения – осциллографы. Перед началом наблюдения следует проверить работу трех блоков: развертки по вертикали (ручки вольт/дел), развертки по горизонтали (ручки время/дел) и синхронизации (ручки «уровень» и «внутренний/внешний»). Для проверки следует включить прибор и присоединить к коаксиальному гнезду ВХОД соединительный шнур (коннектор). При нормальной установке вышеперечисленных ручек (в среднем положении) в середине экрана должна появиться светящаяся линия. При касании пальцем заземленного конца соединительного шнура (более длинного) положение линии на экране не должно измениться. При касании пальцем сигнального конца соединительного шнура (более короткого) на экране можно увидеть «наводку»- помеху в виде нескольких синусоидальных колебаний.

Порядок допуска к лабораторным работам. К проведению эксперимента допускаются студенты:

- Знающие правила техники электробезопасности.
- Имеющие папку - портфолио, содержащую бланки отчетов по всем подлежащим выполнению лабораторным работам. В этой папке отчеты по уже выполненным работам должны быть подписаны преподавателем. Папка - портфолио должна быть одна на бригаду из трех студентов.
- Соблюдающие график выполнения и защиты лабораторных работ.
- Подготовленные к выполнению лабораторной работе, согласно графика. Степень подготовленности проверяется преподавателем в беседе со студентами.

Порядок подготовки к лабораторной работе. Во время подготовки к лабораторной работе студент должен:

- а) обстоятельно ознакомиться с соответствующими разделами теоретического курса;
- б) ознакомиться с требуемыми для заполнения отчета расчетами и графиками;

в) ознакомиться с необходимыми принципиальными и монтажными схемами эксперимента, продумать назначение каждого прибора и деталей лабораторной установки, а также порядок их включения;

г) подготовить ответы на контрольные вопросы.

Порядок выполнения практических работ. Студент должен:

1. Осмотреть установленные на рабочем месте приборы, проверить соответствие их исследуемой схеме.

2. *Приступить к сборке цепи, руководствуясь следующим правилом:* сначала соединить токовый контур цепи источник, нагрузку, амперметры, токовые обмотки ваттметров, у и т.д., а затем собрать цепи напряжения (вольтметры, обмотки напряжения ваттметров, входы осциллографов и т.п.). *Сборку токового контура цепи следует начинать от одного зажима источника питания и заканчивать на другом.*

3. При проверке электрической цепи убедиться в достаточной плотности всех контактов, в правильности установки движков автотрансформаторов, реостатов и рукояток других регулирующих устройств на нулевой отметке. Следует убедиться также в том, что указательные стрелки всех измерительных приборов стоят на нулевых делениях шкал.

4. В процессе работы необходимо наблюдать за приборами и следить за тем, чтобы в цепи не возникали режимы, при которых стрелки приборов выходят за пределы шкалы.

Несоблюдение этого правила может привести к выходу из строя прибора

5. К результатам замеров следует относиться критически, сравнивая их с теоретически ожидаемыми результатами. В случае сомнения, опыт прекратить и полученные результаты показать преподавателю.

6. Электрическую цепь начать разбирать только после того, как преподаватель подпишет протокол наблюдений.

7. По окончании работы и утверждении ее результатов преподавателем, рабочее место привести в порядок. После этого студент обращается к преподавателю за разрешением об уходе из лаборатории.

8. Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- предъявил преподавателю бланк отчета с результатами проведенных опытов;
- после разрешения преподавателя разобрал схему и привел в порядок рабочее место.

9. Если бригада не закончила работу в предусмотренное время, то работа прекращается и подлежит выполнению дома в программе Electronics Workbench.

Инструкция по технике безопасности

Электрические приборы и цепи могут представлять определенную опасность для работающих с ними людей. Поэтому для предотвращения поражения электрическим током, а также травм, вызванных пожарами, механическими разрушениями, вследствие неправильного использования лабораторного оборудования, необходимо соблюдать технику безопасности.

Вероятно, наиболее опасно для человека поражение электрическим током. Если через человеческое тело пройдет ток, превышающий 10 мА, то он парализует человека и лишит его возможности оторваться от провода, находящегося под напряжением. Величина 10 мА представляет собой довольно небольшой электрический ток. В обычном карманном фонарике, например, проходит ток, в 100 раз превышающий эту величину. Если же человек подвергнется воздействию тока более 100 мА, то это во многих случаях приводит к смертельному исходу. Но и этот смертельный для человека ток все же меньше тока, протекающего в карманном фонарике.

Батарейка карманного фонарика вырабатывает ток, значительно больший того, который может быть смертельным для человека. Вместе с тем можно, совершенно не опасаясь, касаться руками её выводов: сопротивление человеческой кожи велико и потому протекающий через неё ток мал.

Сухая человеческая рука имеет сопротивление в несколько десятков тысяч Ом. В низковольтных цепях, при напряжениях менее 40 Вольт, при столь высоком сопротивлении ток оказы-

вается очень малым и опасность поражения в этих условиях мала. При высоких напряжениях, более 200 Вольт, через кожу может протекать достаточно большой ток, приводящий к электрическому поражению. Степень опасности поражения возрастает с увеличением напряжения. Те, кто работает с высоковольтными цепями, должны использовать специальное оборудование и защитные средства.

Если человеческая кожа влажная или имеет повреждения, её сопротивление уменьшается до нескольких сотен Ом. Следовательно, электрическое поражение может возникнуть при значительно меньших напряжениях. Если кожный покров нарушен, то даже напряжение порядка 40 Вольт может привести к смертельному исходу. Хотя большинство инженеров и техников-электриков считает напряжение 40 Вольт низким, его нельзя считать безопасным. Отсюда следует, что следует быть осторожными даже в тех случаях, когда Вы работаете с так называемыми низкими напряжениями.

Людей, понимающих, что такое техника безопасности, нельзя ввести в заблуждение таким термином как низкое напряжение. Они не слишком надеются на защитные средства и не спешат поверить, что электричество отключено, даже если рубильник находится в положении «Выключено». Они знают, что рубильник может оказаться неисправным.

По мере того, как будут углубляться Ваши знания в области дисциплины Основы электротехники и электронной техники, будет расти и Ваше понимание специальных правил безопасной работы, будут формироваться и Ваши практические навыки. Но пока этого не произошло, придерживайтесь правил:

- Изучите ситуацию, прежде чем действовать.
- Четко выполняйте инструкции.
- Если в чем-то сомневаетесь, обратитесь к преподавателю или технику.

Основные правила техники безопасности.

1. Не работайте, когда Вы сильно устали или приняли лекарство, нарушающее работоспособность.
2. Не работайте при плохом освещении.
3. Не работайте в сырых помещениях.
4. Используйте только официально рекомендованные инструменты, оборудование и защитные средства.
5. Не работайте во влажной одежде или при влажном состоянии кожи.
6. При работе с электрическим током снимайте с себя кольца, браслеты и подобные им металлические предметы.
7. Никогда не полагайтесь на то, что электрическая цепь отключена. Проверяйте это по прибору или с помощью другого устройства, например мультиметра, в работе которого Вы уверены.
8. Не трогайте приборы и провода, находящиеся под напряжением. Проверяйте визуально надежность включения или выключения рукой автоматического выключателя стенда.
9. Содержите Ваше рабочее место в образцовом состоянии. Используйте для работы исправный инструмент.
10. Не включайте собранную Вами электрическую схему под напряжение без проверки ее преподавателем.

Ход работы:

- Ознакомиться с теоретической частью.
- Выполнить конспект основных положений (обязательно «Основные правила техники безопасности» и «Порядок выполнения практических работ»).

Содержание отчёта.

Цель работы

Ответы на контрольные вопросы

Контрольные вопросы

- Оснащение лаборатории «Электронной техники».
- «Основные правила техники безопасности».

- «Порядок выполнения практических работ».

Практическая работа № 2.

Тема 1. 1. Основы электротехники и электронной техники.

Организация электрических цепей.

Цель работы: составить схему электрической цепи.

Теоретическая часть:

Элементы электрической цепи

Электрической цепью называется совокупность устройств, предназначенных для прохождения электрического тока. В общем случае цепь содержит источники электрической энергии, приемники электрической энергии, измерительные приборы, коммутационную аппаратуру и соединительные провода.

Источники - это устройства, в которых различные виды энергии преобразуются в электрическую (например, генератор, аккумуляторная батарея).

Приемники разделяют на потребители и накопители.

Потребители - это устройства, в которых электрическая энергия превращается в другие виды энергии: в энергию фотонов света (лампа накаливания), в тепло (нагреватели), в механическую энергию (электродвигатели).

Накопители накапливают и затем отдают обратно в цепь электромагнитную энергию (конденсаторы и катушки индуктивности).

При расчете и анализе электрической цепи ее заменяют схемой замещения, которая состоит из совокупности идеализированных элементов, математическое описание которых отражает процессы, происходящие в цепи. С помощью определенных комбинаций этих элементов можно составить схемы замещения источников и приемников энергии.

К идеализированным элементам относятся источник ЭДС, источник тока, резистивный элемент, индуктивный и емкостной элементы.

Активными элементами считаются источники ЭДС и источники тока. К **пассивным** элементам относятся резистивные элементы, индуктивные и емкостные элементы.



Рис. 1.1

Резистивный элемент необратимо преобразует электрическую энергию в тепло. Условное обозначение показано на рис. 1.1, где R [Ом] - сопротивление, характеризующее способность элемента препятствовать протеканию тока.

Величина $g = \frac{1}{R}$ называется **проводимостью** и измеряется в Сименсах [См].

Емкостной элемент - это элемент, приближенно заменяющий конденсатор, в котором накапливается энергия электрического поля. Условное изображение емкостного элемента представлено на рис. 1.2. Параметром емкостного элемента является емкость.

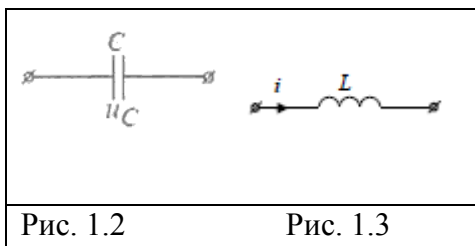


Рис. 1.2

Рис. 1.3

Емкость C - это коэффициент пропорциональности между зарядом q и напряжением элемента. Емкость измеряется в Фарадах (Ф). В линейных цепях емкость постоянна. Каждый конденсатор обладает определенной емкостью, то есть способностью вмещать определенный заряд. Емкость плоского конденсатора C (Ф) тем больше, чем

больше площадь S (м^2) пластины, чем больше диэлектрическая проницаемость ϵ (Ф/м) среды и чем меньше расстояние d (м) между пластинами:

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

Напряжение U на пластинках конденсатора емкостью C будет тем больше, чем больше сообщенный ему заряд Q .

$$U = Q/C$$

Откуда

$$C = Q/U$$

Если конденсатор состоит из n пластин (соединенных между собой через одну), то его емкость определяется так: $C = (n-1) \frac{\epsilon S}{d}$

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 1.3, а), общая емкость батареи C об равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{\text{об}} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 1.3, б) величина, обратная общей емкости, равна сумме величин, обратных емкостям отдельных конденсаторов:

$$\frac{1}{C_{\text{об}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}$$

Индуктивный элемент - это элемент, приближенно заменяющий индуктивную катушку, в котором накапливается энергия магнитного поля.

Условное изображение индуктивного элемента представлено на рис. 1.3. Параметром элемента является индуктивность. Индуктивность измеряется в Генри [Гн] и в линейных цепях является постоянной величиной.

Индуктивность L - это коэффициент пропорциональности между потокосцеплением и током, текущим через катушку, потокосцепление пропорционально силе тока I в катушке:

$$\Psi = \omega \Phi = L I$$

L - коэффициент пропорциональности - индуктивность катушки

Размерность индуктивности

$$[L] = \frac{[\omega \Phi]}{[I]} = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = \frac{\text{Вс}}{\text{А}} \text{ Ом с} = \text{Г(генри)}$$

Индуктивность однослойной катушки $L = \omega \mu_0 S / l$

где $\omega \mu_0$ — число витков катушки; μ_0 - магнитная проницаемость сердечника; l — длина катушки, м; $S = \pi \frac{D^2}{4}$ - площадь поперечного сечения катушки, м^2 ; D - диаметр катушки, м.

При параллельном соединении индуктивностей $1/L_{\text{об}} = 1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3$.

При последовательном соединении индуктивностей $L_{\text{об}} = L_1 + L_2 + L_3$.

В качестве источников электрической энергии применяют главным образом, электрические генераторы и гальванические элементы или аккумуляторы. Источники электрической энергии часто называют источниками питания.

В приемниках электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии. К приемникам относятся электродвигатели, различные электронагревательные приборы, лампы накаливания, электролитические ванны и др.

Электрическая цепь может быть разделена на два участка: внешний и внутренний. Внешний участок, или, как говорят, внешняя цепь, состоит из одного или нескольких приемников электрической энергии, соединительных проводов и различных вспомогательных устройств, включенных в эту цепь. Внутренний участок, или внутренняя цепь — это сам источник.

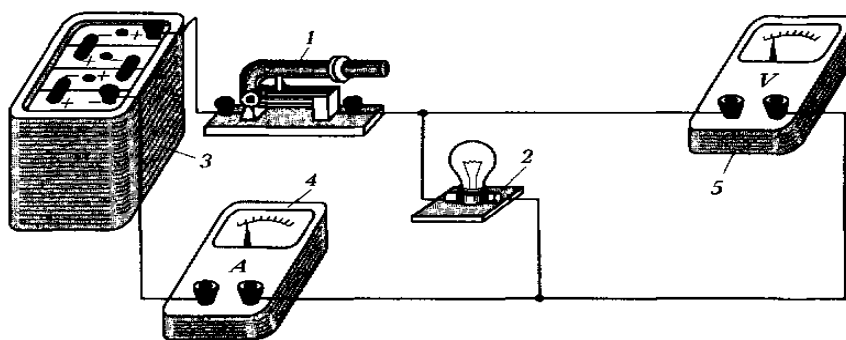


Рис. 2.1

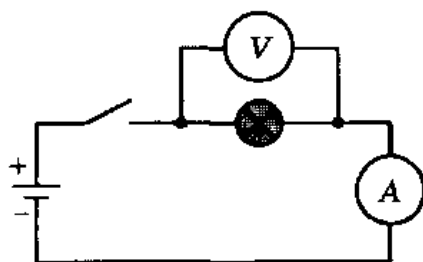


Рис. 2.2

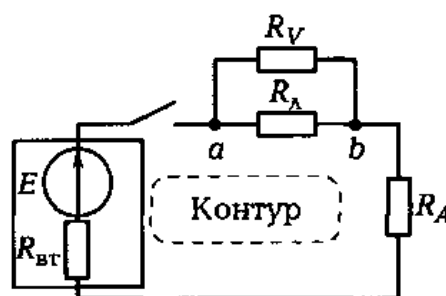


Рис. 2.3

Электрическая схема – способ изображения электрической цепи на плоскости с использованием условных графических обозначений (УГО) компонентов или элементов электрической цепи. Под схемой часто понимают физическую реализацию электрической цепи.

Компонент – минимальная, функционально законченная составная часть цепи или схемы. К компонентам относят источники питания, электродвигатели, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности. Понятие «компонент» будем использовать вместо понятия «элемент», которое в настоящее время оказалось определением как для резисторов, конденсаторов и других составляющих электрических цепей, так и для частей ЭВМ.

Изображение электрических цепей и их элементов. В схемах реальных электрических устройств (электровозов, тепловозов и др.) отдельные элементы имеют свои условные обозначения в соответствии с государственными стандартами.

При составлении расчетных схем элементы электрической цепи, имеющие некоторое сопротивление, например электрические лампы, электронагревательные приборы (в том числе и соединительные провода, если их необходимо учитывать при расчете), изображают в виде сосредоточенных в соответствующем месте схемы резисторов с сопротивлением R . То же относится к элементам, имеющим индуктивность (обмотки генераторов, электродвигателей и трансформаторов) и емкость (конденсаторы). На расчетных схемах их изображают в виде сосредоточенных в соответствующем месте катушек индуктивности и конденсаторов. Источники электрической энергии в схеме электрической цепи часто могут быть представлены в виде идеализированных источников, у которых внутреннее сопротивление $R_0 = 0$.

Для того чтобы учесть внутреннее сопротивление реального источника, в схему вводят изображение резистора с сопротивлением R_0 или ставят букву R_0 возле условного обозначения источника.

Вспомогательные элементы электрических цепей (аппараты для включения и выключения, защитные устройства, некоторые электроизмерительные приборы) в большинстве случаев имеют малые сопротивления и практически не оказывают влияние на значения токов и

напряжений, поэтому при расчете электрических цепей их не принимают во внимание и не указывают на схемах.

рис. 2.1 в качестве примера приведено эскизное изображение электротехнических устройств и способа их соединения в простейшей цепи постоянного тока. При замыкании рубильника 1 к лампе накаливания 2 — приемнику электрической энергии — подключается источник электрической энергии постоянного тока — аккумуляторная батарея 3. Для контроля режима работы приемника энергии включены амперметр 4 и вольтметр 5. Натурное изображение электротехнических устройств и их соединений приводит к громоздким и трудоемким чертежам. Изображение цепи можно упростить, если каждое электротехническое устройство заменить (по ГОСТу) его условным обозначением (рис. 2.2). Такие графические изображения цепей называются *принципиальными схемами*. Принципиальная схема показывает назначение электротехнических устройств и их взаимодействие, но неудобна при расчетах режима работы цепи. Для того чтобы выполнить расчет, необходимо каждое электротехническое устройство представить его схемой замещения.

Схема замещения электрической цепи состоит из совокупности различных идеализированных элементов, выбранных так, чтобы можно было с заданным приближением описать процессы в цепи.

Конфигурация схемы замещения цепи определяется геометрическими (топологическими) понятиями: ветвь, узел, контур.

Ветвь схемы состоит из одного или нескольких последовательно соединенных элементов, каждый из которых имеет два вывода (начало и конец), причем к концу каждого предыдущего элемента присоединяется начало следующего.

В узле схемы соединяются три или большее число ветвей.

Контур — замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям так, что ни одна ветвь и ни один узел не встречаются больше одного раза.

Схема замещения (рис. 2.3) цепи, показанной на рис. 2.1, содержит три ветви, причем две состоят из одного элемента каждая,

а третья — из трех элементов. На рисунке указаны параметры элементов: R_λ — сопротивление цепи лампы; R_V — сопротивление цепи вольтметра; R_A — сопротивление цепи амперметра; E — ЭДС аккумулятора и $R_{вт}$ — его внутреннее сопротивление. Три ветви соединены в двух узлах a и b .

Если значения параметров всех элементов схемы замещения цепи известны, то, пользуясь законами электротехники, можно рассчитать режим работы всех ее элементов, т. е. определить электрическое состояние всех электротехнических устройств.

В дальнейшем вместо термина *схема замещения электрической цепи* будем пользоваться сокращенными — *схема цепи*, или *схема*.

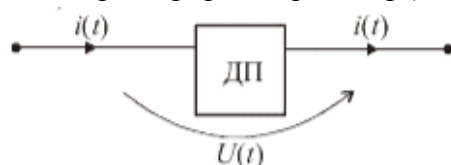
Направления тока, напряжения и э. д. с. в электрической цепи. В схемах электрических цепей направления тока, напряжения и э. д. с. изображают стрелками. За положительное направление тока принято направление движения положительных зарядов, т. е. ток во внешней цепи изображают стрелкой I , направленной от положительного зажима источника электрической энергии к отрицательному его зажиму (см. рис. 12, б), во внутренней цепи ток направлен от

отрицательного зажима к положительному. Положительное направление напряжения совпадает с положительным направлением тока. Стрелка U направлена от положительного зажима источника или приемника к отрицательному зажиму. Положительное направление э. д. с. совпадает с положительным направлением тока внутри источника (стрелка E направлена от отрицательного зажима источника к положительному).

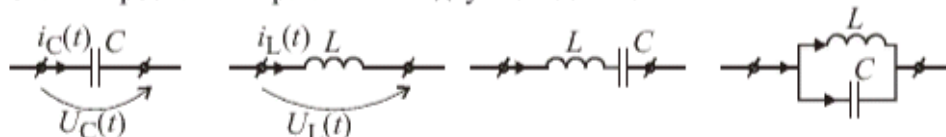
В сложных электрических цепях бывает затруднительно показать действительные направления тока и напряжения на отдельных участках цепи. В таких случаях принимают произвольно какие-либо их направления, которые считают условно положительными, и для этих направлений выполняют расчет электрической цепи. Если в результате расчета выясняется, что какие-то токи и напряжения имеют положительный знак, то это означает, что выбранные для них направления соответствуют действительности. Если же какие-то токи и напряжения получаются отрицательными, то в действительности они имеют направление, противоположное выбранному.

Электрическая цепь. Уравнения электрического состояния цепи

Устройствами, образующими электрическую цепь, являются: источники (генераторы) электромагнитной энергии или электрических сигналов, приемники (потребители) электромагнитной энергии и устройства передачи и преобразования энергии (провода, трансформаторы и др.).



Схемы простейших реактивных двухполюсников:



Каждый генератор и приемник имеют два зажима (полюса) выходные для генератора и входные для приемника через а, с помощью которых через систему передачи осуществляется связь между ними. Их называют двухполюсники.

В общем случае источники и приемники могут объединять несколько двухполюсников, соединенных последовательно или параллельно.

Двухполюсник называют активным, если он содержит источник эдс; при отсутствии источника эдс двухполюсник будет пассивным.

Условные обозначения пассивного Π и активного $\underline{A}$ двухполюсников приведены на рис. 7, а, четырехполюсника — на рис. 7, б.

Соединение элементов электрической цепи может быть последовательным, параллельным и смешанным.

Участок электрической цепи, по которому проходит ток одного и того же значения и направления, называют ветвью.

Узел электрической цепи на схеме отмечается жирной точкой. Если на схеме место скрещивания ветвей точкой не отмечено, это означает, что электрического соединения между ними в месте их пересечения нет.

Замкнутую электрическую о цепь, образуемую одной или несколькими ветвями, называют контуром.

Контур, внутри которого не лежат другие ветви, связывающие между собой его узлы, называют простым (или ячейкой). Например, в схеме рис. 8 содержится шесть ветвей, четыре узла и три простых контура.

Анализ электрической цепи может быть произведен или экспериментально, или решением уравнений ее электрического состояния.

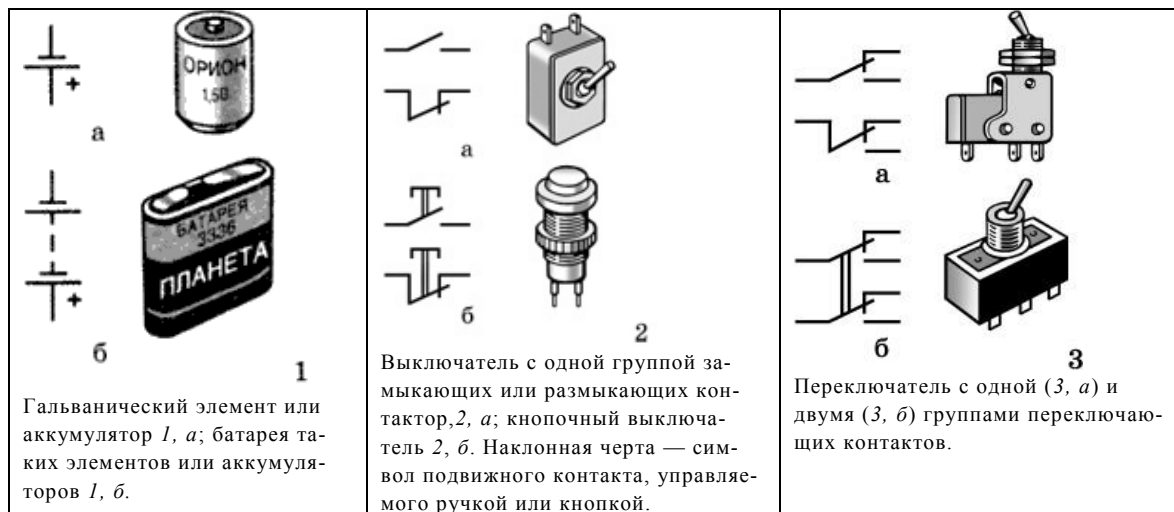
Основными физическими законами, позволяющими описать любые режимы электрической цепи, являются законы Ома, сохранения заряда и сохранения энергии, на основе которых составляются уравнения электрического состояния ветви, узла и контура.

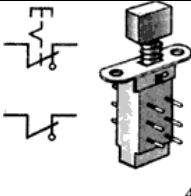
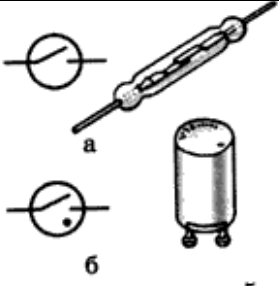
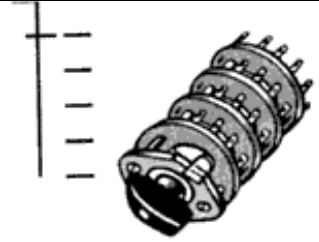
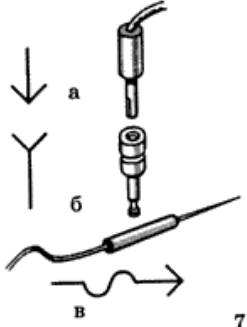
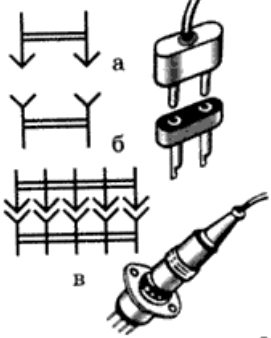
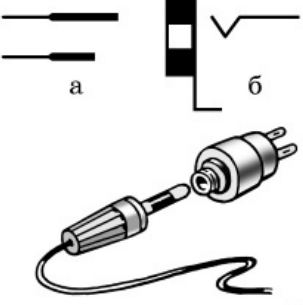
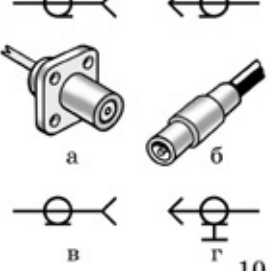
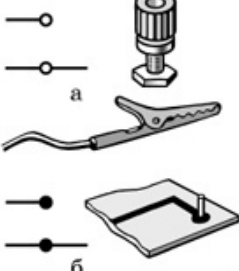
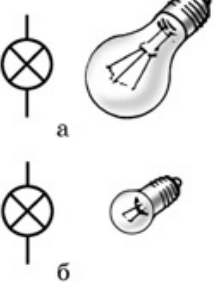
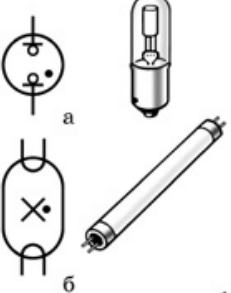
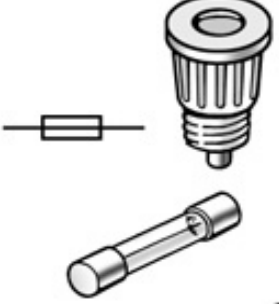
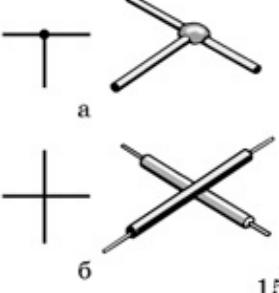
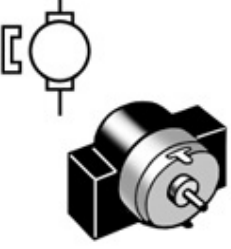
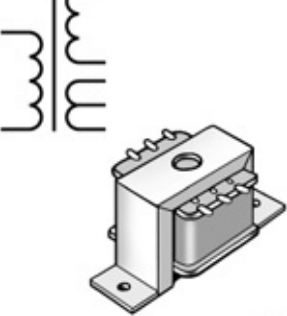
Имея в виду, что в неразветвленном участке электрической схемы с произвольным числом эдс, сопротивлений и заданной разностью потенциалов на его полюсах (рис. 9) ток направлен от высшего потенциала к низшему, т. е. если предположить, что $V_1 > V_2$, то ток и напряжение будут направлены от точки 1 к точке 2.

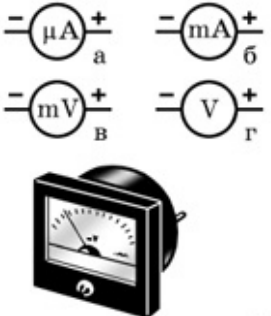
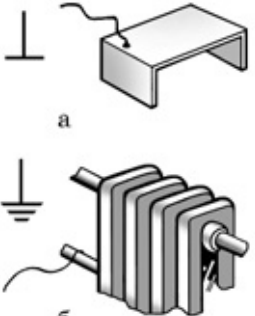
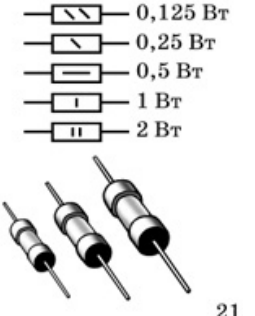
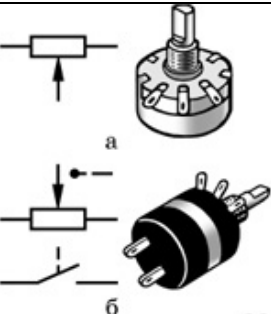
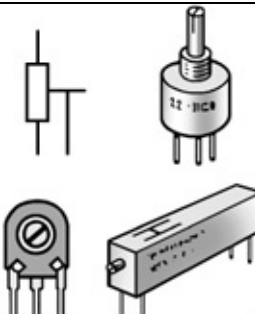
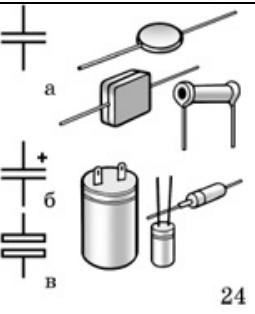
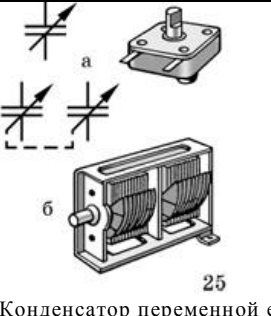
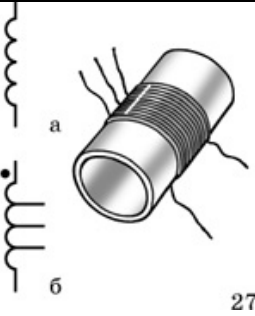
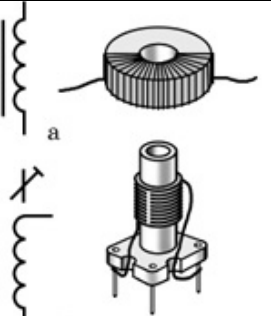
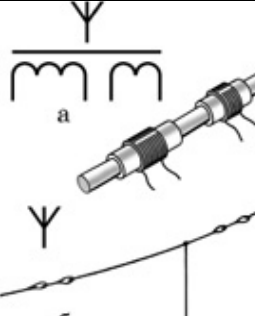
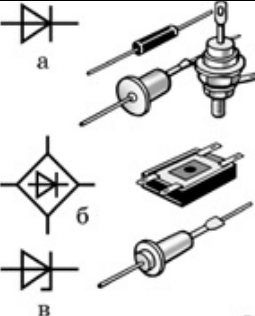
При составлении уравнения электрического состояния ветви слагаемые берут со знаком минус, если на заданном участке происходит падение потенциала, и со знаком плюс, если потенциал возрастает.

- Любая электрическая цепь может быть представлена электрической схемой замещения, содержащей источники энергии, резистивный, индуктивный и емкостной элементы.
- Электромагнитные процессы в электрических и магнитных цепях характеризуются электрическими величинами: эдс, током, напряжением, а в магнитной цепи — магнитными величинами: мдс, магнитным потоком, магнитной индукцией и магнитным напряжением.
- Свойства электрических и магнитных цепей определяются их параметрами.
- Представление любой электрической цепи схемой замещения позволяет анализировать состояние и режим как всей цепи, так и ее частей.
- Электрическая схема содержит ветви, узлы и контуры, уравнения состояния которых основаны на физических законах сохранения электрического заряда в узле и сохранения энергии.
- С помощью уравнения электрического состояния рассчитывают и анализируют режимы цепи.

Условные графические обозначения в электрических и радиотехнических схемах



 4 Кнопочный переключатель с фиксацией положения 4; знак фиксации — кружок на нижнем подвижном контакте.	 а б 5 Геркон 5, а; стартер 5, б.	 6 Галетный переключатель 6.
 а б в 7 Штырь или штепсель 7, а; шуп измерительного прибора 7, б; гнездо 7, в.	 а б в 8 Сетевая вилка 8, а; розетка 8, б; многоконтактный разъем 8, в.	 а б 9 Разъем 9 в малогабаритных приемниках, плеерах.
 а б в г 10 Высокочастотное гнездо 10, а; штырь 10, б.	 а б 11 Контакт соединения: разборного 11, а; неразборного 11, б.	 а б 12 Осветительная (12, а), индикаторная (12, б) лампы накаливания.
 а б 13 Неоновая индикаторная (13, а), люминесцентная осветительная (13, б) лампы.	 14 Плавкий предохранитель 14.	 а б 15 Соединение (15, а), пересечение (15, б) проводников.
 16 Коллекторный электродвигатель постоянного тока 16:	 17	 18

окружность символизирует ротор, касающиеся ее узкие прямоугольники — щетки, П-образная скоба — постоянные магниты статора.	Электродвигатель переменного тока 17: окружность — символ ротора, цепочка полуокружностей над окружностью — основная обмотка, другая цепочка — фазосдвигающая обмотка.	Трансформатор 18: I — первичная обмотка, II, III — вторичные.
 19 Стрелочный индикатор: микроамперметр 19, а; миллиамперметр 19, б; милливольтметр 19, в; вольтметр 19, г.	 20 Общий провод или металлическое шасси 20, а; заземление 20, б.	 21 Постоянный резистор 21. Прямые и наклонные черточки внутри условного обозначения обозначают мощность резистора.
 22 Переменный резистор 22, а; переменный резистор с выключателем 22, б.	 23 Подстроечный резистор 23.	 24 Конденсатор постоянной емкости 24, а; оксидный полярный 24, б; оксидный неполярный 24, в.
 25 Конденсатор переменной емкости одинарный 25, а; сдвоенный 25, б.	 26 Подстроечный конденсатор 26.	 27 Катушка индуктивности без отводов 27, а; с отводами 27, б.
 28 Катушка индуктивности с магнитопроводом 28.	 29 Магнитная (29, а) и наружная (29, б) приемные антенны.	 30 Полупроводниковый диод 30, а; диодный мост 30, б; полупроводниковый стабилизатор 30, в.

31 Фотодиод 31, а; светодиод 31, б.	32 Тиристоры: диностор 32, а; триностор 32, б; симистор 32, в	33 Транзисторы биполярные 33.
34 Транзисторы полевые 34.	35 Микрофоны: электродинамический 35, а; конденсаторный 35, б; пьезоэлектрический и электретный 35, в.	36 Головные телефоны 36.
37 Динамические громкоговорители 37.	38 Пьезоэлектрический звукоизлучатель 38.	39 Звукосниматель пьезоэлектрический 39, а; электромагнитный 39, б.

Ход работы:

- Изучить материал теоретической части и лекции и ответить на вопросы.
- Составить схему электрической цепи (по вариантам)
 - Составить схему электрической цепи, в которой к аккумуляторной батарее присоединены три резистора. Один – регулируемый, включен последовательно с группой из двух нерегулируемых, соединенных между собой параллельно. В схеме предусмотреть управление с помощью двухполюсного выключателя, защиту плавкими предохранителями, измерение общего тока в цепи и напряжения на зажимах батареи.
 - Составить схему электрической цепи, в которой четыре резистора (один из них регулируемый) образуют замкнутый контур в виде четырехугольника. В одной диагонали четырехугольника – гальванический элемент, присоединенный к цепи через однополюсный выключатель, в другой находится гальванометр, который можно включить и выключить кнопочным выключателем.
 - Составить схему электрической цепи, в которой последовательно включены два нерегулируемых резистора, аккумуляторная батарея и генератор, которые можно включить согласно или встречно. В схеме предусмотреть защиту цепи плавкими предохранителями, измерение тока, измерение напряжения на зажимах батареи и генератора одним вольтметром с помощью переключателя.

4. Составить схему электрической цепи, в которой генератор постоянного тока и аккумуляторная батарея, включенные параллельно, снабжают энергией внешнюю часть цепи, состоящей из трех нерегулируемых резисторов, включенных также параллельно. Каждый элемент цепи присоединяется к ней однополюсным выключателем. В схеме предусмотреть измерение общего напряжения, тока в каждом источнике и общего тока приемников энергии.

Контрольные вопросы

1. Электрическая цепь.
2. Составные элементы электрической цепи.
3. Источники электрической энергии.
4. Электрическая схема.
5. Компонент цепи или схемы.
6. Изображение электрических цепей и их элементов.
7. Вспомогательные элементы электрических цепей.
8. Источники электрической энергии в схеме электрической цепи.
9. Как учесть внутреннее сопротивление реального источника.
10. Чем характеризуются свойства электрических цепей.

Практическая работа № 3.

Тема 1. 1. Основы электротехники и электронной техники.

Решение задач по законам Ома.

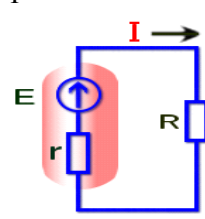
Цель работы: Решение задач.

Теоретическая часть:

Сила тока. Сопротивление.

Закон Ома для однородного участка цепи

Закон Ома для однородного участка цепи: сила тока I в проводнике, находящемся в электростатическом поле, пропорциональна напряжению U между концами проводника:



$$I = \frac{E}{r + R}$$

Закон Ома для полной цепи

где I - сила тока в цепи (Ампер)
 E - ЭДС источника тока (Вольт)
 r - внутреннее сопротивление источника тока E (Ом)
 R - общее активное сопротивление цепи (Ом)

 Источник постоянного тока (ЭДС), который имеет внутреннее сопротивление r (выходной импеданс). Например, это может быть аккумуляторная батарея

 Внутреннее сопротивление источника тока (ЭДС). Чем лучше источник тока, тем меньше его внутреннее сопротивление r . Зависит от действия сторонних сил

 Активная омическая нагрузка R . В ней происходит преобразование электрической энергии в другой вид энергии. Обычно это тепло.



?

зависит от сторонних сил создающих ЭДС в источнике



Сопротивление R участка цепи, состоящего из последовательно соединенных проводников, равно сумме сопротивлений $R_1, R_2, R_3, \dots$ этих проводников:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots;$$

сила тока во всех участках цепи одинакова:

разность потенциалов U между концами цепи равна сумме разностей потенциалов между концами входящих в цепь проводников:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

Электропроводность R^{-1} участка цепи, состоящего из параллельно соединенных проводников, равна сумме электропроводностей этих проводников:

сила тока I в цепи равна сумме сил токов в каждом проводнике:

разность потенциалов U между концами цепи равна разности потенциалов между концами каждого из входящих в цепь проводников:

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots$$

Сопротивление R линейного однородного проводника пропорционально его длине L и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S :

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{l}{\gamma S},$$

где ρ – удельное сопротивление проводника, γ – его удельная электрическая проводимость. Коэффициенты пропорциональности ρ и γ зависят от вещества проводника и его термодинамического состояния.

Величину, показывающую относительное изменение сопротивления при изменении температуры материала на 1° , называют температурным коэффициентом электрического сопротивления. Если температурный коэффициент обозначить через α , удельное сопротивление при $t_0 = 20^\circ\text{C}$ через ρ_0 , то при нагреве материала до температуры t_1 его удельное сопротивление

$$\rho_1 = \rho_0 + \rho_0 \alpha (t_1 - t_0) = \rho_0 [1 + \alpha (t_1 - t_0)]$$

и соответственно $R_1 = R_0 [1 + \alpha (t_1 - t_0)]$

Ход работы:

Решение задач.

1. Напишите формулы закона Ома для участка и полной цепи

2. Зависимость между какими величинами устанавливает закон Ома для участка цепи?

Ответ: -----

3. Заполните таблицу.

0,15 А	25 мкА	140 мкА	0,02 А	1,7 А	420 мкА
... мА	... мА	... А	... мА	... мкА	... мА

4. Заполните таблицу.

0,2 В	15 кВ	0,03 мВ	25 мВ	1200 мкВ	220 В
... мВ	... В	... кВ	... мкВ	... В	... кВ

5. Как изменится ток в цепи, если напряжение увеличится в два раза?

Ответ: _____

6. Электрическая лампочка включена в сеть напряжением 220 В. Какой ток будет проходить через лампочку, если сопротивление ее нити 240 Ом?

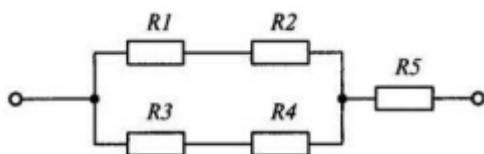
7. Электропаяльник, включенный в сеть напряжением 220 В, потребляет ток 0,3 А. Определите сопротивление электропаяльника.

8. Зависимость между какими величинами устанавливает закон Ома для полной цепи?

Ответ: _____

9. К кислотному аккумулятору, имеющему ЭДС 2,5 В и внутреннее сопротивление 0,2 Ом, подключен потребитель сопротивлением 2,6 Ом. Определите ток в цепи.

11. Определите внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи, если ее ЭДС 6 В, напряжение 5,6 В, а ток в цепи 0,2 А.



Приведен образец оформления ответа.

Дано:	$R_1 = 2 \text{ Ом}, R_2 = 3 \text{ Ом}, R_3 = 5 \text{ Ом}, R_4 = R_5 = 10 \text{ Ом}.$
Найти:	$R_{\text{экв}} - ?$
Решение:	$R_{\text{экв}} = (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)/(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + R_5 =$ $= (2 + 3)(5 + 10)/(2 + 3 + 5 + 10) =$ $= 5 \cdot 15/20 + 10 = 3,75 + 10 = 13,75$
Ответ:	$R_{\text{экв}} = 13,75 \text{ Ом}$

Дано:
Найти:
Решение:

Дано:
Найти:
Решение:

Дано:
Найти:
Решение:

15. Стальная проволока длиной 20 м и площадью сечения $1,5 \text{ мм}^2$, алюминиевая проволока длиной 50 м и площадью сечения 2 мм^2 , нихромовая проволока длиной 10 м и площадью сечения $0,5 \text{ мм}^2$ включены последовательно в сеть. Определите эквивалентное сопротивление всех проволок.

Дано:
Найти:
Решение:

16. Определите эквивалентное сопротивление электрических цепей, изображенных на рис. 2.4, если сопротивление каждого резистора равно R .

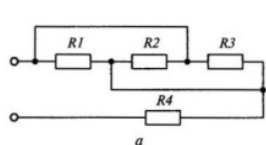
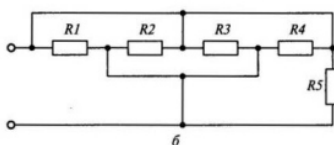


Рис. 2.4



Дано:
Найти:
Решение:

17. В одном из цехов завода из-за большой влажности воздуха ухудшилась изоляция проводов относительно земли. Сопротивление изоляции первого провода понизилось до 100 000 Ом, второго - до 80 000 Ом. Электромонтер, стоя на сыром полу (т.е. фактически на земле), коснулся оголившегося провода (рис. 2.5). Определите ток через тело электромонтера при напряжении сети 220 В, приняв, что сопротивление тела монтера составляет 500 Ом.

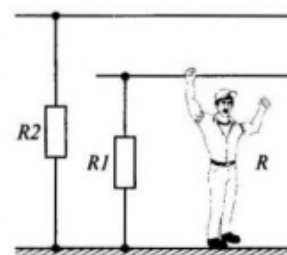


Рис. 2.5

Дано:
Найти:
Решение:

18. Определите эквивалентное сопротивление каркаса в виде куба (рис. 2.6) относительно вершин А и Н, если сопротивление каждого ребра R .

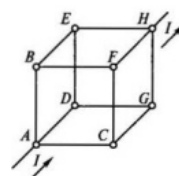


Рис. 2.6

Дано:
Найти:
Решение:

19. Четыре одинаковых резистора соединяют различными способами (рис. 2.7). Определите эквивалентное сопротивление для каждого соединения.

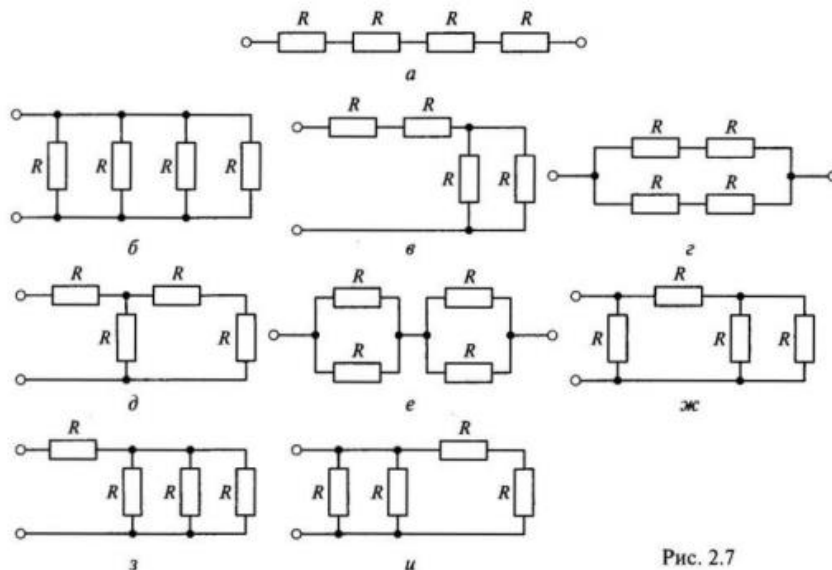


Рис. 2.7

Дано:
Найти:
Решение:

При решении задач этого раздела следует считать сопротивление подводящих проводов пренебрежимо малым, если его величина не указана в условии.
(верхние индексы над номером задачи показывают ее уровень сложности)

38.1¹. По проводу течет ток силы $I = 10$ А. Найдите массу электронов, проходящих через поперечное сечение этого провода за время $t = 1$ ч.

38.2¹. Сила тока в проводнике за четыре равных промежутка времени по $t = 10$ с сначала равномерно возрастает от 0 до $I_1 = 10$ мА, потом равномерно уменьшается до $I_2 = 5$ мА, затем сохраняет постоянное значение, и, наконец, равномерно уменьшается до нуля. Какой заряд q прошел по проводнику за время $T = 40$ с?

38.3². Пластины плоского конденсатора имеют форму квадратов со стороной $a = 21$ см. Расстояние между пластинами составляет $d = 2$ мм. Конденсатор присоединен к полюсам источника постоянного напряжения $U = 750$ В. В пространство между пластинами с постоянной скоростью $v = 8$ см/с вдвигают стеклянную пластинку толщины $d = 2$ мм. Какой силы ток I пойдет при этом по цепи? Диэлектрическая проницаемость стекла $= 7$.

38.4¹. Моток медной проволоки имеет массу $m = 300$ г и электрическое сопротивление $R = 57$ Ом. Определите длину проволоки L и площадь ее поперечного сечения S . Плотность меди $D = 8900$ кг/м³, ее удельное сопротивление $= 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

38.5². Электрическая цепь состоит из трех последовательно соединенных кусков провода одинаковой длины, изготовленных из одного и того же материала, но имеющих разные сечения: $S_1 = 1$ мм², $S_2 = 2$ мм², $S_3 = 3$ мм². Напряжение на концах цепи $U = 11$ В. Найдите напряжение на каждом куске провода.

38.6². На катушку намотан круглый стальной провод диаметром $d = 1,2$ мм. Масса провода $m = 0,2$ кг. На катушку подается напряжение $U = 53,8$ В. Определите силу тока, идущего по проводу, если он нагрелся до температуры $T = 393$ К. Удельное сопротивление стали при $T_1 = 293$ К равно $\rho_1 = 1,2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, температурный коэффициент сопротивления стали $\alpha = 6,0 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹. Плотность стали $D = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

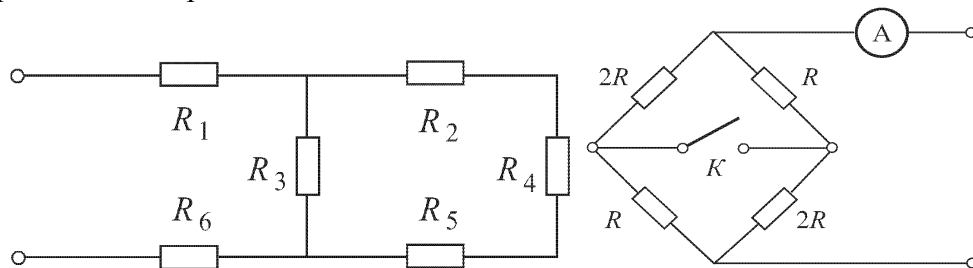
38.7¹. Цепь, имеющая сопротивление $R = 100$ Ом, питается от источника постоянного напряжения. Амперметр с сопротивлением $R_A = 1$ Ом, включенный в цепь, показал силу тока $I = 5$ А. Какова была сила тока в цепи I_0 до включения амперметра?

38.8¹. В сеть с напряжением $U = 24$ В подключили два последовательно соединенных резистора. При этом сила тока стала равной $I_1 = 0,6$ А. Когда резисторы подключили параллельно, суммарная сила тока стала равной $I_2 = 3,2$ А. Определите сопротивление резисторов.

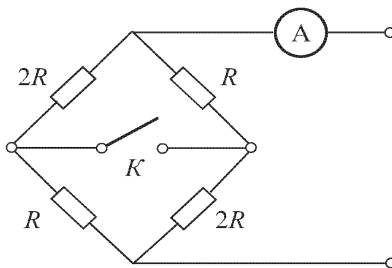
38.9¹. На сколько равных частей нужно разрезать проводник, имеющий сопротивление $R = 36$ Ом, чтобы полное сопротивление его частей, соединенных параллельно, составляло $R_0 = 1$ Ом?

38.10². Из куска проволоки, имеющей сопротивление $R_0 = 32$ Ом, изготовлено кольцо. К двум точкам этого кольца присоединены подводящие ток провода. а) В каком отношении делят точки присоединения длину окружности кольца, если общее сопротивление получившейся цепи $R = 6$ Ом? б) Какова максимально возможная величина общего сопротивления $R_{\max}$ между двумя точками проволоочного кольца?

38.11¹. Определите полное сопротивление R показанной на рисунке цепи, если $R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = 3$ Ом, $R_3 = 20$ Ом, $R_4 = 24$ Ом. Чему равна сила тока, идущего через каждый резистор, если к цепи приложено напряжение $U = 36$ В?



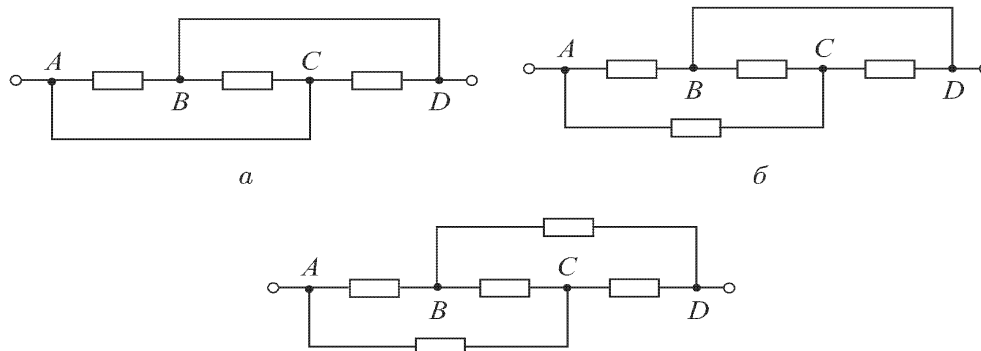
К задаче 38.11.



К задаче 38.12.

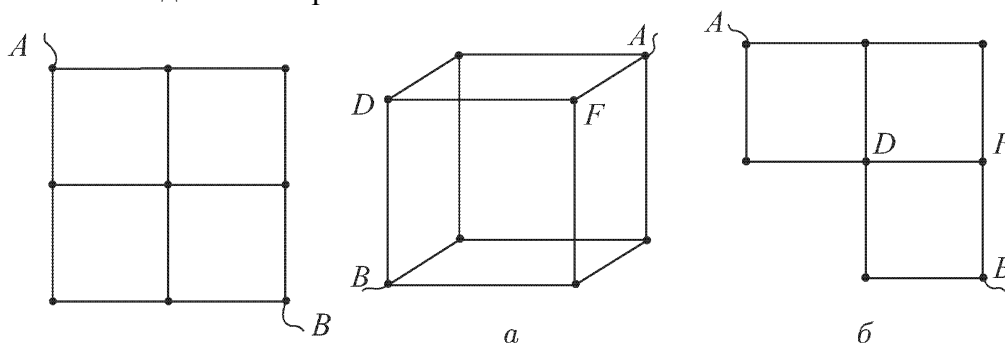
38.12¹. При замкнутом ключе K (см. рисунок) сила тока, текущего через амперметр, равна $I_1 = 0,45$ А. Какой силы ток I_2 будет течь через амперметр при разомкнутом ключе? Напряжение на клеммах постоянно.

38.13². Определите сопротивление R между точками A и D каждой из показанных на рисунке трех цепей. Сопротивления резисторов одинаковы и равны r . Сопротивлением соединяющих проводов можно пренебречь.



К задаче 38.13.

38.14². Определите сопротивление R между точками A и B показанной на рисунке цепи, если сопротивление каждого звена равно r .

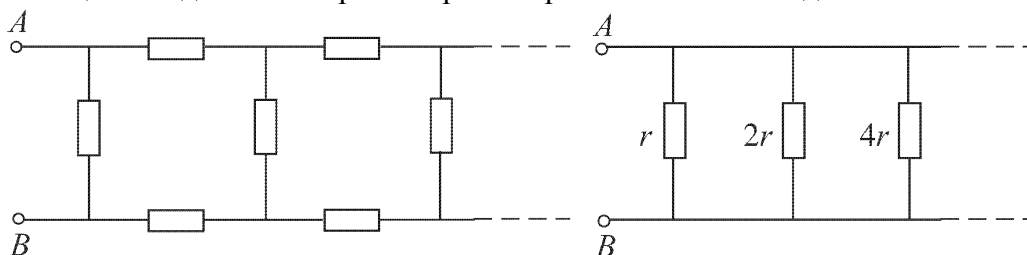


К задаче 38.14.

К задаче 38.15.

38.15³. Каждый из отрезков двух проволоочных конструкций (см. рисунок) имеет одинаковое сопротивление r . Ток, протекающий по отрезку DF , равен i . Определите разность потенциалов U между узлами A и B , сопротивление R между этими узлами и полный ток I от A к B .

38.16³. Найдите полное сопротивление R между точками A и B бесконечной цепи (см. рисунок), состоящей из одинаковых резисторов сопротивлением r каждый.



К задаче 38.16.

К задаче 38.17.

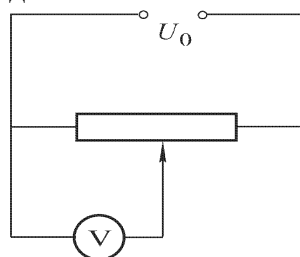
38.17³. Определите полное сопротивление R между точками A и B бесконечной цепи, параметры которой указаны на рисунке.

38.18². Имеется прибор с ценой деления $i_0 = 10$ мкА. Шкала прибора имеет $n = 100$ делений. Внутреннее сопротивление прибора $r = 50$ Ом. Как из этого прибора сделать: а) вольтметр с пределом измерения напряжения $U_0 = 200$ В? б) миллиамперметр с пределом измерения силы тока $I_0 = 800$ мА?

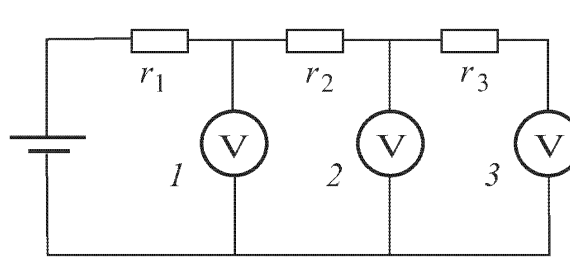
38.19³. Присоединение к вольтметру некоторого добавочного сопротивления увеличивает предел измерения напряжения в n раз. Другое добавочное сопротивление увеличивает предел измерения в m раз. Во сколько раз к увеличится предельно измеримое вольтметром напряжение, если включить последовательно с вольтметром эти два сопротивления, соединенные между собой параллельно?

38.20³. В схеме (см. рисунок) вольтметр показывает напряжение $U_1 = 20$ В. Напряжение на входе цепи $U_0 = 100$ В. Найдите отношение тока, идущего через вольтметр, к току, идущему

через правую часть потенциометра, если отношение сопротивлений, на которые движок делит потенциометр $n = 2/3$, причем большее сопротивление имеет часть потенциометра, расположенная справа от движка.



К задаче 38.20.



К задаче 38.21.

38.21³. Цепь (см. рисунок) собрана из одинаковых резисторов и одинаковых вольтметров. Показания первого и третьего вольтметров $U_1 = 10$ В, $U_3 = 8$ В соответственно. Найдите показания U_2 второго вольтметра.

Закон Ома для неоднородного участка и полной цепи.

Обобщенный закон Ома для произвольного участка цепи: произведение силы тока I на сопротивление R участка цепи равно алгебраической сумме падения потенциала (1 – 2 на этом участке и ЭДС E всех источников электрической энергии, включенных на данном участке цепи:

Закон Ома для замкнутой цепи: сила тока I в замкнутой цепи, состоящей из источника тока с ЭДС E и внутренним сопротивлением r и нагрузки с сопротивлением R , равна отношению величины ЭДС к сумме внутреннего сопротивления источника и сопротивления нагрузки:

Практическая работа № 4.

Тема 1. 1. Основы электротехники и электронной техники.

Решение задач по законам Кирхгофа.

Цель работы: Решение задач.

Теоретическая часть:

Законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа (правило узлов): алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле (точке соединения нескольких линейных проводников), равна нулю:

;

при этом положительными считаются токи, подходящие к узлу, отрицательными – токи, отходящие от узла; иными словами, сумма сил токов, втекающих в узел, равна сумме сил токов, вытекающих из него:

Второй закон Кирхгофа (правило контуров): в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_m на сопротивления R_m соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС в контуре:

здесь n – число отдельных участков, на которые контур разбивается узлами; положительными считаются токи, направления которых совпадают с выбранным (произвольно) направлением обхода контура; ЭДС источников электрической энергии считаются положительными, если они создают токи, направления которых совпадают с направлением обхода контура.

В задачах этого раздела внутренним сопротивлением источника тока, сопротивлением соединительных проводов, а также амперметров следует пренебречь, если эти величины не указаны в условии.

1. Сформулируйте законы Кирхгофа.

В любом узле электрической цепи - - - - -

В любом замкнутом электрическом контуре - - - - -

2. Сколько узлов, ветвей и контуров имеет электрическая цепь, изображенная на рис. 2.8?

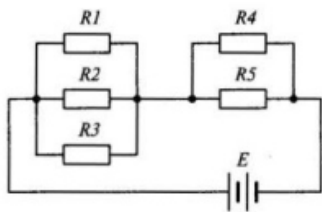


Рис. 2.8

Ответ: узлов _____
ветвей _____
контуров _____

3. Напишите уравнение согласно первому закону Кирхгофа для узла, изображенного на рис. 2.9.

Ответ: _____

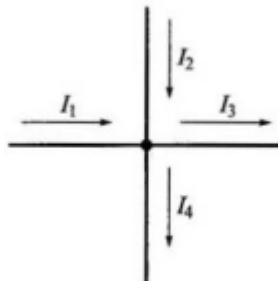


Рис. 2.9

4. Нарисуйте электрический узел, для которого согласно первому закону Кирхгофа составлено следующее уравнение:

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 - I_5 - I_6 = 0.$$

5. Напишите уравнения согласно второму закону Кирхгофа для контуров а-б-д-е и б-в-г-д, изображенных на рис. 2.10.

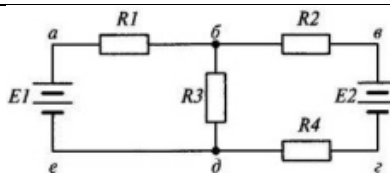


Рис. 2.10

6. Определите ток в цепи, изображенной на рис. 2.11, если ЭДС генератора $E_1 = 36$ В, его внутреннее сопротивление $r_1 = 0,5$ Ом, ЭДС батареи $E_2 = 30$ В, ее внутреннее сопротивление $r_2 = 0,2$ Ом, сопротивление потребителя $R_1 = 1,5$ Ом.

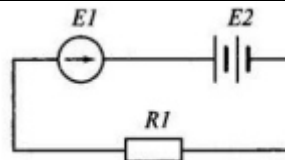


Рис. 2.11

Дано: _____
Найти: _____
Решение: _____

7. В электрической цепи, схема которой приведена на рис. 2.12, резисторы имеют сопротивления $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 6$ Ом, $R_3 = 18$ Ом, $R_4 = 10$ Ом, $R_5 = 3$ Ом, $R_6 = 9$ Ом, $R_7 = 27$ Ом. Определите общий ток в цепи и напряжение на резисторе R_4 , если к зажимам подведено напряжение 24 В.

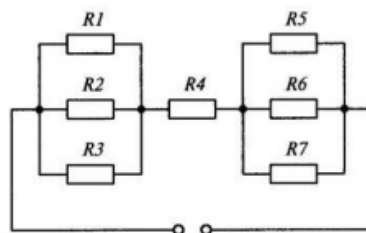


Рис. 2.12

Дано: _____
Найти: _____
Решение: _____

8. Напряжение сети составляет 12 В, общий ток, потребляемый четырьмя параллельно включенными одинаковыми лампами, равен 6 А. Определите сопротивление каждой лампы.

Дано: _____
Найти: _____
Решение: _____

9. Имеется разветвление, состоящее из четырех параллельно включенных резисторов сопротивлениями 10, 5, 3 и 8 Ом. Ток, протекающий к точке разветвления, равен 20 А. Определите ток, протекающий по каждой ветви.

Дано:
Найти:
Решение:

10. Показания амперметров А7, А1 и А6 в сложной цепи (рис. 2.13) соответственно равны 10, 8 и 1 А, показания амперметра А5 равно нулю. Определите значения и направления неизвестных токов.

Дано:
Найти:
Решение:

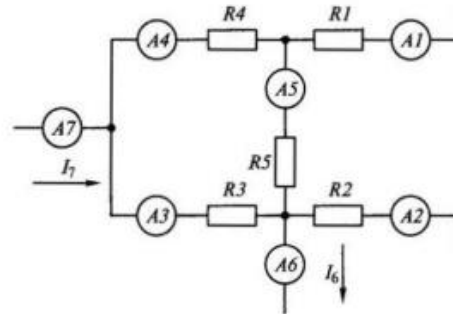


Рис.

2.13

11. Напряжение генератора 110 В. В сеть включены параллельно тридцать ламп сопротивлением по 200 Ом каждая. Определите ЭДС генератора, если его внутреннее сопротивление 0,5 Ом.

Дано:
Найти:
Решение:

РАБОТА И МОЩНОСТЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

2.5.1. Заполните таблицу.

55 кВт	1500 Вт	1,5 МВт	0,33 кВт	0,12 МВт	312 кВт
... Вт	... кВт	... кВт	... Вт	... кВт	... МВт

2.5.2. Определите мощность, потребляемую электрическим двигателем, если ток в цепи равен 6 А, а двигатель включен в сеть напряжением 220 В.

Дано:
Найти:
Решение:

2.5.3. Электродвигатель, подключенный к сети напряжением 220 В, потребляет ток 6 А. Определите мощность двигателя и количество энергии, которую он потребляет за 8 ч работы.

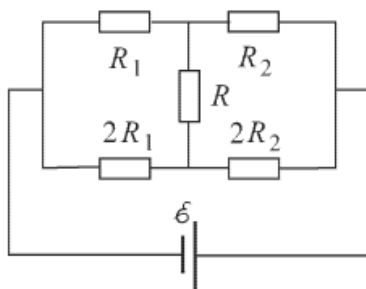
Дано:
Найти:
Решение:

2.5.4. В квартире имеются восемь ламп, из которых шесть мощностью по 40 Вт горят 6 ч в сутки, а две мощностью по 60 Вт - 8 ч в сутки. Сколько нужно заплатить за горение всех ламп в течение месяца (30 дней) при тарифе 120 р. за 1 кВт ч?

Дано:
Найти:
Решение:

В задачах этого раздела внутренним сопротивлением источника тока, сопротивлением соединительных проводов, а также амперметров следует пренебречь, если эти величины не указаны в условии.

(верхние индексы над номером задачи показывают ее уровень сложности)



39.1¹. Амперметр с сопротивлением $R_1 = 2$ Ом, подключенный к источнику тока, показывает ток $I_1 = 5$ А. Вольтметр с сопротивлением $R_2 = 150$ Ом, подключенный к такому же источнику тока, показывает напряжение $U_2 = 12$ В. Найдите ток короткого замыкания $I_{к.з}$ источника.

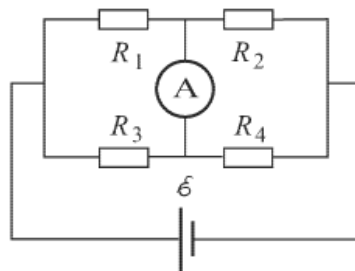


Рис. 1

39.2¹. Источник тока питает $n = 100$ ламп, рассчитанных на напряжение $U_1 = 220$ В и соединенных параллельно. Сопротивление каждой лампы $R_1 = 1,2$ кОм, сопротивление подводящих проводов $R_2 = 4$ Ом, внутреннее сопротивление источника $r = 0,8$ Ом. Найдите напряжение U на зажимах источника и его ЭДС E .

39.3². Найдите силу тока I_2 , идущего через резистор с сопротивлением R_2 в схеме, параметры которой приведены на рисунке 1.

Рис. 2

39.4². Какой ток I_A будет идти через амперметр в схеме, изображенной на рисунке 2? ЭДС источника равна E . Рассмотрите два случая: а) $R_1 = R_4 = R$; $R_2 = R_3 = 2R$; б) $R_1 = R_2 = R_3 = R$; $R_4 = 2R$.

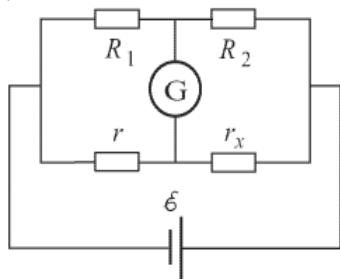


Рис. 3

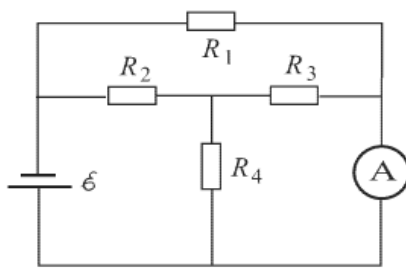


Рис. 4

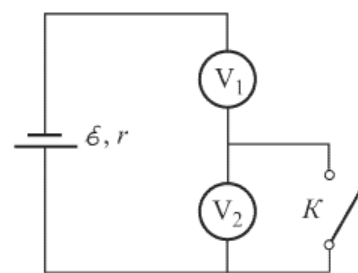


Рис. 5

39.5². Какой ток I_A течет через амперметр в схеме, показанной на рисунке 3 ЭДС источника $E = 7,5$ В, $R_1 = 15$ Ом, $R_2 = R_3 = R_4 = 10$ Ом.

39.6². При замкнутом ключе K вольтметр V_1 показывает напряжение $0,8E$, где E – ЭДС источника (см. рисунок 4). Что покажут вольтметры V_1 и V_2 при разомкнутом ключе, если их сопротивления одинаковы?

39.7². В мосте Уитстона (см. рисунок 5) сопротивления подбирают таким образом, что чувствительный гальванометр показывает нуль.

а) Считая сопротивления R_1 , R_2 и r известными, определите величину сопротивления r_x .

б) Если поменять местами батарею и гальванометр, то снова получится мостовая схема. Сохранится ли баланс в новой схеме?

39.8². Имеется цепь, содержащая $N = 1000$ одинаковых источников тока с ЭДС E и внутренним сопротивлением r каждый (см. рисунок 6). Между точками A и B (на дуге ACB) находится m источников тока.

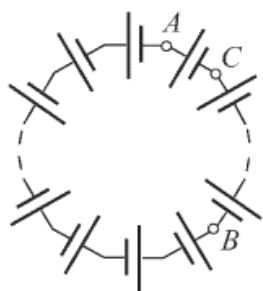


Рис. 6

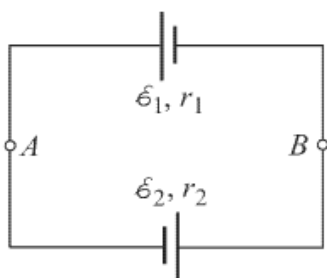


Рис. 7

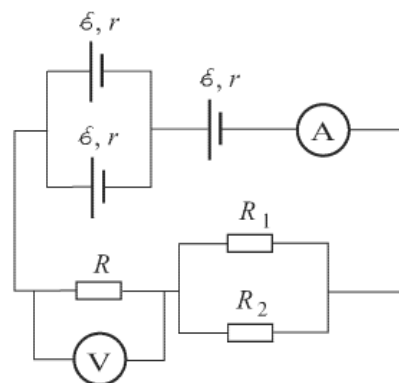


Рис. 8

а) Найдите разность потенциалов между точками A и B . б) Какой будет эта разность потенциалов, если элементы будут обращены друг к другу одноименными полюсами:

39.9³. Два источника тока соединены, как показано на рисунке 7.

а) Определите разность потенциалов между точками A и B . б) Какой станет эта разность потенциалов, если изменить полярность включения второго источника?

39.10³. Три одинаковых источника с ЭДС $E = 1,6$ В и внутренним сопротивлением r включены в электрическую цепь по схеме, изображенной на рисунке 8. Миллиамперметр показывает ток $I = 100$ мА. Сопротивления резисторов $R_1 = 10$ Ом и $R_2 = 15$ Ом, сопротивление резистора R неизвестно. Какое напряжение U показывает вольтметр? Сопротивление вольтметра считать очень большим.

39.11². Батарея из $n = 4$ одинаковых источников тока с внутренним сопротивлением $r = 2$ Ом каждый, соединенных в первом случае последовательно, во втором – параллельно, замыкается на резистор с сопротивлением $R = 10$ Ом. Найдите отношение напряжений на резисторе U_1/U_2 в первом и во втором случаях.

39.12³. Из $N = 400$ одинаковых источников тока составлена батарея так, что образовано n соединенных последовательно групп, в каждой из которых содержится m источников, соединенных параллельно (см. рисунок а). Внутреннее сопротивление каждого источника $r = 1$ Ом. При каких значениях питающая сила тока через резистор с сопротивлением $R = 100$ Ом, подключенный к батарее, будет наибольшей? Изменится ли ответ, если источники тока соединить в батарею, как показано на рисунке б (m параллельно соединенных ветвей, в каждой из которых содержится n последовательно соединенных источников)?

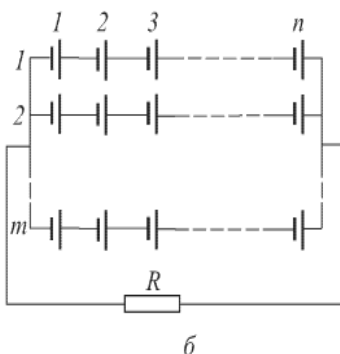
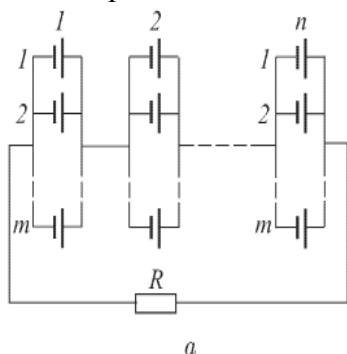


Рис. 9

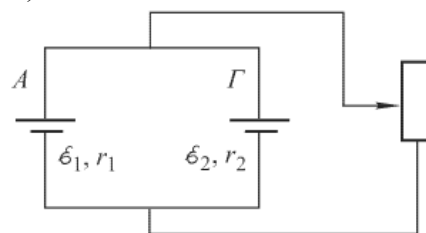


Рис. 10

39.13³. Источниками электрического тока в системе электрического оборудования автомобиля являются генератор Γ постоянного тока и соединенный с ним параллельно аккумулятор A (см. рисунок 10). ЭДС аккумулятора $E_1 = 12$ В, его внутреннее сопротивление $r_1 = 0,15$

Ом. ЭДС генератора $E_2 = 14$ В, его внутреннее сопротивление $r_2 = 0,05$ Ом. Найдите зависимость силы тока I_A ,

протекающего через аккумулятор, от силы тока I_H , потребляемого нагрузкой – переменным сопротивлением. Нарисуйте график зависимости $I_A(I_H)$. Определите с помощью графика, при каких значениях силы тока нагрузки I_H аккумулятор будет заряжаться, а при каких – разряжаться.

39.14³. В конце зарядки аккумулятора сила тока $I_1 = 3$ А, а разность потенциалов на клеммах $U_1 = 8,85$ В. В начале разрядки того же аккумулятора сила тока $I_2 = 4$ А, а разность потенциалов $U_2 = 8,5$ В. Определите силу тока короткого замыкания $I_{к.з}$ этого аккумулятора.

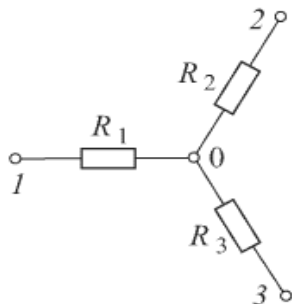


Рис. 11

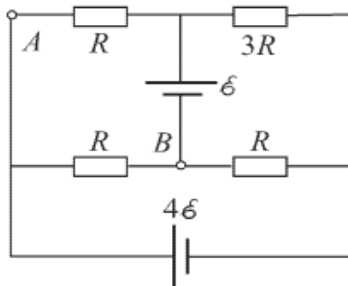


Рис. 12

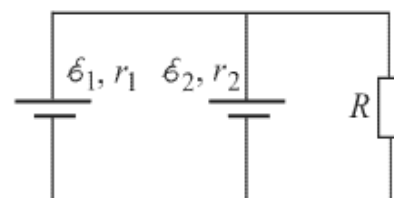


Рис. 13

39.15³. Найдите силу тока I через нагрузку R , подключенную к параллельно соединенным источникам тока с ЭДС E_1 и E_2 и внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 соответственно (см. рисунок 11).

39.16³. В схеме на рисунке внутренние сопротивления источников пренебрежимо малы. Определите силу тока I_1 через резистор сопротивления $3R$, силу тока I_2 через источник тока с ЭДС $4E$ и разность потенциалов U_{AB} между точками A и B схемы.

39.17². Найдите силу тока I_1 через сопротивление R_1 участка цепи (см. рисунок 12), если $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R_3 = 30$ Ом и потенциалы точек 1, 2 и 3 равны соответственно $\varphi_1 = 10$ В, $\varphi_2 = 6$ В, $\varphi_3 = 5$ В.

39.18³. В схеме, изображенной на рисунке 13, определите сопротивление R_{AB} цепи между точками A и B .

Практическая работа № 4.

Тема 1.2. Расчёт электрических цепей постоянного тока.

Расчёт простых электрических цепей.

Цель работы: Расчет электрических цепей постоянного тока методом эквивалентных преобразований.

Теоретическая часть:

Расчет электрической цепи методом последовательного упрощения схемы.

Резистивными называются электрические цепи, в схему замещения которых входят только элементы активного сопротивления и источники. Чаще всего это цепи, составленные из резисторов. Основной особенностью резистивных цепей является отсутствие накопителей энергии – индуктивностей и емкостей. Поэтому в специальной литературе такие цепи часто называют цепями "без памяти".

Анализ резистивных цепей представляет собою простую задачу, так как колебания в резистивных цепях описываются линейными алгебраическими уравнениями. Полученные при рассмотрении резистивных цепей методы анализа колебаний и основные теоремы теории цепей в дальнейших темах будут распространены на цепи общего вида. В этом прежде всего ценность результатов анализа колебаний в резистивных цепях.

Методы расчета простых резистивных цепей

Простыми резистивными цепями называются такие цепи, элементы которых соединены или только последовательно, или только параллельно, или только последовательно и параллельно.

Параллельное (последовательное) соединение нескольких однотипных элементов может быть заменено одним элементом. Поэтому простую цепь с одним источником путем объединения элементов, включенных только параллельно или только последовательно, можно свести к цепи, содержащей лишь один элемент. Резистивные цепи, которые указанным путем не могут быть сведены к одному элементу активного сопротивления, называются сложными. Расчет простых резистивных цепей с одним источником производится с использованием закона Ома. При наличии нескольких источников используется метод наложения.

Рассмотрим методы расчета простых цепей на примерах, употребляя для краткости термины "резистор" вместо термина "элемент активного сопротивления".

Параллельные цепи

Пусть электрическая цепь содержит два резистора и источник тока (рис. 1.1).

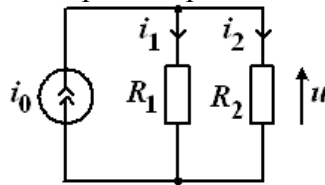


Рис. 1.1.

Определим напряжение в цепи и токи в ветвях, если значения сопротивлений резисторов и задающий ток источника известны. Учитывая заданное направление тока i_0 и выбранное направления токов i_1 и i_2 , составляем уравнение по первому закону Кирхгофа:

$$i_0 - i_1 - i_2 = 0, \text{ откуда } i_1 + i_2 = i_0.$$

Для резисторов выбрана согласная система отсчетов и поэтому:

$$i_1 = \frac{u}{R_1}; i_2 = \frac{u}{R_2}.$$

$$\text{Тогда } \frac{u}{R_1} + \frac{u}{R_2} = u \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = u \frac{1}{R_{\Sigma}} = i_0$$

Следовательно, эквивалентное сопротивление двух параллельно соединяемых резисторов определяется из соотношения:

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

и равно отношению произведения соединяемых сопротивлений к их сумме:

$$R_{\Sigma} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Напряжение цепи находится как произведение тока источника на эквивалентное сопротивление: $u = R_{\Sigma} \cdot i_0$.

Токи в ветвях вычисляются по закону Ома:

$$i_1 = \frac{u}{R_1} = \frac{R_{\Sigma} \cdot i_0}{R_1} = i_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}; i_2 = i_0 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

При дальнейшем использовании эти выражения условимся называть правилом деления тока между двумя ветвями, или просто правилом деления тока: ток в данной ветви пропорционален отношению сопротивления соседней ветви к сумме сопротивлений обеих ветвей.

Если использовать проводимости ветвей G_1 и G_2 , то правило деления тока можно записать так:

$$i_1 = i_0 \frac{G_1}{G_1 + G_2}; i_2 = i_0 \frac{G_2}{G_1 + G_2}.$$

Ток в данной ветви пропорционален отношению проводимости этой ветви к сумме проводи-

$$i_k = i_0 \frac{G_k}{G_{\Sigma}}, \text{ где } G_{\Sigma} - \text{эквивалентная проводимость цепи.}$$

мостей ветвей. Последние соотношения можно объединить в одно:

Для n параллельно соединенных резисторов: $G_{\Sigma} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$.

Последовательные цепи

Пусть несколько резисторов соединены последовательно (рис. 1.2).

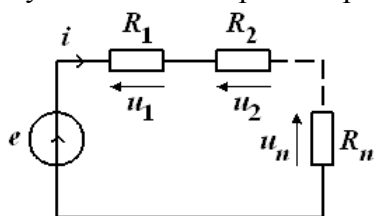


Рис. 1.2.

Определим ток в цепи и напряжения на резисторах, если значения сопротивлений и Э.Д.С. источника известны.

По второму закону Кирхгофа получим:

$$e - u_1 - u_2 - u_n = 0, \text{ или } e = u_1 + u_2 + \dots + u_n.$$

Учитывая, что $u_k = R_k i$, выражение принимает вид:

$$e = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \cdot i = R_{\Sigma} i.$$

Отсюда получается известная формула:

$$i = \frac{e}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} = \frac{e}{R_{\Sigma}},$$

где R_{Σ} – эквивалентное сопротивление цепи.

Напряжение на любом резисторе

$$u_k = R_k \cdot i = e \frac{R_k}{R_{\Sigma}}.$$

Последовательная резистивная цепь может использоваться как делитель напряжения, причем правило деления напряжения таково: напряжение на данном резисторе пропорционально отношению его сопротивления к эквивалентному сопротивлению цепи.

Параллельно-последовательные цепи

При расчете параллельно-последовательной цепи с одним источником необходимо путем объединения сопротивлений свести цепь или к параллельному, или к последовательному соединению, сопротивления для которых уже известны.

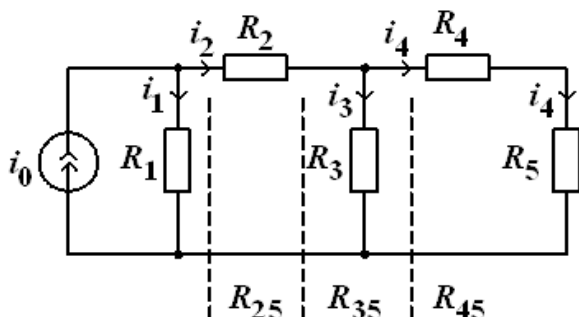


Рис. 1.3.

Например, в схеме рис. 1.3 заменяем последовательное соединение резисторов R_4 и R_5 одним элементом с сопротивлением $R_{45} = R_4 + R_5$. Затем объединяем параллельное соединение элементов R_3 и R_{45} .

$$R_{35} = \frac{R_3 \cdot (R_4 + R_5)}{R_3 + R_4 + R_5}.$$

Наконец, заменяем последовательное соединение элементов R_2 и R_{35} одним элементом с сопротивлением $R_{25} = R_2 + R_{35}$.

Тогда токи в резисторах R_1 и R_2 вычисляем по правилу деления тока i_0 :

$$i_1 = i_0 \frac{R_{25}}{R_1 + R_{25}}, \quad i_2 = i_0 \frac{R_1}{R_1 + R_{25}}.$$

Токи i_3 и i_4 находим по правилу деления тока i_2 :

$$i_3 = i_2 \frac{R_4 + R_5}{R_3 + R_4 + R_5}, \quad i_4 = i_2 \frac{R_3}{R_3 + R_4 + R_5}.$$

Напряжения на резисторах по известным токам в них вычисляются по закону Ома.

Решение задач *Расчет электрических цепей постоянного тока методом эквивалентных преобразований.*

Ход работы:

Решение задач *Расчет электрических цепей постоянного тока методом эквивалентных преобразований*

Задача 1. Для цепи (рис. 1), *определить эквивалентное сопротивление* относительно входных зажимов $a-g$, если известно: $R_1 = R_2 = 0,5$ Ом, $R_3 = 8$ Ом, $R_4 = R_5 = 1$ Ом, $R_6 = 12$ Ом, $R_7 = 15$ Ом, $R_8 = 2$ Ом, $R_9 = 10$ Ом, $R_{10} = 20$ Ом.

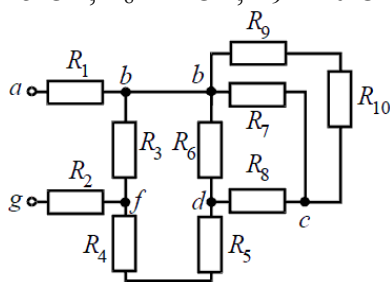


Рис. 1

Решение

Начнем эквивалентные преобразования схемы, с ветви наиболее удаленной от источника, т.е. от зажимов $a-g$:

$$R_{11} = R_9 + R_{10} = 10 + 20 = 30 \text{ Ом}; \quad R_{12} = \frac{R_{11} \cdot R_7}{R_{11} + R_7} = \frac{30 \cdot 15}{30 + 15} = 10 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = R_8 + R_{12} = 2 + 10 = 12 \text{ Ом}; \quad R_{14} = \frac{R_6 \cdot R_{13}}{R_6 + R_{13}} = \frac{12 \cdot 12}{12 + 12} = 6 \text{ Ом};$$

$$R_{15} = R_{14} + R_5 + R_4 = 6 + 1 + 1 = 8 \text{ Ом}; \quad R_{16} = \frac{R_3 \cdot R_{15}}{R_3 + R_{15}} = \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 4 \text{ Ом};$$

$$R_g = R_1 + R_{16} + R_2 = 0,5 + 4 + 0,5 = 5 \text{ Ом}.$$

Задача 2. Для цепи (рис. 2, а), *определить входное сопротивление* если известно: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 40$ Ом.

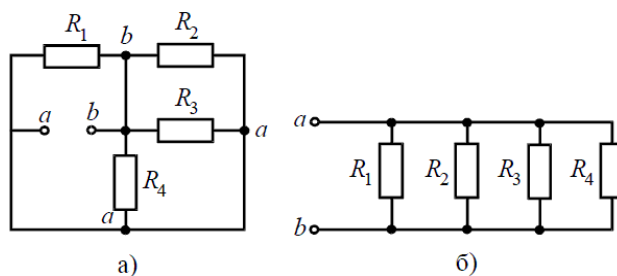


Рис. 2

Решение

Исходную схему можно перечертить относительно входных зажимов (рис. 2, б), из чего видно, что все сопротивления включены параллельно. Так как величины сопротивлений равны, то для определения величины эквивалентного сопротивления можно воспользоваться формулой:

$$R_{\Sigma} = \frac{R}{n}, \text{ где } R - \text{величина сопротивления, Ом;}$$

n – количество параллельно соединенных сопротивлений.

$$R_{\Sigma} = \frac{40}{4} = 10 \text{ Ом.}$$

Задача 3. Определить эквивалентное сопротивление относительно зажимов $a-b$, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 10 \text{ Ом}$ (рис. 3, а).

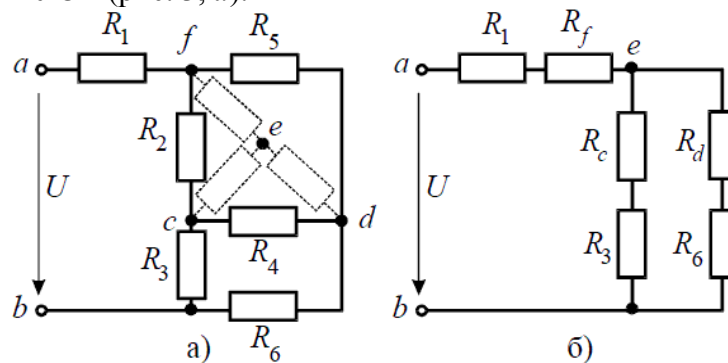


Рис. 3

Решение

Преобразуем соединение «треугольник» $f-d-c$ в эквивалентную «звезду». Определяем величины преобразованных сопротивлений (рис. 3, б):

$$R_f = \frac{R_2 \cdot R_5}{R_2 + R_5 + R_4} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10 + 10} = \frac{100}{30} = 3,33 \text{ Ом.}$$

По условию задачи величины всех сопротивлений

равны, а значит:

$$R_f = R_d = R_c = 3,33 \text{ Ом.}$$

На преобразованной схеме получили параллельное соединение ветвей между узлами $e-b$, тогда эквивалентное сопротивление равно:

$$R_{eb} = \frac{(R_c + R_3) \cdot (R_d + R_6)}{(R_c + R_3) + (R_d + R_6)} = \frac{(3,33 + 10) \cdot (3,33 + 10)}{(3,33 + 10) + (3,33 + 10)} = 6,67 \text{ Ом.}$$

И тогда эквивалентное сопротивление исходной схемы представляет последовательное соединение сопротивлений:

$$R_{ab} = R_1 + R_f + R_{eb} = 10 + 3,33 + 6,67 = 20 \text{ Ом.}$$

Задача 4. В заданной цепи (рис. 4, а) определить методом эквивалентных преобразований входные сопротивления ветвей $a-b$, $c-d$ и $f-b$, если известно, что: $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $R_2 = 8 \text{ Ом}$, $R_3 = 4 \text{ Ом}$, $R_4 = 8 \text{ Ом}$, $R_5 = 2 \text{ Ом}$, $R_6 = 8 \text{ Ом}$, $R_7 = 6 \text{ Ом}$, $R_8 = 8 \text{ Ом}$.

Решение

Для определения входного сопротивления ветвей исключают из схемы все источники ЭДС. При этом точки c и d , а также b и f соединяются накоротко, т.к. внутренние сопротивления идеальных источников напряжения равны нулю.

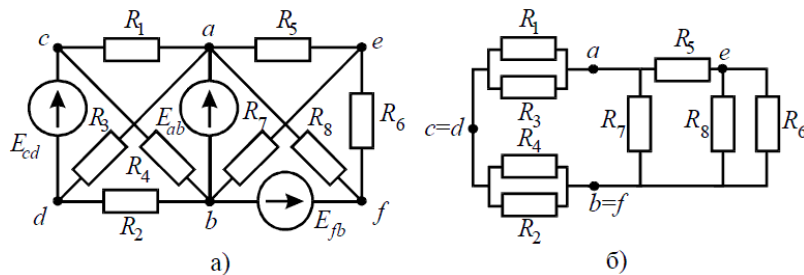


Рис. 4

Ветвь $a-b$ разрывают, и т.к. сопротивление $R_{a-b} = 0$, то входное сопротивление ветви равно эквивалентному сопротивлению схемы относительно точек a и b (рис. 4, б):

$$R'_{ab} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_4} = \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} + \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 6 \text{ Ом};$$

$$R''_{ab} = \frac{\left(R_5 + \frac{R_6 \cdot R_8}{R_6 + R_8} \right) \cdot R_7}{R_5 + \frac{R_6 \cdot R_8}{R_6 + R_8} + R_7} = \frac{\left(2 + \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} \right) \cdot 6}{2 + \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} + 6} = 3 \text{ Ом};$$

$$R_{ab} = \frac{R'_{ab} \cdot R''_{ab}}{R'_{ab} + R''_{ab}} = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} = 2 \text{ Ом}.$$

Аналогично методом эквивалентных преобразований определяются входные сопротивления ветвей R_{cd} и R_{bf} . Причем, при вычислении сопротивлений учтено, что соединение накоротко точек a и b исключает («закорачивает») из схемы сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 в первом случае, и R_5, R_6, R_7, R_8 во втором случае.

$$R_{cd} = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{4 \cdot 8}{4 + 8} + \frac{8 \cdot 4}{8 + 4} = \frac{16}{3} \text{ Ом}$$

$$R_{bf} = \frac{\left(R_6 + \frac{R_5 \cdot R_8}{R_5 + R_8} \right) \cdot R_7}{R_6 + \frac{R_5 \cdot R_8}{R_5 + R_8} + R_7} = \frac{\left(8 + \frac{2 \cdot 8}{2 + 8} \right) \cdot 6}{8 + \frac{2 \cdot 8}{2 + 8} + 6} = \frac{48}{13} \text{ Ом}.$$

Задача 5. В цепи (рис. 5) определить методом эквивалентных преобразований токи I_1, I_2, I_3 и составить баланс мощностей, если известно: $R_1 = 12 \text{ Ом}, R_2 = 20 \text{ Ом}, R_3 = 30 \text{ Ом}, U = 120 \text{ В}$.

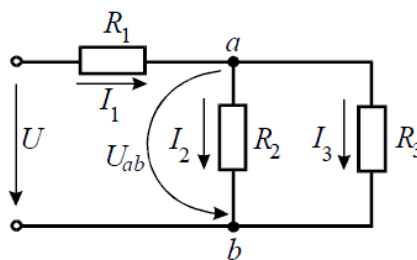


Рис. 5

Решение

Эквивалентное сопротивление для параллельно включенных сопротивлений:

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = 12 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное сопротивление всей цепи:

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_{23} = 12 + 12 = 24 \text{ Ом}.$$

Ток в неразветвленной части схемы:

$$I_1 = U / R_{\Sigma} = 120 / 24 = 5 \text{ А}.$$

Напряжение на параллельных сопротивлениях:

$$U_{ab} = R_{23} \cdot I_1 = 12 \cdot 5 = 60 \text{ В}.$$

Токи в параллельных ветвях:

$$I_2 = U_{ab} / R_2 = 60 / 20 = 3 \text{ A};$$

$$I_3 = U_{ab} / R_3 = 60 / 30 = 2 \text{ A}.$$

Баланс мощностей:

$$P_{ист} = I_1 \cdot U = 5 \cdot 120 = 600 \text{ Вт};$$

$$P_{номр} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 = 5^2 \cdot 12 + 3^2 \cdot 20 + 2^2 \cdot 30 = 600 \text{ Вт}.$$

Практическая работа № 6.

Тема 1.2. Расчёт электрических цепей постоянного тока.

Расчёт сложных электрических цепей.

Цель работы: Расчет сложных электрических цепей.

Теоретическая часть:

Законы Ома и Кирхгофа используют, как правило, при расчете относительно простых электрических цепей с небольшим числом контуров, хотя принципиально с их помощью можно рассчитать сколь угодно сложные электрические цепи.

Расчет сложных резистивных цепей, т. е. цепей, не сводящихся к последовательному или параллельному соединению элементов, основывается на использовании законов

Кирхгофа. Если цепь имеет N_{Σ} элементов, то для нее по 1-му и 2-му законам Кирхгофа можно составить N_{Σ} линейно независимых уравнений. Используя закон Ома, эти уравнения можно записать относительно искомых токов ветвей или относительно искомых напряжений на зажимах элементов. В методе токов ветвей (элементов) неизвестными, подлежащими определению, являются токи в элементах цепи. Существо метода рассмотрим на примере цепи, называемой удлинителем (схема рис. 1.4).

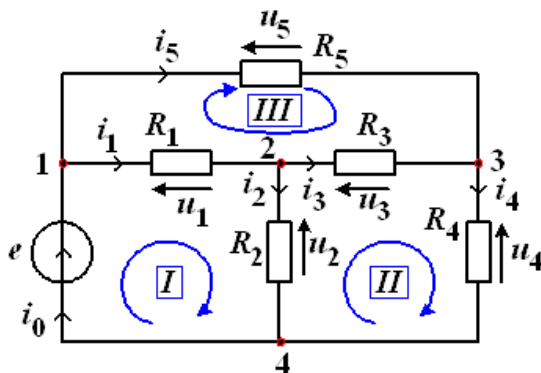


Рис. 1. 4.

Зададим (произвольно) направления отсчета токов в каждом элементе. Направления отсчета напряжений на зажимах каждого элемента выберем так, чтобы для всех элементов получить согласную систему отсчетов.

Для схемы, приведенной на рисунке 1.4, по первому закону Кирхгофа, можно составить соответственно для узлов 1, 2 и 3 следующие три независимые уравнения:

$$1) i_0 - i_1 - i_5 = 0$$

$$2) i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

$$3) i_3 - i_4 + i_5 = 0.$$

По второму закону Кирхгофа можно составить три независимых уравнения, так как:

$$N_{\text{НУ}} = N_{\Sigma} - N_y + 1 = 6 - 4 + 1 = 3.$$

Выберем контуры так, как показано на рисунке 1.4. По второму закону Кирхгофа:

$$4) e - u_1 - u_2 = 0$$

$$5) u_2 - u_3 - u_4 = 0$$

$$6) u_1 - u_5 - u_3 = 0.$$

Учитывая, что напряжение на любом резисторе $u_k = R_k i_k$ и перенеся известную величину в правую часть, получим:

$$4) R_1 i_1 + R_2 i_2 = e$$

$$5) R_2 i_2 - R_3 i_3 - R_4 i_4 = 0$$

$$6) R_1 i_1 + R_3 i_3 - R_5 i_5 = 0$$

В результате получено шесть линейно независимых уравнений относительно такого же количества неизвестных токов. Таким образом, система разрешима, и можно найти все токи и по ним вычислить напряжения на резисторах.

Если в цепи имеется источник тока, то в системе уравнений неизвестным будет напряжение на зажимах этого источника, а не ток через источник, поскольку он известен и равен задающему току источника. Общее число неизвестных при этом сохраняется тем же.

Число уравнений, которое необходимо составлять для расчета цепи рассматриваемым методом, равно числу элементов цепи. Поэтому метод токов ветвей используется редко. Можно существенно уменьшить число необходимых уравнений, если применить другие методы анализа цепи.

При расчете электрических цепей в большинстве случаев известны параметры источников ЭДС или напряжения, сопротивления элементов электрической цепи, и задача сводится к определению токов в ветвях цепи. Зная токи, можно найти напряжения на элементах цепи, мощность, потребляемую отдельными элементами и всей цепью в целом, мощность источников питания и др.

Электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 1.25, состоит из одного источника питания, имеющего ЭДС E и внутреннее сопротивление r_0 , и резисторов R_1 , R_2 , R_3 , подключенных к источнику по смешанной схеме. Операции расчета такой схемы рекомендуется производить в определенной последовательности.

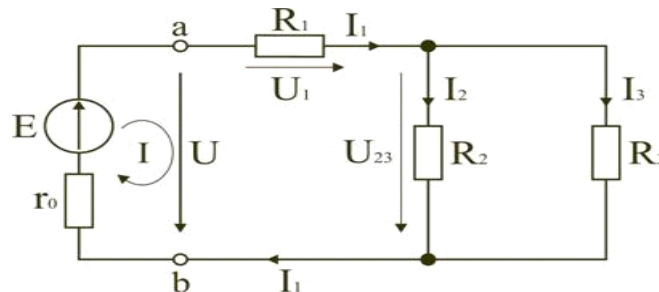


Рис. 1.25

1. Обозначение токов и напряжений на участках цепи.

Резистор R_1 включен последовательно с источником, поэтому ток I_1 для них будет общим, токи в резисторах R_2 и R_3 обозначим соответственно I_2 и I_3 . Аналогично обозначим напряжения на участках цепи.

2. Расчет эквивалентного сопротивления цепи.

Резисторы R_2 и R_3 включены по параллельной схеме и заменяются согласно (1.7) эквивалентным сопротивлением:

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

В результате цепь на рис. 1.25 преобразуется в цепь с последовательно соединенными резисторами R_1 , R_{23} и r_0 . Тогда эквивалентное сопротивление всей цепи запишется в виде:

$$R_3 = r_0 + R_1 + R_{23}$$

3. Расчет тока в цепи источника. Ток I_1 определим по закону Ома (1.2):

$$I_1 = U/R_3$$

4. Расчет напряжений на участках цепи. По закону Ома (1.1) определим величины напряжений:

$$U_1 = I_1 R_1; U_{23} = I_1 R_{23}$$

Напряжение U на зажимах ab источника питания определим по второму закону Кирхгофа (1.4) для контура I (рис. 1.25):

$$E = I_1 r_0 + U; U = E - I_1 r_0.$$

5. Расчет токов и мощностей для всех участков цепи. Зная величину напряжения U_{23} , определим по закону Ома токи в резисторах R_2 и R_3 :

$$I_2 = \frac{U_{23}}{R_2}; I_3 = \frac{U_{23}}{R_3}.$$

По формуле (1.8) определим величину активной электрической мощности, отдаваемой источником питания потребителям электрической энергии:

$$P = EI_1.$$

В элементах схемы расходуются активные мощности:

$$P_1 = I_1^2 R_1; P_2 = I_2^2 R_2; P_3 = I_3^2 R_3.$$

На внутреннем сопротивлении r_0 источника питания расходуются часть электрической мощности, отдаваемой источником. Эту мощность называют мощностью потерь ΔP :

$$\Delta P = I_1^2 r_0.$$

6. Проверка правильности расчетов. Эта проверка производится составлением уравнения баланса мощностей (1.8): мощность, отдаваемая источником питания, должна быть равна сумме мощностей, расходуемых в резистивных элементах схемы:

$$EI_1 = I_1^2 (r_0 + R_1) + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3.$$

Кроме того, правильность вычисления токов можно проверить, составив уравнение по первому закону Кирхгофа (1.3) для узла схемы:

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

Расчет разветвленной электрической цепи с несколькими источниками питания

Основным методом расчета является метод непосредственного применения первого и второго законов Кирхгофа.

В качестве примера рассмотрим цепь, схема которой приведена на рис. 1.26. Схема цепи содержит 6 ветвей ($m=6$) и 4 узла: a, b, c, d ($n=4$). По каждой ветви проходит свой ток, следовательно число неизвестных токов равно числу ветвей, и для определения токов необходимо составить m уравнений. При этом по первому закону Кирхгофа (1.3) составляют уравнения для $(n-1)$ узлов. Недостающие $m-(n-1)$ уравнения получают по второму закону Кирхгофа (1.4), составляя их для $m-(n-1)$ взаимно независимых контуров. Рекомендуется выполнять операции расчета в определенной последовательности.

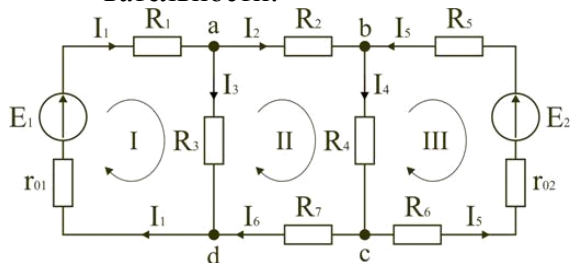


Рис. 1.26

1. Обозначение токов во всех ветвях. Направление токов выбираем произвольно, но в цепях с источниками ЭДС рекомендуется, чтобы направление токов совпадало с направлением ЭДС.

2. Составление уравнений по первому закону Кирхгофа. Выбираем $4-1=3$ узла (a, b, c) и для них записываем уравнения:

$$\text{узел } a: I_1 - I_2 - I_3 = 0;$$

узел b: $I_2 - I_4 + I_5 = 0$;

узел c: $I_4 - I_5 + I_6 = 0$.

3. Составление уравнений по второму закону Кирхгофа. Необходимо составить $6-3=3$ уравнения. В схеме на рис. 1.26 выбираем контура I, II, III и для них записываем уравнения:

контур I: $E_1 = I_1(r_{01} + R_1) + I_3R_3$;

контур II: $0 = I_2R_2 + I_4R_4 + I_6R_7 - I_3R_3$;

контур III: $-E_2 = -I_5(r_{02} + R_5 + R_6) - I_4R_4$.

4. Решение полученной системы уравнений и анализ результатов. Полученная система из шести уравнений решается известными математическими методами. Если в результате расчетов численное значение тока получено со знаком «минус», это означает, что реальное направление тока данной ветви противоположно принятому в начале расчета. Если в ветвях с ЭДС токи совпадают по направлению с ЭДС, то данные элементы работают в режиме источников, отдавая энергию в схему. В тех ветвях, где направления тока и ЭДС не совпадают, источники ЭДС работают в режиме потребителей.

5. Проверка правильности расчетов. Для проверки правильности произведенных расчетов можно на основании законов Кирхгофа написать уравнения для узлов и контуров схемы, которые не использовались при составлении исходной системы уравнений:

узел d: $I_3 + I_6 - I_1 = 0$

внешний контур схемы: $E_1 - E_2 = I_1(r_{01} + R_1) + I_2R_2 - I_5(r_{02} + R_5 + R_6) + I_6R_7$.

Независимой проверкой является составление уравнения баланса мощностей (1.8) с учетом режимов работы элементов схемы с ЭДС:

$$E_1I_1 + E_2I_5 = I_1^2(r_{01} + R_1) + I_2^2R_2 + I_3^2R_3 + I_4^2R_4 + I_5^2(r_{02} + R_5 + R_6) + I_6^2R_7.$$

Если активная мощность, поставляемая источниками питания, равна по величине активной мощности, израсходованной в пассивных элементах электрической цепи, то правильность расчетов подтверждена.

Практическая работа № 7.

Тема 1. 3. Цепи синусоидального тока.

Измерение работы и мощности электрической лампы

Цель работы: измерить работу и мощность электрического тока, потребляемого лампочкой, и сравнить ее с номинальной.

Перечень используемого оборудования: мультиметр M890G, адаптер, лампочка накаливания МН-6,3 В — 0,3 А, соединительные провода.

Теоретическая часть:

Электрическая энергия, как и всякий другой вид энергии, проявляется также при совершении работы. На практике принято считать, что энергией обладает электрический ток внешней цепи. Обладая энергией, он совершает работу, которая сводится к преодолению сопротивления приемников (потребителей). Электрическая энергия при этом превращается во внутреннюю (тепловую). Для вычисления работы или потребляемой энергии пользуются формулой

Работа тока на участке цепи численно равна произведению напряжения U на концах этого участка на силу тока I и на время t , в течение которого совершалась работа.

Активная, реактивная и полная мощности

Известно, что мощность в электрической цепи определяется произведением тока на напряжение. Именно эта формулировка позволяет определить мгновенное значение мощности, определённое в данный момент времени:

$$p = i u.$$

Активной мощностью называют среднее значение мощности за полный период:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt.$$

Если выполнить интегрирование произведения синусоидального входного напряжения и тока в цепи, учитывая при этом фазовую задержку, то можно прийти к выражению для активной мощности:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi,$$

где U и I - действующие значения напряжения и тока в цепи. Активная мощность указывает на необратимые преобразования электроэнергии в данной цепи в другие виды энергии, например, в тепло или механическую энергию. Для электрической цепи можно определить номинальные действующие значения напряжения и тока, обусловленные качеством изоляции, сечением используемых проводов. Тогда максимальная достижимая активная мощность будет зависеть только от множителя $\cos \varphi$, который называют коэффициентом мощности. Максимальное приближение к единице этого коэффициента достигают рациональным конструированием оборудования, например, электродвигателя или трансформатора.

Полная мощность определяется произведением:

$$S = U \cdot I.$$

Эта мощность определяет максимально достижимое значение активной мощности. В электрических цепях переменного тока вводят понятие и реактивной мощности, которую определяют из равенства:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi.$$

Физическая величина, показывающая, какую работу совершает электрический ток за единицу времени, называется *мощностью*. Мощность электрического тока P численно равна отношению работы A ко времени t : $P = A/t = IU$.

Единица измерения мощности называется *ваттом* (Вт): $1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}$.

Применяют также кратные единицы мощности:

1 гектоватт = 1 гВт = 100 Вт,

1 киловатт = 1 кВт = 1000 Вт,

1 мегаватт = 1 МВт = 1 000 000 Вт.

Единица измерения работы называется *джоулем* (Дж):

$1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с}$

Применяют также и другие единицы работы:

1 гектоватт · час = 1 гВт · ч = 100 Вт · ч = 360 000 Дж,

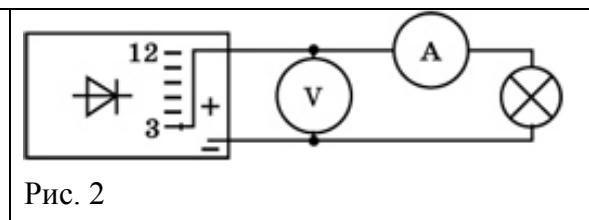
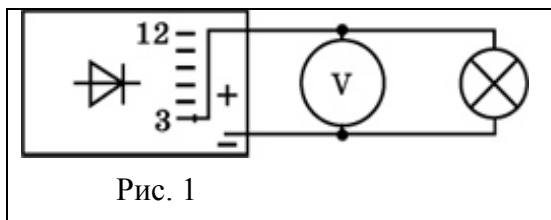
1 киловатт · час = 1 кВт · ч = 1000 Вт · ч = 3 600 000 Дж.

Работу электрического тока измеряют счетчиком электрической энергии, мощность тока — ваттметром или с помощью амперметра и вольтметра.

Каждый приемник электрической энергии характеризуется не только номинальным напряжением, но и номинальной мощностью. Числовые значения этих величин всегда указывают на приемниках, а у сетевых ламп накаливания — на их баллонах.

Ход работы:

- Соберите электрическую цепь по схеме на рисунке 2. Если мультиметр один, то соберите вначале электрическую цепь по схеме на рисунке 1 и измерьте напряжение на лампочке при каждом положении переключателя на адаптере. Далее мультиметр переведите в режим работы амперметра, соберите электрическую цепь по схеме на рисунке 29 и измерьте силу тока при каждом фиксированном положении переключателя на адаптере.



2. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

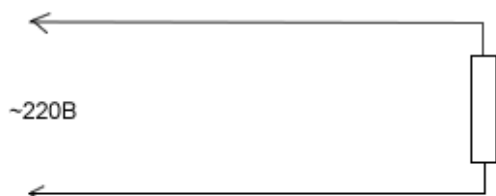
Положение переключателя на адаптере	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	12,0
Напряжение U на лампочке, В						
Сила тока I в лампочке, А						
Мощность P тока, Вт						
Работа тока A за время, равное 10 с, Дж						

3. Перепишите с цоколя лампочки ее паспортные данные: напряжение и силу тока. Подсчитайте номинальную мощность лампочки. Запишите, чем отличается горение лампочки, когда она работает не в номинальном режиме.

Контрольные вопросы

- Какое внутреннее сопротивление должен иметь источник, чтобы КПД был не менее 91%, если сопротивление нагрузки составляет 2 кОм?
- Сила тока в цепи.
- Сопротивление и электрическая проводимость с точки зрения электронной теории.
- Закон Ома для участка цепи.

Задача 1. На улице установлен щиток со счетчиком. Необходимо из имеющихся в наличии резисторов ПЭВ-100 номиналами 400 Ом и 620 Ом использовать те, которые смогут обогревать щиток при подаче на них напряжения 220 В.



Решение: составим схему питания обогревательного резистора (рис. 6). Имеющаяся мощность резистора - 100 Вт. Поэтому при нагревании выделяющаяся на нем мощность не должна превышать этого значения. Мощность рассчитывается по формуле $P = U \cdot I$, где U - напряжение питания, I - проходящий через резистор ток.

По закону Ома найдем ток, проходящий через резистор по формуле $I = U/R$. Ток через резистор номиналом 400 Ом составит: $I_1 = 220/400 = 0,55$ А. Мощность, которая на нем выделяется $P = U \cdot I_1 = 220 \cdot 0,55 = 121$ Вт. Этот резистор не подойдет, т.к. реально выделяемая расчетная мощность 121 Вт превысит его максимально заданную 100 Вт.

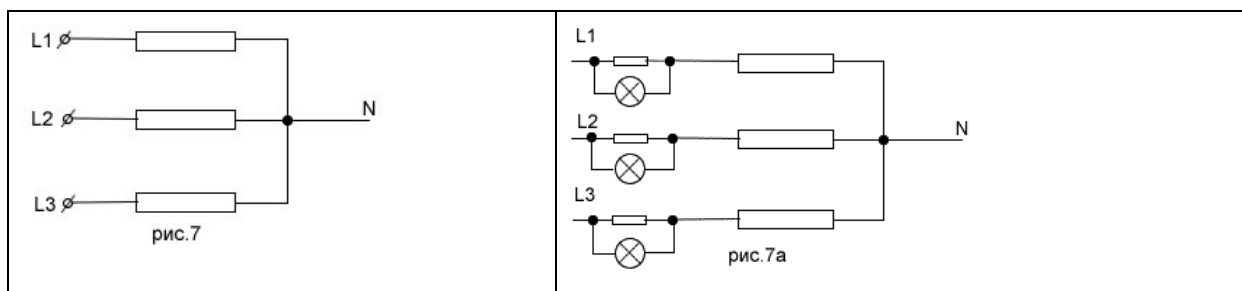
Рассчитаем ток через сопротивление номиналом 620 Ом. Ток $I_2 = U/R = 220/620 = 0,355$ А. Тогда выделяемая мощность будет $P = U \cdot I_2 = 220 \cdot 0,355 = 78,1$ Вт. Это сопротивление подойдет - расчетная мощность меньше максимально допустимой.

P.S. Есть более простая в данном случае формула, позволяющая обойтись и без вычисления

тока - $P = \frac{U^2}{R}$. Проверьте самостоятельно. Мощность также можно рассчитывать и по формуле

$P = I^2 \cdot R$. Тогда $P_1 = 0,55 \cdot 0,55 \cdot 400 = 121$ Вт; $P_2 = 0,355 \cdot 0,355 \cdot 620 = 78,1$ Вт.

Задача 2. Имеется небольшой водонагреватель для 3-х фазной цепи. Каждый тэн мощностью 1 кВт и напряжением 220 В. Необходимо на щитке управления смонтировать три лампочки напряжением 1,5 В, которые контролировали бы исправность каждого из трех тэнов.



Решение: составим упрощенную схему питания тэнов(рис.7). Чтобы контролировать цепь питания любого тэна, необходимо в цепь его питания последовательно с ним включить такое сопротивление, на зажимах которого образовывалось бы напряжение величиной 1,5В. С него мы и возьмем напряжение на индикаторную лампочку. Величина этого сопротивления определяется, согласно закона Ома: $R1 = U1/I$, где I - величина тока в цепи, $R1$ - величина искомого сопротивления, $U1$ - напряжение для лампочки величиной 1,5В. При перегорании тэна цепь питания его лампы оборвется и она погаснет. Рассматриваемая идея представлена на рис.7а. Для упрощения мы пренебрегли полным сопротивлением цепи (исключили маленькое сопротивление), учтя только сопротивление тэна. Получим ток в цепи $I = P/U = 1000\text{Вт}/220\text{В} = 4,55 \text{ А}$. Тогда величина дополнительного сопротивления составит: $R1 = U1/I = 1,5/4,55 = 0,33 \text{ Ом}$. Возьмем, к примеру, нихромовую проволоку диаметром 1,5мм²(именно такое сечение выдержит такой ток по справочникам - это надо учитывать). Рассчитаем ее необходимую длину по формуле $R = \rho \frac{L}{S}$, где ρ - удельное сопротивление металла (для нихрома 1,1Ом*кв. мм/м), S - сечение, L - необходимая длина. Откуда находим $L = \frac{RS}{\rho} = 0,33 \cdot 1,5/1,1 = 0,45\text{м}$. Если взять фехраль ($\rho = 1,3\text{Ом} \cdot \text{кв. мм} / \text{м}$); необходимое сечение 1кв.мм), то длина проволоки составит $L = 0,33 \cdot 1/1,3 = 0,25\text{м}$.

Практическая работа № 8.

Тема 2.1. Электрические сигналы.

Осциллограф как средство наблюдения и измерения сигналов.

Цель работы: Формирование навыков работы с осциллографом

Теоретическая часть:

Осциллограф как средство наблюдения и измерения сигналов

Для наблюдения формы сигналов и измерения амплитудных и временных параметров сигналов используется осциллограф. Упрощенная структурная схема двухканального осциллографа предложена на рисунке 6.

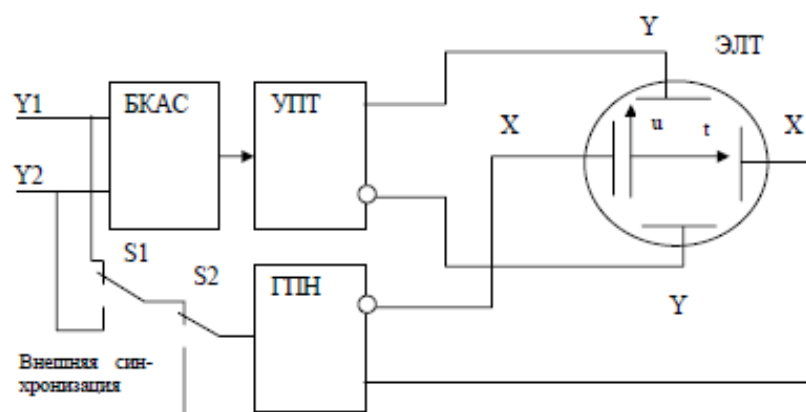


Рисунок 1

Осциллограф состоит из БКАС - блок коммутации аналогового сигнала, УПТ - усилителя постоянного тока с прямым и инвертирующим полярность выходами, ГПН - генератор пилообразного сигнала, ЭЛТ- электронно-лучевая трубка, с пластинами горизонтального отклонения луча X и пластинами вертикального отклонения луча Y, переключателя выбора сигнала

внутренней синхронизации S1, переключателя выбора режима синхронизации S2. ЭЛТ содержит пластины вертикального отклонения луча Y и пластины горизонтального отклонения луча X.

Обычно по горизонтали формируется ось времени t , а по вертикали — ось напряжения u . БКАС обеспечивает поочерёдный вывод на экран осциллографа одного из входных аналоговых сигналов Y1, Y2, которые наблюдаются оператором одновременно на экране благодаря высокой скорости коммутации. УПТ усиливает (масштаб по вертикали) входные сигналы до требуемого уровня, который позволяет получить на экране необходимые отклонения по вертикали. Масштаб по вертикали выбирается по каждому каналу индивидуально с помощью соответствующих переключателей. УПТ содержит в своём составе линию задержки сигнала на небольшой интервал времени (десятки наносекунд). БКАС и УПТ составляют канал вертикального отклонения луча.

Для формирования оси времени используется ГПН. В момент прихода определённого фронта импульсного сигнала или в момент преодоления входным сигналом определённого уровня напряжения ГПН запускается и вырабатывает пилообразное напряжение (осуществляется синхронизация осциллографа). Это пилообразное напряжение вызывает смещение луча на экране слева направо с постоянной скоростью развёртки. Скорость развёртки может выбираться с помощью специальных переключателей временного масштаба (масштаб по горизонтали).

Для удобства измерения временных и амплитудных параметров наблюдаемых сигналов на экране ЭЛТ присутствует специальная сетка.

Синхронизация осциллографа, которая подстраивается с помощью специальной ручки, позволяет получить устойчивое изображение на экране. Различают синхронизацию внешнюю и внутреннюю.

При внешней синхронизации запуск ГПН осуществляется от сигнала, подаваемого на специальный вход «Внешняя синхронизация», который часто обозначают как вход X. Этот режим позволяет наблюдать взаимное расположение поочерёдно подаваемых на вход вертикального отклонения луча сигналов.

Именно в этом режиме легко осциллографом измерить задержку одного сигнала относительно другого. При этом режиме переключатель S2 должен стоять в нижнем положении.

Для получения устойчивого изображения целесообразно в качестве сигнала синхронизации из наблюдаемых сигналов выбрать сигнал с наименьшей частотой.

При внутренней синхронизации запуск ГПН осуществляется от наблюдаемого сигнала. При этом режиме переключатель S2 должен стоять в верхнем положении. В нашем случае переключатель S1 позволяет выбирать сигнал, от которого будет производиться синхронизация. Наличие двух каналов позволяет одновременно наблюдать два сигнала при синхронизации от одного из них (с меньшей частотой), что даёт возможность наблюдать и измерить их взаимное расположение во времени. Пример наблюдаемых на экране сигналов с указанием их параметров предложен на рисунке 5.

Чтобы такая картина наблюдалась на экране двухканального осциллографа, можно использовать или внутреннюю синхронизацию от нарастающего фронта сигнала Sign.1, или использовать внешнюю синхронизацию от того же сигнала. Взаимное расположение сигналов по вертикали можно достичь применением ручек управления смещением по вертикали по каждому каналу.

Вакуумная электроника — это раздел электроники, включающий исследования взаимодействия потоков свободных электронов с электрическими и магнитными полями в вакууме, а также методы создания электронных приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется. К важнейшим направлениям исследований в области вакуумной электроники относятся: электронная эмиссия (в частности, термо- и фотоэлектронная эмиссия); формирование потока электронов и/или ионов и управление этими потоками; формирование электромагнитных полей с помощью устройств ввода и вывода энергии; физика и техника высокого вакуума и др.

Основные направления развития вакуумной электроники связаны с созданием электровакуумных приборов следующих видов: электронных ламп (диодов, триодов, тетродов и т. д.); электровакуумных приборов сверхвысокой частоты (например магнетронов, клистронов, ламп бегущей и обратной волны); электронно-лучевых и фотоэлектронных приборов (например кинескопов, видиконов, электронно-оптических преобразователей, фотоэлектронных умножителей); газоразрядных приборов (например тиратронов, газоразрядных индикаторов).

Следует отметить, что за последние годы прогресс в области полупроводниковой электроники позволил во многих случаях (на 85-90%) заменить электровакуумные приборы полупроводниковыми. Однако в ряде случаев, например, электронные лампы еще не могут быть заменены полупроводниковыми приборами из-за меньшего температурного рабочего предела, меньшей стабильности, меньшего входного сопротивления и т. п.

А осциллографические и рентгеновские трубки, кинескопы практически не имеют полупроводниковых аналогов.

Электронное поле, действуя на электрон, изменяет скорость, кинетическую энергию и направление движения. Магнитное поле изменяет только направление движения электрона.

Источником электронов в электронных лампах служит металлический электрод — катод, с поверхности которого электроны выходят в окружающую среду. Даже при нормальной температуре и при отсутствии внешнего электрического поля некоторая часть электронов, обладающая наибольшей энергией, выходит за пределы металла, образуя электронный слой (облако) вокруг катода, оставляя на поверхности катода слой положительных ионов, т. е. атомов, лишившихся электронов. Между этими двумя слоями образуются некоторая разность потенциалов, называемая *потенциальным барьером*, препятствующая выходу электронов за пределы катода

Для выхода электронов из катода необходимо сообщить им энергию, равную работе по преодолению потенциального барьера, названной *работой выхода A* . Работа выхода измеряется в электрон-вольтах [эВ]. Очень часто в литературе работа выхода A обозначается как $e\varphi_0$. Работа выхода измерена довольно точно для многих веществ. Оказалось, что минимальное значение работы выхода имеют щелочные и щелочноземельные металлы (например, цезий Cs имеет $e\varphi_0 = 1,81$ эВ, барий Ba $e\varphi_0 = 2,52$ эВ), а максимальные значения у таких металлов, как вольфрам W — 4,63 эВ, молибден Mo — 4,16 эВ, платина Pt; — 5,32 эВ. Все перечисленные материалы используются для изготовления электродов электронных приборов. Отношение работы выхода A к заряду электрона e называется потенциалом выхода φ_0 т. е.

$$\varphi_0 = A/e$$

Электронной эмиссией называется явление испускания электронов поверхностью катода в результате различного рода внешних воздействий.

В зависимости от способа сообщения электрону дополнительной энергии, необходимой для выхода из катода, различают следующие основные виды электронной эмиссии.

Термоэлектронная эмиссия происходит при разогреве поверхности катода, вследствие чего увеличивается количество электронов, способных преодолеть потенциальный барьер. Этот вид эмиссии применяют в электронных лампах с катодом прямого или косвенного нагрева

Автоэлектронная эмиссия — эмиссия электронов, обусловленная действием электрического поля у поверхности электрода. Электроны металла дополнительной энергии не получают, но за счет изменения формы потенциального барьера они приобретают способность его преодолевать. Автоэлектронная эмиссия используется в электровакуумных приборах с холодным катодом, т. е. катодом без специального подогрева.

Вторичная электронная эмиссия происходит при бомбардировке первичными электронами поверхности катода в вакууме. При этом первичные электроны должны обладать энергией, значительно большей работой выхода. Тогда первичный электрон может передать свою энергию не одному, а нескольким электронам, поэтому число вторичных электронов может быть больше числа первичных. Этот вид эмиссии применяют в фотоэлектронных умножителях.

Фотоэлектронная эмиссия происходит при освещении поверхности катода. Поглощая энергию квантов света, электроны катода совершают работу выхода. Это явление называют еще фотоэффектом и используют в фотоэлектронных приборах

Электронно-лучевые приборы (ЭЛП) — широкий класс электровакуумных приборов, отличительной особенностью которых является использование потока электронов, сфокусированных в узкий пучок (электронный луч), управляемый по интенсивности и по положению в пространстве и взаимодействующий с мишенью (экраном) прибора.

В зависимости от физических свойств мишени ЭЛП осуществляют различные преобразования информации, представленной в форме электрических или световых сигналов.

ЭЛП, в которых отклоняемый по определенному закону электронный пучок вызывает локальное свечение экрана или меняет оптические свойства мишени, преобразуют временную последовательность электрических сигналов в видимое двухмерное изображение, и составляют группу **электроннолучевых приборов отображения информации** или приемных электронно-лучевых приборов. Основными представителями приборов этой группы являются: **кинескоп** — главный элемент телевизионных приемников; **индикаторный** электронно-лучевой прибор, отображающий данные в радиолокационных системах, дисплеях ЭВМ и т. п.; **осциллографический** электронно-лучевой прибор, широко используемый в измерительной технике. Информация отображается либо непосредственно на экране электроннолучевого прибора, либо при использовании проекционных электронно-лучевых приборов на отдельном отражающем или просветном экране. Запоминающие электронно-лучевые приборы с видимым изображением обладают способностью длительное время воспроизводить однократно записанную информацию.

Электронно-лучевые приборы в основном бывают двух типов: с электростатическим и электромагнитным отклонением луча.

Электронно-лучевые приборы с электростатическим отклонением луча. Устройство ЭЛП с электростатическим отклонением луча показано на рис. 1.

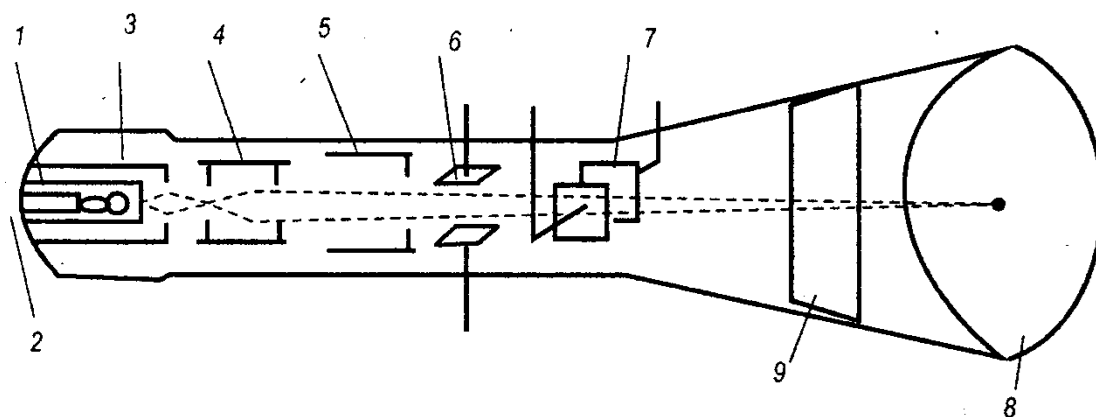


Рисунок 2. Схема устройства электронно-лучевых приборов с электростатическим отклонением луча

Стеклянный баллон ЭЛП имеет форму колбы, в которой создан глубокий вакуум. Электронная пушка (электронный прожектор) состоит из катода 1 косвенного подогрева с нитью накала 2, управляющего электрода (модулятор) 3, двух цилиндрических анодов (4 — фокусирующий и 5 — ускоряющий), фокусирующих электронный луч на экране 8.

Катод 1 представляет собой никелевый цилиндр, внутри которого расположен вольфрамовый подогреватель 2. На торцевой части катода с наружной стороны нанесен оксидный слой, что обеспечивает эмиссию электронов в одну сторону. Управляющий электрод 3, окружающий катод, имеет в основании небольшое отверстие (1...3 мм) и находится под небольшим отрицательным потенциалом относительно катода.

Под действием электронного, поля между катодом и управляющим электродом на электрон действует сила F , в результате электроны большей частью проходят в отверстие управляющего электрода 3 и далее попадают узким расходящимся пучком в зону действия анодов 4, 5. Меняя потенциал управляющего электрода, регулируют количество электронов, вылетающих из его отверстия, т. е. регулируют яркость изображения на экране 8.

Вылетев из отверстия управляющего электрода, электроны снова отклоняются от оси луча. Для последующей фокусировки луча служат аноды 4 и 5. На оба анода подается высокое положительное напряжение (200-500 В на первый анод, 1000-2000 В на второй), т. е. на второй в 5 раз больше, чем на первый. Узкое отверстие в середине первого анода 4 вырезает центральную часть электронного пучка, а наличие поля между анодами ускоряет и сжимает этот пучок к оси луча в направлении экрана.

Экран ЭЛП покрыт тонким слоем вещества специального состава (*люминофора*), который светится под действием быстро летящих электронов, т. е. когда сфокусированный луч попадает в какую-либо точку экрана, эта точка начинает светиться. В качестве люминофоров для экранов ЭЛП используют оксиды цинка, бериллиевого цинка, смеси сульфата цинка с сульфатом кадмия и др. Они определяют зачастую цвет свечения. Например, виллемит дает зеленое свечение, сульфид цинка — светло-синее, окись цинка — фиолетовое. Эти материалы обладают также свойством послесвечения, т. е. продолжают светиться некоторое время после прекращения ударов электронов.

Электроны, попадающие на экран, вызывают его свечение за счет отдачи энергии в виде светящегося потока диаметром меньше одного миллиметра, и, кроме того, выбивают из экрана вторичные электроны, число которых может быть больше числа первичных. Для отвода вторичных электронов конусообразная часть баллона покрывается слоем аквадага 9 (аквадаг — коллоидный раствор графита в жидком стекле). Обычно слой аквадага соединяется со вторым анодом и имеет тот же потенциал.

Испускаемый электронной пушкой пучок электронов после анодов проходит сначала между *вертикально отклоняющими* (ВО) пластинами 6, а затем между *горизонтально отклоняющими* (ГО) пластинами 7. Подача, например, положительного напряжения на верхнюю пластину ВО вызывает отклонение электронов вверх на d мм. Перемена знака напряжения вызывает изменение направления отклонения.

Отношение смещения d к вызывающему его напряжению U называется *чувствительностью* электронно-лучевого прибора S

$$S = \frac{d}{U}$$

Подобное же действие оказывает и напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах с той лишь разницей, что чувствительность в горизонтальном направлении несколько меньше из-за более близкого расположения пластин к экрану. Таким образом, изменяя напряжение на вертикальных и горизонтальных отклоняющих пластинах и его полярность, можно менять угол и направление смещения электронного луча как по вертикали, так и по горизонтали, следовательно, и точка свечения экрана будет перемещаться как по вертикали, так и по горизонтали.

Кроме описанного ЭЛП с одним лучом в измерительной практике применяются приборы с двумя и более лучами, в которых в одном баллоне с общим экраном совмещено несколько систем однолучевого прибора.

Примером ЭЛП, использующего электронное отклонение луча, является осциллографический ЭЛП (или просто осциллограф), предназначенный для наблюдения, записи, измерения и контроля периодически изменяющихся во времени электрических параметров (напряжения, тока и др.). Для получения кривой исследуемого напряжения U оно подводится к вертикально отклоняющим пластинам. К горизонтально отклоняющим пластинам подводится напряжение развертки U_p , имеющее пилообразную форму, от специального генератора, смонтированного внутри осциллографа.

Ход работы:

1. Ознакомиться с описанием работы упрощённой структурной схемы двухканального осциллографа и электронно-лучевого прибора с электростатическим отклонением луча.
2. Ответить на вопросы
 1. К какому типу приборов относятся электронно-лучевые приборы.
 2. Как устроена электронно-лучевые приборы с электростатическим управлением.
 3. Какие явления содействуют испусканию электронов с поверхности катода и их разновидности.
 4. Описать работу упрощённой структурной схемы двухканального осциллографа.

Практическая работа № 9.

Тема 3.1. Элементная база электронных устройств.

Исследование полупроводниковых выпрямительных диодов

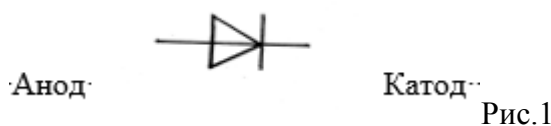
Цель работы: исследование принципа действия диодов. Получение практических навыков в анализе и оценке их работоспособности.

Перечень используемого оборудования

Измерительный стенд, модуль «Полупроводниковый диод», образцы диодов, ампервольтметр.

Теоретическая часть:

Выпрямительными диодами называются электронные приборы, основным назначением которых является выпрямление переменного тока. Условное графическое обозначение выпрямительных диодов (УГО) приведено на рис. 1.



Полупроводниковый диод содержит один p - n -переход и имеет два вывода от p и n -областей. Наиболее распространены и обширны две группы диодов - выпрямительные и импульсные, называемые в некоторых справочниках универсальными.

К выпрямительным диодам относят плоскостные двухэлектродные полупроводниковые приборы, выполненные на кремниевой или германиевой основе, а также селеновые и медно-закисные приборы.

Работа выпрямительных диодов основана на использовании выпрямительных (вентильных) свойств электронно-дырочного перехода. Выпрямительные диоды, в которых используется основное свойство p - n -перехода - его односторонняя электропроводность, применяют главным образом для выпрямления переменного тока в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц.

Импульсные диоды примеряют в импульсных режимах работы.

Свойства выпрямительных диодов характеризуются вольтамперными характеристиками (ВАХ) и параметрами. На рис. 2а представлены вольтамперные характеристики кремниевого и германиевого диодов.

В зависимости от площади p - n -перехода и эффективности отвода теплоты выпрямительные диоды подразделяются на диоды малой мощности, рассчитанные для получения выпрямленного тока не более 0,3 А, средней с токами от 0,3 до 10А и большой, у которых выпрямленный ток превышает 10А.

Поскольку выпрямительные диоды обладают сравнительно большой емкостью - порядка нескольких десятков пикофард, а также большим временем восстановления обратного сопротивления, их практическое применение ограничивается диапазоном частот (максимальная частота не превышает 100 кГц).

В качестве исходного материала при производстве германиевых и кремниевых выпрямительных диодов используют соответственно германий и кремний с электронной (п-типа) электропроводностью, поскольку подвижность электронов, как основных носителей заряда, в 2—2,5 раза больше подвижности дырок.

Исходный материал кристалла образует базовую область диода (катод), а акцепторная примесь (индий, алюминий, бор) - эмиттерную область (анод). От базовой и эмиттерной областей исходят внешние выводы.

Базовую область припаивают к кристаллодержателю. Для лучшего теплоотвода в диодах средней и большой мощности применяют радиаторы

Конструкция плоскостных диодов малой мощности представлена на рис.2б. Плоскостные диоды выполняют в виде пластинки 7 с электронной проводимостью, укрепленной на металлическом держателе 8, представляющем собой нижний контакт р-п-перехода.

В пластинке 7 из германия или кремния создается плоский по форме электронно-дырочный переход 9. В германиевых диодах для получения электронно-дырочного перехода 9 в пластинку из германия с электронной проводимостью добавляют каплю расплавленного индия, а затем нагревают. При нагревании плавящийся индий диффундирует в основной полупроводник, образуя в нем слой 10 с дырочной проводимостью.

Верхний контакт представляет массивную деталь 6, способную пропускать значительные токи большого по площади перехода. Германиевая пластинка 7 с р-п-переходом помещается в металлический корпус 5, герметизированный сверху стеклянным изолятором 4 с трубкой 3, в которой помещены внутренний 2 и наружный 1 выводы.

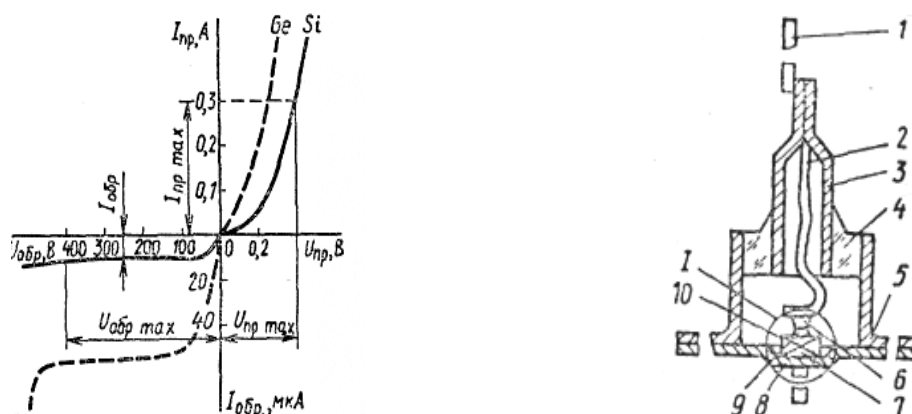


Рис.2 ВАХ диодов (а) и их конструкция (б)

Прямую ветвь ВАХ снимают, включив испытуемый диод в схему, показанную на рис. 1.2, а. Прямой ток через диод I_{np} задается генератором тока ГТ, характерной особенностью которого является слабая зависимость тока от сопротивления нагрузки. Плавно увеличивая от нуля ток генератора ГТ, измеряют прямое напряжение U_{np} диода для ряда значений прямого тока I_{np} .

Обратную ветвь ВАХ снимают, включив диод в схему, показанную на рис. 1.2, б. Здесь в качестве источника используется генератор напряжения ГН2. Плавно увеличивая от нуля выходное напряжение ГН2, измеряют обратный ток $I_{обр}$ диода для ряда значений обратного напряжения $U_{обр}$.

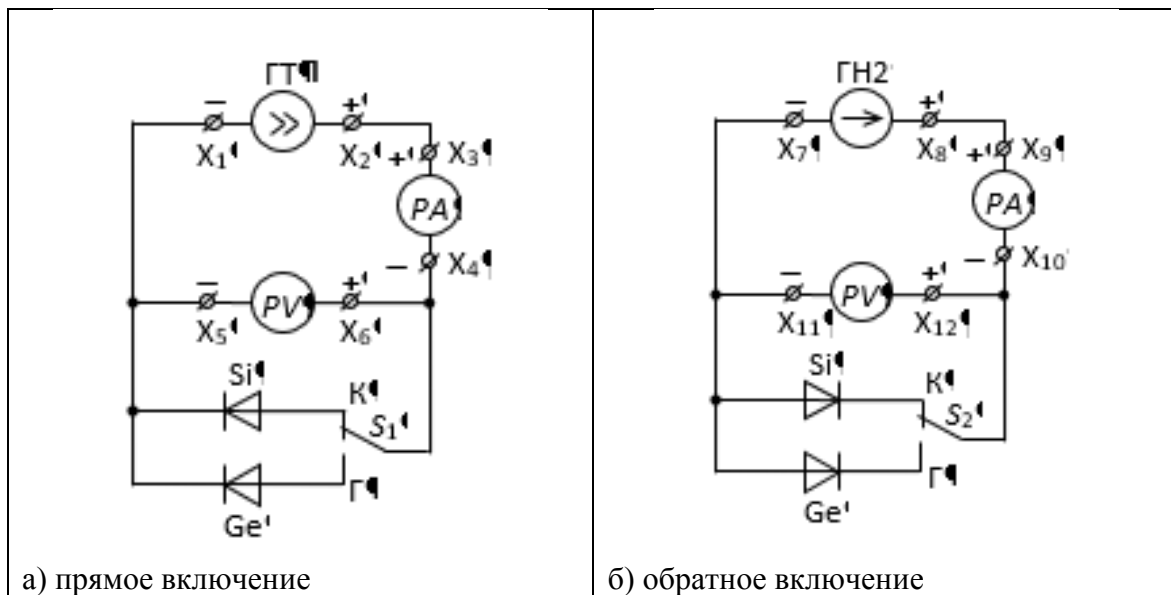


Рис.3

Выпрямительные диоды характеризуют следующими параметрами.

Прямой ток $I_{пр}$ - ток, протекающий через диод при прямом напряжении, обычно равном 1В. Прямой ток, как было сказано выше, определяется мощностью, на которую должен быть рассчитан диод.

Прямое падение напряжения $U_{пр}$ - падение напряжения на диоде при заданном прямом токе. Прямое напряжение у кремниевых диодов больше, чем у германиевых.

Максимальный обратный ток $I_{обр.мах.}$ - ток неосновных носителей, протекающий через диод при обратном напряжении, обычно близком к напряжению электрического пробоя. Обратный ток составляет сотые доли процента от прямого тока, у кремниевых диодов он меньше, чем у германиевых.

Максимальное обратное напряжение $U_{обр.мах.}$ - падение напряжения на диоде при оговариваемой (достаточно большой) величине обратного тока, при которой не нарушается нормальная работа диода. Предельным обратным напряжением является напряжение, при котором происходит электрический пробой р-п-перехода. Кремниевые диоды обладают большим обратным напряжением, чем германиевые, поэтому они устойчиво работают в предпробойной области. Кремниевые диоды могут иметь максимальные обратные напряжения порядка 1000 - 1500 В, а германиевые 100 - 400 В.

Ход работы:

В работе исследуются два диода Д303 (германиевый) и Д202 (кремниевый), параметры которых представлены в таблице 1. Исследования заключаются в снятии ВАХ диодов и определении их основных параметров.

Таблица 1. Параметры диодов

Тип /параметры	$I_{пр.ср.макс.}$ мА	$U_{пр.}, В$ (не более)	$U_{обр.макс.},$ В	$I_{обр.}, мкА$
Д303	3000	0,35	150	1000
Д202	400	1	100	500

1 Подготовить измерительный стенд. Для этого:

1.1 Переключатель «Сеть» - в положение 0.

1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.

1.3 Переключатели приборов Р1, Р2, Р3, Р4 – в положение «20».

2 Подключить диодный модуль к измерительному стенду в соответствии с рисунком.3.

- 8 Выключить питание стенда и разобрать схему.
- 9 По результатам измерений построить на одном рисунке ВАХ VD1 и VD2 (рис.4). По характеристикам рассчитать сопротивления диодов для $U_{ак пр} = +0,4 В$ и $U_{ак обр} = -3 В$.
- 11 По заданию преподавателя ампервольтметром проверить работоспособность выпрямительных диодов.
- 12 Оформить отчет и представить его преподавателю.

Практическая работа №10.

Тема 3.1. Элементная база электронных устройств.

Исследование стабилитрона.

Цель работы: Исследование принципа действия стабилитрона. Получение практических навыков в анализе и оценке их работоспособности.

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Стабилитрон», образцы стабилитронов.

Теоретическая часть:

Стабилитрон - полупроводниковый диод, на вольтамперной характеристике которого имеется участок со слабой зависимостью напряжения от проходящего тока и который предназначен для стабилизации постоянного напряжения на нагрузке.

Вольтамперная характеристика и условное графическое обозначение показаны на рис.1.

Как известно, при превышении обратного максимального напряжения происходит лавинный пробой p-n-перехода. При этом наблюдается резкое возрастание обратного тока при почти неизменном уровне обратного напряжения. Это явление и используется в стабилитронах, нормальным включением которых в цепь источника постоянного напряжения является обратное.

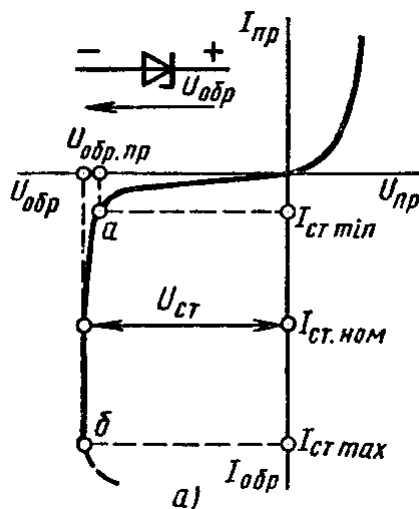


Рис.1. УГО и вольтамперная характеристика стабилитрона

Если обратный ток через стабилитрон не превышает некоторого значения $I_{ст max}$, то состояние электрического пробоя не приводит к выходу из строя диода.

В качестве полупроводникового материала при производстве стабилитронов используют кремний, что обусловлено незначительным обратным током в кремниевых диодах. Это исключает возможность их разогрева и теплового пробоя p-n-переходов.

Стабилитроны характеризуются следующими основными параметрами:

$U_{ст}$ - напряжением стабилизации при прохождении заданного тока стабилизации;

$\Delta U_{ст}$ - допуск (изменение напряжения при изменении тока от минимального до максимального);

Ист.ном – номинальный ток стабилизации.

Кроме Ист.ном указывают также минимальное (Ист.мин) и максимальное (Ист.макс) значения постоянных токов на участке стабилизации, при которых обеспечивается заданная точность.

Превышение тока Ист.макс приводит к тепловому пробое р-п-перехода. Напряжение стабилизации современных стабилитронов лежит в пределах 1-1000 В, а значения минимального и максимального токов стабилизации соответственно в пределах Ист.мин = 1...10 мА, Ист.макс = 50...2000 мА;

Стабилизацию низковольтного напряжения в пределах 0,3...2 В можно получить при использовании прямой ветви вольтамперной характеристики кремниевых диодов, называемых стабилиторами.

Ход работы

В работе исследуется стабилитрон Д814Б, параметры которого представлены в таблице 1. Исследования заключаются в снятии ВАХ стабилитрона и определении основных параметров параметрического стабилизатора.

Таблица 1. Параметры стабилитрона

U _{ст} , В	ΔU _{ст} , %	I _{ном} , мА	I _{макс} , мА	I _{мин} , мА
8...9,5	-	5	36	3

1.Подготовить измерительный стенд. Для этого:

1.1 Переключатель «Сеть» - в положение О.

1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.

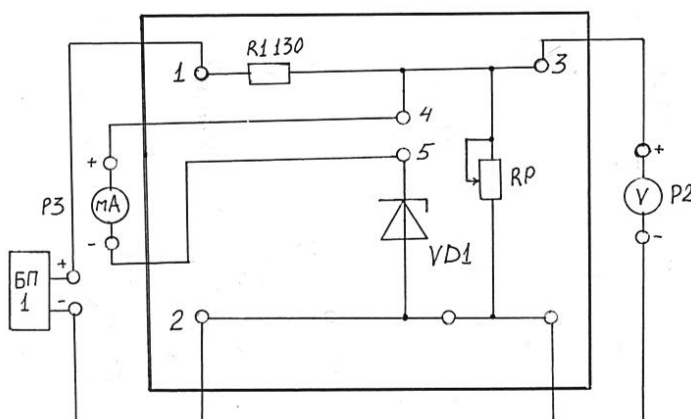


Рис.2 Схема исследования стабилитрона

1.3 Переключатели приборов P1, P2, P3, P4 – в положение «20».

2 Подключить стабилитрон к измерительному стенду в соответствии с рисунком.

3 Снятие вольтамперной характеристики стабилитрона.

3.1 Включить питание измерительного стенда.

3.2 Плавно изменяя напряжение на выходе БП1, измерять U_{ак обр.} (прибор P2) и ток Ист (прибор P3).

Примечание: ток Ист не должен превышать 20 ма.

Данные измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

U _{ак} , В									
I _{ст} , мА									

3.3 Построить ВАХ стабилитрона и по характеристике определить U_{ст}, Ист ном.

3.4 Определить ΔU_{ст} (%) при изменении Ист от 3 до 10 мА по соотношению:

$$\Delta U_{ст} = (U_{ст макс} - U_{ст мин}) / 100.$$

- 3.5 Выключить питание стенда.
- 3.6 Провести анализ полученных результатов и справочных данных и сделать выводы.
- 3.7 Выключить питание стенда.
- 4 Исследование параметрического стабилизатора.**
- 4.1 На модуле установить RP в крайнее левое положение, что соответствует максимальному сопротивлению нагрузки (R_n).
- 4.2 Переключатели $P1$, $P2$ установить в положение 20, $P3$ – в положение 200.
- 4.3 Включить питание стенда и по прибору $P2$ установить напряжение на нагрузке $U_{H1} \approx 8,5$ В. Прибором $P1$ измерить входное напряжение ($U_{Вх1}$).
- 4.4 Увеличить входное напряжение на 1В ($U_{Вх2}$) и измерить напряжение на нагрузке (U_{H2}).
- 4.5 Рассчитать коэффициент стабилизации ($K_{ст}$) по соотношению:
- $$K_{ст} = (\Delta U_{Вх} / U_{Вх1}) / (\Delta U_H / U_{H1}),$$
- где: $\Delta U_{Вх} = U_{Вх1} - U_{Вх2}$; $\Delta U_H = U_{H1} - U_{H2}$.
- 5 Увеличить сопротивление нагрузки поворотом ручки RP на 90° и сделать вывод о влиянии его на U_H .
- 6 Оформить и сдать отчет.

Практическая работа № 11.

Тема 3.1. Элементная база электронных устройств.

Исследование биполярного транзистора.

Цель работы: определить структуру и выводы транзисторов, измерить статический коэффициент усиления транзистора.

Перечень используемого оборудования: адаптер, мультиметр M890G, резистор на 22 кОм (из комплекта для сборки детекторного радиоприемника), провода соединительные.

Теоретическая часть:

Биполярным транзистором (БТ) называют полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими $p - n$ - переходами и тремя выводами. Он имеет трехслойную структуру, состоящую из чередующихся областей с различными типами электропроводности: $p-p-p$ или $p-p-n$. Структура таких транзисторов и их условные графические обозначения показаны на рис.1.

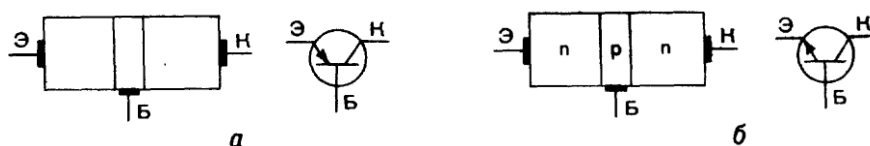


Рис.1 Трехслойные структуры и условные графические обозначения транзисторов типа $p-p-p$ (а) и $p-p-n$ (б).

Работа биполярного транзистора зависит от носителей заряда обеих полярностей - электронов и дырок, отсюда его название «биполярный».

Внутренняя область транзистора называется базой. Наружная область с наименьшей площадью соприкосновения с базой называется эмиттером, вторая наружная область – коллектором. Электронно-дырочный переход между эмиттером и базой называют эмиттерным переходом, а между коллектором и базой - коллекторным переходом.

Принцип действия транзисторов $p-p-p$ и $p-p-n$ -типов одинаков. Разница лишь в полярности подключаемых источников питания.

Транзистор изготовлен из пластинки (кристалла) германия, в грани которой вплавлены атомы индия (рис. 1). В результате в пластинке образуются три области: эмиттер Э, база Б,

коллектор К, на границах которых выделяют два электронно-дырочных перехода: эмиттерный Э — Б, коллекторный Б — К (рис. 2).

В зависимости от комбинации включения областей с p - и n -проводимостями различают транзисторы структуры $n-p-n$ (рис. 2) и $p-n-p$ (рис. 3). Принцип действия транзисторов обеих структур одинаков, отличие состоит в полярности подключения источника питания. Так как в транзисторах структуры $n-p-n$ основными носителями тока являются электроны, то к коллектору транзистора подводят «минус» источника тока, а к эмиттеру — «плюс».

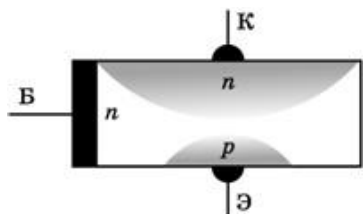


Рис. 1

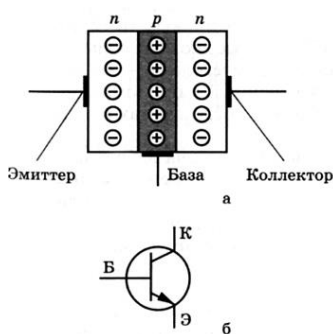


Рис. 2

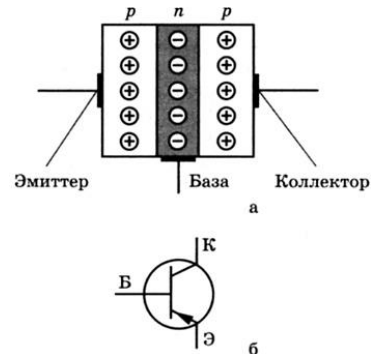


Рис. 3

Каждый переход транзистора можно рассматривать как полупроводниковый диод, а в целом транзистор — как бы состоящим из двух диодов, соединенных в зависимости от структуры анодами (рис. 4) или катодами (рис. 5). При этом точка соединения диодов соответствует выводу базы транзистора.

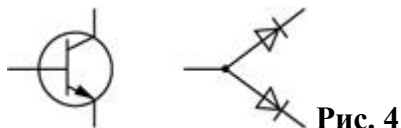


Рис. 4

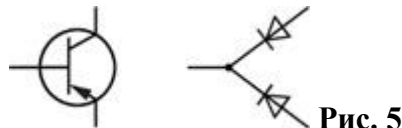


Рис. 5

В основу принципа действия транзистора положен эффект влияния базы на прохождение носителей тока (дырок, электронов) из области эмиттера в область коллектора через область базы.

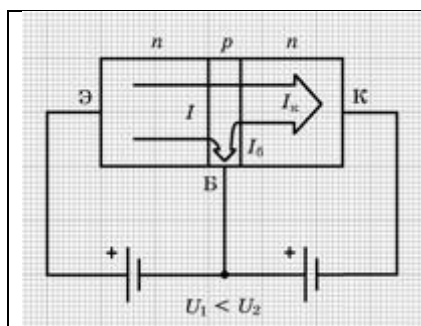


Рис. 6

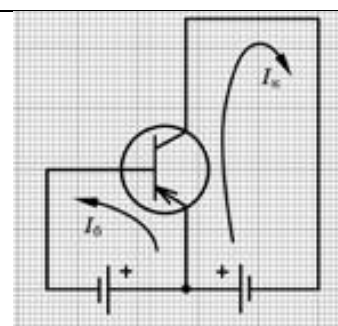


Рис. 7

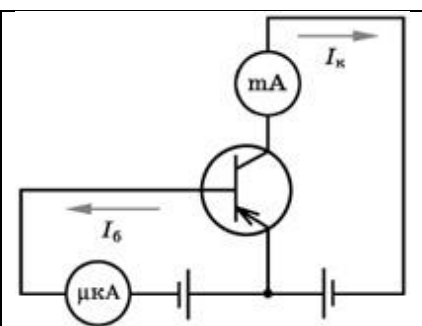


Рис. 8

При подключении источника питания (рис. 6) переход Э — Б включен в прямом (пропускном) направлении и через него протекает ток. Базовая область в транзисторе имеет ма-

лую толщину, поэтому носители тока, попадая в нее, оказываются под воздействием относительно высокого напряжения коллектора. Благодаря этому они приобретают значительную скорость и преодолевают сопротивление коллекторного перехода.

В результате основная часть носителей тока из области Э, пройдя через область Б, переходит в область К и обеспечивает коллекторный ток.

Незначительное увеличение напряжения на переходе Э — Б (это аналогично прохождению тока через диод, включенный в прямом направлении) ведет к увеличению числа носителей тока, поступающих из области эмиттера в области коллектора и базы.

Для транзистора $p - n - p$ -типа (см. рис. 6) подача небольшого отрицательного напряжения (до 1 В) на эмиттерный переход («плюс» на эмиттер, «минус» на базу) приводит к открытию этого перехода и движению дырок из эмиттера в базу. Небольшая часть дырок рекомбинирует (поглощается) при встречах с электронами в базе и тем самым создает ток базы (I_b). Основная же часть дырок достигает коллекторного перехода и создает ток в цепи коллектора (I_k).

В итоге транзистор можно рассматривать как устройство, распределяющее ток, протекающий через эмиттер в заданном соотношении между базой и коллектором.

Учитывая, что напряжение, подводимое к базе, гораздо меньше напряжения, подводимого к коллектору, а произведение силы тока на напряжение — это мощность тока, можно сделать вывод, что малая входная мощность управляет большой выходной. Это значит, что транзистор обладает усилительными свойствами. Коэффициент усиления транзистора по току в схеме с общим эмиттером (рис. 7) показывает, во сколько раз коллекторный ток больше базового тока:

Для измерения статического коэффициента усиления транзистора, включенного в цепь с общим эмиттером, необходимо измерить токи коллектора и базы при постоянном напряжении между коллектором и эмиттером (рис. 8). Эта процедура длительная, требующая разных измерительных приборов и источников тока.

В настоящее время статический коэффициент усиления транзистора измеряют прямым и простым методом, т. е. с помощью цифрового мультиметра.

В зависимости от полярности напряжений, подключаемых к электродам, транзисторы могут работать в следующих режимах.

Если оба перехода смещены в прямом направлении, то такой режим называют режимом **насыщения**. В этом режиме через переходы протекают сравнительно большие прямые токи. При обратном смещении переходов транзистор работает в режиме **отсечки**, при котором токи отсутствуют, если пренебречь малыми обратными токами. В режимах насыщения и отсечки взаимодействие между переходами отсутствует.

Если эмиттерный переход напряжением $U_{эб}$ смещен в прямом направлении, а коллекторный переход напряжением $U_{кб}$ - в обратном, то режим работы транзистора называют **активным**. Это основной режим работы транзистора. При перемене полярности напряжений $U_{эб}$ и $U_{кб}$ получим **инверсный** режим работы. Этот режим используется редко. При изменении напряжений на электродах транзистора, они могут переходить из одного режима в другой.

Рассмотрим принцип действия БТ $p-n-p$ -типа в активном режиме.

В активном режиме (рис. 2.) к эмиттерному переходу должно быть приложено прямое напряжение, а к коллекторному - обратное. Если на эмиттерном переходе нет напряжения, то через коллекторный переход протекает очень небольшой обратный ток $I_{кобр}$. По сравнению с рабочим током им можно пренебречь для упрощения рассуждений и считать, что в коллекторной цепи тока нет, т. е. транзистор закрыт.

При подаче на эмиттерный переход прямого напряжения от источника питания $E_э$, происходит инжекция основных носителей заряда из эмиттера в базу, где они являются неосновными.

Для транзистора р-п-р этими носителями заряда являются дырки. Движение дырок в процессе инжекции через эмиттерный переход создает ток эмиттера $I_э$.

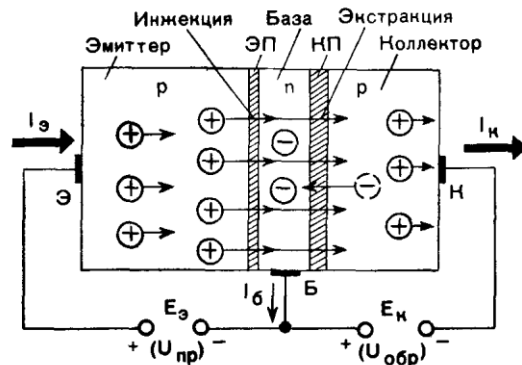


Рис.2. Принцип действия транзистора в активном режиме

Через эмиттерный переход из базы в эмиттер инжектируется небольшое количество электронов, что обуславливает в переходе ток $I_{эп}$. Так как концентрация электронов в базе мала, этим током можно пренебречь. В результате в эмиттере нарушается электронейтральность и для ее восстановления лишние электроны стекают на $+E_э$.

Появляется ток эмиттера:

$$I_э = I_{эп} + I_{эп} \approx I_э.$$

Дырки, перешедшие в базу, имеют вблизи р-п перехода повышенную концентрацию, что вызывает их диффузию в базу. Толщина базы очень мала, поэтому дырки в процессе диффузии оказываются вблизи коллекторного перехода. Большая их часть не успевает рекомбинировать с электронами базы и втягивается ускоряющим электрическим полем коллекторного перехода в область коллектора. Происходит экстракция дырок под действием обратного напряжения из базы в коллектор. Движение дырок в процессе экстракции из базы в коллектор создает ток коллектора $I_{кр}$, т.к. из-за нарушения электронейтральности в коллекторе в него поступают электроны от $-E_к$. Так как коллекторный переход смещен в обратном направлении, то через него также протекает небольшой обратный ток $I_{кбо}$ ($I_{кбр}$)

Таким образом, в коллекторе протекает суммарный ток:

$$I_к = I_{кр} + I_{кбо} = \alpha I_{эп} + I_{кбо},$$

где α – коэффициент, учитывающий процесс рекомбинации в дырок и электронов в базе.

$$\alpha = I_{кр}/I_{эп} \leq 1.$$

Этот коэффициент называют статическим коэффициентом передачи тока эмиттера, или коэффициентом передачи постоянного тока.

Количество рекомбинированных электронов пополняется из внешней цепи от источника $-E_э$. За счет этого в цепи базы протекает ток базы рекомбинации $I_{брк}$. Он очень мал из-за небольшой толщины базы и малой концентрации основных носителей заряда - электронов.

При этих условиях число рекомбинаций, определяющих величину тока базы, невелико. Таким образом, суммарный ток базы определяется уравнением:

$$I_б = I_{бп} + I_{брк} - I_{кбо},$$

где $I_{бп}$ – ток базы, обусловленный движением электронов от $-E_э$ на восполнение инжектированных в эмиттер.

Если суммировать токи $I_к$ и $I_б$, получим уравнение, определяющее взаимосвязь между токами транзистора:

$$I_э = I_к + I_б.$$

Ток эмиттера может изменяться в больших пределах при малых изменениях прямого напряжения на эмиттерном переходе. Поэтому ток коллектора также будет изменяться, т.е. он управляется током эмиттера. Током базы в практических целях можно пренебречь.

Принцип действия транзистора п-р-п - типа аналогичен, только носителями заряда, создающими токи через р-п - переходы в процессе инжекции и экстракции, являются электроны. Полярность источников $E_э$ и $E_к$ должна быть изменена на противоположную, соответственно изменятся и направления токов в цепях.

Схема включения транзистора имеет две цепи: входную и выходную (рис.3).

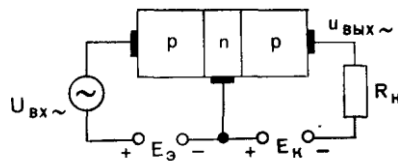


Рис.3

В зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей, существует три способа включения транзисторов: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК) (рис.4).

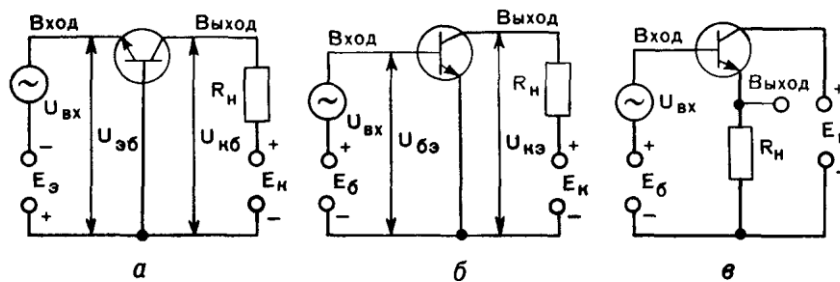


Рис.4. Способы включения транзистора типа $n-p-n$:

а - с общей базой; б - с общим эмиттером; в - с общим коллектором.

В схеме, на которой рассматривался принцип действия транзистора входной электрод - эмиттер, выходной - коллектор, а общий - база; следовательно, это была схема ОБ.

При любой схеме включения постоянный ток проходит от плюса источника питания через соответствующие области транзистора к минусу источника питания. Стрелка эмиттера указывает направление проходящего через него тока в активном режиме.

Во всех трех схемах сохраняется рассмотренный принцип действия транзистора, но свойства схем различны.

Важным параметром, с помощью которого можно оценить способы включения, является коэффициент передачи тока h_{21} . Он определяется соотношением:

$$h_{21} = \Delta I_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вх}},$$

где Δ – обозначает переменную составляющую сигнала, действующую во входной и выходной цепях.

Для способа включения с ОБ:

$$h_{21\text{б}} = \Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{э}} = \alpha < 1.$$

Для способа включения с ОЭ:

$$h_{21\text{э}} = \alpha / (1 - \alpha) = \beta \gg 1 \text{ (При } \alpha = 0,99 \beta = 99 \text{)}.$$

Для способа включения с ОК:

$$h_{21\text{к}} = \Delta I_{\text{э}} / \Delta I_{\text{б}} = 1 / (1 - \alpha) = \beta + 1.$$

Из анализа полученных соотношений видно, что наибольший коэффициент передачи тока имеют способы включения с ОЭ и ОК, поэтому они и используются чаще всего в электронных узлах.

Статические характеристики транзистора.

Статическими характеристиками называют зависимости одной физической величины от другой при неизменных других величинах. Такими величинами для транзистора являются входные и выходные токи и напряжения ($I_{\text{вх}}$, $U_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$, $U_{\text{вых}}$) при отсутствии нагрузки.

Основными характеристиками являются:

- входные;
- выходные;

-прямой передачи.

Вид характеристик транзистора зависит от способа его включения, но для схем ОЭ и ОК они практически одинаковы, поэтому пользуются обычно входными и выходными характеристиками для схем ОЭ.

Совокупность характеристик, снятых при разных значениях постоянной величины, представляет собой *семейство статических характеристик*.

Схема для снятия характеристик транзистора п-р-п-типа с ОЭ представлена на рис.5.

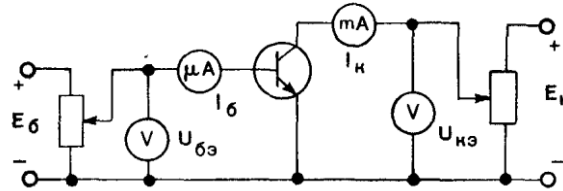


Рис.5 Схема для снятия характеристик транзистора, включенного с общим эмиттером

В любой схеме включения в каждой из двух цепей действует напряжение между двумя электродами и протекает ток: во входной цепи - $U_{вх}$ и $I_{вх}$, в выходной - $U_{вых}$ и $I_{вых}$. Эти электрические величины определяют режим работы транзистора и взаимно влияют друг на друга.

Для того чтобы одну из электрических величин можно было поддерживать постоянной, в схему для снятия характеристик надо включить только источники питания; нагрузку не включают. Для регулирования напряжений включают потенциометры, а для измерения напряжений и токов - измерительные приборы. При снятии каждой характеристики сначала устанавливают с помощью потенциометров значение постоянной величины, а затем, устанавливая последовательно разные значения изменяемой величины, определяют соответствующее значение зависящей от нее другой величины.

Статические характеристики транзистора в схеме ОЭ. При таком способе включения входным током является ток базы I_b , выходным - ток коллектора I_k , входное напряжение создается между базой и эмиттером $U_{бэ}$, а выходное - между коллектором и эмиттером $U_{кэ}$.

Входные характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ (рис.6б), представляют собой зависимость тока базы от напряжения база - эмиттер при постоянном напряжении коллектор - эмиттер:

$$I_b = f(U_{бэ}) \text{ при } U_{кэ} = \text{const.}$$

Входные характеристики, как и прямая ветвь вольтамперной характеристики диода, начинаются не из начала координат, а при некотором значении напряжения базы, называемым пороговым $U_{пор}$.

Входное сопротивление транзистора в схеме ОЭ мало:

$$R_{вх} = U_{бэ}/I_b, \text{ при } U_{кэ} = \text{const, составляет сотни Ом.}$$

Выходные характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ, представляют собой зависимости тока коллектора от напряжения коллектор - эмиттер при постоянном токе базы:

$$I_k = f(U_{кэ}) \text{ при } I_b = \text{const.}$$

Семейство выходных характеристик представлено на рис. 6а.

Напряжение $U_{бэ}$ - это прямое напряжение на эмиттерном переходе, а обратное напряжение на коллекторном переходе $U_{кб}$ определяется разностью $U_{кэ} - U_{бэ}$. Но поскольку $U_{кэ} \gg U_{бэ}$, можно приближенно считать, что $U_{обр} \approx U_{кэ}$.

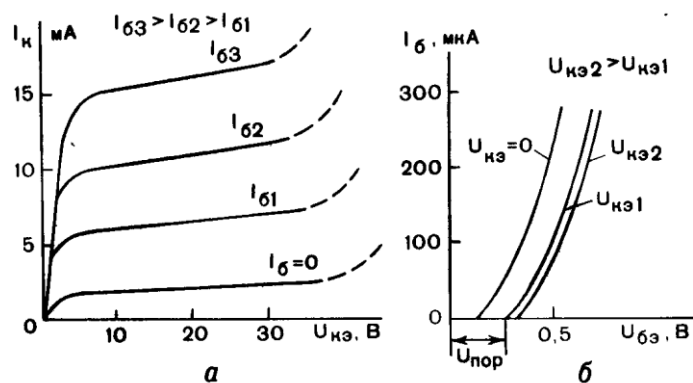


Рис.6 Характеристики транзистора, включенного по схеме ОЭ:

a — выходные, *б* — входные

При $U_{кэ} < U_{бэ}$ транзистор находится в режиме насыщения и с ростом $U_{кэ}$ приближается к активному. Поэтому на начальном участке характеристики наблюдается резкое увеличение тока I_k .

При $U_{кэ} > U_{бэ}$ полярность $U_{кб}$ изменяется на обратную для коллекторного перехода и транзистор работает в активном режиме. Изменение напряжения $U_{кэ}$ на этом участке характеристик мало влияет на величину тока коллектора; рабочий участок характеристики идет полого.

Выходное сопротивление транзистора в схеме с ОЭ велико:

$R_{вых} = U_{кэ} / I_k$ при $I_b = \text{const}$, составляет десятки килоом.

Увеличение коллекторного напряжения выше максимально допустимого приводит к пробое коллекторного перехода (штриховые линии).

Характеристикой прямой передачи называют зависимость выходного тока от входного. Для схемы ОЭ это зависимость тока коллектора от тока базы при постоянном напряжении коллектора:

$I_k = f(I_b)$ при $U_{кэ} = \text{const}$.

Порядок выполнения работы

В работе исследуется БТ большой мощности низкой частоты КТ815А, основные параметры которого приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры КТ815А

I_k макс,	P_k макс, Вт	$U_{кэ}$ нас, В	$h_{21э}$	$F_{гр}$, МГц
1,5	10	0,6	40	300

Исследования заключаются в снятии статических характеристик транзистора и определении по ним некоторых параметров.

1 Подготовить измерительный стенд. Для этого:

- 1.1 Переключатель «Сеть» - в положение О.
- 1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 — в крайнее левое положение.
- 1.3 Переключатели приборов P1, P2, P4 — в положение «20», P3 — «2».

2 Подключить модуль к измерительному стенду в соответствии с рисунком 8.

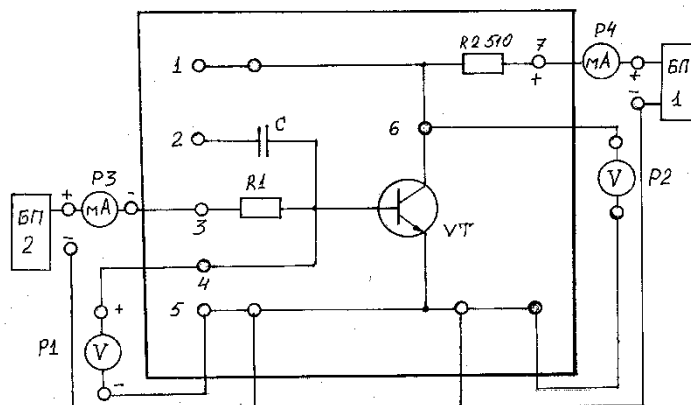


Рис.8 Схема исследования транзистора

3 Снятие входных характеристик $I_B = f(U_{BЭ})$ при $U_{КЭ} = \text{const.}$ и характеристик

3.1 Ручками «Грубо» и «Точно» БП1 по прибору Р2 установить $U_{КЭ} = 5 \text{ В}$.

3.2 Ручкой «Точно» БП2 увеличивать напряжение $U_{BЭ}$ от 0 до момента, когда оно прекращает увеличиваться. При этом измерять токи I_B и I_K и данные измерений заносить таблицу 2.

Таблица 2 $U_{КЭ} = 5 \text{ В}$

$U_{BЭ}, \text{ В}$						
$I_B, \text{ мкА}$						
$I_K, \text{ мА}$						

3.3 Выполнить такие же измерения для $U_{КЭ} = 10 \text{ В}$ и данные измерений занести в аналогичную таблицу 3.

3.4 Все ручки регулировки напряжения вернуть в исходное состояние.

4 Снятие выходных характеристик $I_K = f(U_{КЭ})$ при $I_B = \text{const.}$

4.1 Ручкой «Точно» БП2 установить по прибору Р3 $I_B = 0,1 \text{ мА}$.

4.2 Ручками «Грубо» и «Точно» БП1 изменять напряжение $U_{КЭ}$ и при этом измерять ток I_K по прибору Р4. Данные измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3 $I_B = 0,1 \text{ мА}$

$U_{КЭ}, \text{ В}$					
$I_K, \text{ мА}$					

4.3 Выполнить аналогичные действия для тока $I_K = 0,2 \text{ мА}$. Данные измерений занести в аналогичную таблицу 4.

5 Выключить питание стенда и разобрать схему.

6 Построить графики характеристик (рис.9).

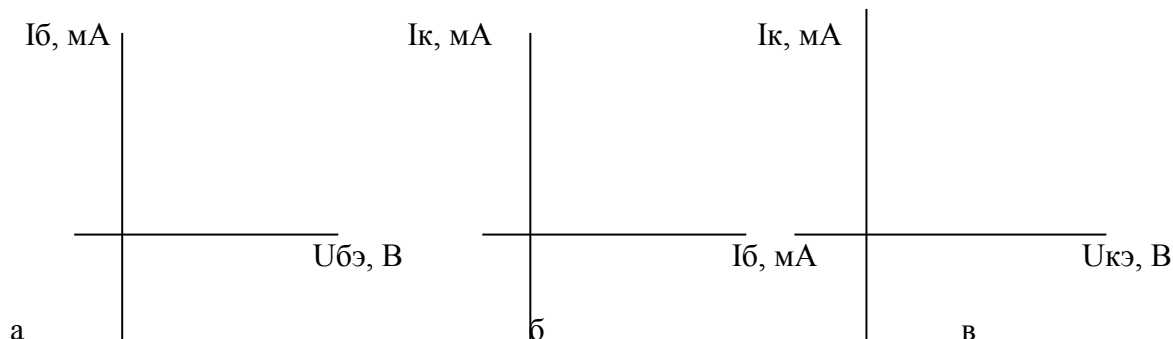


Рис. 9 Характеристики БТ: а) входные; б) прямой передачи; в) выходные

7. В заданной преподавателем рабочей точке по графикам определить входное и выходное сопротивления транзистора, коэффициенты передачи тока $h_{21Э}$ и $h_{21К}$.

8. Сделать выводы по работе.

Или измерение мультиметром

Ход работы:

1. Переведите мультиметр в разряд омметра.

2. Подключите омметр к эмиттеру и базе транзистора и, меняя полярность включения, убедитесь в односторонней проводимости перехода Э — Б. Аналогично установите одностороннюю проводимость перехода Б — К.

Измерьте прямые сопротивления эмиттерного и коллекторного переходов. Результаты измерений занесите в таблицу 40.

Тип транзистора	Сопротивление R перехода Э — Б, Ом	Сопротивление R перехода Б — К, Ом
-----------------	--------------------------------------	--------------------------------------

	прямое	обратное	прямое	обратное

3. Установите омметр на предел измерения «МОм» и измерьте обратные сопротивления обоих переходов транзистора.

Примечание. Если при малом сопротивлении переходов транзистора плюсовой щуп омметра касался одного и того же вывода, то это вывод базы и транзистор имеет структуру $n-p-n$. Если в данной ситуации этого вывода касался минусовой щуп, то транзистор имеет структуру $p-n-p$.

4. Измерьте статический коэффициент усиления транзистора. Для этого переключатель функции мультиметра переведите в положение « hFE » и выводы транзистора вставьте в соответствующие гнезда панельки.

5. Определите соответствие выводов эмиттера и коллектора, поскольку базовый вывод был уже определен ранее (см. примечание). Собирают электрические цепи (рис. 112) для транзистора $n-p-n$ или цепи (рис. 113) для транзистора $p-n-p$. Правильному выбору выводов коллектора и эмиттера соответствует меньшее сопротивление, фиксируемое омметром.

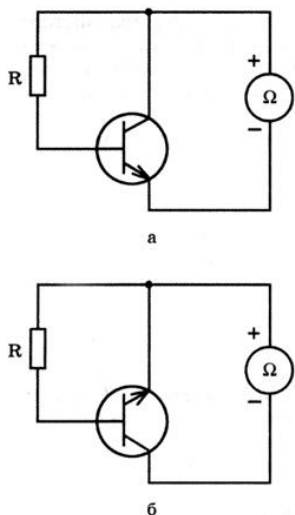


Рис. 112

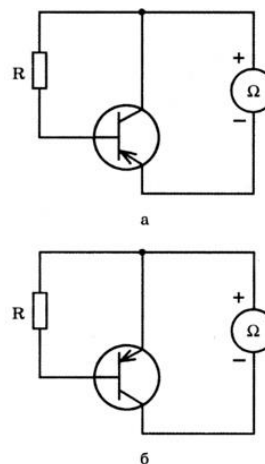


Рис. 113

3. Подключите в гнезда панельки («Е» — эмиттер, «В» — база, «С» — коллектор), и на дисплее мультиметра появится число — коэффициент усиления транзистора, включенного в цепь с общим эмиттером.

Практическая работа № 12.

Тема 3.1. Элементная база электронных устройств.

Исследование полевого транзистора.

Цель работы: экспериментально подтвердить теоретические положения по принципу действия полевых транзисторов (ПТ). Получить практические навыки в анализе и оценке работоспособности ПТ.

Теоретическая часть:

Полевым транзистором называют полупроводниковый прибор, электрический ток в котором обусловлен потоком основных носителей заряда, протекающим через проводящий канал, управляемый электрическим полем.

В отличие от биполярного транзистора действие полевого транзистора обусловлено носителями заряда одной полярности - либо только электронами в канале n -типа, либо только дырками в канале p -типа. Поэтому их иногда называют униполярными.

Различают два основных вида полевых транзисторов: с управляющим р-п переходом и с изолированным затвором (МДП-транзисторы).

Полевой транзистор с управляющим р – п – переходом

Полевой транзистор с р-п переходом (рис.1) представляет собой полупроводниковую пластину п-типа, от торцов которой с помощью невыпрямляющих металлических контактов сделаны выводы электродов. Слой полупроводника между этими контактами, в котором регулируется поток носителей заряда, называют проводящим каналом (в данном случае п-типа). Электрод полевого транзистора, через который в проводящий канал втекают носители заряда, называют истоком (И), а электрод, через который из канала вытекают носители заряда, - стоком (С).

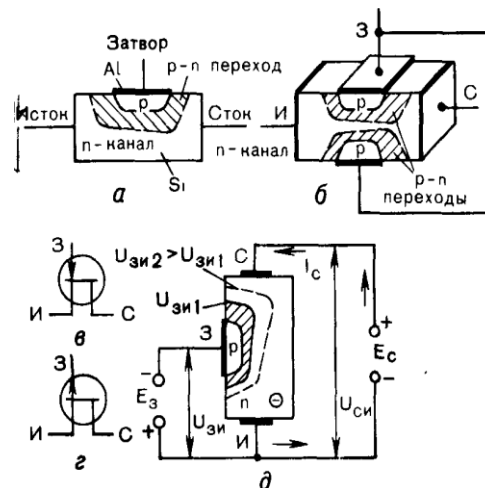


Рис.1 Полевой транзистор с управляющим р-п - переходом:

а, б - упрощенные структуры; в, г- условные графические обозначения с каналом п - типа и р - типа; д - схема включения, поясняющая принцип действия.

Электрод, на который подается напряжение, создающее электрическое поле для управления протекающим через канал током, называют затвором (З).

При создании р-п перехода только с одной стороны пластины (рис.1, а) канал п-типа образуется между областью р-п перехода и непроводящей подложкой, на которой укреплена пластина. Чаще всего создают р-п переходы с двух сторон пластины - на противоположных гранях - и электрически соединяют обе р - области в один вывод затвора (рис.1,б). В этом случае проводящий канал образуется в пластине между областями двух р-п переходов.

На рис.1, в, г показаны условные графические обозначения полевых транзисторов с каналами п-типа и р-типа соответственно.

В схеме включения полевого транзистора (рис.1, д) между истоком и стоком подается напряжение $U_{си}$ такой полярности, чтобы основные носители заряда (электроны в канале п-типа) двигались по каналу в направлении от истока к стоку. При этом через канал и по внешней цепи протекает ток стока I_c . На затвор относительно истока подается напряжение $U_{зи}$, обратное для р-п перехода. Оно создает поперечное по отношению к каналу электрическое поле, напряженность которого зависит от значения приложенного напряжения. Чем больше это напряжение, а следовательно, сильнее электрическое поле, тем шире запирающий слой и уже канал (пунктир на рис.1, д). С уменьшением поперечного сечения канала уменьшается его проводимость, что приводит к уменьшению тока I_c в цепи.

Цепь между затвором и истоком является управляющей. Таким образом, принцип действия полевого транзистора с р-п переходом основан на изменении проводимости канала за счет изменения ширины области р-п перехода под действием поперечного электрического поля, которое создается напряжением затвор – исток.

Из принципа действия полевого транзистора следует, что, в отличие от биполярного транзистора, он управляется не током, а напряжением $U_{зи}$.

Поскольку это напряжение обратное, то в цепи затвора протекает очень малый ток, т.к. входное сопротивление очень большое. В этом преимущество полевого транзистора по сравнению с биполярным.

Такое же устройство и принцип действия имеют полевые транзисторы с р-п переходом и каналом р-типа; по сравнению с транзисторами с каналом п-типа они требуют противоположной полярности источников питания. Основные носители заряда в них - дырки.

Следует отметить, что при подаче на канал напряжения $U_{си}$ потенциалы точек канала относительно истока неодинаковы по его длине: они возрастают по мере приближения к стоку от нуля до полного напряжения $U_{си}$. В связи с этим увеличивается и обратное напряжение на р-п переходе в направлении от истока к стоку от значения, равного $U_{зи}$ около истока, до суммы $U_{зи} + U_{си}$ у стока. Это вызывает постепенное расширение области р-п -перехода по мере приближения к стоку и соответствующее сужение канала: его сечение уменьшается в направлении от истока к стоку. С увеличением $U_{си}$ возрастает влияние этого напряжения на сужение канала у стока.

Основные характеристики полевых транзисторов - выходные (стоковые) и передаточные (стоко-затворные).

Стоковая характеристика отражает зависимость тока стока от напряжения сток - исток при постоянном напряжении затвор - исток:

$$I_c = f(U_{си}), \text{ при } U_{зи} = \text{const.}$$

Характеристики, снятые при разных значениях постоянной величины $U_{зи}$, составляют семейство статических стоковых характеристик. На рис.2,а, приведено семейство характеристик для полевого транзистора с р-п переходом и каналом п - типа.

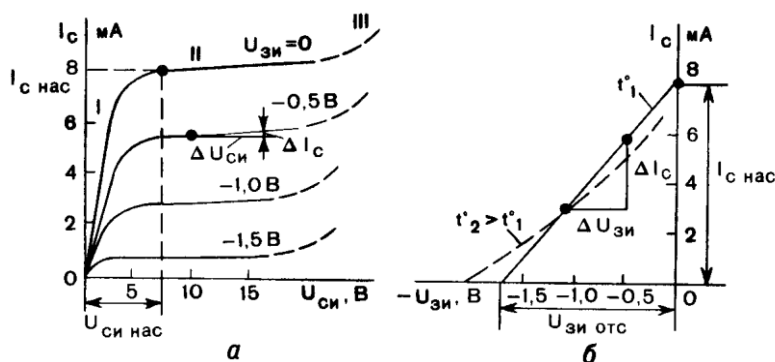


Рис.2. Семейство стоковых характеристик (а) и стоко-затворная характеристика (б) полевого транзистора с управляющим р-п - переходом и каналом п-типа.

Полевой транзистор может быть использован не только в схемах усиления, но и в качестве управляемого омического сопротивления, если он работает в режиме, соответствующем начальному линейному участку стоковой характеристики.

Стокозатворная характеристика - это зависимость тока стока от напряжения затвор - исток при неизменной величине напряжения сток - исток (рис.2,б):

$$I_c = f(U_{зи}) \text{ при } U_{си} = \text{const.}$$

Эта зависимость характеризует управляющее действие входного напряжения на величину выходного тока.

При данном постоянном значении $U_{си}$, взятом в рабочем режиме, т. е. на участке насыщения, и при $U_{зи} = 0$ точка характеристики лежит на оси тока и соответствует величине, равной току насыщения $I_{с \text{ нас}}$. С увеличением напряжения $U_{зи}$ по абсолютной величине проводимость канала уменьшается, что приводит к уменьшению тока I_c . Увеличение напряжения $U_{зи}$ вызывает уменьшение сечения проводящего канала до тех пор, пока он не оказывается перекрытым; ток через канал прекращается, транзистор закрывается, так как сток и исток изолированы друг от друга. Напряжение затвор - исток, при котором ток через канал прекращается, называют напряжением отсечки $U_{зи \text{ отс}}$.

На рис.2.6 приведена одна стоко-затворная характеристика, поскольку изменение $U_{си}$ в режиме насыщения очень мало влияет на ток I_c и характеристики, снятые при разных значениях $U_{си}$, располагаются очень близко друг к другу.

Изменение температуры мало сказывается на работе полевого транзистора, что является еще одним его преимуществом перед биполярным. Это объясняется противоположным влиянием на сопротивление канала и величину выходного тока I_c двух факторов. С одной стороны, повышение температуры снижает потенциальный барьер р-п перехода, что ведет к уменьшению его ширины и расширению канала, сопротивление канала уменьшается, ток I_c возрастает. С другой стороны, при повышении температуры уменьшается подвижность основных носителей заряда, что вызывает рост сопротивления канала и уменьшает ток I_c . В результате ток I_c изменяется мало. Причем в области больших токов преобладает влияние второго фактора, и I_c с ростом температуры уменьшается, что очень благоприятно, а в области малых токов преобладает первый фактор, и ток немного возрастает (пунктирная кривая на рис.2,6).

Порядок выполнения работы

В работе исследуется полевой транзистор с р-п – переходом и каналом р- типа малой мощности 2П103Г и МДП – транзистор с индуцированным каналом р – типа 2П301Б. Некоторые параметры транзисторов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 2П103Г

$U_{си\ макс}$, В	$U_{зи.отс}$, В	$I_{с.нач}$, мА	$P_{макс.}$, мВт
10	2 ...6	3 ...6	120

Таблица 2 2П301Б

$U_{симакс}$, В	$U_{зи\ пор}$, В	$I_{с.нач}$, мкА	$P_{макс.}$, мВ	$U_{зи_{макс}}$, В	S , мА/В	$I_{с\ max}$, мА
20	2,7...5,4	0,5	200	10 В	1...6	15

Исследования заключаются в снятии стоко-затворных и стоковых характеристик и определении по ним основных параметров транзисторов.

1 Исследование транзистора 2П103Г.

1.1 Подготовить измерительный стенд. Для этого:

- 1.1.1 Переключатель «Сеть» - в положение О.
- 1.1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.
- 1.1.3 Переключатели приборов Р1, Р2, Р3 Р4– в положение «20».
- 1.1.4 Подключить модуль к измерительному стенду в соответствии с рисунком 3.

1.2 Снятие стоко-затворных характеристик $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = const$.

- 1.2.1 Включить питание измерительного стенда.
- 1.2.2 Ручкой «Грубо» и «Точно» БП1 установить напряжение $U_{си} = 5В$. $U_{зи}$ (БП2) = 0 В.
- 1.2.3 По прибору Р3 определить начальное значение тока $I_{с.нач}$ и записать его в табл. 3.

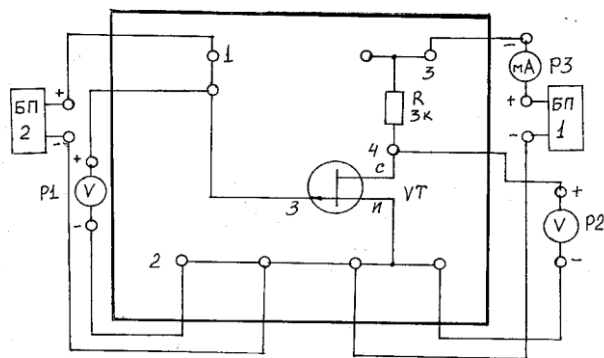


Рис.3 Схема исследования полевого транзистора

Таблица 3 $U_{зи} = 5В$

$U_{зи}, В$									
$I_c, мА$									

1.2.4 Увеличивая ручкой «Точно» БП2 напряжение $U_{зи}$ до момента закрытия транзистора, (I_c станет = 0) измерять ток I_c . Данные измерений занести в таблицу.

1.2.5 Установить $U_{зи} = 0$, $U_{си} = 10В$.

1.2.6 Повторить измерения, записав их в аналогичную таблицу 4.

1.3 Снятие стоковых характеристик $I_c = f(U_{си})$, при $U_{зи} = const$.

1.3.1 Установить $U_{си}$ и $U_{зи} = 0 В$.

1.3.2 Изменяя $U_{си}$ (БП1) от 0 до 10 В, снять показания приборов P2 и P3 и данные измерений занести в таблицу 6.

Таблица 6 $U_{зи} = 0 В$

$U_{си}, В$									
$I_c, мА$									

1.3.3 Вернуть ручки БП1 и 2 в исходное положение, затем установить $U_{зи} = 1В$ и повторить

измерения, записав показания приборов в аналогичную таблицу 7.

1.4 Выключить питание стенда и разобрать схему.

1.5 По таблицам построить характеристики и по ним определить $U_{зи} отс$, $I_c нач$, S . Сравнить полученные результаты со справочными.

2 Исследование транзистора 2П301Б.

2.1 Собрать схему для исследования (рис.4).

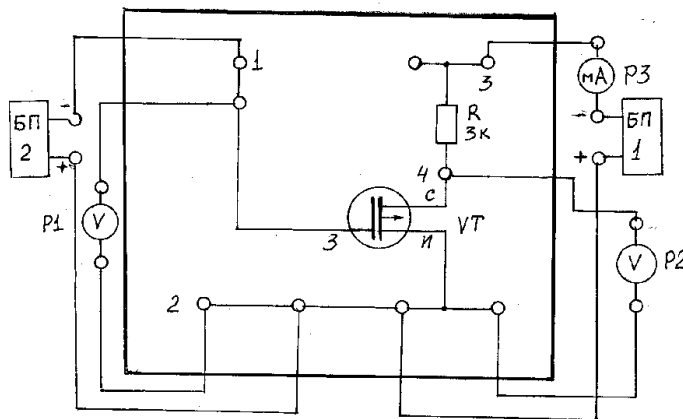


Рис. 4 Схема исследования

- 2.2 По вышеизложенной методике снять стоко-затворные и стоковые характеристики при разных напряжениях на стоке и затворе.
- 2.3 Построить характеристики и по ним определить основные параметры.
- 2.4 Сделать выводы по работе.

Практическая работа № 13.

Тема 3.2. Электронные устройства

Сборка и изучение работы выпрямителя.

Цель работы: сконструировать одно- и двухполупериодный выпрямитель, измерить основные выходные параметры.

Перечень используемого оборудования: адаптер с выводами для переменного тока, мультиметр M890G, резистор-потенциометр, конденсатор электролитический, плоскостной диод на колодке, мостиковый выпрямитель в сборке, провода соединительные.

Теоретическая часть:

Кроме первичных источников электропитания (гальванические элементы, генераторы, солнечные батареи и т. д.), в электрорадиотехнике широко распространены источники вторичного электропитания — выпрямители.

Остановимся на изучении работы выпрямителей, собранных по одно- и двухполупериодным схемам со средней точкой и по мостовой схеме.

Однополупериодный выпрямитель (рис. 96), как правило, состоит из понижающего трансформатора, во вторичную цепь которого включены полупроводниковый диод и нагрузка (резистор). Под действием внешнего переменного напряжения запирающий слой полупроводникового диода «пульсирует», т. е. меняется его толщина и сопротивление (рис. 97, а). Это создает благоприятные условия для прохождения электрического тока от дырочного полупроводника к электронному (пропускное направление) и неблагоприятные условия для прохождения тока в обратном направлении. Иначе говоря, в течение второго полупериода ток становится настолько слабым, что практически его можно не принимать во внимание (рис. 97, б).

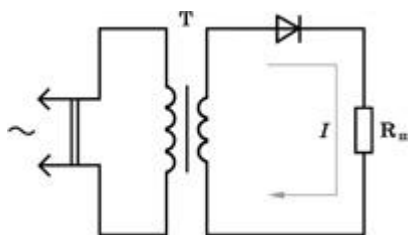


Рис. 96

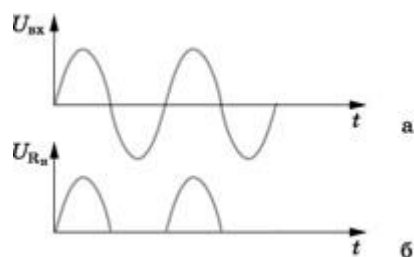


Рис. 97

Однополупериодный выпрямитель работает через такт, использует энергию только одного полупериода переменного напряжения. При этом частота импульсов (см. рис. 97, б) такая же, как и частота сетевого напряжения (50 Гц), а постоянная составляющая тока на нагрузке примерно равна 32% от амплитудного импульса.

Двухполупериодный выпрямитель (рис. 98) выпрямляет оба полупериода переменного напряжения. На нагрузке R_n (рис. 99, а) ток протекает без пауз, частота пульсации равна 100 Гц, а постоянная составляющая тока на нагрузке достигает 64% от амплитудного. Когда на конце одной обмотки (точнее, одной секции) «плюс» относи-

тельно средней точки вторичной обмотки трансформатора, а на конце другой «минус» — один диод открыт, а другой — закрыт. Когда во время следующего полупериода напряжения полярность во вторичной обмотке меняется, то первый диод закрывается, а второй — открывается (рис. 99, б).

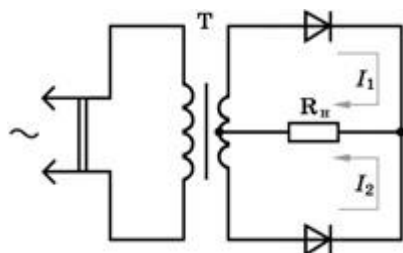


Рис. 98

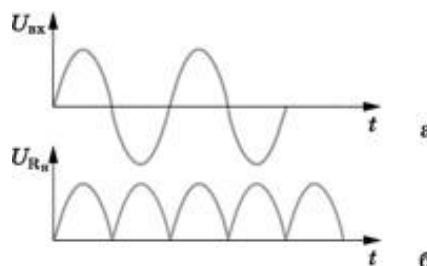


Рис. 99

Двухполупериодное выпрямление получают и с помощью мостовой схемы (рис. 100). В ней в каждый полупериод ток проходит через два последовательно включенных диода.

Полученное на выходе выпрямителя пульсирующее постоянное напряжение (рис. 101) в большинстве случаев отрицательно сказывается на нормальной работе электронных схем. Так, для питания входных каскадов радиоприемной аппаратуры пульсации напряжения источника питания не должны превышать 0,1% амплитудного значения постоянного напряжения, для выходных каскадов — 1%, для приборов автоматики и телемеханики — 2%.

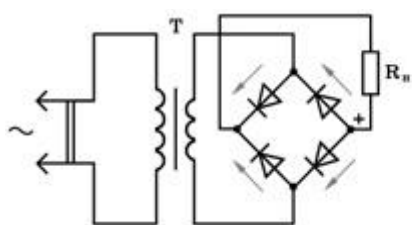


Рис. 100

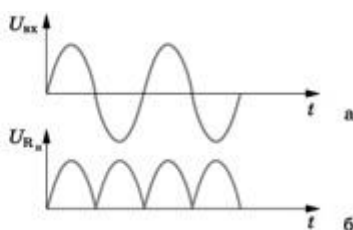


Рис. 101

Для снижения пульсации выходного напряжения на выходе выпрямителя устанавливают сглаживающие фильтры различных конструкций.

Наиболее простым и распространенным фильтром является емкость конденсатора, включаемая параллельно нагрузке выпрямителя (рис. 102). Сглаживающее действие конденсатора состоит в следующем. Конденсатор заряжается все время, пока напряжение на выходе выпрямителя больше напряжения на нагрузке (рис. 102). Когда напряжение на выходе выпрямителя начинает уменьшаться, конденсатор разряжается, отдавая накопленную энергию в нагрузку. Если емкость конденсатора выбрана достаточно большой, то за время уменьшения напряжения на выходе выпрямителя он не успевает достаточно глубоко разрядиться и колебания напряжения на нагрузке (пульсация напряжения) будут относительно небольшими (рис. 103).

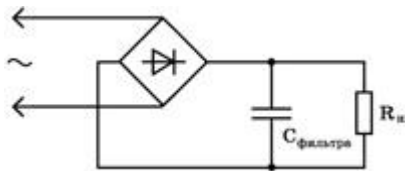


Рис. 102

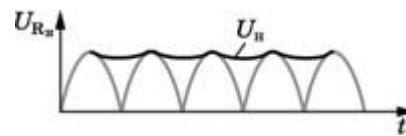


Рис. 103

Подобного рода фильтр установлен в адаптере. Недостатком этого фильтра является значительная зависимость амплитуды пульсации напряжения от силы тока нагрузки. Например, если сила тока в нагрузке возрастает, то ее сопротивление уменьшается. Следовательно, до того момента, пока напряжение на выходе выпрямителя начнет возрастать, конденсатор отдаст в нагрузку больше запасенной энергии, т. е. разрядится до более низкого напряжения. Амплитуда пульсации на нагрузке возрастает. Вот почему емкость конденсатора фильтра выбирают исходя из максимальной силы тока нагрузки.

Ход работы:

1. Соберите однополупериодный выпрямитель по схеме на рисунке 96.
2. Переключателем функции переведите мультиметр в режим частотомера и измерьте на нагрузке выпрямителя частоту тока.
3. Соберите двухполупериодный выпрямитель по схеме на рисунке 100.
4. Частотомером мультиметра измерьте на нагрузке выпрямителя частоту тока.
5. Переведите мультиметр в режим работы вольтметра постоянного тока. Измерьте напряжение на нагрузке выпрямителя: однополупериодного и двухполупериодного.
6. К нагрузке подключите конденсатор электролитический (см. рис. 102) и снова измерьте напряжение на выходе выпрямителя.
7. Результаты измерений, наблюдений и размышлений запишите в таблицу 39.

Таблица 3

Тип выпрямителя	Частота тока ν на выходе, Гц	Напряжение U на нагрузке, В	Графическое изображение изменения напряжения на нагрузке
Однополупериодный			
Однополупериодный с фильтром			
Двухполупериодный			
Двухполупериодный с фильтром			

Пр и м е ч а н и е . Нагрузка должна быть постоянной для любой схемы выпрямителя.

Практическая работа № 14.

Тема 3.2. Электронные устройства

Исследование стабилизатора напряжения непрерывного действия.

Цель работы: исследовать свойства и технические характеристики стабилизатора непрерывного действия. Снять характеристики стабилизатора при различных условиях работы.

Рассчитать основные параметры.

Перечень используемого оборудования: Макет «Стабилизатор непрерывного действия», электронный вольтметр В7-38

Теоретическая часть:

Стабилизатором напряжения (тока) называют устройство, автоматически обеспечивающее поддержание напряжения (тока) нагрузочного устройства с заданной степенью точности.

Напряжение (ток) нагрузочного устройства может сильно изменяться не только при изменениях нагрузочного тока I_H , но и за счет воздействия ряда дестабилизирующих факторов. Одним из них является изменение напряжения промышленных сетей переменного тока.

Другими дестабилизирующими факторами являются изменение температуры окружающей среды, колебание частоты тока и так далее. Стабилизаторы классифицируют по ряду признаков:

- 1) по роду стабилизируемой величины - стабилизаторы напряжения и тока;
- 2) по способу стабилизации - параметрические и компенсационные стабилизаторы.

Основным параметром, характеризующим качество работы всех стабилизаторов, является коэффициент стабилизации. Как отмечалось, определяющими дестабилизирующими факторами, из-за которых изменяются выходные величины стабилизатора, являются входное напряжение стабилизатора $U_{ВХ}$ и нагрузочный ток I_H .

Для стабилизатора напряжения коэффициент стабилизации по напряжению:

$$K_{стU} = (\Delta U_{ВХ}/U_{ВХ})/(\Delta U_{ВЫХ}/U_{ВЫХ}),$$

где $\Delta U_{ВХ}$ и $\Delta U_{ВЫХ}$ – приращения входного и выходного напряжений, а $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$ – номинальные значения входного и выходного напряжений.

Для стабилизатора тока коэффициент стабилизации тока:

$$K_{стI} = (\Delta U_{ВХ}/U_{ВХ})/(\Delta I_H/I_H)$$

где ΔI_H и I_H – соответственно приращение и номинальное значение нагрузочного тока.

Параметрические стабилизаторы напряжения. Схема простейшего параметрического стабилизатора напряжения изображена на рис.6. С помощью такого стабилизатора, в котором применяется полупроводниковый стабилитрон Д, можно получать стабилизированное напряжение от нескольких вольт до нескольких сотен вольт при токах от единиц миллиампер до единиц ампер.

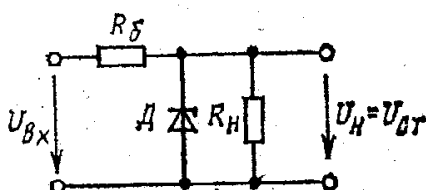


Рис.6 Схема параметрического стабилизатора напряжения на полупроводниковом стабилитроне

Стабилитрон в параметрическом стабилизаторе включают параллельно нагрузочному резистору $R_н$. Последовательно со стабилитроном для создания требуемого режима работы включают балластный резистор $R_б$.

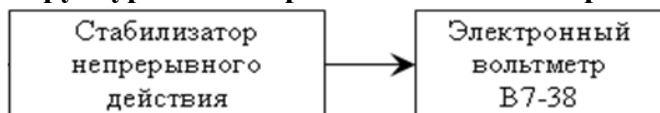
Коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора напряжения на полупроводниковом стабилитроне может достигать 30 – 50.

Основными достоинствами параметрических стабилизаторов напряжения являются простота конструкции и надежность работы. К недостаткам следует отнести небольшой коэффициент полезного действия, не превышающий 0,3, большое внутреннее сопротивление стабилизатора (5 – 20 Ом), а также узкий и нерегулируемый диапазон стабилизируемого напряжения.

Ход работы:

1. Собрать структурную схему исследования для чего:

Структурная электрическая схема измерений



- 3.1. Подключить электронный вольтметр к разъему макета **XS**, установив род его работы «V»
- 3.2. После проверки схемы преподавателем, включить макет, вольтметр в сеть.
- 3.3. Исследовать зависимость **U_{вых}** стабилизатора при изменении напряжения на входе схемы **U_{вх}**, для чего:
 - 3.3.1. Установить переключатель **S2** в положение «**U_{вх}**», переключатель изменения параметров входного напряжения или тока нагрузки **S1** – в положение «**1**», записать значение **U_{вх}** по электронному вольтметру в табл.1.
 - 3.3.2. Перевести переключатель **S2** в положение «**U_{вых}**» записать значение **U_{вых}** по электронному вольтметру в табл.1.
 - 3.3.3. Установить переключатель **S1** в положение «**2**», а затем «**3**», записать значение **U_{вх}** и **U_{вых}** по электронному вольтметру в табл.1.
- 3.4. Исследовать зависимость **U_{вых}** стабилизатора при изменении **I_н** схемы, для чего:
 - 3.4.1. Установить переключатель **S2** в положение «**U_{вх}**», записать значение **U_{вх}** по электронному вольтметру в табл.2
 - 3.4.2. Переключатель **S2** перевести в положение «**I_н**», переключатель **S1** в положение «**1**», что соответствует определенному току нагрузки, записать значение **I_н** по электронному вольтметру в табл.2
 - 3.4.3. Переключатель **S2** перевести в положение «**U_{вых}**» записать значение **U_{вых}** по электронному вольтметру в табл.2.
 - 3.4.4. Установить переключатель **S1** в положение «**2**», а затем «**3**» (в положении **S2** - «**I_н**»), что соответствует изменению тока нагрузки и для каждого перевода **S2** в положение «**U_{вых}**», записывать значения **I_н**, **U_{вых}** по электронному вольтметру в табл.2.

Таблица 1.

Положение переключателя S1(U _{вх})	1	2	3	K _{ст} =Δ U _{вх} /Δ U _{вых}
U _{вх}				
U _{вых}				

Таблица 2

Положение переключателя S1(I _н)		1	2	3	K _{ст} =Δ U _{вх} /Δ U _{вых}
U _{вх} =	I _н				
	U _{вых}				

5. По данным замеров табл.1 построить характеристику **U_{вых} = f (U_{вх})** . По данным замеров табл.2 построить характеристику **U_{вых} = f (I_н)**

Рассчитать коэффициенты стабилизации **K_{ст} = Δ U_{вх}/Δ U_{вых}** для табл. 1 и табл.2. **Отчет должен содержать:**

- 6.1. Наименование работы
- 6.2. Цель работы
- 6.3. Графики
- 6.4. Ответы на контрольные вопросы

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию стабилизаторов и их основные параметры.
1. Нарисовать блок-схему стабилизатора с управляемым прибором.
2. Поясните назначение элементов транзисторного стабилизатора.
3. Какие типы стабилизаторов применяются в устройствах аудиовидеотехники?

Практическая работа № 15.

Тема 3.2. Электронные устройства.

Усилители.

Цель работы: расширить и систематизировать знания по теме «Усилители».

Теоретическая часть:

Электронным усилителем называют устройство, предназначенное для повышения мощности входных электрических сигналов при сохранении всех остальных параметров (формы, частоты, фазы и др.).

Усиление сигнала осуществляется за счет энергии источника постоянного тока (источника питания).

Процесс усиления сигналов осуществляется с помощью усилительных элементов: транзисторов, электронных ламп, тиристоров и других элементов, обладающих управляющими свойствами.

Обобщенная схема усилительного каскада приведена на рис.1.

К входу усилителя (зажимы 1 - 2) подключен источник входного сигнала с действующим значением ЭДС $E_{\text{и}}$ и внутренним сопротивлением $R_{\text{и}}$. Маломощный входной сигнал управляет расходом энергии источника питания значительно большего уровня мощности. Таким образом, благодаря использованию управляющего элемента (например, транзистора) и более мощного источника питания осуществляется усиление мощности входного сигнала.

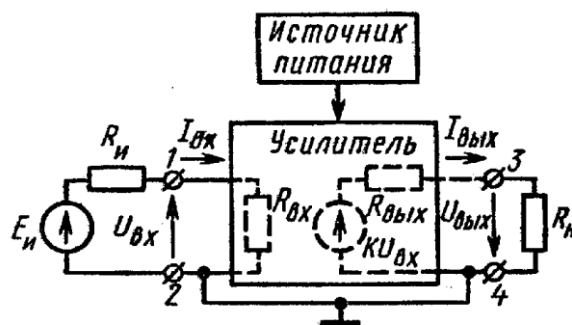


Рис.1 Обобщенная схема усилителя

В выходной цепи усилителя действует усиленный сигнал, что отражено на схеме наличием источника напряжения $U_{\text{вх}}$ с выходным сопротивлением $R_{\text{вых}}$. Внешняя нагрузка $R_{\text{н}}$, потребляющая энергию усиленного сигнала, подключена к выходу усилителя (зажимы 3 - 4). Входное и выходное сопротивления усилителя в общем случае являются комплексными. Однако для большинства рассматриваемых далее усилителей их можно считать активными.

Усилитель, содержащий несколько ступеней усиления, называют многокаскадным.

Свойства усилителя оценивают параметрами, основными из которых являются коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления и коэффициент полезного действия, а также частотной и фазовой характеристиками.

Коэффициент усиления. Этот важнейший параметр представляет собой отношение напряжения или тока (мощности) на выходе усилителя к напряжению или току (мощности) на его входе и численно показывает увеличение выходного сигнала по сравнению с входным.

В соответствии с назначением усилителя различают коэффициенты усиления напряжения K_u , тока K_i и мощности K_p . В общем случае коэффициент усиления зависит от частоты усиливаемых сигналов ω и является величиной комплексной.

В технической документации на усилители, как правило, указываются коэффициенты усиления действующих значений напряжения, тока и мощности в определенном диапазоне частот:

$$K_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}, \quad K_i = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}, \quad K_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} = K_i K_u.$$

Амплитудно-частотная характеристика. Зависимость модуля коэффициента усиления от частоты ($\omega = 2\pi f$) представляет собой амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя. Графическое изображение АЧХ для наиболее распространенного класса усилителей переменного

напряжения с емкостной связью показано на рис. 2. Поскольку модуль коэффициента усиления на разных частотах имеет разные значения, гармонические составляющие сложного входного сигнала усиливаются не одинаково и, следовательно, форма выходного сигнала будет отлична от формы входного сигнала. Такие искажения усиленного сигнала называют частотными (линейными) искажениями.

Причиной частотных искажений являются реактивные элементы усилителя (индуктивности и емкости), сопротивления которых зависят от частоты, а также зависимость от частоты физических параметров полупроводниковых приборов, как активных элементов усилителя.

Режимы работы усилителей. В зависимости от режима работы активного усилительного элемента усилителя по постоянному току различают следующие режимы работы усилительного каскада - режимы классов А, В, АВ, С, D. Рассмотрим этот вопрос на примере транзисторного усилителя. Режим работы по постоянному току определяется положением рабочей точки на динамической характеристике транзистора. От положения рабочей точки зависят значения постоянных составляющих токов входного и выходного электродов транзистора и напряжений на этих электродах, а, следовательно, мощность, потребляемая усилителем от источника питания. В свою очередь, выбор положения рабочей точки в значительной степени регламентируется амплитудой, формой и полярностью входного переменного сигнала. В соответствии с этим рассмотрим особенности работы усилительного каскада на транзисторе по схеме ОЭ при воздействии на входе переменного сигнала синусоидальной формы.



Рис.2 Амплитудно-частотная характеристика усилителя

В режиме класса А начальное положение рабочей точки выбирают по середине участка динамической характеристики, где изменению базового (входного) тока соответствуют пропорциональные изменения коллекторного (выходного) тока, а ее перемещение, вызванное воздействием двойной амплитуды входного сигнала, ограничивается этим участком. На выходной характеристике (рис.3) этот участок отмечен линией АВ. Поэтому выходной коллекторный ток проходит в течение всего периода усиленного сигнала, что является характерной особенностью режима класса А.

Так как рабочая точка не выходит за пределы линейного участка динамической входной характеристики, то нелинейные искажения, вносимые усилителем, невелики и тем меньше, чем меньше амплитуда входного сигнала. Однако низок и КПД усилителя.

В режиме класса В начальное положение рабочей точки на динамической характеристике выбирают при токе коллектора, близком к $I_{кб0}$ (рис.3). Поэтому при наличии переменного входного сигнала переменная составляющая коллекторного тока с амплитудой $I_{км}$ проходит лишь в течение половины периода сигнала, а в другую половину периода транзистор заперт. Транзистор работает с отсечкой тока. При этом угол отсечки тока θ , под которым понимают половину времени за период прохождения тока через транзистор, примерно равен $\pi/2$.

Важной особенностью режима класса В является высокий КПД усилителя, достигающий 60-70%, поскольку постоянная составляющая коллекторного тока, поступающая от источника питания при отсутствии усиленного сигнала, почти равна нулю.

Режим класса АВ является промежуточный между классами А и В и характеризуется углом отсечки в $(120-130^\circ)$ и меньшими нелинейными искажениями, однако является более экономичным, чем режим класса А.

Режиму класса С соответствует угол отсечки $\theta < \pi/2$. Такой режим является наиболее экономичным (КПД достигает 85%), так как при отсутствии усиливаемого сигнала транзистор почти не потребляет мощности.

Режим класса D характеризуется переходом рабочей точки при усилении сигналов большой амплитуды из области, соответствующей режиму отсечки, в область, соответствующей режиму насыщения.

Режимы класса С и D применяется в усилителях - формирователях, которые работают при превышении входным сигналом некоторого порогового значения.

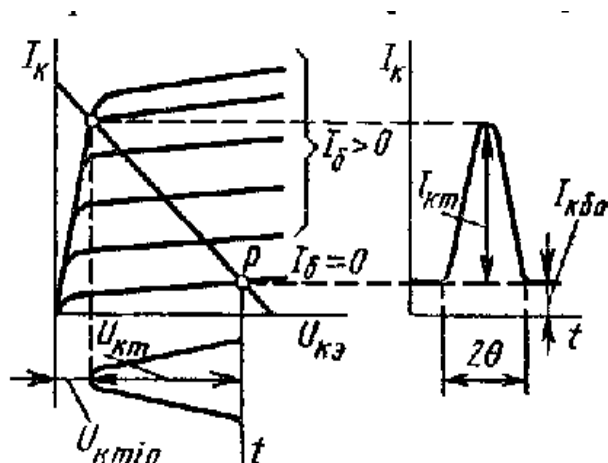


Рис.3 К пояснению режимов работы усилителей

Обратные связи в усилителях. Обратной называют такую связь между входом и выходом усилителя, при которой часть энергии выходного сигнала передается на вход. При этом образуется замкнутый контур, состоящий из усилителя и цепи обратной связи - петля обратной связи (ОС). Различают однопетлевую (рис.4, а) и многопетлевую (рис.4, б) обратные связи. В последней схеме можно выделить общую петлю обратной связи, охватывающую весь усилитель с коэффициентом усиления K , и местную петлю обратной связи, охватывающую отдельный усилительный каскад.

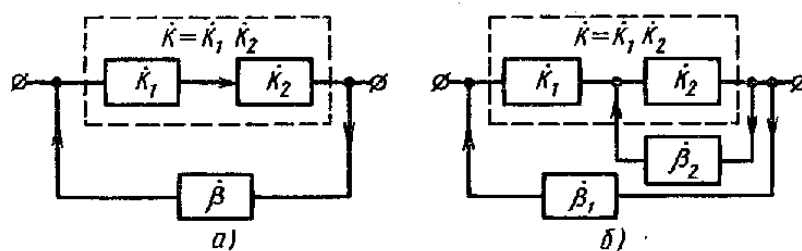


Рис. 4. Однопетлевая (а) и многопетлевая (б) обратные связи

Основной показатель обратной связи - коэффициент передачи цепи обратной связи β , показывающий, какая часть выходного сигнала передается на вход.

Если напряжение обратной связи $U_{ос}$ (рис.5) пропорционально выходному напряжению на нагрузке усилителя, то имеем обратную связь по напряжению (рис. 5,а), а в случае пропорциональности $U_{ос}$ току в нагрузке - обратную связь по току (рис.5,б). Кроме того, возможна смешанная обратная связь (комбинация обратной связи по напряжению и по току).

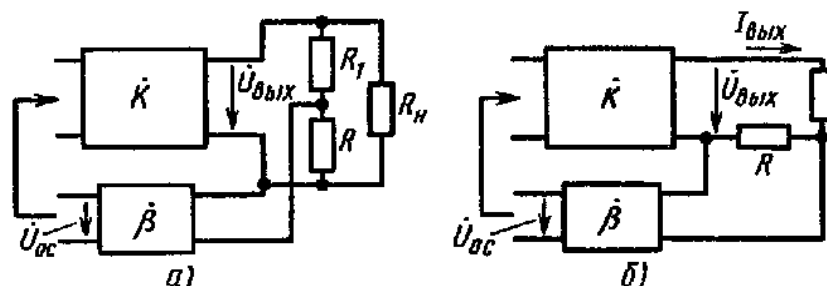


Рис.5 Обратные связи по напряжению (а) и по току (б)

По способу передачи энергии через цепь обратной связи на вход усилителя различают последовательную и параллельную обратные связи. В первом случае напряжение обратной связи подключают последовательно с напряжением источника входного сигнала усилителя (рис.6,а), а во втором - параллельно (рис.6,б).

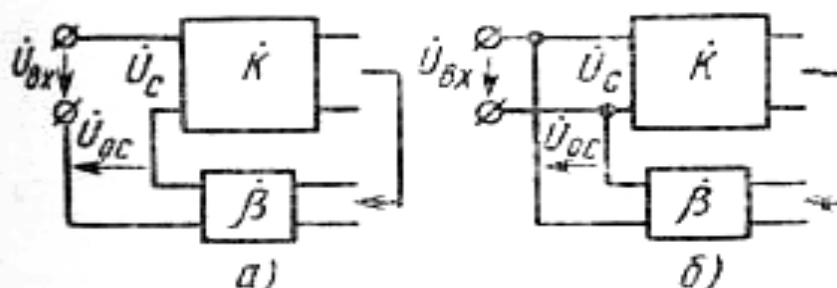


Рис.6 Обратные связи: последовательная (а) и параллельная (б)

Коэффициент усиления усилителя K и коэффициент передачи цепи ОС β являются частотно-зависимыми. Комплексный коэффициент усиления усилителя определяется соотношением:

$$\dot{K} = K / (1 - \beta \dot{K}).$$

Поэтому возможен сдвиг фазы сигнала с выхода цепи ОС относительно входного сигнала. Если фазы сигналов совпадают, то такую ОС называют положительной (ПОС). При этом коэффициент усиления усилителя с ОС определяется соотношением:

$$K_{ос} = K / (1 - \beta K).$$

При условии $\beta K \rightarrow 1$, $K_{ос} \rightarrow \infty$, что может привести к самовозбуждению усилителя. Это обстоятельство позволяет использовать усилители с ПОС для реализации генераторов электрических сигналов.

Если сигнал обратной связи поступает на вход усилителя в противофазе с входным сигналом, то коэффициент усиления усилителя определяется соотношением:

$$K_{ос} = 1 / (1 + \beta K).$$

Т.е. он уменьшается в $(1 + \beta K)$ раз. Такую обратную связь называют отрицательной обратной связью (ООС). Несмотря на уменьшение усиления, отрицательную обратную связь широко используют в усилителях, так как с ее введением увеличивается входное и уменьшается выходное сопротивления, расширяется полоса пропускания, увеличивается стабильности усилителя, уменьшаются частотные, фазовые и нелинейные искажения.

Ход работы:

1. Изучить теоретическую часть.
2. ответить на вопросы.
 1. Что такое усилительный каскад?
 2. Какие классы усиления существуют в усилителях?
 3. Дайте понятие режима покоя усилителя?
 4. Что такое дрейф нуля?

5. Назовите основные методы и схемные решения проблемы стабилизации режима покоя и дрейфа нуля.
6. Назначение обратных связей в усилительных устройствах.

Практическая работа № 16.

Тема 3.2. Электронные устройства

Исследование усилителя на биполярном транзисторе.

Цель работы экспериментально подтвердить теоретические положения по принципу действия усилителей. Получить практические навыки в анализе и оценке их работоспособности.

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Усилитель», осциллограф.

Теоретическая часть:

Рассмотрим простейшую схему усилителя на БТ п-р-п- типа, включенного по схеме с общим эмиттером (рис.1, а).

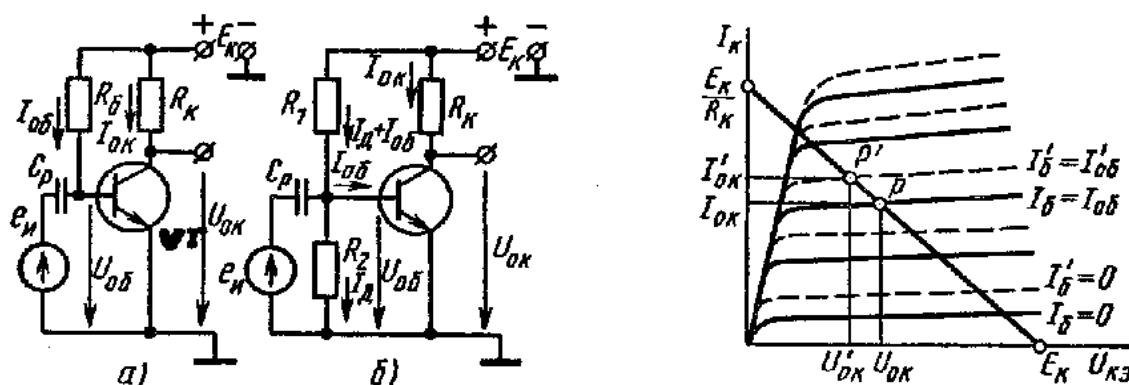


Рис.7 Схема усилителя на БТ с общим эмиттером

Назначение элементов усилителя. E_K – источник питания постоянного тока, энергия которого преобразуется в энергию усиленного сигнала; VT – транзистор – основной усилительный элемент, с помощью которого осуществляется преобразование энергии; $R_б$ – резистор, определяющий ток базы $I_{б0}$ и тем самым задающий режим работы транзистора по постоянному току; $R_к$ – резистор, предназначенный для выделения усиленного сигнала; $C_р$ – разделительный конденсатор, предназначенный для разделения усилительного каскада по постоянной составляющей сигналов от предыдущей цепи.

Режим покоя. Режимом покоя (исходным состоянием) называют режим работы электронного устройства при отсутствии входного сигнала $U_{вх} = 0$.

В режиме покоя конденсаторы $C_р$ отделяет вход усилителя от предыдущего каскада. Если бы конденсатора не было, то резисторы других каскадов были бы подключены параллельно к резисторам усилителя и поэтому режим усилителя по постоянному току был бы нарушен.

Режим покоя задается выбором рабочей точки А (рис.8) так, чтобы не было нелинейных искажений сигнала. При выборе рабочей точки пользуются входными и выходными характеристиками транзистора.

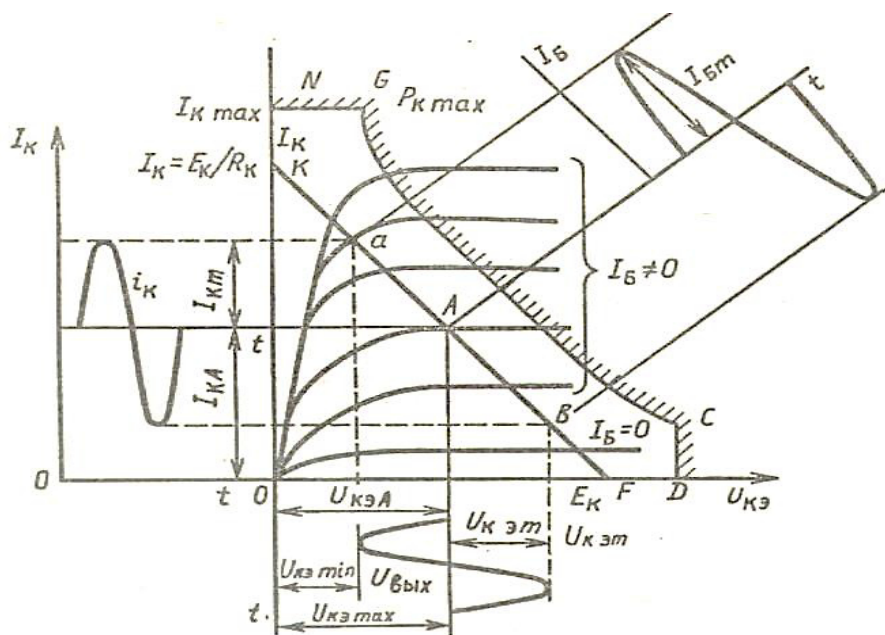


Рис.8 Диаграммы, поясняющие принцип действия усилителя

Рабочая область выходных характеристик ограничена линией NGCD. При работе транзистора ток его коллектора не должен превышать максимально допустимый $I_{K \max}$.

NG соответствует этому режиму. Каждый транзистор способен рассеивать мощность на коллекторе не выше максимально допустимой ($P_{K \max}$). Линия GC ограничивает область допустимых мощностей рассеяния на коллекторе. Транзистор работает при некотором вполне определенном напряжении между коллектором и эмиттером. При превышении этого допустимого максимального напряжения транзистор выходит из строя. Линия CD определяет область допустимых напряжений $U_{КЭ}$.

При усилении разнополярных сигналов (к ним относится и гармонический сигнал) рабочую точку A на характеристиках следует выбирать так, чтобы она находилась на середине линейных участков входной и выходной характеристик, при этом нелинейные искажения будут минимальные. Для определения рабочей точки на статических выходных характеристиках строится линия нагрузки (линия KF) в соответствии с уравнением:

$$U_{КЭ} = E_K - I_K R_K.$$

Положение рабочей точки на нагрузочной линии определяется током базы I_B , который можно рассчитать:

$$I_{B0} = (E_K - U_{БЭ})/R_B \approx E_K/R_B.$$

Напряжением $U_{БЭ}$ можно пренебречь, т.к. оно на прямосмещенном эмиттерном переходе незначительно.

Рабочая точка характеризуется током коллектора $I_K A$ и напряжения $U_{КЭ} A$.

Принцип действия. При действии положительной полуволны входного сигнала ток базы I_B увеличивается, транзистор приоткрывается, что вызывает увеличение тока коллектора I_K и уменьшение напряжения на коллекторе $U_{КЭ}$. При действии отрицательной полуволны процессы протекают в обратном порядке. Т.к. выходные ток и напряжение значительно превышают входные, то мощность выходного сигнала также значительно больше входного. При чем выходной сигнал повторяет форму входного.

Из анализа работы данного усилителя видно, что он кроме усиления мощности сигнала изменяет его фазу на 180° .

Цепи смещения предназначены для задания режима работы усилителя по постоянному току (исходного состояния). Цепи смещения можно разделить на два вида: цепи фиксированного сме-

щения и цепи автосмещения. Наиболее простой цепью фиксированного смещения является резистор R_6 (Рис.7, а). На практике используется цепь фиксированного смещения в виде делителя напряжения R_1, R_2 (рис.7, б).

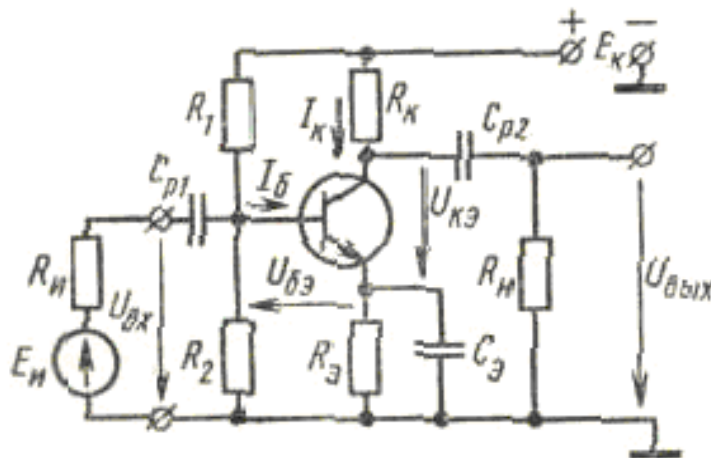


Рис.9 Схема усилителя с цепями смещения

Недостатками такой цепи смещения являются: при замене транзистора необходимо заново рассчитать параметры цепи и зависимость режима работы от температуры.

Для термостабилизации совместно с фиксированной цепью применяют цепь автосмещения. Она реализуется включением в эмиттер транзистора резистора $R_Э$ (рис.9). Этот резистор создает отрицательную обратную связь по току. Напряжение на эмиттерном переходе определяется соотношением:

$$U_{БЭ} = \varphi_6 - \varphi_Э = \varphi_6 - I_Э R_Э.$$

Из этого соотношения видно, что температурные изменения токов коллектора и эмиттера вызывают изменения напряжения $U_{БЭ}$ в направлении препятствующем этим изменениям.

Для уменьшения действия отрицательной обратной связи по переменному сигналу резистор $R_Э$ шунтируется конденсатором $C_Э$. Емкость конденсатора выбирается из условия

$$X_C = 1/\omega C_Э \ll R_Э,$$

где ω – частота усиливаемого сигнала.

Ход работы

В работе исследуются усилители на транзисторах КТ315Б (рис.10). Исследования заключаются в выборе исходного режима, определении коэффициента усиления и оценке влияния обратных связей на процесс усиления различных каскадов усилителей.

1 Подготовить измерительный стенд. Для этого:

- 1.1 Переключатель «Сеть» - в положение 0.
- 1.2 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.
- 1.3 Переключатели приборов Р1, Р2, Р3, Р4 – в положение «20».
- 1.4 Питание модуля осуществляется напряжением 12В кабелем ОМЦ.

2 Включить питание осциллографа и подготовить его к работе.

3 Исследование однокаскадного усилителя с фиксированной цепью смещения без ОС (соответствующий рис.7, б).

- 3.1 Соединить перемычкой гн.4 с корпусом.
- 3.2 Включить питание измерительного стенда.
- 3.3 Подключить осциллограф к выходу «20dB» ГНЧ и с его помощью установить на выходе ГНЧ гармонический сигнал частотой $f = 1$ кГц и амплитудой $U_{вх} = 0,02В$.
- 3.4 Задание исходного режима усилителя:

- подключить вольтметр Р1 к коллектору транзистора;
- устанавливая резистор РР в крайние положения, измерить напряжение $U_{кз}$, соответствующее режимам насыщения и отсечки транзистора;
- рассчитать среднее значение и установить его резистором РР, это будет соответствовать режиму класса А.

3.5 Подключить ГНЧ к входу (С1), а осциллограф – выходу усилителя (Гн.5).

3.6 Получить устойчивое изображение усиленного сигнала.

Примечание: Если усиленный сигнал искажен, т.е. имеет ограничения сверху или снизу, резистором РР подкорректировать режим работы. Если имеются ограничения и сверху и снизу, уменьшить амплитуду сигнала на выходе генератора.

3.7 Измерить его амплитуду $U_{вых}$ и частоту f .

3.8 Рассчитать коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = U_{вых}/U_{вх}.$$

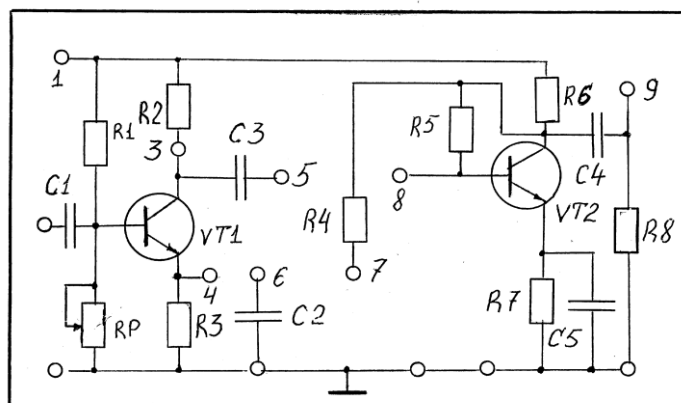


Рис.10 Двухкаскадный усилитель

4 Исследование однокаскадного усилителя с цепью автосмещения (соответствующий рис.9):

4.1 Снять перемычку между гнездами 4 и 1. Тем самым вводится ООС по току в первом каскаде. Осциллографом измерить амплитуду $U_{вых}$ и рассчитать K_u . Сделать вывод о влиянии ООС на K_u .

4.2 Соединить гнезда 4 и 6, тем самым устраняется ООС по переменной сигналу и реализуется цепь автосмещения. Если наблюдаются искажения усиленного сигнала, необходимо подкорректировать режим работы усилителя резистором РР.

4.3 Определить K_u и сделать вывод об усилительных свойствах усилителя.

5 Исследование двухкаскадного усилителя.

5.1 Соединить гнезда 5 и 8, а осциллограф подключить к гнезду 9.

5.2 Если наблюдаются искажения сигнала, уменьшить амплитуду входного сигнала.

5.3 Рассчитать K_u двухкаскадного усилителя.

5.4 Ввести ООС по напряжению всего усилителя, соединив гнездо 9 с гнездом 4(6).

Определить K_u и сделать вывод об усилительных свойствах усилителя.

6 Выключить питание стенда, сделать выводы по работе.

Практическая работа № 17.

Тема 3.2. Электронные усилители.

Операционные усилители.

Цель работы: расширить и систематизировать знания по теме.

Теоретическая часть:

Операционные усилители применяются повсеместно, везде где требуется усилить сигнал по мощности. Особенно распространено применение операционных усилителей в аудиотехнике.

Оглавление:

Что такое операционный усилитель?

Условное графическое обозначение (УГО)

Правильное питание ОУ Пример на батарейках

Схемы источников двуполярного питания

Схема с трансформатором, с отводом от «средней» точки

Схема с двумя диодными мостами

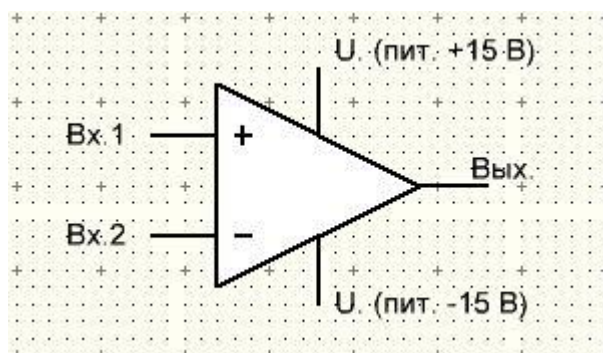
Обратная связь ОУ: положительная обратная связь, отрицательная обратная связь

Схемы включения операционных усилителей: компаратор на ОУ; триггер Шмитта на ОУ; повторитель; неинвертирующий усилитель; инвертирующий усилитель; сумматор инвертирующий.

Операционные усилители представляют собой микросхемы, которые могут выглядеть по-разному



Например, на этой картинке изображены два операционных усилителя российского производства. Слева операционный усилитель К544УД2АР в пластмассовом DIP корпусе, а справа изображен операционный усилитель в металлическом корпусе. Условное графическое обозначение (УГО) Условное обозначение операционного усилителя выглядит следующим образом.



Операционный усилитель (ОУ) имеет два входа и один выход. Также имеются выводы для подключения питания, но на условных графических обозначениях их обычно не указывают. Для такого усилителя есть два правила которые помогут понять принцип работы

1. Выход операционного усилителя стремится к тому, чтобы разность напряжений на его входах была равна нулю
2. Входы операционного усилителя ток не потребляют.

Вход 1 обозначается знаком «+» и называется неинвертирующим, а вход 2 обозначается как «-» и является инвертирующим.

Входы операционного усилителя обладают высоким входным сопротивлением или иначе говорят высоким импедансом.

Это говорит о том, что входы операционного усилителя ток почти не потребляют (буквально какие-то наноамперы). Усилитель просто оценивает величину напряжений на входах и в зависимости от этого выдает сигнал на выходе усиливая его.

Коэффициент усиления операционного усилителя имеет просто огромное значение, может достигать миллиона, а это очень большое значение! Значит это то, что если мы ко входу приложим небольшое напряжение, хотя бы 1 мВ, то на выходе получим сразу максимум, напряжение почти равное напряжению источника питания ОУ. Из-за этого свойства операционные усилители практически никогда не используют без обратной связи (ОС).

Входы ОУ работают так, что если величина на неинвертирующем входе окажется больше, чем на инвертирующем, то на выходе будет максимальное положительное значение +15В.

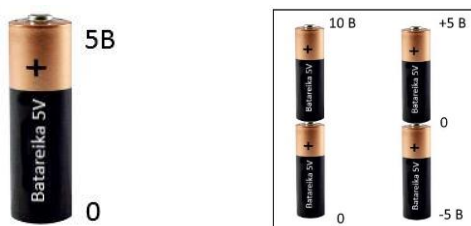
Если на инвертирующем входе величина напряжения окажется более положительно, то на выходе будем наблюдать максимум отрицательной величины, где-то -15В.

Действительно операционный усилитель может выдавать значения напряжений как положительной, так и отрицательной полярности. Может возникнуть вопрос о том, как же такое возможно? Но такое действительно возможно и это связано с применением источника питания с расщепленным напряжением, так называемым двуполярным питанием. Давайте рассмотрим питание операционного усилителя подробнее.

Питание ОУ

Чтобы операционный усилитель работал, его нужно запитать, т.е. подключить его к источнику питания. Но есть интересный момент, операционный усилитель может выдавать на выход напряжения как положительной, так и отрицательной полярности. Как такое может быть? А такое быть может! Это связано с применением двуполярного источника питания, конечно возможно использование и однополярного источника, но в этом случае возможности операционного усилителя будут ограничены. Вообще в работе с источниками питания многое зависит от того, что мы взяли за точку отсчета т.е. за 0 (ноль).

Пример на батарейках

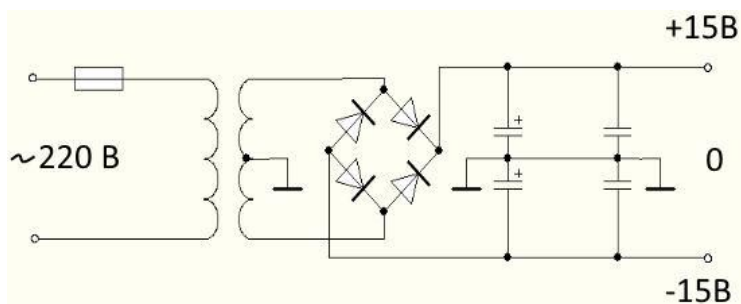


Обычно примеры проще всего приводить на пальцах, но мы возьмем пальчиковые батарейки. Допустим у нас есть обычная пальчиковая батарейка (батарейка типа АА). У нее есть два полюса плюсовой и минусовой. Когда минусовой полюс мы принимаем за ноль, считаем нулевой точкой отсчета, то соответственно плюсовой полюс батарейки будет у нас показывать +5В (значение с плюсом). Это мы можем увидеть с помощью мультиметра, достаточно подключить минусовой(черный) щуп к минусу батарейки, а красный щуп к плюсу и вуаля. Здесь все просто и логично. Теперь немножко усложним задачу и возьмем точно такую же вторую батарейку. Подключим батарейки последовательно и рассмотрим, как меняются показания измерительных приборов (мультиметров или вольтметров) в зависимости от различных точек приложения щупов. Если мы за ноль приняли минусовой полюс крайней батарейки, а измеряющий щуп подключим к плюсу батарейки, то мультиметр нам покажет значение в +10 В. Если за точку отсчета будет принят положительный полюс батарейки, а измеряющий щуп был подключен к минусу, то любой вольтметр нам покажет -10 В. Но если за точку отсчета будет принята точка между двумя батарейками, то в результате мы сможем получить простой источник двуполярного питания. И вы можете в этом убедиться, мультиметр нам подтвердит, что так оно и есть. У нас в наличии будет напряжение, как положительной полярности +5В, так и напряжение отрицательной полярности -5В.

Схемы источников двуполярного питания

Рассмотрим несколько примеров простых схем источников расщепленного питания которые можно применять

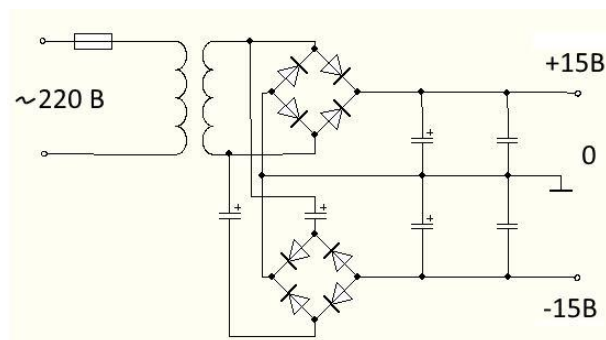
Схема с трансформатором, с отводом от «средней» точки



Она достаточно простая. На первичную обмотку трансформатора приходит переменный ток в 220В. Затем трансформатор преобразует переменный ток 220В в такой же переменный, но уже в 30В, на вторичной обмотке будет переменное напряжение в 30В, но обратите внимание на отвод от средней точки вторичной обмотки. На вторичной обмотке сделано ответвление, причем количество витков до этого ответвления равно числу витков после ответвления. Благодаря этому ответвлению мы можем получить на выходе вторичной обмотки переменное напряжение, как в 30 В так и в 15В. Переменное напряжение выпрямить и превратить в постоянное с помощью диодного моста. Но на выходе мы получили не очень стабильное постоянное напряжение в 30В. Это напряжение будет нам показывать мультиметр, если мы подключим щупы к выходу диодного моста, но нам нужно помнить про ответвление на вторичной обмотке. Это ответвление мы ведем далее и подключаем между электролитическими конденсаторами и затем между следующей парой высокочастотных конденсаторов. Мы получили нулевую точку отсчета между полюсами потенциалов положительной и отрицательной полярности. В результате на выходе мы имеем достаточно стабильное напряжение как +15В так и -15В. Эту схему улучшить если добавить стабилитроны или интегральные стабилизаторы, но тем не менее приведенная схема уже вполне может справиться с задачей питания операционных усилителей.

Схема с двумя диодными мостами.

Эта схема проще, нет необходимости искать трансформатор с ответвлением от середины или формировать вторичную обмотку самостоятельно. Но здесь придется добавить второй диодный мост. Диодные мосты включены так, что положительный потенциал формируется с катодов диодов первого моста, а отрицательный потенциал выходит с анодов диодов второго моста. Нулевая точка отсчета выводится между двумя мостами. Здесь используются разделительные конденсаторы, они оберегают один диодный мост от воздействий со стороны второго. Эта схема также легко подвергается различным улучшениям, но самое главное она решает основную задачу — с помощью нее можно запитать операционный усилитель.



Обратная связь ОУ

Операционные усилители почти всегда используют с обратной связью (ОС). Но что представляет собой обратная связь и для чего она нужна? Попробуем с этим разобраться. Без обратной связи при подаче на вход определенного сигнала на выходе мы всегда получим одно и то же значение напряжения. Оно будет близко напряжению питания (так как коэффициент усиления очень большой). Мы не контролируем выходной сигнал. Но если часть сигнала с выхода мы отправим обратно на вход, мы сможем контролировать выходное напряжение.

Это управление будет настолько эффективным, что можно просто забыть про коэффициент усиления, операционный усилитель станет послушным и предсказуемым потому, что его поведение будет зависеть лишь от обратной связи.

Положительная обратная связь, отрицательная обратная связь.

Обратная связь может быть как положительной, так и отрицательной. Положительная обратная связь – это, когда часть выходного сигнала поступает обратно на вход, причем она (часть выходного) суммируется с входным. Положительная обратная связь в операционных усилителях применяется не так широко, как отрицательная. Более того положительная обратная связь чаще бывает нежелательным побочным явлением некоторых схем и положительной связи стараются избегать. Она является нежелательной потому, что эта связь может усиливать искажения в схеме и в итоге привести к неустойчивости. С другой стороны, положительная обратная связь не уменьшает коэффициент усиления операционного усилителя, что бывает полезно. А неустойчивость также находит свое применение в компараторах, которые используют в АЦП (Аналого-цифровых преобразователях). Отрицательная обратная связь – это такая связь, когда часть выходного сигнала поступает обратно на вход, но при этом она вычитается из входного. Отрицательная обратная связь просто создана для операционных усилителей. Несмотря на то, что она способствует некоторому ослаблению коэффициента усиления, она приносит в схему устойчивость и управляемость. В результате схема становится независимой от коэффициента усиления, ее свойства полностью управляются отрицательной обратной связью. При использовании отрицательной обратной связи операционный усилитель приобретает одно очень полезное свойство: операционный усилитель контролирует состояния своих входов и стремится к тому, чтобы потенциалы на его входах были равны. ОУ подстраивает свое выходное напряжение так, чтобы результирующий входной потенциал (разность $V_{x.1}$ и $V_{x.2}$) был нулевым. Подавляющая часть схем на операционных усилителях строится с применением отрицательной обратной связи. Так что для того, чтобы разобраться как работает отрицательная связь нам нужно рассмотреть схемы включения ОУ.

Ход работы:

1. Изучить теоретическую часть и ответить на вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что такое операционный усилитель?
2. Условное графическое обозначение (УГО)
3. Правильное питание ОУ Пример на батарейках
4. Схемы источников двуполярного питания
5. Схема с трансформатором, с отводом от «средней» точки
6. Схема с двумя диодными мостами
7. Обратная связь ОУ: положительная обратная связь, отрицательная обратная связь
8. Схемы включения операционных усилителей: компаратор на ОУ; триггер Шмитта на ОУ; повторитель; неинвертирующий усилитель; инвертирующий усилитель; сумматор инвертирующий.

Практическая работа № 18

Тема 3.2. Электронные устройства

Исследование операционного усилителя.

Цель работы: Экспериментальное подтверждение теоретических положений по принципу действия операционного усилителя (ОУ).

Перечень используемого оборудования: измерительный стенд, модуль «Операционный усилитель», осциллограф.

Теоретическая часть:

Операционным усилителем называют усилитель, имеющий большой коэффициент усиления и применяемый для выполнения различных операций по преобразованию электрических сигналов.

ОУ с использованием цепей положительных и отрицательных обратных связей позволяют усиливать, ослаблять, генерировать электрические сигналы, осуществлять сложение, вычитание, дифференцирование, интегрирование и другие операции.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили трехкаскадные ОУ. Структурная схема трехкаскадного ОУ приведена на рис.1. Первый каскад обычно выполняют по схеме простого дифференциального усилителя (ДУ), имеющего два входа и два выхода. Второй каскад - усилитель напряжения (УН), также выполняемый по схеме дифференциального усилителя, обладает значительным коэффициентом усиления напряжения.

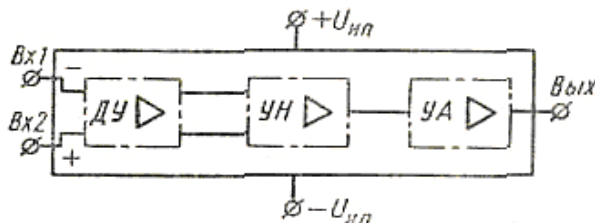


Рис.1 Структурная схема ОУ

Выходной каскад является усилителем амплитуды сигнала (УА) и выполняется по схеме ОК. Общий коэффициент усиления трехкаскадного ОУ достигает сотен тысяч. Входные характеристики ОУ практически полностью определяются входными характеристиками дифференциального усилителя, а выходные - аналогичными показателями каскада по соответствующей схеме включения.

Условные графические обозначения и схема включения показаны на рис.2.

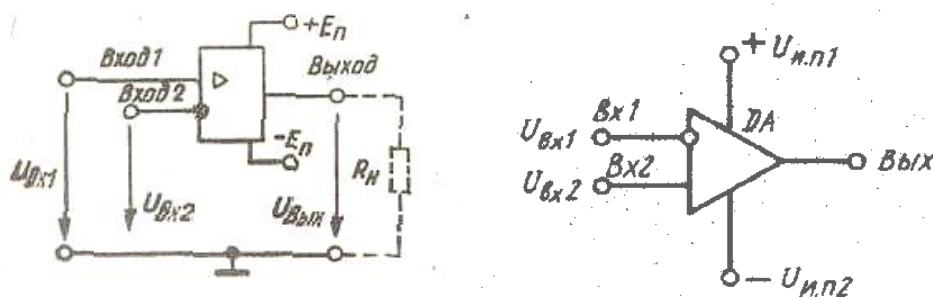


Рис.2 Условное графическое обозначение ОУ

Вход 1 является неинвертирующим, вход 2 - инвертирующим (обозначен кружком).

Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ связано со входными соотношением:

$$U_{\text{вых}} = K_u (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}),$$

где K_u - собственный коэффициент усиления ОУ по напряжению.

Как правило, ОУ питается от двух источников питания, подключаемых разными полюсами.

Применение двух источников питания при подключении нагрузки к их общей точке позволяет формировать на выходе двухполярное напряжение.

Следовательно, передаточная характеристика усилителя расположена в двух квадрантах. На рис.3 приведены передаточные характеристики ОУ соответственно для неинвертирующего и инвертирующего входов. Из этих характеристик следует, что максимальное выходное напряжение ОУ ($U_{\text{выхmax}}$) всегда меньше напряжения питания.

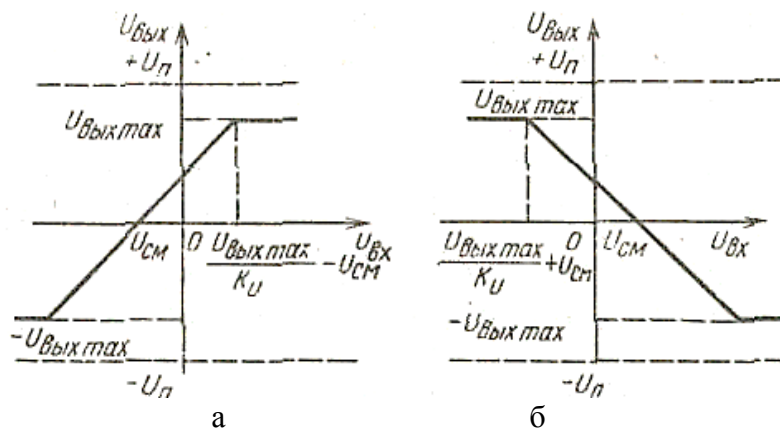


Рис.3 Передаточные характеристики ОУ: а – по неинвертирующему входу; б – по инвертирующему входу

Примеры использования ОУ

При рассмотрении основных типовых применений ОУ будем полагать, что влиянием собственных параметров усилителя с учетом того, что K_U и $R_{вх}$ достаточно велики, а $R_{вых}$ мало, можно пренебречь.

Типовая схема усилителя с обратными связями представлена на рис.4.

Входной сигнал и сигнал обратной связи подаются на один и тот же инвертирующий вход. При этом образуется цепь параллельной отрицательной обратной связи по напряжению.

Сопротивления резисторов Z , реализующих обратную связь, в общем случае имеют комплексный характер.

В этом случае, предполагая, что $K_U \rightarrow \infty$, коэффициент передачи усилителя с обратными связями определяется равенством :

$$K_{U \text{ оос}} = - Z_{ос} / Z_1.$$

Минус означает, что фазы входного и выходного напряжений сдвинуты относительно друг друга на 180° .

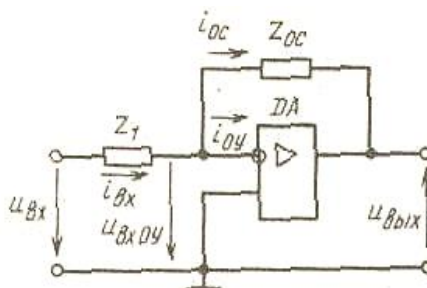


Рис.4 Усилитель с обратными связями

Рассмотрим некоторые примеры применения ОУ.

Масштабный усилитель. Если в цепь обратной связи включить резисторы $R_{ос}$ и R_1 , то выходное напряжение будет определяться соотношением:

$$U_{вых}(t) = - (R_{ос} / R_1) U_{вх}(t).$$

Отношение $R_{ос} / R_1$ называют масштабным коэффициентом.

При условии $R_{ос} = R_1 = R$ усилитель становится инвертором, т.е.:

$$U_{вых}(t) = -U_{вх}(t).$$

Суммирующий усилитель. Суммирующий усилитель предназначен для формирования напряжения, равного усиленной алгебраической сумме нескольких входных сигналов, т. е. выполняет математическую операцию суммирования нескольких сигналов. При этом выходной сигнал дополнительно инвертируется. В качестве примера на рис.5 приведена схема устройства, выполняющего данную операцию для трех входных напряжений.

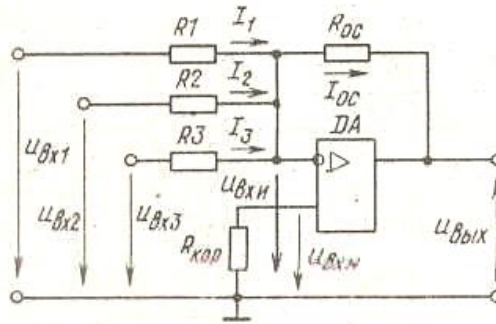


Рис.5 Суммирующий усилитель

Соотношение для определения выходного напряжения имеет вид:

$$U_{вых} = -(U_{вх1}R_{oc}/R_1 + U_{вх2}R_{oc}/R_2 + U_{вх3}R_{oc}/R_3).$$

Сигнал на выходе равен алгебраической сумме входных сигналов, взятых со своими масштабными коэффициентами, но с обратным знаком.

В частном случае, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_{oc}$, получим

$$U_{вых} = -(U_{вх1} + U_{вх2} + U_{вх3}).$$

Интегрирующий усилитель (интегратор). Интегратором называется электронное устройство, выходной сигнал которого пропорционален интегралу по времени от его входного сигнала. Простейшая схема интегратора, выполненная на ОУ, приведена на рис.6.

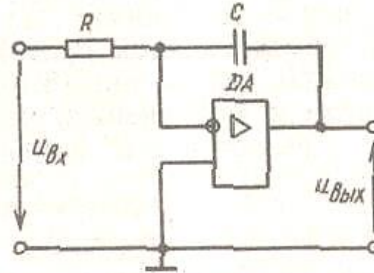


Рис.6 Интегрирующий усилитель

Данная схема является инвертирующим усилителем, в цепь обратной связи которого включен конденсатор С. При этом коэффициент передачи усилителя находится как:

$$U_{вых}(t) = -1/RC \int_0^t U_{вх}(t)dt.$$

Дифференцирующий усилитель (дифференциатор). Дифференциатором называется устройство, выходной сигнал которого пропорционален производной от его входного сигнала. Другими словами, выходной сигнал дифференциатора пропорционален скорости изменения его входного сигнала.

Простейшая схема дифференциатора, выполненная на ОУ, приведена на рис.7.

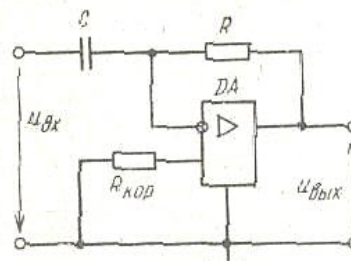


Рис.7 Дифференцирующий усилитель

Выходное напряжение данного усилителя определяется соотношением:

$$U_{вых}(t) = -RC dU_{вх}(t)/dt.$$

Порядок выполнения работы

В работе исследуется интегральный ОУ 153УД1А. Питание микросхемы осуществляется от источников +6В и -6В.

1 Подготовить измерительный стенд. Для этого:

- 1.1 Ручки регулировки напряжения блоков питания 1 и 2 – в крайнее левое положение.
- 1.2. Переключатели приборов P1, P2 – в положение «20».
- 2 В работе используется модуль схема которого имеет вид (рис.8):

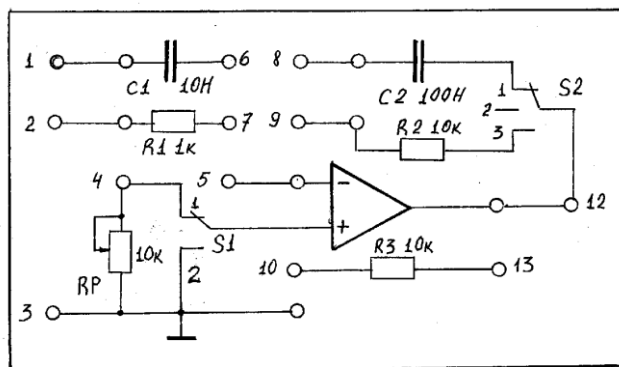


Рис.8 Схема модуля для исследования ОУ

3 Исследование усилителя с ООС.

- 3.1 Включить осциллограф и измерительный стенд.
- 3.2 С помощью осциллографа установить на выходе ГНЧ гармонический сигнал с амплитудой $U_m = 5 \text{ мВ}$ и частотой $f = 10 \text{ кГц}$.
- 3.3 Собрать схему усилителя с ООС (рис.9):

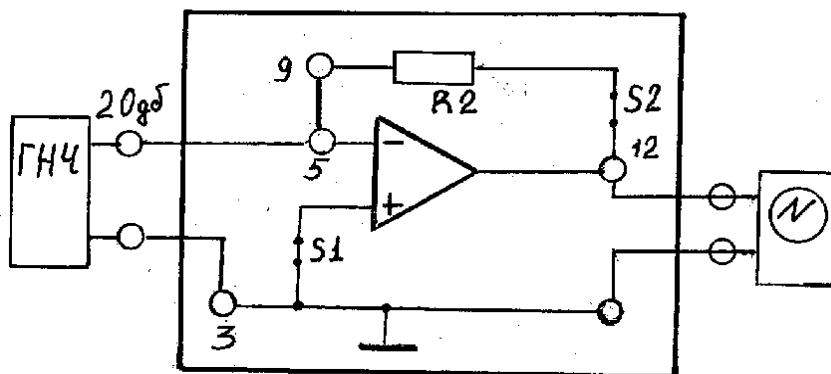


Рис.9 ОУ с ООС

- 3.4 Измерить амплитуду выходного сигнала и рассчитать K_u .

4 Исследование масштабного усилителя.

- 4.1 Установить на выходе БП 2 напряжение $U = +0,1 \text{ В}$.
- 4.2 Собрать схему (рис.10):

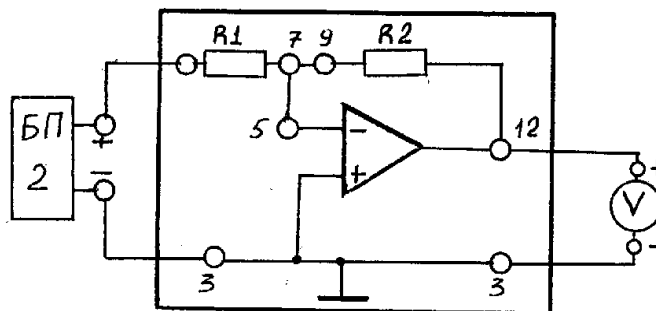


Рис.10 Масштабный усилитель

- 4.3 Измерить вольтметром $U_{\text{вых}}$ и рассчитать масштабный коэффициент:
$$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} .$$

Сравнить его с коэффициентом, определяемым по параметрам цепи ОС:

$$K = R2 / R1.$$

4.4 Вместо R1 включить R3 = 10 кОм и вновь рассчитать K.

Сделать выводы.

5 Исследование дифференцирующего усилителя.

5.1 Установить на выходе ГНЧ импульсный сигнал с $f = 1 \text{ кГц}$ амплитудой $U_a = 0,5 \text{ В}$.

5.2 Собрать схему (рис.11):

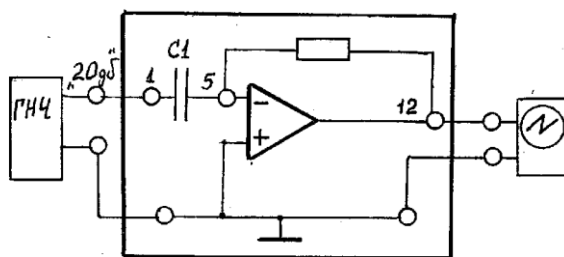


Рис.11 Дифференцирующий усилитель

5.3 Изобразить осциллограммы входного и выходного сигналов в отчете.

6 Исследование интегрирующего усилителя.

6.1 В цепи обратной связи включить вместо C1 – R1, вместо R2 – C2.

6.2 Установить на выходе ГНЧ импульсный сигнал с $f = 100 \text{ Гц}$ и $U_a = 0,5 \text{ В}$ и подключить его к входу (гн.1).

6.3 Убедиться, что выходной сигнал имеет пилообразную форму.

6.4 Осциллограммы сигналов отобразить в отчете.

7 Подготовить и сдать отчет.

Практическая работа № 19.

Тема 3.3. Электронные импульсные устройства.

Моделирование заданных логических устройств.

Цель работы: расширить и систематизировать знания по моделированию заданных логических устройств.

Перечень используемого оборудования:

Теоретическая часть:

ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Логические элементы (ЛЭ) – это электронные устройства (схемы), выполняющие **функции алгебры логики**. Аргументы и функции алгебры логики, обозначаемые нулями и единицами, для логических элементов – это **входные и выходные напряжения**, называемые **логическими нулями и логическими единицами**.

Рассмотрим работу шести ЛЭ: элемента логического сложения (**ИЛИ**), логического умножения (**И**), инверсии (**НЕ**), логического сложения с инверсией (**ИЛИ-НЕ**), логического умножения с инверсией (**И-НЕ**), а также элемента «сумма по модулю 2» (**проводящее ИЛИ**).

Логические элементы могут иметь два и более входов. При описании работы в текстах логические элементы обозначаются функцией, которую они выполняют, а перед ней указывается количество входов. Например, **2ИЛИ**, **3И**, **2ИЛИ-НЕ**, **4И-НЕ**, **8И-НЕ**.

1.1. Логическое сложение

Операция «**логическое сложение**» имеет еще два названия: операция **ИЛИ** и дизъюнкция.

Логический элемент, выполняющий эту операцию, называют **элементом ИЛИ**.

Напомним правила логического сложения:

$$0+0 = 0$$

$$0+1 = 1$$

$$1+0 = 1$$

$$1+1 = 1.$$

Нетрудно заметить, что если **в сложении участвует хотя бы одна единица**, – **результат равен 1**. Отсюда следуют формулы логического сложения в общем виде:

$$a+0 = a$$

$$a+1 = 1$$

$$a + a = a$$

$$a + a = 1.$$

Поясним последнее выражение: если **в сложении используется число и его противоположность**, то **результат равен 1**, так как одно из слагаемых будет обязательно равно 1.

Логический элемент **ИЛИ** — это электронное устройство, реализующее **операцию логического сложения** над сигналами, пришедшими на его вход. Результат появляется на выходе элемента в виде соответствующего логического уровня напряжения.

На рис. 1.1 представлены разновидности логических элементов **ИЛИ** – двух-, трех- и четырехвходовой (**2ИЛИ**, **3ИЛИ**, **4ИЛИ**) – и формулы, которые они реализуют.

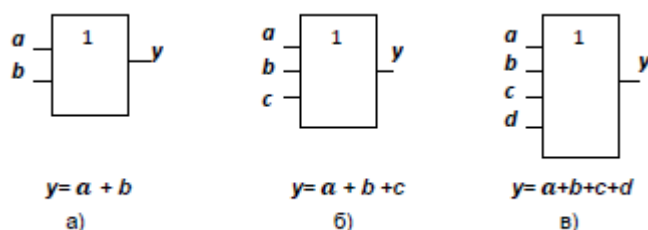


Рис.1.1. Логические элементы **ИЛИ**: а - **2ИЛИ**; б - **3ИЛИ**; в - **4ИЛИ**

Работа логического элемента может задаваться как формулой, так и **таблицей истинности**, где приводятся все возможные сочетания (наборы) входных сигналов и соответствующие им значения выходного сигнала **y**. Рассмотрим работу **двухвходового** логического элемента – **2ИЛИ**. Условное обозначение, формула, таблица истинности и размеры изображения двухвходового логического элемента на схемах по стандарту представлены на рис.1.2. Размеры 10х15мм имеют все двухвходовые логические элементы независимо от выполняемой функции.

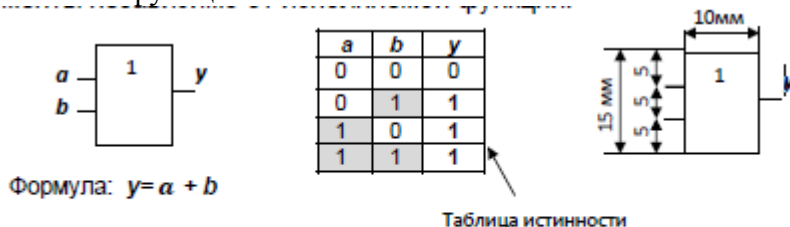


Рис.1.2. Логический элемент **ИЛИ**, его таблица истинности и размеры двухвходового ЛЭ на схемах

Построим временную диаграмму напряжений $y(t)$ работы ЛЭ при разных значениях входных сигналов **a** и **b** (рис.1.3). Временная диаграмма, изображенная на рис.1.3а, составлена в том порядке, как заданы входные комбинации в таблице истинности. По рисунку видно, что **если хотя бы на одном из входов 1, то на выходе – 1**. Однако таблица описывает лишь закон работы элемента, а входные сигналы могут приходить на входы в совершенно произвольной последовательности и иметь разные длительности.

По графику на рис.1.3б видно, что логическая **1** на входе **b** **БЛОКИРУЕТ** прохождение импульсов со входа **a** - на выход **y**. В свою очередь логический **0** на входе **b**, наоборот, **ПРОПУСКАЕТ** импульсы со входа **a** на выход **y**. Почему так происходит? Логический элемент **2ИЛИ** реализует формулу $y = a + b$ (рис.1.4а). По правилам алгебры логики $a + 0 = a$, $a + 1 = 1$. Поэтому в формуле $y = a + b$ путем простой подстановки значения **b** получим: при $b=1$ $y = a + b = a + 1 = 1$ *y не зависит от a*; при $b=0$ $y = a + b = a + 0 = a$ *y зависит только от a*.

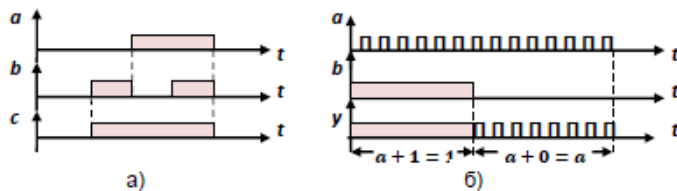


Рис.1.3. Временные диаграммы работы логического элемента **2ИЛИ**: а - сигналы на входы приходят в том порядке, как записаны в таблице истинности; б - сигналы со входа a проходят на выход y при $b=0$

Иногда логическую функцию двух аргументов можно реализовать на логических элементах с большим количеством входов. Для этого на свободные (лишние) входы принудительно подают такие логические уровни напряжений, которые не изменят итоговой логической функции (рис.1.4, а; б; в; г; д).

Добавление входов изменяет размер изображения логического элемента на схемах: расстояние между входами равно 5мм, расстояние от края корпуса до входов сверху и снизу – 5мм, выход логического элемента – изображается по центру (рис.1.4, е).

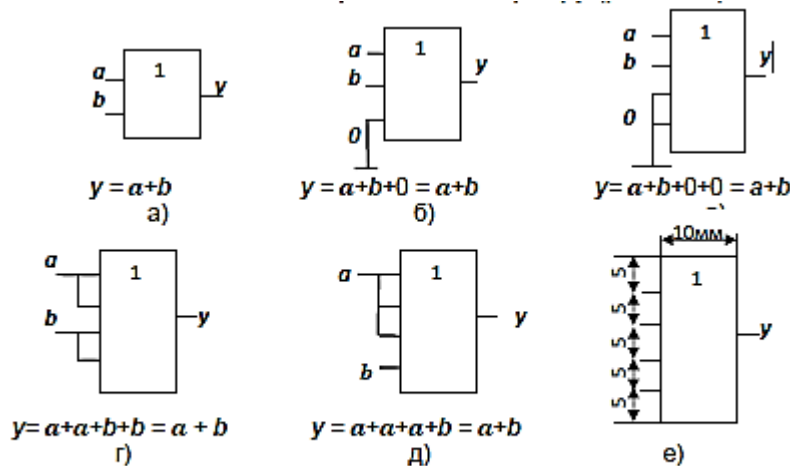


Рис.1.4. Реализация логического сложения двух логических напряжений на элементах **2ИЛИ**, **3ИЛИ** и **4ИЛИ**

Например, чтобы реализовать логическое сложение двух напряжений a и b на многовходовом логическом элементе **ИЛИ**, на свободные входы достаточно принудительно подать логический 0^1 (рис.1.4, б; в).

Это понятно из формулы $y = a + b + 0 + 0 + \dots + 0 = a + b$.

Сколько нулей не прибавляй - итог не изменится!

На незадействованные входы можно не только принудительно подавать логический 0 , но и объединять с одним из задействованных входов так, как показано на рис.1.4г, д. Логика работы от этого не изменится. Докажем правильность работы логических элементов при объединении свободных входов:

для рис.1.4,в $y = \underline{a} + \underline{a} + \underline{b} + \underline{b} = a + b$;

для рис.1.4,г $y = \underline{a} + \underline{a} + \underline{a} + b = a + b$.

В обоих случаях $y = a + b$.

Здесь и далее будем считать подачей логического нуля соединение соответствующего входа с «общим»

проводом (рис.1.4,б;в).

ЛОГИЧЕСКОЕ СЛОЖЕНИЕ

Правило алгебры логики:

если в сложении участвует хотя бы одна 1, то результат равен 1.

Работа логического элемента ИЛИ:

если хотя бы на одном из входов логическая 1, то на выходе - логическая 1

Работа логического элемента 2ИЛИ:

- логическая 1 на одном входе – БЛОКИРУЕТ прохождение сигналов со второго входа на выход, обеспечивая на выходе $y=1$
- логический 0 на одном из входов ПРОПУСКАЕТ сигналы со второго входа на выход

1.2. Логическое умножение

Операция «логическое умножение» имеет еще два названия: операция И, конъюнкция. Напомним правила логического умножения.

$$0 \cdot 0 = 0$$

$$0 \cdot 1 = 0$$

$$1 \cdot 0 = 0$$

$$1 \cdot 1 = 1.$$

Нетрудно заметить, что, если в умножении участвует хотя бы один ноль – результат равен 0. Отсюда следуют формулы логического умножения в общем виде:

$$a \cdot 0 = 0$$

$$a \cdot 1 = a$$

$$a \cdot a = a$$

$$a \cdot 0 = 0.$$

Поясним последнее выражение: если в умножении используется число и его противоположность, то результат будет равен 0, т.к. одним из множителей обязательно будет 0.

Правила логического умножения очень похожи на правила арифметического умножения, за исключением правила 0×0 – в арифметике результат не определен.

Логический элемент, выполняющий функцию логического умножения, называют элементом И.

Количество входов логических элементов И может быть различным – от 2 до 8.

На рис.1.5 представлены разновидности логических элементов И – двух-, трех- и четырехвходовой (2И,3И,4И) - и формулы, которые они реализуют.

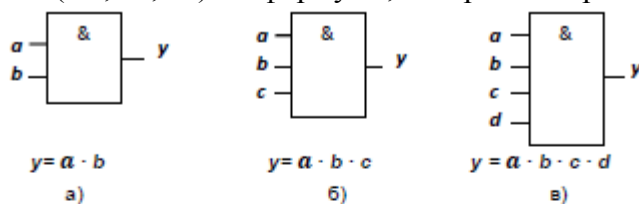


Рис.1.5. Логические элементы И: а - 2И; б - 3И; в - 4И

Рассмотрим работу двухвходового элемента И. Условное обозначение, формула и таблица истинности представлены на рис.1.6.



Рис.1.6. Логический элемент И и его таблица истинности

Построим временную диаграмму напряжений $y(t)$ работы ЛЭ при разных значениях входных сигналов a и b (рис.1.7).

Временная диаграмма на рис.1.7, а составлена в том порядке, как заданы входные комбинации в таблице истинности. Для такого построения нужно рассматривать каждую комбинацию входных сигналов в отдельности.

Но лучше строить временную диаграмму другим путем: помнить, что любое умножение на 0 дает в результате 0 , а если один из сомножителей равен 1 , то результат равен другому сомножителю. В этом случае построение временной диаграммы для логических элементов, имеющих большое количество входов, не будет представлять сложности.

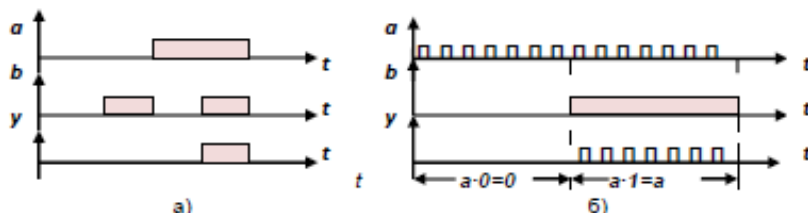


Рис.1.7. Временные диаграммы работы логического элемента 2И: а - сигналы на входы приходят в том порядке, как записаны в таблице истинности; б - сигналы со входа a проходят на выход y при $b=1$

По графику, изображенному на рис.1.7, б, видно, что логический 0 на входе b БЛОКИРУЕТ прохождение импульсов со входа a на выход y (так как умножение на 0 в результате дает 0), а логическая 1 на входе b , наоборот, ПРОПУСКАЕТ импульсы со входа a – на выход $y = a \cdot 1 = a$.

Условные обозначения многовходовых логических элементов И и реализация на них функций логического умножения с количеством входных сигналов, меньшим, чем количество входов, представлены на рис.1.8.

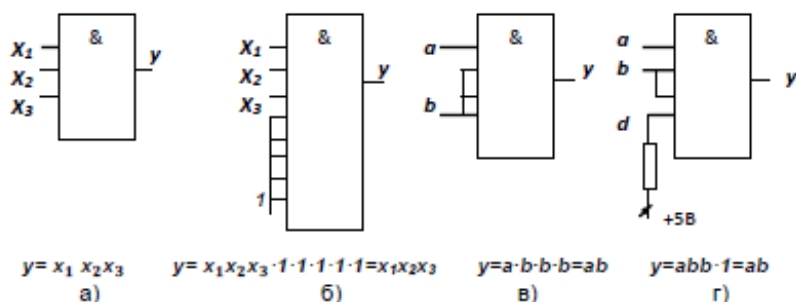


Рис.1.8. Реализация логического умножения на многовходовых ЛЭ: а - функция трех аргументов на элементе 3И; б - функция трех аргументов на элементах 8И; в - функция двух аргументов на элементе 4И; г - функция двух аргументов на элементе 4И

Для того чтобы реализовать логическое умножение трех напряжений x_1 , x_2 и x_3 на многовходовом логическом элементе **8И** (рис.1.8, б), достаточно принудительно подать логическую 1 на его свободные входы². Это понятно из формулы

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3.$$

Сколько на единицу не умножай - итог не изменится! Незадействованные входы можно объединять с одним из используемых входов (рис.1.8, в; г), что также не повлияет на результат операции И.

Задача 1. Построить временную диаграмму напряжения $y(t)$ на выходе элемента **4И** (рис.1.9, а), если напряжения на входах представлены графиками $a(t)$, $b(t)$, $c(t)$, $d(t)$ на рис.1.9,б .

Решение задачи можно производить путем простого разбиения графиков вертикальной линией на мелкие участки и определять значение «у» простой подстановкой значений a, b, c, d на каждом участке.

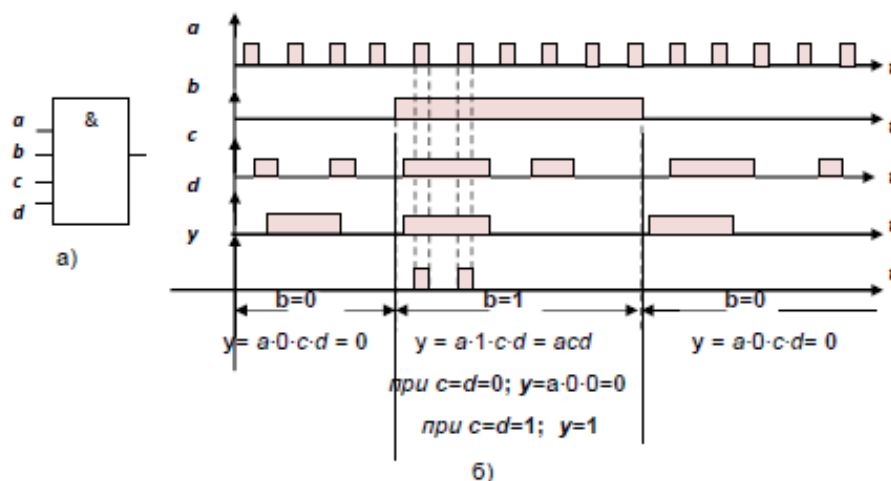


Рис.1.9. Работа логического элемента **4И**: а - условное обозначение; б - временная диаграмма работы ЛЭ при заданных изменениях напряжений на входах $a(t)$, $b(t)$, $c(t)$, $d(t)$

2 Здесь и далее в пособии, будем считать подачей логической единицы – соединение соответствующего входа с источником питания +5В (рис.1.8в).

t

Но легче решить задачу, вспомнив правило: напряжение на выходе элемента **И** равно логической **1**, если на всех входах – логическая **1**. Таких ситуаций всего две – показано пунктиром на временной диаграмме (рис.1.9, б).

В общем случае, при построении сложных временных диаграмм выделяют условно крупные участки графика одного из напряжений (в нашем примере на рис.1.9 обозначено $b=0$, $b=1$). Затем записывают формулу для y , подставив в нее значения аргументов на выделенных участках (показано на рис.1.9 под графиком), и строят график $y(t)$ по полученному выражению.

ЛОГИЧЕСКОЕ УМНОЖЕНИЕ <i>Правило алгебры логики:</i> если в умножении участвует хотя бы один 0, то результат равен 0. Работа логического элемента И: если хотя бы на одни из входов поступает логический 0, то на выходе – логический 0 Работа логического элемента 2И: • логический 0 на одном входе – БЛОКИРУЕТ прохождение сигналов со второго входа на выход, обеспечивая на выходе $y=0$; • логическая 1 на одном из входов ПРОПУСКАЕТ сигналы со второго входа на выход.
--

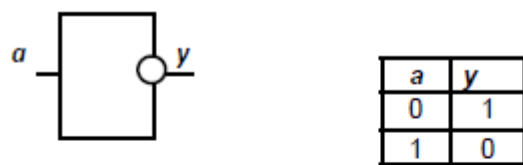
1.3. Инверсия

Операция «инверсия» состоит в том, что инверсия **0** равна **1**, а инверсия **1** равна **0**, то есть:

$$\begin{aligned}\bar{0} &= 1 \\ \bar{1} &= 0\end{aligned}$$

Другие названия ЛЭ «инверсия» – элемент **НЕ**, инвертор. Этот логический элемент просто меняет входной сигнал на его противоположность (рис.1.10). И все!

Из формулы $y =$ видно, что значение y - противоположно значению a , это подтверждает и график.



Формула: $y = \bar{a}$

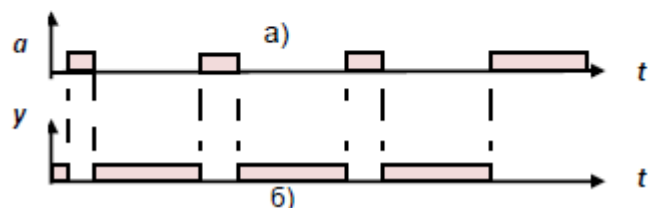


Рис. 1.10. Логический элемент **НЕ**: а – условное обозначение и таблица истинности; б – временная диаграмма

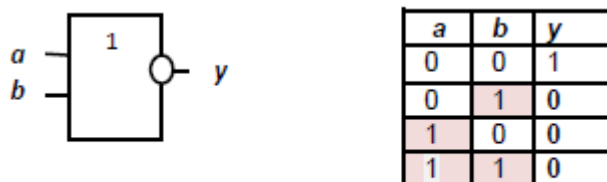
1.4. Логическое сложение с инверсией

Операция логического сложения с инверсией **ИЛИ-НЕ**

выполняется по правилам логического сложения, однако результат записывается в проинвертированном виде. Логический элемент

ИЛИ-НЕ выполняет операцию **ИЛИ**, но с точностью до наоборот.

Условное обозначение, формула, а также таблица истинности представлены на рис.1.11.



Формула: $y = \overline{a + b}$

Рис.1.11. Логический элемент **ИЛИ-НЕ** и его таблица истинности

Из временных диаграмм (рис.1.12, а) видно, что если хотя бы на одном из входов – логическая 1, то напряжение на выходе равно 0. Это логично, ведь сложение с 1 всегда дает 1, но функция выполняется – с инверсией, поэтому на выходе y – логический 0.

Если же складываются сигналы, один из которых равен 0, то на выход проходит проинвертированный второй сигнал (рис.1.12,б).

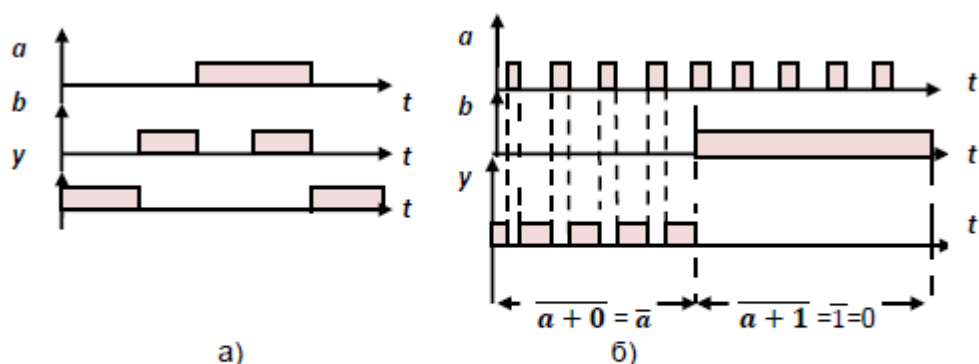


Рис.1.12. Временные диаграммы работы элемента **ИЛИ-НЕ**: а - сигналы на входы приходят в том порядке, как записаны в таблице истинности; б - при $b=0$ сигналы со входа a проходят в инверсном виде на выход y

Временную диаграмму (рис.1.12, б) можно пояснить с помощью формул:

при $b=0$ $y = \overline{a + 0} = \bar{a}$ - на выход y проходят сигналы со входа a с инверсией;

при $b=1$ $y=0$ – на выходе логический 0. Получается, что **логическая 1** на одном из входов **БЛОКИРУЕТ** прохождение сигналов с **другого входа на выход**.

Задача 2. Построить временную диаграмму напряжений на выходе элемента **4ИЛИ-НЕ**, если входные напряжения $a(t)$ $b(t)$ $c(t)$ $d(t)$ заданы графиками (рис.1.13).

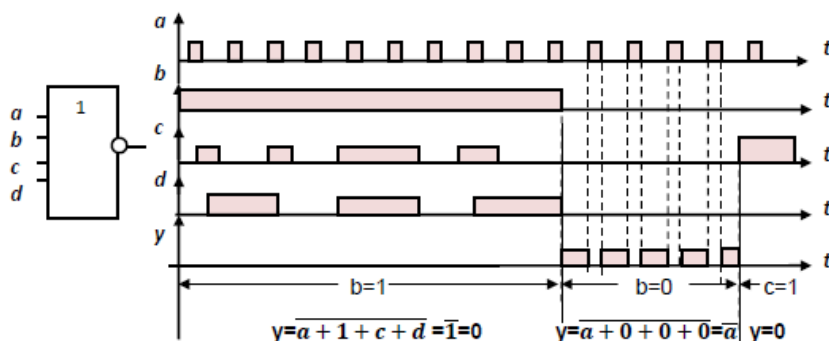


Рис.1.13. Условное обозначение элемента **4ИЛИ-НЕ** и временная диаграмма его работы при заданных значениях $a(t)$, $b(t)$, $c(t)$, $d(t)$

Решение. Выделим на графике (рис.1.13) участки, на которых $b=1$, $b=0$ и $c=1$. Затем подставим эти значения в формулу работы элемента **4ИЛИ-НЕ**, а потом получим значения для y для каждого выделенного участка. Сигналы b и c равные 1 блокируют прохождение остальных сигналов, поэтому на выходе – 0.

СЛОЖЕНИЕ С ИНВЕРСИЕЙ

Правило алгебры логики:

если в логическом сложении с инверсией участвует хотя бы одна 1, то результат равен 0.

Работа логического элемента ИЛИ-НЕ:

если хотя бы на один из входов поступает логическая 1, то на выходе – логический 0.

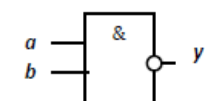
Работа логического элемента 2ИЛИ-НЕ:

- логическая 1 на одном входе – БЛОКИРУЕТ прохождение сигналов со второго входа на выход, обеспечивая на выходе $y=0$;
- логический 0 на одном из входов ПРОПУСКАЕТ проинвертированные сигналы со второго входа на выход.

1.5. Логическое умножение с инверсией

Операция логического умножения с инверсией **И-НЕ** выполняется по правилам логического умножения, однако результат записывается в проинвертированном виде. Работа ЛЭ **И-НЕ** представляет собой работу элемента И с точностью до наоборот.

Условное обозначение, формула, таблица истинности и временные диаграммы элемента **И-НЕ** представлены на рис.1.14 и 1.15.



Формула $y = \overline{a \cdot b}$

a	b	y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Рис. 1.14. Логический элемент **И-НЕ** и его таблица истинности

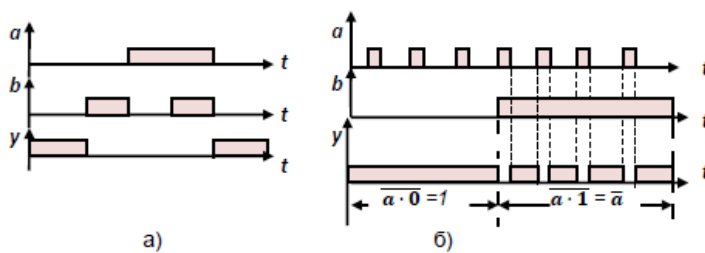


Рис. 1.15. Временные диаграммы работы элемента **2И-НЕ**: а - сигналы на входы приходят в том порядке, как записаны в таблице истинности; б - при **b=1** сигналы со входа **a** проходят **в инверсном виде** на выход **y**

Временная диаграмма на рис. 1.15, б наглядно показывает, что импульсы, поступающие на вход **a**, проходят на выход **y** в инверсном виде только при **b=1**. Если же на **b** - логический **0**, то он **БЛОКИРУЕТ** прохождение импульсов со входа **a** на выход, при этом на выходе под-держивается логическая **1** ($y=1$).

УМНОЖЕНИЕ С ИНВЕРСИЕЙ

Правило алгебры логики:

если в умножении с инверсией участвует хотя бы один **0**, то результат равен **1**.

Работа логического элемента И-НЕ:

если хотя бы на один из входов поступает логический **0**, то на выходе – логическая **1**

Работа логического элемента 2И-НЕ:

- логический **0** на одном входе – **БЛОКИРУЕТ** прохождение сигналов со второго входа на выход, обеспечивая на выходе **y=1**;
- логическая **1** на одном из входов **ПРОПУСКАЕТ** проинвертированные сигналы со второго входа на выход.

1.6. Сумма по модулю 2 (исключающее ИЛИ)

Операция сложения по модулю 2 выполняется в соответствии с правилом: **если в сложении участвует нечетное число единиц, то результат операции равен 1, в противном случае - равен 0**.

Сложение по модулю 2 обозначается символом $\oplus$. Логический элемент, выполняющий операцию сумма по модулю 2, иногда называют элементом **ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ**.

Условные обозначения, таблица истинности и временная диаграмма работы двухвходового ЛЭ «сумма по модулю 2» представлены на рис. 1.16.

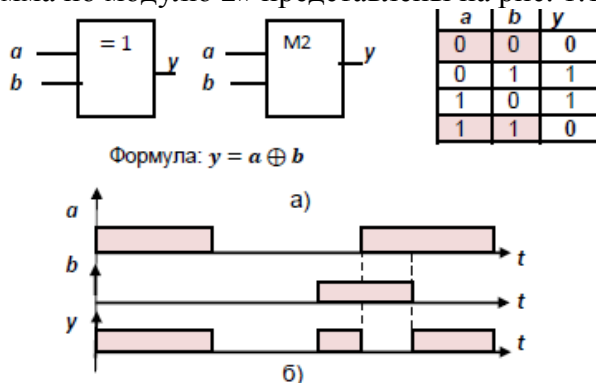


Рис. 1.16. Логический элемент сумма по модулю 2: а – условные обозначения и таблица истинности; б - временная диаграмма работы

На рис.1.16 представлены два условных обозначения ЛЭ сумма по модулю 2. Оба обозначения можно встретить в справочниках микросхем. Двухвходовой ЛЭ работает по принципу: если на вход пришло два одинаковых логических уровня напряжения (два нуля или две единицы), то функция равна **0**, в противном случае функция равна **1**.

Работу двухвходового элемента сумма по модулю 2 можно интерпретировать и по-другому. Если принять один вход как управляющий, то логика работы элемента может быть сформулирована так:

- если на управляющем входе - логический **0**, то на выход проходит сигнал со второго входа;
- если на управляющем входе **1**, то состояние выхода равно инверсии состояния второго входа:

при $a=0$, $y=b$; при $a=1$, $y=$

СУММА ПО МОДУЛЮ 2

Правило алгебры логики:

если в сложении по модулю 2 участвует **четное** число нулей или единиц, то результат **равен 0**.

Работа логического элемента «Сумма по модулю 2»:

если на входы поступает четное число логических 1 или логических 0, то на выходе – логический 0.

Работа 2-входового ЛЭ «Сумма по модулю 2»:

логический 0 на одном из входов обеспечивает прохождение сигналов со второго входа на выход; **логическая 1** – прохождение сигналов со второго входа в инверсном виде на

Для закрепления материала запишите формулы, реализуемые логическими элементами, представленными на рис.1.17.

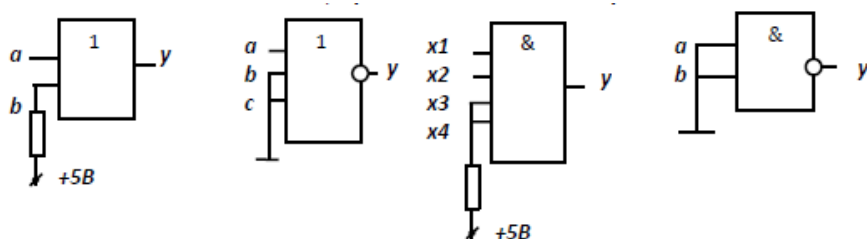


Рис.1.17. Примеры включения логических элементов

1.7. Построение схем на ЛЭ по формулам

Построим схему на логических элементах по заданной формуле $y=ab+c$ (рис. 1.18).

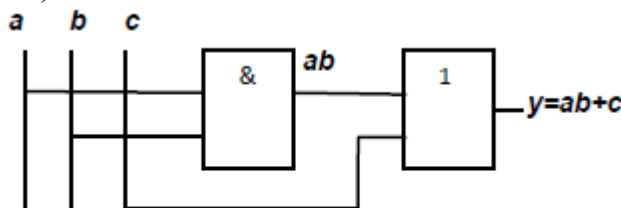


Рис. 1.18. Построение схемы на логических элементах по формуле $y=ab+c$

Входные сигналы **a**, **b**, **c** – это сигналы, поступающие по проводам от некоторых источников, таких как, например, цифровые схемы, бинарные датчики и т.п.

Построим схему, реализующую функцию **y**, заданную формулой $y = + (+b)$.

Построение схемы ведется последовательно.

а) так как в формулу входят аргументы как в прямом виде **a**, **b**, **c**, так и в инверсном **и**, то получим сначала инверсии входных сигналов **и** (рис.1.19);

б) выполним произведение с инверсией логическим элементом **3И-НЕ**;

в) реализуем логическим элементом **2И-НЕ**.

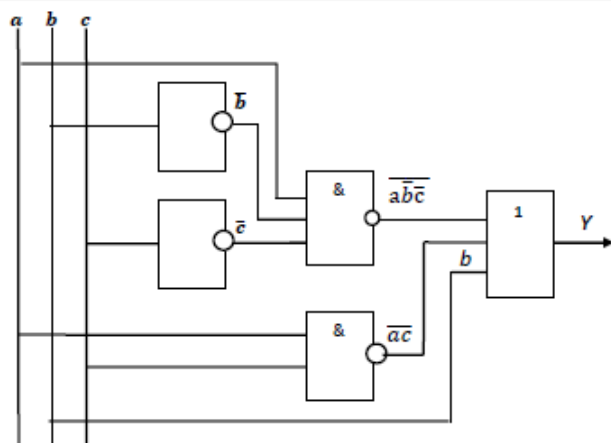


Рис.1.19. Реализация функции $y = a\bar{b}\bar{c} + (\bar{a}c + b)$.

Далее возможны два варианта реализации:

1. Получить выражение в скобках $(\bar{a}c + b)$ логическим элементом

ИЛИ, а после этого сложить два слагаемых: $a\bar{b}\bar{c}$ и $(\bar{a}c + b)$ еще одним элементом **ИЛИ**;

2. Сложить все три слагаемых сразу логическим элементом **ЗИЛИ**, ведь скобки, использованные в записи выражения y , не меняют результата сложения.

На рис.1.19 использован второй вариант с использованием ЛЭ **ЗИЛИ**.

Постройте самостоятельно схему, реализующую функцию

$$y = a(\bar{b}\bar{c} + d).$$

Иногда требуется уметь строить схему при ограниченном варианте выбора логических элементов. Например, как в задаче, приведенной ниже.

Задача 3. Построить схему, реализующую функцию

$$y = (a + \bar{b} + c + d)\bar{a}\bar{b} + cd^3$$

только на 3-входовых ЛЭ (выражение упрощать не надо).

Решение.

В схеме должны быть реализованы:

- ✓ инверсия одного аргумента $\bar{b}$;
- ✓ сумма 4-х слагаемых $a + \bar{b} + c + d$;
- ✓ инверсия произведения двух аргументов $\bar{a}\bar{b}$;
- ✓ произведение двух логических сомножителей $(a + \bar{b} + c + d)\bar{a}\bar{b}$;
- ✓ произведение cd ;
- ✓ и сумма двух слагаемых $(a + \bar{b} + c + d)\bar{a}\bar{b} + cd$ – и все это на 3-входовых ЛЭ!

Вариантов непосредственного использования 3-входовых ЛЭ может быть два: либо входов не хватает, либо входов больше, чем нужно.

Если входов не хватает – придется использовать несколько ЛЭ. Например, сложение четырех слагаемых $X1 + X2 + X3 + X4$ можно выполнить так: $(X1 + X2 + X3) + X4$ или $(X1 + X2) + X3 + X4$ и т.п.

³ Выражение для y обычно упрощают перед построением, однако в данном разделе пособия оттачиваются навыки построения схем, поэтому выражение не упрощаем.

может быть два: либо

Если же входов больше, то надо на неиспользованные входы подать такие сигналы, которые не окажут влияния на результат операции. В ЛЭ **ИЛИ** – это логический 0, а в ЛЭ **И** – это логическая 1.

В условии задачи сказано, что нужно использовать 3-входовые ЛЭ, однако не оговорена их разновидность. Поэтому при решении задачи будем использовать те ЛЭ, которые удобны (рис.1.20).

Реализацию можно выполнить на любом 3-входовом ЛЭ с инверсией. Выбираем элемент **ИЛИ-НЕ**.

На входы остальных логических элементов подадим принудительно **0** и **1** в соответствии с выполняемой логической функцией (см. рис.1.20).

Обратите внимание на изображение схемы (рис.1.20): рисунок выполнен таким образом, что схему легко читать: сначала получена инверсия, потом сумма и произведения, потом – совместные операции с результатами других операций. Логические элементы оказались расположенными в вертикаль – отмечено штриховкой на рисунке: инвертор – одна вертикаль, сумма и произведение аргументов – вторая вертикаль и т.д.

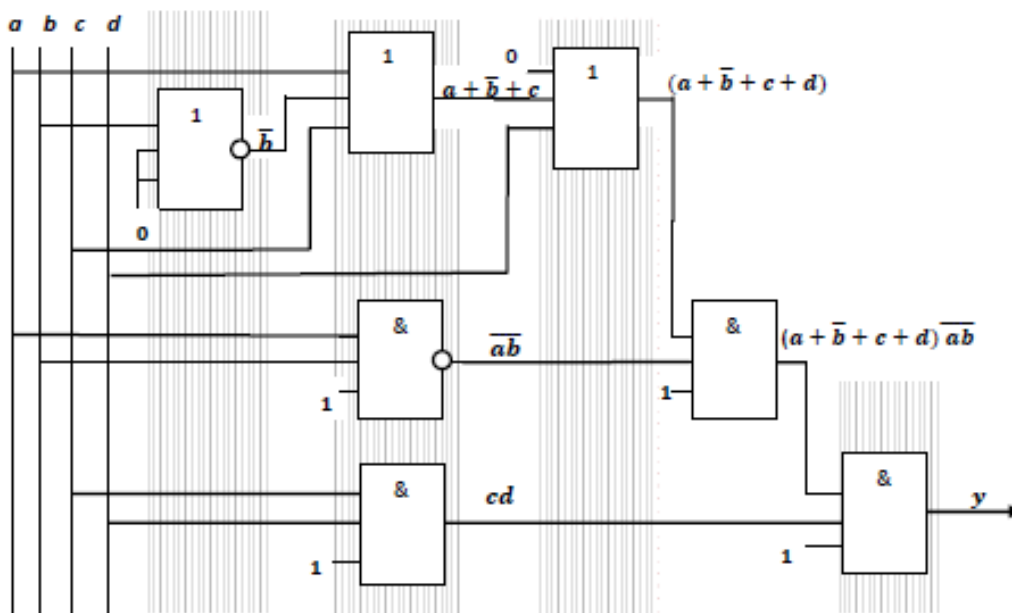


Рис.1.20. Реализация функции y в соответствии с условием задачи 3

Задача 4. Построить схему, реализующую функцию

$$y = \overline{abc} + c(\overline{a} + \overline{b})$$

только на элементах И-НЕ и ИЛИ-НЕ⁴.

Решение.

Не трудно заметить, что для простой реализации схемы нужно иметь логические элементы и с инверсией и без нее:

- ✓ НЕ – для $\overline{a}$ и для $\overline{b}$
- ✓ И-НЕ – для $\overline{abc}$
- ✓ ИЛИ – для $\overline{a} + \overline{b}$
- ✓ И-НЕ – для $c(\overline{a} + \overline{b})$
- ✓ ИЛИ – для получения итогового выражения $\overline{abc} + c(\overline{a} + \overline{b})$.

Однако по условию задачи можно использовать только умножение с инверсией и сумму с инверсией. Начнем!

Выражения $\overline{abc}$ и $c(\overline{a} + \overline{b})$ реализуем с помощью тех самых логических элементов, которые оговорены в условии задачи И-НЕ и ИЛИ-НЕ. Однако прежде нужно получить инверсии: $\overline{a}$ и $\overline{b}$.

Для реализации y получим:

- 1) $\overline{a}$: 2-входным элементом ИЛИ-НЕ (можно элементом И-НЕ); $\overline{b}$ - аналогично.
- 2) $(\overline{a} + \overline{b})$: на элементе ИЛИ-НЕ сначала получим выражение $(\overline{a} + \overline{b})$, а затем проинвертируем его на 2-входном И-НЕ, и получим $\overline{(\overline{a} + \overline{b})} = \overline{\overline{a} + \overline{b}}$ (помните: двойная инверсия числа равна самому числу $\overline{\overline{x}}=x$);
- 3) $c(\overline{a} + \overline{b})$: получим на элементе 2И-НЕ;

Выражение для y обычно упрощают перед построением, однако в данном разделе пособия отрабатываются навыки построения схем, поэтому выражение не упрощаем.

- 4) итоговую сумму $\overline{abc} + c(\overline{a} + \overline{b})$ получим аналогично п.2 – сначала получим сумму с инверсией, а потом – избавимся от ненужной инверсии – проинвертировав выражение еще раз.

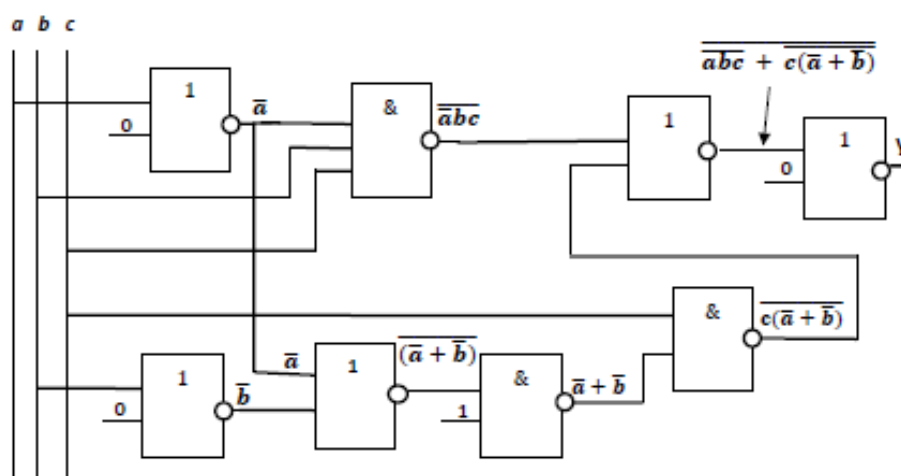


Рис.1.21. Реализация функции y в соответствии с условием задачи 4

Ход работы:

1. Изучить теоретическую часть и решить задачи по каждой теме.

Практическая работа № 20.

Тема 3.4. Электронные цифровые устройства

Цифровые логические автоматы без памяти.

Цель работы: расширить и систематизировать знания по изучаемой теме.

Теоретическая часть:

Цифровыми логическими автоматами без памяти, или комбинационными логическими устройствами, называются электронные цифровые устройства, логические значения на выходах которых однозначно определяются совокупностью логических значений на входах в данный момент времени. К логическим автоматам без памяти относятся дешифраторы, шифраторы, мультиплексоры, демультиплексоры, сумматоры и другие цифровые устройства, выпускаемые в виде интегральных схем.

Дешифратором называется устройство, вырабатывающее сигнал логической 1 только на одном из своих 2^n выходов в зависимости от кода двоичного числа на n входах. На рис. 17.1, а — **в** приведены: условное обозначение интегральной схемы дешифратора.

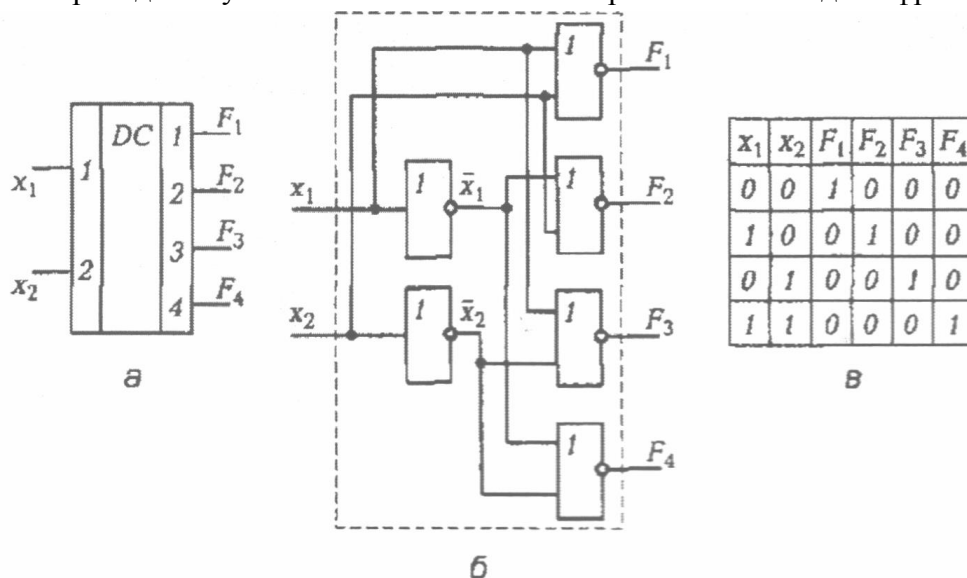


Рис. 17.1

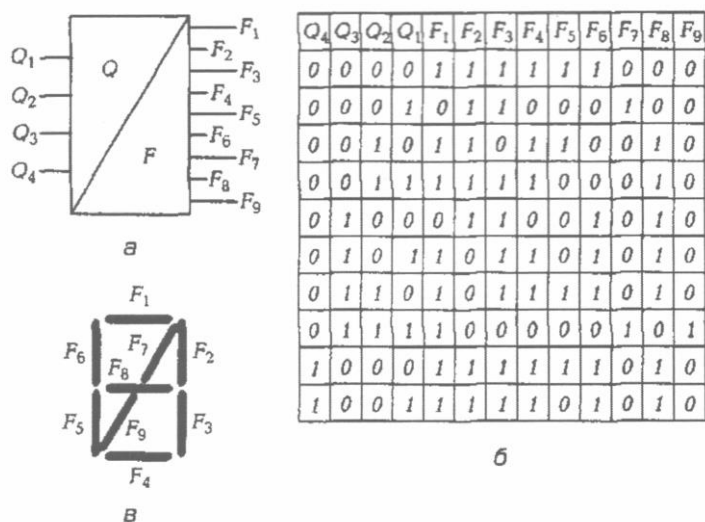


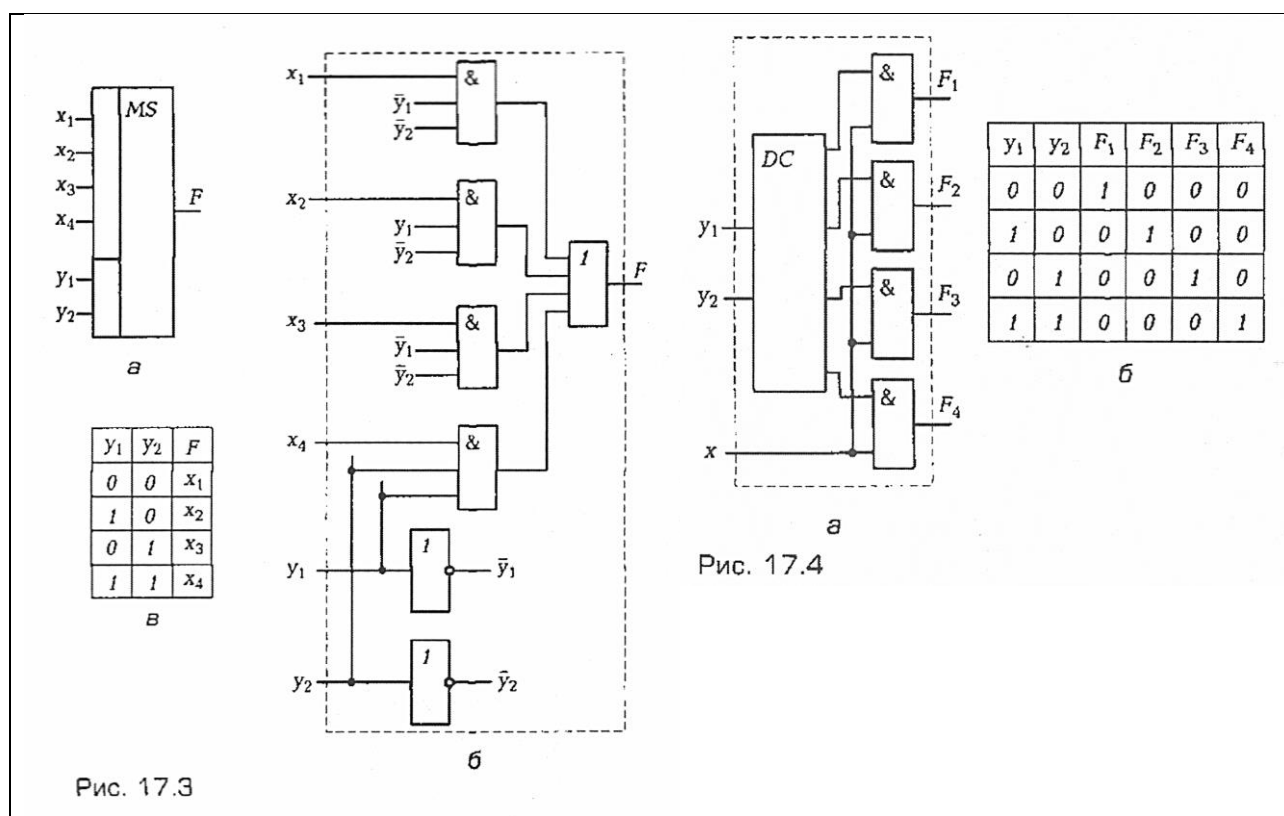
Рис. 17.2

на $l = 2$ входа и $2^l = 4$ выхода, его функциональная схема и таблица истинности, Часто схемы дешифраторов изготавливаются с дополнительными входами, например входом разрешения (стробирования). Стробирование позволяет исключить появление на выходах дешифратора ложных сигналов, запрещая его работу в интервале времени переходного процесса при изменении цифрового кода на входе.

Преобразователь кодов отличается от дешифратора тем, что каждому набору логических 1 и 0 на входе ставит в однозначное соответствие набор логических 1 и 0 на выходе. Примером может служить интегральная схема и ее таблица истинности на рис. 17.2, а и б, преобразующая код двоичного числа $Q_4Q_3Q_2Q_1$ (цифры в индексах указывают номера разрядов) в сигналы управления $F_1—F_9$ девятью сегментами светового индикатора (рис. 17.2, в).

Шифратор выполняет функцию, обратную дешифратору. Он имеет 2^l входов, на один из которых подается логическая 1, а на остальные — 0. При этом на n выходах код двоичного числа должен соответствовать номеру единичного входа.

Мультиплексором называется устройство для коммутации одного из 2^m информационных входов на один выход. Для реализации необходимой коммутации мультиплексор имеет кроме информационных входов также m адресных входов.



Значение числа в двоичном коде на адресных входах определяет адрес коммутируемого информационного входа.

Условное обозначение интегральной схемы мультиплексора с двумя адресными $m = 2$ (y_1 и y_2) и четырьмя информационными $2^m = 4$ (x_1, x_2, x_3, x_4) входами, его функциональная схема и таблица истинности приведены на рис. 17.3, а — в.

Демультимплексор выполняет функцию, обратную мультиплексору. С его помощью осуществляется коммутация одного информационного входа на один из 2^m информационных выходов в зависимости от значения числа в двоичном коде на m адресных входах.

Рис. 17.4

y_1	y_2	F_1	F_2	F_3	F_4
0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	1	0
1	1	0	0	0	1

Пример схемной реализации демультиплексора с двумя адресными $m = 2$ (y_1 и y_2) входами и четырьмя информационными $2^m = 4$ (F_1, F_2, F_3, F_4) выходами и его таблица истинности, в которой учтем таблицу истинности дешифратора (см. рис. 17.1, в), приведены на рис. 17.4, а и б.

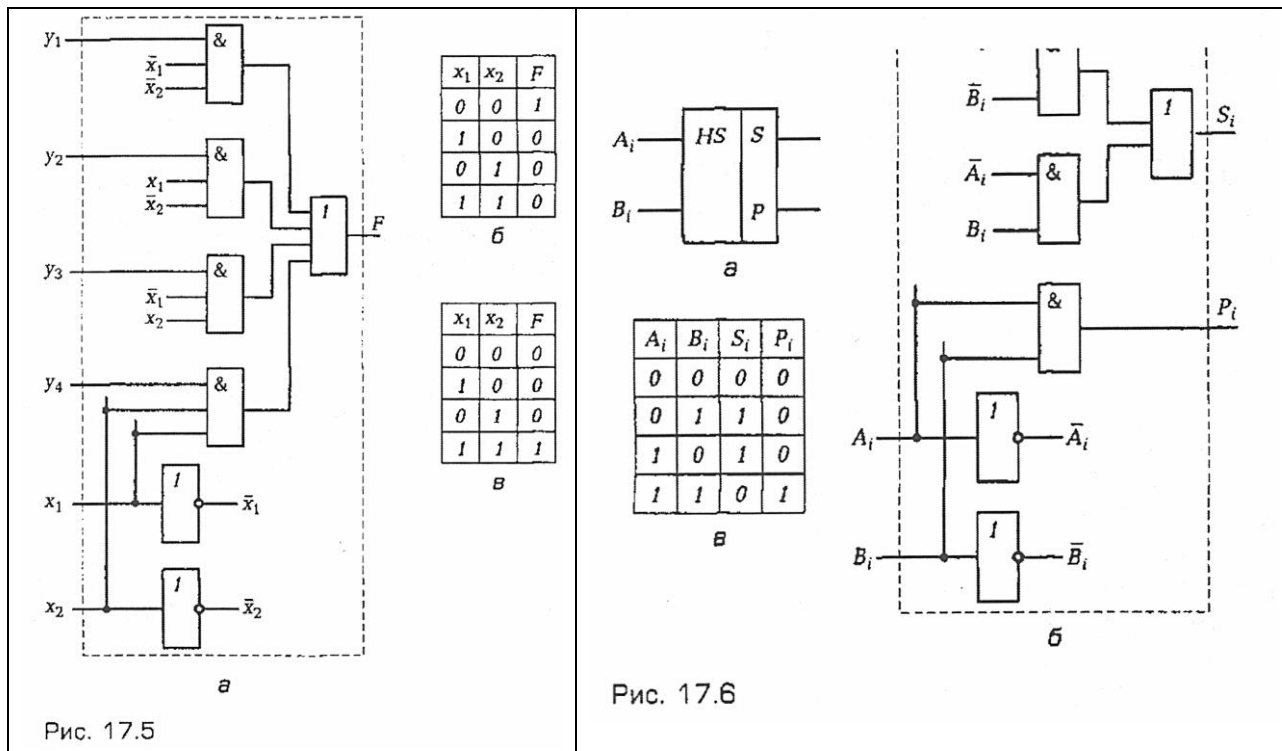
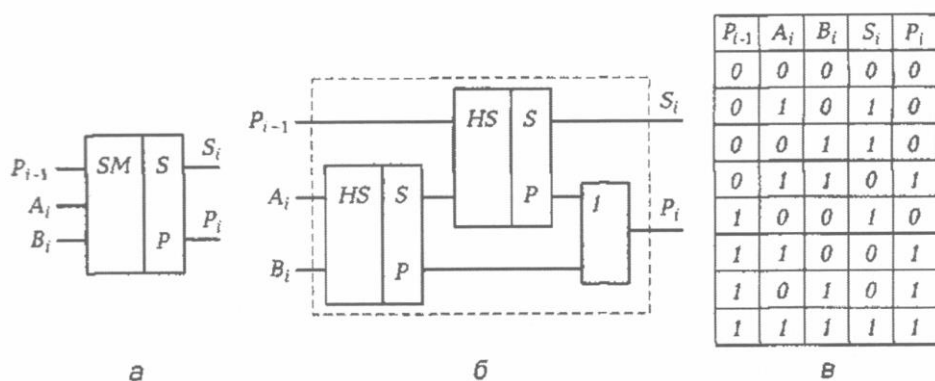


Рис. 17.6



Генератором логических функций называется устройство, позволяющее получить на своем выходе желаемую функцию значений логических величин на его информационных входах. Такие генераторы реализуются на основе мультиплексоров (см. рис. 17.3, б), в которых назначение управляющих и информационных входов следует поменять местами. Так, задавая на управляющих входах y_1, y_2, y_3, y_4 генератора логических функций (рис. 17.5, а) соответствующие значения логических 1 и 0, получим на выходе любую функцию F величин на информационных

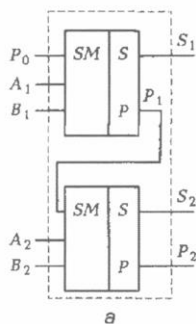
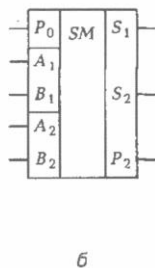


Рис. 17.8



б

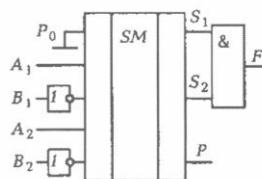


Рис. 17.9

входах x_1 и x_2 . Например, логическим функциям $F = \overline{x_1 + x_2}$ и $F = x_1 \wedge x_2$, т.е. таблицам истинности на рис. 17.5, б и в, соответствуют значения $y_1, y_2, y_3, y_4 = 1000$ и 0001 . Такой способ получения логических функций позволяет унифицировать элементную базу в интегральном исполнении и сократить время проектирования логических автоматов.

Сумматором называется устройство для арифметического сложения двух двоичных чисел. Сложение двух одноименных z -х разрядов с учетом переносов из младшего $(z - 1)$ -го разряда в старший $(z + 1)$ -й разряд осуществляется одноразрядным сумматором, который составляется из одноразрядных **полусумматоров**. Последние не учитывают перенос из младшего разряда.

На рис. 17.6, а — в приведены условное обозначение интегральной схемы одноразрядного полусумматора, его функциональная схема и таблица истинности, где A_i и B_i , — одноименные разряды двух двоичных чисел; S , — сумма; P , — перенос в старший разряд.

Условное обозначение интегральной схемы одноразрядного сумматора, его функциональная схема и таблица истинности приведены на рис. 17.7, а—в. Из одноразрядных составляются многоразрядные сумматоры. Схема и условное обозначение интегральной схемы двухразрядного сумматора приведены на рис. 17.8, а и б.

Цифровым компаратором называется устройство сравнения двоичных чисел. Одна из возможных схем реализации с применением сумматора приведена на рис. 17.9. Действительно, если в одноименных разрядах $A_i = B_i$ где i — номер разряда, то сумма значений A , и B равна $S_i = 1$ и перенос в старший разряд $P_i = 0$.

Таким образом, при равенстве двух двоичных чисел на выходе сумматора $S_1 = S_2 = 1$ и $P = 0$, а на выходе логического элемента $F = 1$.

Приведенная схема цифрового компаратора может также фиксировать неравенство двух двоичных чисел $A_2A_1 > B_2B_1$ при котором на выходе сумматора перенос в старший разряд $P = 1$.

Ход работы:

1. Ознакомиться с теоретической частью.
1. Выполнить конспект основных положений.

Практическая работа № 21.

Тема 3. 4. Электронные цифровые устройства

Цифровые логические автоматы с памятью.

Цель работы: расширить и систематизировать знания по теме «Цифровые логические автоматы с памятью и адресной выборкой: регистры, счетчики.

Теоретическая часть:

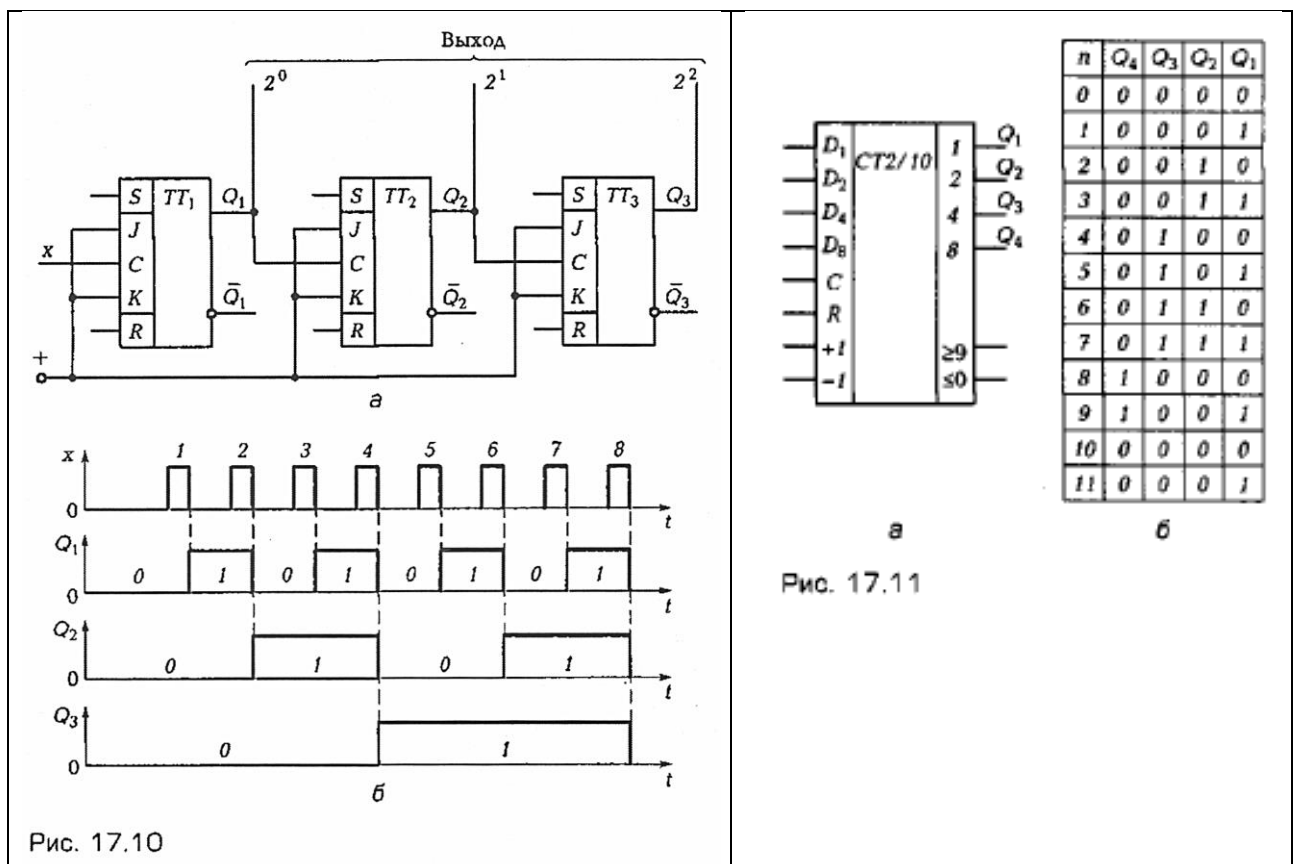
Цифровыми логическими автоматами с памятью, или последовательными логическими устройствами, называются электронные цифровые устройства, логические значения на выходах которых определяются как совокупностью логических значений на входах в данный момент времени, так и состоянием логического автомата по результатам его предшествующей работы. Запоминание предшествующих состояний обычно выполняется с помощью триггеров.

К логическим автоматам с памятью относятся счетчики импульсов и сдвиговые регистры.

Счетчиком называется устройство для определения числа поступающих на его вход импульсов напряжения. Различают счетчики на сложение, вычитание и реверсивные. Последние имеют два входа — один на сложение, другой на вычитание.

Рассмотрим работу трехразрядного **счетчика на сложение** (рис. 17.10, а) на основе двухступенчатых JK-триггеров с представлением результата счета в двоичной системе счисления.

Перед началом работы счетчика все его разряды с помощью установочных входов R (см. рис. 16.17, а) устанавливаются в состояние $Q_1=Q_2=Q_3=0$. В момент окончания первого счетного импульса триггер младшего разряда $ТТ_1$, переключается, а состояние триггеров старших разрядов $ТТ_2$ и $ТТ_3$ не изменяется, т.е. значение двоичного числа на выходе счетчика равно $Q_3Q_2Q_1=001$. В момент окончания второго счетного импульса триггер $ТТ_1$ снова переключается и логическое значение выхода младшего разряда изменяется с 1 на 0. Поэтому одновременно переключится и триггер $ТТ_2$, т.е. $Q_3Q_2Q_1=010$. Далее переключение триггеров происходит аналогично, так что число импульсов на входе счетчика соответствует числу в двоичной системе счисления на



его выходе (рис. 17.10, б). После седьмого счетного импульса число на выходе счетчика $Q_3Q_2Q_1=111$, а после восьмого — 000. Такой счетчик называется *по модулю 8*.

Схема **счетчика на вычитание** отличается от рассмотренной выше схемы счетчика на сложение тем, что в последней входы синхронизации триггеров следует переключить с прямых на инверсные входы триггеров предыдущих разрядов.

Интегральные схемы счетчиков имеют следующие входные и выходные выводы (не обязательно все).

1. **Входы:** R — для установки всех разрядов в состояние логических 0; +1 и -1 для счета числа импульсов на сложение и вычитание соответственно; $D_1D_2D_4D_8$ — для установки счетчика в заданное состояние; C — для разрешения установки счетчика в состояние, заданное на входах D_1 — D_8 (цифры в индексах указывают веса разрядов); V — для разрешения счета.

2. **Выходы:** $Q_1Q_2Q_3Q_4$ — для указания содержимого в счетчике числа; вспомогательные — для указания переполнения или обнуления счетчика.

Максимальное число (максимальная емкость), которое можно записать в счетчик, равно $N = 2^n - 1$, где n — число разрядов счетчика. Емкость счетчика, называемая также **коэффициентом счета**, отражается в его названии. Например, счетчик с коэффициентом счета $N = 2^n - 1$ называется **двоичным**, с коэффициентом счета (от 0 до 9) — **двоично-десятичным**.

Условное обозначение интегральной схемы четырехразрядного двоично-десятичного реверсного счетчика и его таблица истинности при работе на сложение даны на рис. 17.11, *а* и *б*.

Сдвиговыми регистрами называются устройства для приема, хранения, передачи и преобразования информации, представленной обычно в двоичной системе счисления. Элементарной базой их реализации являются синхронные и асинхронные триггеры. Последние здесь рассматриваться не будут из-за ограниченного распространения.

Различают последовательный и параллельный вводы информации в сдвиговой регистр.

При **последовательном вводе** информация в виде последовательности логических сигналов подается на один вход регистра и последовательно продвигается по его разрядам.

На рис. 17.12, *а* приведена схема трехразрядного синхронного сдвигового регистра на двухступенчатых JK-триггерах. Предварительно подачей сигналов на установочные входы R (см. рис. 16.17, *а*) триггеры устанавливаются в состояние $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 0$.

Подав логический сигнал $x = 1$ на вход регистра, т. е. на установочный вход S триггера TT_1 , приведем его в состояние $Q_1 = 1$ (рис. 17.12, *б*). При этом состояние регистра определится совокупностью значений $Q_1Q_2Q_3 = 100$. Под действием первого импульса синхронизации C состояние регистра изменится на $0,0_20_3$ - $^{01}_0$ - $^{11}_0$. А действием второго импульса синхронизации на $Q_1Q_2Q_3 = 001$ и т.д.

При **параллельном вводе** информации все разряды двоичного числа одновременно подаются каждый на вход соответствующего разряда регистра. Например, как показано на рис. 17.12, *а* штриховыми линиями.

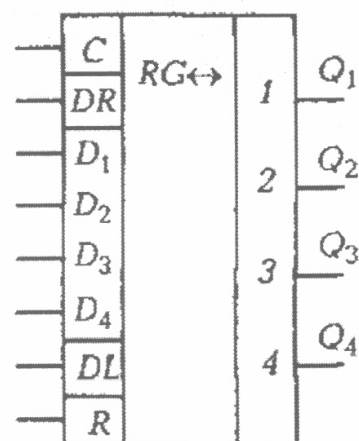
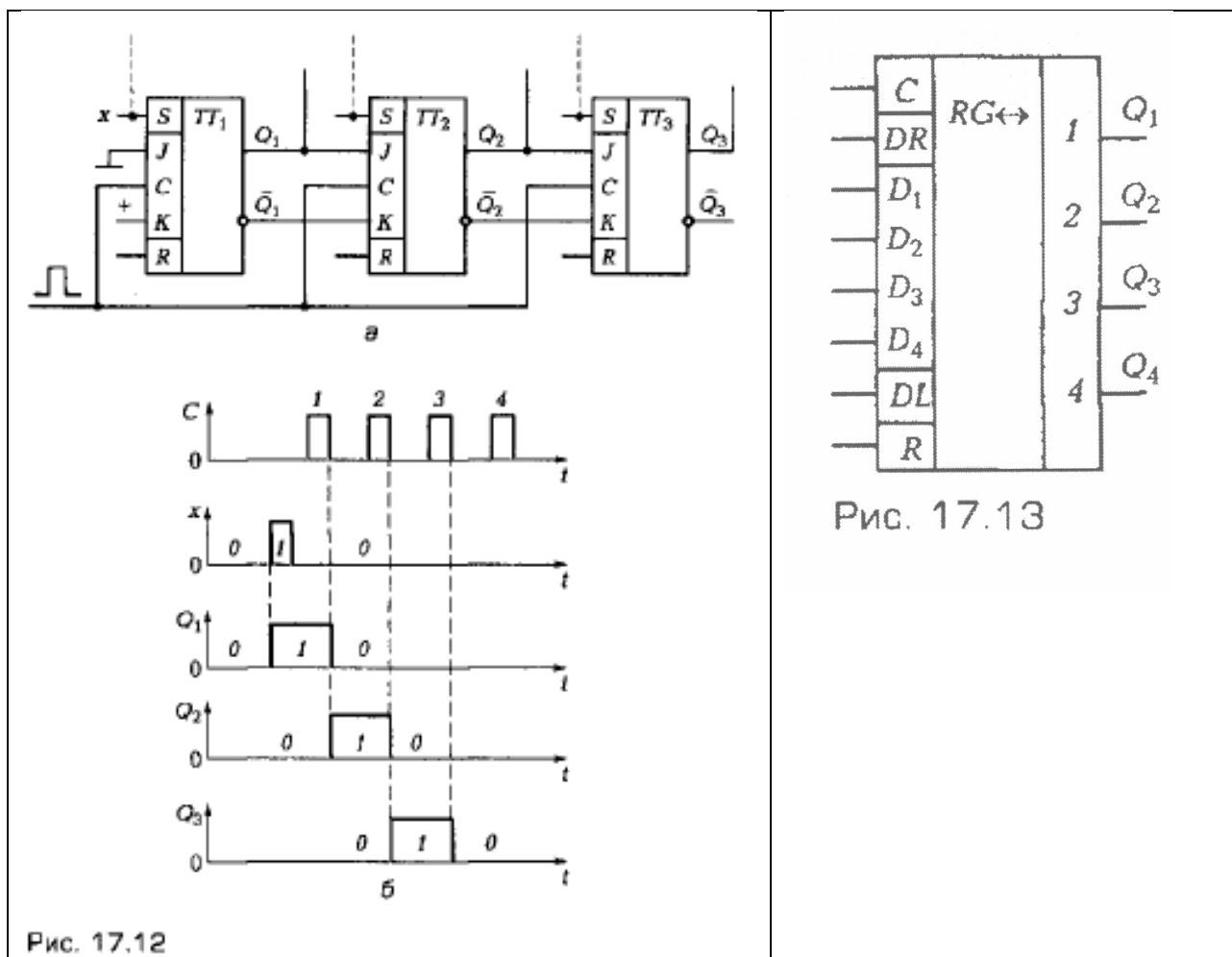


Рис. 17.13

Регистры применяются для преобразования последовательного кода двоичного числа в параллельный, и наоборот, хранения (буферизации) кода двоичного числа, вводимого в регистр и выводимого из него через некоторое время, сдвига кода двоичного числа на один разряд, что означает умножение его значения на 2.

Интегральные схемы регистров имеют следующие входные и выходные выводы (не обязательно все):

1. **Входы:** D_1, D_2 — для подачи параллельного кода; DR и DL — для сдвига вправо и влево; R — для установки всех разрядов в состояние логических 0; C — для разрешения записи по входам $D_1, D_2 \dots$; V — для разрешения сдвига.

2. **Выходы:** $Q_1, Q_2 \dots$ — для указания содержимого регистра.

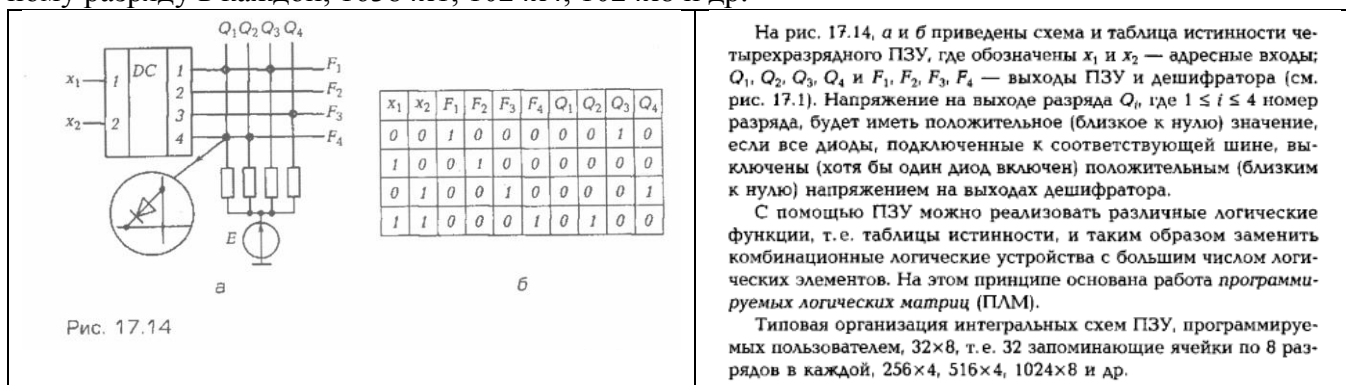
На рис. 17.13 приведено условное обозначение интегральной схемы четырехразрядного универсального сдвигового регистра.

Цифровыми логическими автоматами с адресной выборкой называются цифровые устройства, в которых каждый набор логических значений на входах содержит адрес, позволяющий из множества информационных ячеек устройства обратиться и работать с той или иной из них. К логическим автоматам с адресной выборкой относятся оперативные и постоянные запоминающие устройства.

Оперативные запоминающие устройства (ОЗУ — RAM, random access memory) представляют собой устройства, содержимое информационных ячеек которых при обращении к ним можно изменять, т. е. считывать, одновременно стирая, и записывать. В качестве элементов для хранения информации в ОЗУ используются триггеры или электрические емкости р-п-переходов транзисторов с большой постоянной времени разрядки. В последнем случае ОЗУ называется **динамическим**, так как требуется периодическое восстановление его электриче-

ского состояния. Для динамических ОЗУ по сравнению с ОЗУ на основе триггеров, называемых **статическими**, характерны меньшее потребление энергии и сохранение информации при кратковременном отключении питания, но увеличенный набор аппаратных средств.

Типовая организация интегральных схем ОЗУ 4096 x 1, т.е. 4096 запоминающих ячеек по одному разряду в каждой, 16384x1, 1024x4, 1024x8 и др.



На рис. 17.14, а и б приведены схема и таблица истинности четырехразрядного ПЗУ, где обозначены x_1 и x_2 — адресные входы; Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 и F_1, F_2, F_3, F_4 — выходы ПЗУ и дешифратора (см. рис. 17.1). Напряжение на выходе разряда Q_i , где $1 \leq i \leq 4$ номер разряда, будет иметь положительное (близкое к нулю) значение, если все диоды, подключенные к соответствующей шине, включены (хотя бы один диод включен) положительным (близким к нулю) напряжением на выходах дешифратора.

С помощью ПЗУ можно реализовать различные логические функции, т.е. таблицы истинности, и таким образом заменить комбинационные логические устройства с большим числом логических элементов. На этом принципе основана работа программируемых логических матриц (ПЛАМ).

Типовая организация интегральных схем ПЗУ, программируемых пользователем, 32x8, т.е. 32 запоминающие ячейки по 8 разрядов в каждой, 256x4, 516x4, 1024x8 и др.

Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ — ROM, read only memory) представляют собой два набора параллельных шин, ортогональных друг другу. В местах пересечения шины соединяются между собой перемычками в виде полупроводниковых диодов или проводников. Целенаправленные исключения части перемычек плавкой проводников, электрическим пробоем диодов или в процессе производства с помощью соответствующих масок означает программирование, т.е. запись информации в ПЗУ. По этому признаку различают ПЗУ масочные и программируемые пользователем. Масочные ПЗУ используются для записи постоянной информации общего пользования, например математических таблиц, символов, программ стандартных математических преобразований и др. В ПЗУ, программируемых пользователем, возможна однократная самостоятельная запись информации. Существуют также ПЗУ, допускающие неоднократное, хотя ограниченное число раз (до десятков раз), изменение информации. Стирание информации в них осуществляется ультрафиолетовым облучением.

Ход работы:

1. Ознакомиться с теоретической частью.
2. Выполнить конспект основных положений.

Практическая работа №22

Тема 3. 4. Электронные цифровые устройства

Микросхемы.

Цель работы: расширить и систематизировать знания по изучаемой теме.

Теоретическая часть:

Блоки и узлы радиоэлектронной аппаратуры на втором этапе развития электронной техники (после электронных ламп) строились на полупроводниковых приборах. Но возникла мысль, а можно ли отдельные блоки и узлы создать в одном корпусе на одной подложке или в одном кристалле полупроводника. Эта идея начала реализовываться в мировой промышленности с конца шестидесятых годов.

Интегральная микросхема (ИС) — это конструктивно законченное изделие электронной техники, выполняющее определенную функцию, и содержащее совокупность транзисторов, полупроводниковых диодов, резисторов, конденсаторов и других элементов, электрически соединенных между собой.

Теория, методы расчета и технология изготовления ИС составляют основное содержание *микроэлектроники*.

По технологии изготовления различают полупроводниковые (т. е. монокристалльные), пленочные и гибридные ИС.

В *полупроводниковой* ИС все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводника, обычно кремния. Как правило, для полупроводниковых ИС характерно создание всех элементов одновременно в ходе единого технологического цикла.

В *пленочных* ИС все элементы и межэлементные соединения выполнены в виде проводящих, диэлектрических и резистивных пленок (слоев) на подложке. Такие ИС содержат, как правило, только пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, межсоединения). Вариантами пленочных ИС являются *тонкопленочные* с толщиной пленок 1...3 мкм и менее и *толстопленочные* с толщиной пленок свыше 3...5 мкм. Деление пленочных ИС обусловлено не столько толщиной пленок, сколько методом их нанесения в процессе создания пассивных элементов. Пассивные элементы тонкопленочных схем наносят на подложку преимущественно с использованием термовакuumного распыления и катодного осаждения, а пассивные элементы толстопленочных схем получают нанесением и вжиганием проводящих и резистивных паст. Наряду с полупроводниковой и пленочной широко используется гибридная технология, в которой сочетаются тонкопленочные или пассивные толстопленочные элементы с полупроводниковыми активными, называемыми компонентами гибридной схемы. Частным случаем гибридной ИС является монокристалльная ИС, содержащая в качестве компонентов несколько бескорпусных полупроводниковых схем на одной подложке. Наиболее распространены в настоящее время полупроводниковые и гибридные ИС.

Число элементов в данной ИС характеризует ее степень интеграции. В соответствии со степенью интеграции все ИС условно делят на малые (МИС — до 10^2 элементов на кристалл), средние (СИС — до 10^3), большие (БИС — до 10^4), *сверхбольшие* (СБИС — до 10^6), *улыпбольшие* (УБИС — до 10^9) и *гигабольшие* (ГБИС — более 10^9 элементов на кристалл). Иногда степень интеграции определяют величиной $k = \lg N$, где N число элементов, входящих в ИС, а значение k определяется до ближайшего целого числа в сторону увеличения. Например, ИС первой степени интеграции ($k = 1$) содержит до 10 элементов, второй степени интеграции ($k = 2$) — свыше 10 до 100, третьей степени интеграции ($k = 3$) — свыше 100 до 1000 и т. д.

При всем своем многообразии ИС по *функциональному* назначению делятся на два основных класса — аналоговые (частный случай — линейные) и цифровые. Аналоговые ИС предназначены для усиления, ограничения, частотной фильтрации, сравнения и переключения сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции.

Цифровые ИС предназначены для преобразования (обработки) сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции (например, выраженных в двоичном или другом цифровом коде). Цифровые ИС представляют собой множество транзисторных ключей, обладающих двумя устойчивыми состояниями (разомкнутым и замкнутым). Основным видом цифровых схем являются логические ИС, выполняющие одну или несколько логических функций, простейшими из которых реализуются такие функции, как «И», «ИЛИ», «НЕ» и др.

Полупроводниковые ИС по конструктивно-технологическому принципу *бывают биполярные*, т. е. использующие биполярные транзисторы, и *МДП*, т. е. построенные на МДП-транзисторах. *Кристаллом ИС* называется структура, содержащая элементы, межэлементные соединения и контактные площадки (металлизированные участки, служащие для присоединения внешних выводов). В большинстве проводниковых ИС элементы располагаются в тонком (толщина 0,5...10 мкм) приповерхностном слое полупроводника. Так как удельное сопротивление полупроводника *невелико* (1...10 Ом), а

элементы должны быть изолированы друг от друга, необходимы специальные *изолирующие области*

Элементы биполярных полупроводниковых ИС

Типичная структура полупроводниковой ИС, выполненная по биполярной технологии, показана на рис. 16.1. В такой ИС отдельные элементы, сформированные в «карманах» с проводимостью *n*-типа, оказываются электрически изолированными друг от друга обратносмещенным *p*-*n*-переходом, для чего на подложку *p*-типа кремния подается отрицательный потенциал. Предварительно создаваемые локальные области (называемые «карманами») служат для исключения взаимного влияния активных и пассивных элементов и могут быть изолированы друг от друга кроме *p*-*n*-переходом диэлектриком или комбинированным методом с применением *p* - *n*- переходов и диэлектрика.

В качестве резисторов в биполярных ИС используют участки однородного полупроводника; в качестве конденсаторов — обратносмещенные *p*-*n*-переходы. Индуктивность не создается в толще полупроводника, а может наноситься в виде спирали из металла на поверхности полупроводника.

Диоды и транзисторы, используемые в ИС, изготавливают по планарной технологии, то есть их выводы находятся на одной поверхности. Планарная технология позволяет в течение единого технологического процесса получать одновременно различные элементы.

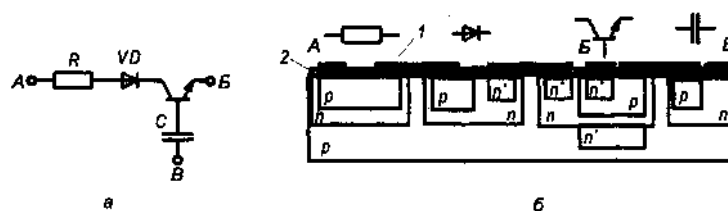


Рис. 16.1. Интегральная схема с изоляцией *p*-*n*-переходом:
а — электрическая схема; б — топология;
1 — металлическое межсоединение; 2 — слой SiO_2 ;
А, Б, В. — соответствующие друг другу точки на рис. а и б

При конструировании ИС стремятся применять диоды, эквивалентные переходам эмиттер-база или коллектор-база транзисторной структуры. В этом случае диоды изготавливают в едином технологическом цикле с остальными элементами.

Соединение элементов в полупроводниковой ИС может осуществляться несколькими способами, основным из которых является нанесение металлических тонкопленочных проводящих дорожек (чаще всего алюминиевых), изолированных от элементов кристалла слоем диэлектрика, чаще всего оксида кремния SiO_2 , с помощью проволочных соединений.

Количество кристаллов ИС, получаемых в едином технологическом процессе на одной пластине, чаще всего кремния, зависит от размера кристалла, в свою очередь зависящего от количества элементов в схеме, и диаметра пластин. Площадь кристалла ИС в зависимости от ее сложности составляет 1...100 мм², наиболее распространены размеры 10...50мм².

Элементы ИС на МДП- структуре

В качестве активных элементов в ИС могут использоваться кроме биполярных полевые транзисторы со структурой «металл-диэлектрик (оксид)-полупроводник», т. е. МДП- транзисторы или МОП- транзисторы. В соответствии с этим все монокристаллические ИС разделяются на три основных вида: МДП ИС (МОП ИС), биполярные и биполярно-полевые ИС. МДП ИС могут быть реализованы на транзисторах с каналом *p*- типа (*p*-МДП ИС, *p*- МОП ИС) и каналом *n*-типа (*n*-МДП ИС, *n* - МОП ИС), а также на *комплементарных* т. е. использующих одновременно *p*- и *n*- типы, МДП- транзисторах

(КМДП ИС, КМОП ИС). Биполярно-полевые ИС представляют собой объединенные в одном кристалле биполярные и КМДП ИС (БиКМДП ИС, БиКМОП ИС).

Основными элементами современных МДП ИС являются МДП-транзисторы с каналом п-типа. Площадь этих транзисторов на кристалле значительно меньше, чем биполярных, поэтому в ИС на п-канальных МДП- резисторах достигается самая высокая (в 3-10 раз) степень интеграции, но они уступают биполярным ИС по быстродействию. В комплементарных МДП ИС применяют МДП- транзисторы с индуцированными каналами п- и р- типа, для этих ИС характерна очень малая потребляемая мощность.

МДП- транзистор может использоваться в качестве конденсатора и резистора, при этом значение емкости и сопротивления можно изменять в определенных пределах путем изменения потенциала на управляющем электроде (т. е. на затворе).

В качестве резистора МДП- транзистор используется при $U_{зи}=0$, т. е. при этом сопротивление канала имеет наибольшее значение. Сопротивление между выводами стока и истока в этом случае обратно пропорционально отношению ширины канала b к его длине L , т. е. b/L . Эта зависимость позволяет проводить расчет топологии для получения необходимого сопротивления резистора.

На рис. 16.2 приведена схема МДП- транзистора, используемого в качестве резистора. Структура МДП- конденсатора показана на рис 16.3. Диэлектриком в этом конденсаторе является термически выращенная пленка диоксида кремния SiO_2 . Одним из электродов является пленка напыленного металла на SiO_2 , являющимся диэлектриком, другим — сильнолегированная n^+ - область кремния, лежащая под оксидом.

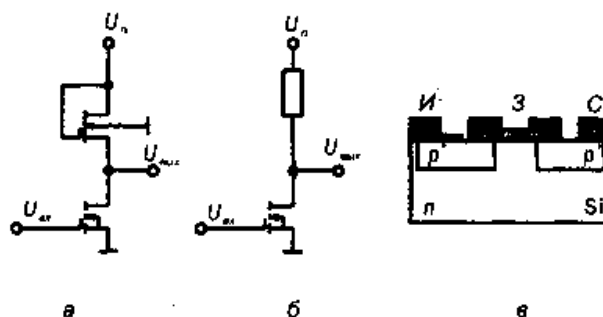


Рис. 16.2. Схема полевого транзистора с резистором:
а — топологическая схема; б — эквивалентная схема;
в — топология МОП-резистора

Высокоомный п-слой и р- кремний подложки образуют изолирующий р - п-переход. Емкость МДП- конденсатора зависит прямо пропорционально от площади и обратно пропорционально от толщины оксидной пленки. Уменьшение толщины оксидной пленки для получения емкости большей величины имеет ограничения, так как неоднородность структуры очень тонкой пленки может привести к замыканию обкладок конденсатора.

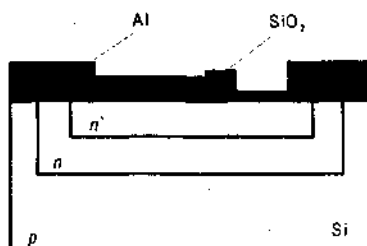


Рис. 16.3. МДП-конденсатор

Изготавливают МДП ИС методами планарной технологии. Трудоемкость изготовления МДП ИС на 30% ниже, чем биполярных ИС, так как технологический цикл изготовления МДП ИС состоит из 22 основных операций, а биполярных ИС — из 32.

Гибридные интегральные схемы

Исторически первыми (в середине шестидесятых годов прошлого века) были разработаны гибридные ИС. В этих схемах пассивные элементы (резисторы, конденсаторы) и все соединения изготавливаются из пленок различных материалов, нанесенных на диэлектрическую подложку, а в качестве активных элементов применяются бескорпусные или в малогабаритном корпусе полупроводниковые приборы и ИС.

Диэлектрические подложки изготавливают из керамики, ситала или стекла. Индуктивные катушки и конденсаторы большой емкости, как правило, применяют навесные.

При изготовлении гибридной схемы сначала создают соединения, для чего напыляют или наносят каким-либо другим способом полосы алюминия, серебра или золота. После этого напыляют сопротивление из тантала, хрома или специальных сплавов. Выбирая соответствующий материал, его толщину и площадь, подбирается необходимый номинал резистора. Необходимо отметить, что сопротивление резисторов можно «подгонять» до необходимой величины частичным удалением резистивной пленки. Таким образом, эти резисторы позволяют получить непрерывную шкалу номиналов. Для изготовления конденсатора напыляется металл, затем диэлектрик и снова металл. Как и резисторы, пленочные конденсаторы имеют непрерывную шкалу номиналов емкости. Считается целесообразным изготавливать пленочные конденсаторы с емкостью в пределах 100-5000 пФ. Пленочные индуктивности выполняют нанесением на диэлектрические подложки пленок в виде однослойных спиралей круглой или прямоугольной формы, заканчивающихся контактными площадками. Затем устанавливают навесные элементы: диоды, транзисторы и другие элементы.

Гибридные ИС, в которых в качестве навесных элементов применены бескорпусные ИС, называют *многокристалльными*.

Преимущества гибридно-пленочной технологии заключаются в высокой гибкости, т. е. в возможности выбора различных материалов и методов изготовления пленочных элементов, сравнительной простоте разработки и изготовления большинства схем в гибридном исполнении.

Как и полупроводниковые ИС гибридные ИС на заключительном этапе подлежат корпусированию. Перед герметизацией контактные площадки платы гибридной схемы соединяются с помощью проволоки с контактными площадками выводов корпуса, проволочные выводы развариваются или напаиваются к контрастным площадкам.

Интегральные схемы с использованием оптоэлектронных элементов

На основе оптоэлектронных устройств разработано большое число оптоэлектронных ИС. Основные конструктивно - технологические концепции развития оптоэлектронных ИС аналогичны концепции развития ИС: это миниатюризация элементов оптоэлектронных схем, преимущественное развитие плоскостных конструкций панельного типа, применение в производстве групповых методов обработки. Существуют полупроводниковые и гибридные оптоэлектронные ИС.

Основным элементом любой оптоэлектронной ИС является оптронная пара. На рис. 16.9 показана оптронная пара, используемая в интегральной схеме. Она состоит из источника света 1, управляемого входным сигналом, и оптически связанного с ним с помощью иммерсионной среды 2 фотоприемника 3. В качестве иммерсионной среды используют диэлектрические материалы, выполняющие в оптроне также функции изолятора. Требования к иммерсионной среде следующие: иметь малый коэффициент поглощения света и показатель преломления, близкий к показателям преломления источника и фотоприемника.

На рис. 16.10 приведены примеры логических интегральных оптронных элементов.

В схеме на рис. 16.10, а, если оба фоторезистора затемнены ($\Phi_1 = \Phi_2 = 0$), ток в цепи меньше порогового и светодиод не излучает. Только при одновременном освещении обоих фоторезисторов ток возрастает до величины, достаточной для появления светового потока Φ из светодиода. Схема выполняет операцию «И».

Схема, приведенная на рис. 16.10, б, выполняет операцию «НЕ» (инвертор). Световой поток Φ , подающий на фоторезистор, уменьшает его сопротивление. Светодиод открывается шунтированием и при облучении фоторезистора не излучает свет.

Если оба фоторезистора затемнены (рис. 16.10, в), то ток в цепи очень мал и светодиод не излучает. При появлении потока Φ_1 или Φ_2 светодиод излучает световой поток Φ . То же получается, если появляются одновременно потоки Φ_1 и Φ_2 поэтому схема выполняет операцию «И-ИЛИ».

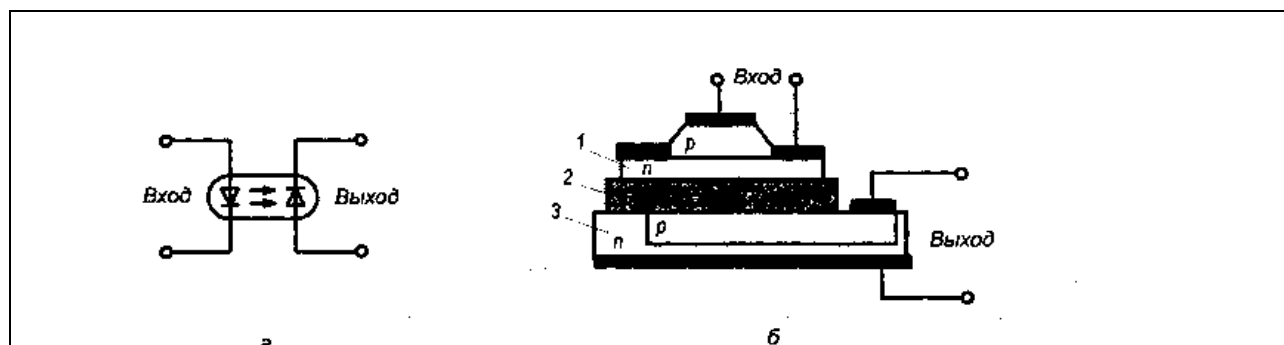


Рис. 16.9. Схема (а) и конструктивно-технологическое исполнение (б) оптронной пары в ИС



Рис. 16.10. Примеры логических интегральных оптронных элементов

Следует отметить, что логические оптроны пока не конкурируют со схемами транзисторной логики: быстродействие ограничено фоторезисторами, необходим источник света и др.

В микроэлектронике наиболее широко применяют оптоэлектронные ИС гальванической развязки предварительной обработки сигналов. К ним относят быстродействующие переключатели, коммутаторы аналоговых сигналов, ключи и аналоговые оптоэлектронные устройства, предназначенные для использования в системах функциональной обработки аналоговых сигналов.

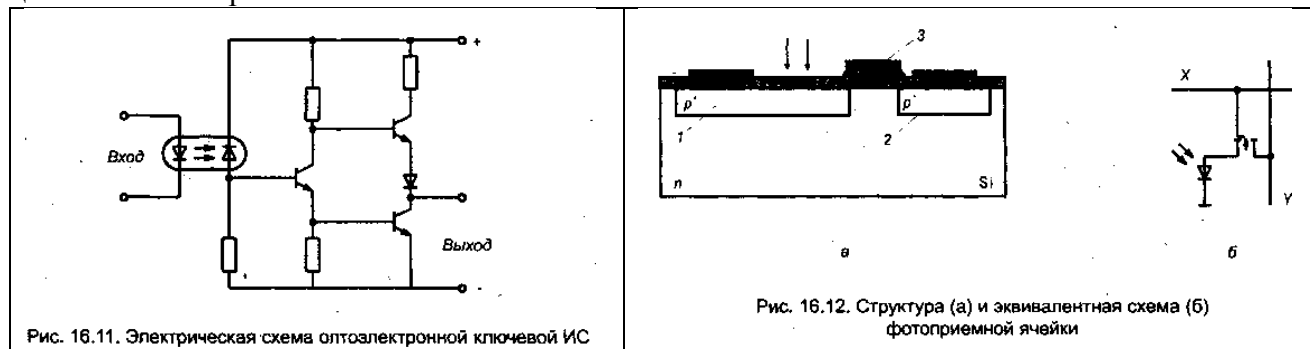


Рис. 16.11. Электрическая схема оптоэлектронной ключевой ИС

Рис. 16.12. Структура (а) и эквивалентная схема (б) фотоприемной ячейки

Для примера на рис. 16.11 показана электрическая схема ключевой ИС. Ключевая

ИС включает в себя быстродействующую диодную оптоэлектронную пару, согласованную с монолитным кремниевым усилителем. Она предназначена для замены трансформаторных и релейных связей в логических устройствах ЭВМ и дискретной автоматики. Среди оптоэлектронных полупроводниковых ИС наибольшее распространение также получили схемы *многоэлементных фотоприемных устройств* (ФПУ), содержащие множество фоточувствительных элементов, преобразующих оптическое излучение в электрический сигнал.

Типичным примером многоканальных ФПУ являются устройства с кремниевыми фотодиодными матрицами, представляющие собой матрицу фотоприемных ячеек, каждая из которых содержит фотодиод и электронную схему управления и усиления на МДП- транзисторах. Ячейки соединяются с шинами строк и столбцов, с помощью которых осуществляется произвольная выборка при считывании информации. ИС имеет большее число выводов, определяемое числом строк и столбцов.

На рис. 16.12 показаны структура и эквивалентная схема простейшей фотоприемной ячейки.

Она представляет собой МДП- транзистор с индуцированным каналом р- типа и с увеличенной областью истока 1, при этом р-п-переход исток-подложка выполняет функцию фотодиода. Затвор 3 транзистора соединен с шиной строки X, а сток 2 — с шиной столбца Y. Существенный недостаток простейшей ячейки заключается в том, что полезный сигнал, выделяемый на шине Y, очень мал. Это обусловлено большой собственной емкостью шины. Поэтому шины Y подключаются к усилителям, размещение которых на том же кристалле сильно усложняет конструкцию ФПУ

Вопросы, выносимые на семинар:

1. Основные технологические процессы сборки интегральных схем.
2. Принципы классификации интегральных схем.
3. Критерии сложности микросхемы.
4. Цифровые и аналоговые микросхемы.
5. Преимущества электронной аппаратуры на интегральных микросхемах.
6. Особенности полупроводниковых интегральных микросхем.
7. Конструктивно-технологические типы интегральных микросхем: полупроводниковые, совмещенные и гибридные микросхемы.
8. Технология изготовления полупроводниковых микросхем: эпитаксия, диффузия примесей, ионное легирование, термическое окисление, травление, нанесение тонких пленок.
9. Проводники соединений и контакты в полупроводниковых микросхемах. Литография
10. Сборка полупроводниковых микросхем.
11. Технология изготовления гибридных микросхем.

Практическая работа №23

Тема 4. 2. Типовые блоки питания устройств информационных систем.

Нахождение неисправностей источников питания.

Цель работы:

Перечень используемого оборудования: Паяльник, припой, флюс, паяльная станция с регулировкой мощности или пара паяльников разной мощности. Отсос для припоя и (или) оплетка. Отвертка. Бокорезы. Мультиметр. Пинцет.

Теоретическая часть:

Устройство БП.

Внутреннее изображение блока питания системы АТХ

А – диодный мост, служит для преобразования переменного тока в постоянный

В – силовые конденсаторы, служат для сглаживания входного напряжения

Между В и С – радиатор, на котором расположены силовые ключи

С – импульсный трансформатор, служит для формирования необходимых номиналов напряжения, а также для гальванической развязки

между С и D – радиатор, на котором размещены выпрямительные диоды выходных напряжений

D – дроссель групповой стабилизации (ДГС), служит для сглаживания помех на выходе

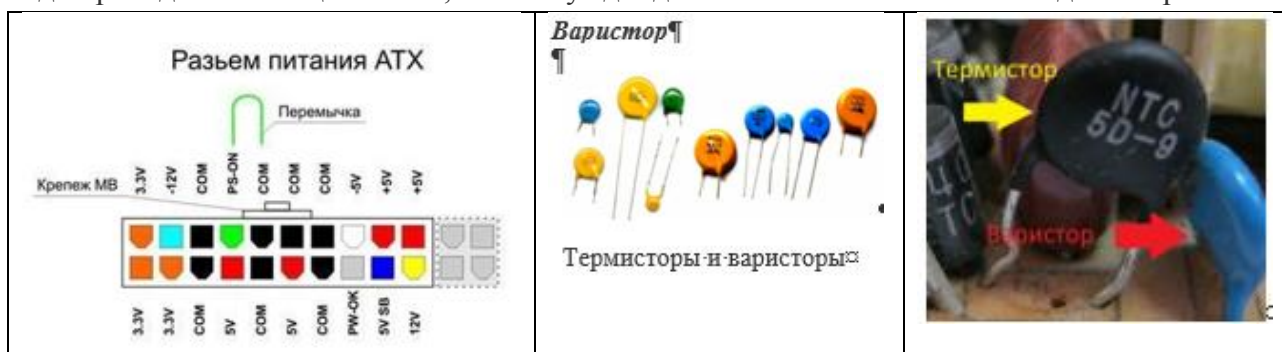
Е – выходные, фильтрующие, конденсаторы, служат для сглаживания помех на выходе

Распиновка разъема 24 pin и измерение напряжений.

Знание контактов на разъеме ATX нам понадобится для диагностики БП. Прежде чем приступать к ремонту следует проверить напряжение дежурного питания, на рисунке этот контакт отмечен синим цветом +5V SB, обычно это фиолетовый провод. Если дежурка в порядке, то следует проверить наличие сигнала POWER GOOD (+5V), на рисунке этот контакт помечен серым цветом, PW-OK. Power good появляется только после включения БП. Для запуска БП замыкаем зеленый и черный провод, как на картинке. Если PG присутствует, то, скорее всего блок питания уже запустился и следует проверить остальные напряжения. Обратите внимание, что выходные напряжения будут отличаться в зависимости от нагрузки.

Так, что если увидите на желтом проводе 13 вольт, не стоит беспокоиться, вполне вероятно, что под нагрузкой они стабилизируются до штатных 12 вольт.

Если у вас проблема в горячей части и требуется измерить там напряжения, то все измерения надо проводить от общей земли, это минус диодного моста или силовых конденсаторов.



Визуальный осмотр.

Первое, что следует сделать, вскрыть блок питания и произвести визуальный осмотр.

Если БП пыльный вычищаем его. Проверяем, крутится ли вентилятор, если он стоит, то это, скорее всего и является причиной выхода из строя БП. В таком случае следует смотреть на диодные сборки и ДГС. Они наиболее склонны к выходу из строя из-за перегрева.

Далее осматриваем БП на предмет сгоревших элементов, потемневшего от температуры текстолита, вспученных конденсаторов, обугленной изоляции ДГС, оборванных дорожек и проводов.

Первичная диагностика.

Перед вскрытием блока питания можно попробовать включить БП, чтобы наверняка определиться с диагнозом. Правильно поставленный диагноз – половина лечения.

Неисправности:

БП не запускается, отсутствует напряжение дежурного питания

БП не запускается, но дежурное напряжение присутствует. Нет сигнала PG.

БП уходит в защиту,

БП работает, но воняет.

Завышены или занижены выходные напряжения

Предохранитель.

Если вы обнаружили, что сгорел плавкий предохранитель, не спешите его менять и включать БП. В 90% случаев вылетевший предохранитель это не причина неисправности, а её следствие. В таком случае в первую очередь надо проверять высоковольтную часть БП, а именно диодный мост, силовые транзисторы и их обвязку.

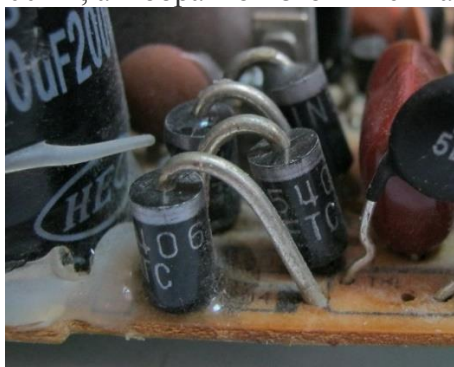
Варистор

Задачей варистора является защита блока питания от импульсных помех. При возникновении высоковольтного импульса сопротивление варистора резко уменьшается до долей Ома и шунтирует нагрузку, защищая ее и рассеивая поглощенную энергию в виде тепла. При пере-напряжении в сети варистор резко уменьшает свое сопротивление, и возросшим током через него выжигается плавкий предохранитель. Остальные элементы блока питания при этом остаются целыми.

Варистор выходит из строя из-за скачков напряжения, вызванными, например, грозой. Так же варисторы выходят из строя, если по ошибке вы переключили БП в режим работы от 110в. Вышедший из строя варистор обычно определить не сложно. Обычно он чернеет и раскаляется, а на окружающих его элементах появляется копоть. Вместе с варистором обычно перегорает предохранитель. Замену предохранителя можно производить только после замены варистора и проверки остальных элементов первичной цепи.

Диодный мост

Диодный мост представляет собой диодную сборку или 4 диода стоящие рядом друг с другом. Проверить диодный мост можно без выпаивания, прозвонив каждый диод в прямом и обратном направлениях. В прямом направлении падение напряжения должно быть около 500мВ, а в обратном звониться как разрыв.



Диодные сборки измеряются следующим образом. Ставим минусовой щуп мультиметра на ножку сборки с отметкой «+», а плюсовым щупом прозваниваем в направления указанных на картинке.

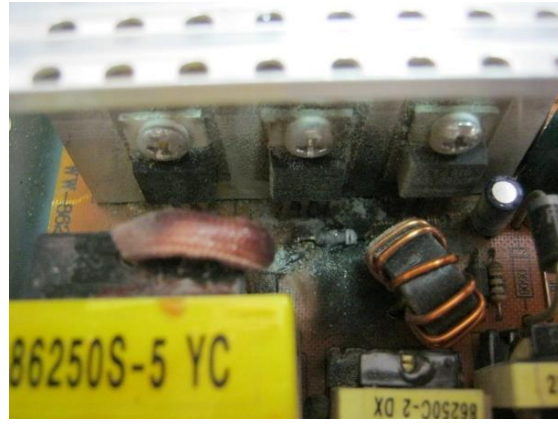
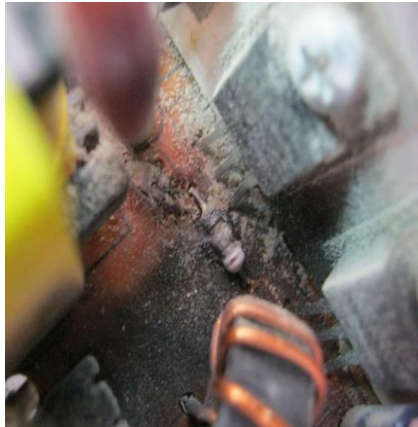
Конденсаторы

Вышедшие из строя конденсаторы легко определить по выпуклым крышкам или по вытекшему электролиту. Конденсаторы заменяются на аналогичные. Допускается замена на конденсаторы немногим большие по ёмкости и напряжению. Если из строя вышли конденсаторы в цепи дежурного питания, то блок питания будет включаться с n-ого раза, либо откажется включаться совсем. Блок питания с вышедшими из строя конденсаторами выходного фильтра будет выключаться под нагрузкой либо так же полностью откажется включаться, будет уходить в защиту.

Иногда, высохшие, деградировавшие, конденсаторы выходят из строя, без каких-либо видимых повреждений. В таком случае следует, предварительно выпаяв конденсаторы проверить их емкость и внутренние сопротивление. Если емкость проверить нечем, меняем все конденсаторы на заведомо рабочие.

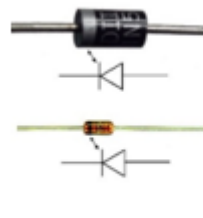
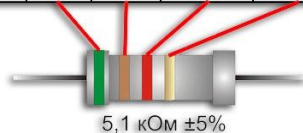


Резисторы



Номинал резистора определяется по цветовой маркировке. Резисторы следует менять только на аналогичные, т.к. небольшое отличие в номиналах сопротивления может привести к тому, что резистор будет перегреваться. А если это подтягивающий резистор, то напряжение в цепи может выйти за пределы логического входа, и ШИМ не будет генерировать сигнал Power Good. Если резистор сгорел в уголь, и у вас нет второго такого же БП, чтобы посмотреть его номинал, то считайте, что вам не повезло. Особенно, это касается дешевых БП, на которые, практически не возможно достать принципиальных схем.

Цвет знака	Номинальное сопротивление, Ом		Множитель	Допуск, %
	Первая полоса	Вторая полоса	Третья полоса	Четвертая полоса
Черный		0	1	
Коричневый	1	1	10	±1
Красный	2	2	100	±2
Оранжевый	3	3	1000	
Желтый	4	4	10 ⁴	
Зеленый	5	5	10 ⁵	±0,5
Голубой	6	6	10 ⁶	±0,25
Фиолетовый	7	7	10 ⁷	±0,1
Серый	8	8	10 ⁸	
Белый	9	9	10 ⁹	
Золотистый		0	0,1	±5
Серебристый			0,01	±10



Диоды и стабилитроны.



Транзисторы, диодные сборки.

Диоды и стабилитроны.

Проверяются прозвонкой в обе стороны. Если звонятся в обе стороны как К.З. или разрыв, то не исправны. Сгоревшие диоды следует менять на аналогичные или сходные по характеристикам, внимание обращаем на напряжение, силу тока и частоту работы.

Транзисторы, диодные сборки.

Транзисторы и диодные сборки, которые установлены на радиатор, удобнее всего выпаивать вместе с радиатором. В «первичке» находятся силовые транзисторы, один отвечает за дежурное напряжение, а другие формируют рабочие напряжения 12в и 3,3в. Во вторичке на радиаторе находятся выпрямительные диоды выходных напряжений (диоды Шоттки).

Проверка транзисторов заключается в «прозвонке» р-п-переходов, также следует проверить сопротивление между корпусом и радиатором. Транзисторы не должны замыкать на радиатор. Для проверки диодов ставим минусовой щуп мультиметра на центральную ногу, а плюсовым щупом тыкаем в боковые. Падение напряжения должно быть около 500мВ, а в обратном направлении должен быть разрыв.

Если все транзисторы и диодные сборки оказались исправными, то не спешите запаивать радиаторы обратно, т.к. они затрудняют доступ к другим элементам.

ШИМ

Если ШИМ визуально не поврежден и не греется, то без осциллографа его проверить довольно сложно.

Простым способом проверки ШИМ, является проверка контрольных контактов и контактов питания на пробой.

Для этого нам понадобится мультиметр и дата шит на микросхему ШИМ. Диагностику ШИМ следует проводить, предварительно выпаяв её. Проверка производится прозвоном следующих контактов относительно земли (GND): V3.3, V5, V12, VCC, OPP. Если между одним из этих контактов и землей сопротивление крайне мало, до десятков Ом, то ШИМ под замену.

Дроссель групповой стабилизации (ДГС).

Выходит из строя из-за перегрева (при остановке вентилятора) или из-за просчетов в конструкции самого БП (пример Microlab 420W). Сгоревший ДГС легко определить по потемневшему, шелушащемуся, обугленному изоляционному лаку. Сгоревший ДГС можно заменить на аналогичный или смотать новый. Если вы решите смотать новый ДГС, то следует использовать новое ферритовое кольцо, т.к. из-за перегрева старое кольцо могло уйти по параметрам.



Трансформаторы.

Для проверки трансформаторов их следует предварительно выпаять. Их проверяют на короткозамкнутые витки, обрыв обмоток, потерю или изменение магнитных свойств сердечника.

Чтобы проверить трансформатор на предмет обрыва обмоток достаточно простого мультиметра, остальные неисправности трансформаторов определить гораздо сложнее и рассматривать их мы не будем. Иногда пробитый трансформатор можно определить визуально. Опыт показывает, что трансформаторы выходят из строя крайне редко, поэтому их нужно проверять в последнюю очередь.

Профилактика вентилятора.

После удачного ремонта следует произвести профилактику вентилятора. Для этого вентилятор надо снять, разобрать, почистить и смазать.

Отремонтированный блок питания следует длительное время проверить под нагрузкой.

Ход работы:

Паяльник, припой, флюс. Рекомендуется паяльная станция с регулировкой мощности или пара паяльников разной мощности. Мощный паяльник понадобится для выпайки транзисторов и диодных сборок, которые находятся на радиаторах, а также трансформаторов и дросселей. Паяльником меньшей мощности паяется разная мелочевка. Отсос для припоя и (или) оплетка. Служат для удаления припоя. Отвертка. Бокорезы. Используются для удаления пластиковых хомутов, которыми стянуты провода.

Мультиметр

Пинцет

Лампочка на 100Вт

Очищенный бензин или спирт. Используется для очистки платы от следов пайки.

Практическая работа № 24.

Тема 5.1. Оптоэлектронные приборы.

Оптоэлектронные приборы.

Цель работы: расширить и систематизировать знания по изучаемой теме.

Теоретическая часть:

Источник света, световой поток или яркость которого являются однозначной функцией электрического сигнала, поступающего на его вход, называют *управляемым источником света*. Общими требованиями к управляемым источникам света оптоэлектронных цепей являются: стабильность и линейность характеристики преобразования, миниатюрность, малая потребляемая мощность, большой срок службы, высокая надёжность, высокая эффективность, быстроедействие, возможность изготовления в виде интегральных микросхем, возможность смещения спектральных характеристик в любую заданную часть области спектра, механическая прочность и технологичность.

Оптоэлектроникой называют научно-техническое направление, в котором для передачи, обработки и хранения информации используются электрические и оптические методы.

В оптоэлектронике оптический луч выполняет те же функции управления, преобразования и связи, что и электрический сигнал в электрических цепях.

Устройства оптоэлектроники имеют ряд преимуществ перед чисто электронными приборами.

В них обеспечивается практически полная развязка между входной и выходной цепями. Отсутствует обратное влияние приёмника сигнала на его источник. Легко согласуются между собой электрические цепи с разными входными и выходными импедансами (полными сопротивлениями). Оптоэлектронные устройства имеют широкую полосу пропускания и преобразования сигналов, большое быстроедействие и высокую информационную ёмкость оптических каналов связи (до $10^{13} \dots 10^{15}$ Гц). В связи с тем, что в оптической цепи носителями заряда являются электрически нейтральные фотоны, которые в световом потоке не взаимодействуют между собой, не смешиваются и не рассеиваются, на подобные цепи практически не влияют всевозможные электромагнитные поля. В электронных и электрических цепях, где носителями заряда являются электроны, имеющие определённый электрический заряд, всегда наблюдается «взаимодействие» носителей заряда с электрическими и магнитными полями, вследствие чего информационные сигналы искажаются.

К недостаткам оптоэлектронных компонентов относятся: плохая временная и температурная стабильность характеристик; сравнительно большая потребляемая электрическая мощность; сложности изготовления универсальных устройств для обработки информации; меньшие функциональные возможности по сравнению с интегральными микросхемами; жёсткие требования к технологии изготовления. Вследствие этого компоненты оптоэлектроники и электроники существуют не отрицая друг друга и каждый из них используется в той области, где применение его более целесообразно.

Оптоэлектронными приборами называют устройства, излучающие и преобразующие излучение в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой областях спектра или использующие для своей работы электромагнитные излучения, частоты которых находятся в этих областях. Для осуществления элементарного преобразования в оптоэлектронике необходимо иметь управляемый источник света (фотоизлучатель), яркость свечения которого однозначно определяется электрическим сигналом, а также фотоприёмник, сопротивление или ЭДС которого зависят от степени его освещённости.

Фотоэффект и электролюминесценция в полупроводниках.

При освещении полупроводникового материала кванты света взаимодействуют с электронами, передавая им свою энергию. Если энергия квантов света превышает ширину запрещенной зоны ΔE , валентные электроны поглощают энергию квантов и переходят в зону проводимости, т. е. происходит генерация электронно-дырочных пар. Одновременно с генерацией осуществляется процесс рекомбинации этих носителей. При непрерывном освещении полупроводника между генерацией и рекомбинацией устанавливается равновесие, при котором концентрация избыточных носителей поддерживается на некотором постоянном уровне.

Увеличение концентрации свободных носителей заряда в полупроводнике под действием квантов света называют *внутренним фотоэффектом*. При внутреннем фотоэффекте уменьшается сопротивление полупроводника. Рекомбинация избыточных электронно-дырочных пар сопровождается выделением энергии. Например, при переходе электрона из зоны проводимости в валентную зону выделяется энергия, равная ширине запрещенной зоны ΔE . Эта энергия может выделяться в виде кванта света — излучательная *рекомбинация*.

Люминесценция — это эмиссия оптического излучения (в ультрафиолетовой, видимой или инфракрасной области спектра) в результате возбуждения электронов в полупроводнике. Существуют множество видов люминесценции, различающихся способом возбуждения. В электронике наибольшее значение имеют следующие типы люминесценции: *электролюминесценция*, включающая возбуждение электрическим полем или током; *фотолюминесценция* — возбуждение оптическим излучением и *катодолюминесценция* — возбуждение пучком электронов.

Спектральный диапазон, воспринимаемый человеческим глазом, составляет 0,4...0,7 мкм. Инфракрасная область лежит в диапазоне 0,7...200 мкм, а ультрафиолетовая область включает длины волн 0,4...0,002 мкм.

Области длин волн, отвечающие спектральным цветам, следующие:

ультрафиолетовый	фиолетовый	синий	зеленый	желтый	оранжевый	красный
0,390	0,335	0,495	0,570	0,590	0,630	0,770

Несмотря на то, что излучение различных длин волн возбуждается различными методами, природа процесса возбуждения во всех случаях одинакова.

Полупроводниковые приборы, чувствительные к свету, называют *фотоприемниками*. Действие полупроводниковых фотоприемников (фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов и др.) основано на внутреннем фотоэффекте. Явление электролюминесценции используется в *светоизлучающих диодах (светодиодах)*.

Полупроводниковые светодиоды и фотодиоды.

Светоизлучающие диоды

Светодиоды предназначены для преобразования электрической энергии в энергию электромагнитного излучения инфракрасного (ИК) или видимого диапазона. Светодиод представляет собой излучающий *p-n-переход*, свечение в котором возникает вследствие рекомбинации носителей заряда (электронов и дырок. Действие светодиода основано на явлении инжекторной электролюминесценции, т. е. генерации оптического излучения в *p-n-переходе*, находящемся под прямым внешним напряжением электрического тока. Под воздействием внешней энергии электроны в атомах переходят в возбужденное состояние с более высоким уровнем энергии, чем энергия, необходимая для выхода электрона из атома. Такой уровень энергии называется *метастабильным уровнем возбуждения* (зона проводимости 2 на рис.1). При возвращении таких электронов с метастабильного уровня 2 на исходный низкий энергетический уровень 1 происходит испускание фотонов с длиной волны

$\lambda = 1,23 (W_2 - W_1)$, где W_1 — низкий уровень энергии 1, а W_2 — высокий уровень энергии 2.

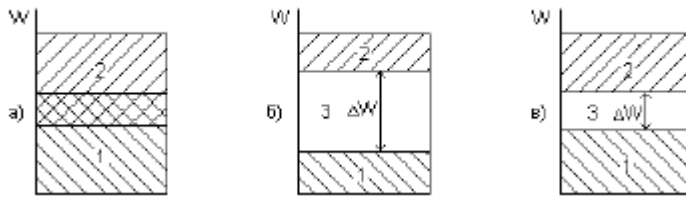


Рисунок 1 – Энергетические зоны проводника (а), диэлектрика (б) и полупроводника.

1 – валентная зона; 2 – зона проводимости; 3 – запрещенная зона

Показатель преломления активного слоя выше 2 показателя преломления ограничивающих пассивных слоев 1, благодаря чему рекомбинационное излучение может распространяться в пределах активного слоя, испытывая многократное отражение, что значительно повышает КПД источника излучения.

Гетеродинные (неоднородные) для изготовления светодиода структуры могут создаваться на основе разных полупроводниковых материалов. Обычно в качестве подложки используются GaAs (галлий, мышьяк) и In P (индий, фосфор). Соответствующий композиционный состав активного материала выбирается в зависимости от длины волны излучения и создаётся посредством напыления на подложку.

Длину волны излучения λ_0 определяют как значение, соответствующее максимуму спектрального распределения мощности, а ширину спектра излучения $\Delta\lambda_{0,5}$ – как интервал длин волн, в котором спектральная плотность мощности составляет половину максимальной. Яркость свечения пропорциональна прямому току светодиода.

Светодиоды изготавливают как в виде отдельных индикаторов, так и в виде сегментных или точечных матриц. На основе точечных матриц можно синтезировать любое изображение.

Основные параметры и характеристики светодиодов

1. Сила света I_V – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении; выражается в канделах (обычно $0,1 \div 10$ мКд).
2. Цвет свечения или длина волны излучения.
3. Постоянное прямое напряжение – падение напряжения при заданном токе ($2 \div 4$ В).
4. Угол излучения α – плоский угол, в пределах которого сила света составляет не менее половины её максимального значения.
5. Характеристики зависимостей: силы света от величины тока; спектральной плотности излучения $I_V(\lambda) / I_V(\lambda)_{\max}$ от длины волны; постоянного прямого тока от постоянного прямого напряжения и др.

Для получения повышенной мощности излучения применяют *суперлюминесцентные* диоды, занимающие промежуточное положение между инжекционными светодиодами и полупроводниковыми лазерами. Они обычно представляют собой конструкции, работающие на том участке ВАХ, на котором наблюдается оптическое усиление (стимулированное излучение). Этот участок характеризуется тем, что внешний квантовый выход на нём существенно больше, чем у обычного светодиода. Суперлюминесцентные диоды имеют уменьшенную спектральную ширину полосы излучения и требуют для работы больших плотностей тока (при мощности излучения 60 мВт плотность тока 3 КА/см^2). Их применяют при работе с волоконно-оптическими линиями связи.

В ряде случаев в качестве управляемых источников света применяют инжекторные лазеры. Они отличаются от светодиодов тем, что излучение сконцентрировано в узкой спектральной области и является когерентным. Лазеры имеют высокий КПД и большое быстродействие. Полупроводниковые лазеры широко применяются при создании световодных линий связи большой протяжённости и в измерительных устройствах различного назначения.

Система обозначений светодиодов аналогична обозначениям обычных диодов, только вместо буквы Д используют Л, например АЛ302В.

Оптоэлектронные преобразователи

Фотоприёмники предназначены для преобразования светового излучения в электрические сигналы. Так как функциональные возможности Электролюминесцентных источников света ограничены, то многообразие возможных характеристик оптронов реализуется за счёт фотоприёмников.

В качестве фотоприёмников могут быть использованы фоторезисторы, фотодиоды, фототристоры и т. д.

При подборе фотоизлучателей и фотоприёмников необходимо согласовывать их спектральные характеристики. В противном случае вследствие несовершенства существующих источников света сложно получить удовлетворительные результаты.

Фоторезисторы

Фоторезисторы — полупроводниковые фотоприёмники, которые изменяют сопротивление в зависимости от интенсивности и спектрального состава падающего на них светового излучения. Они широко применяются в системах автоматики и фототелеграфии.

Устройство фоторезистора (рис. 1) следующее: на пластину из диэлектрика 1 нанесен слой светочувствительного полупроводника 2, расположенный так, что на него может падать свет. На полупроводнике укреплены металлические контакты 3, соединяющие фоторезистор с внешней цепью. Материалами для фоторезисторов служат, например, сернистый кадмий CdS, наиболее чувствительный к видимым лучам; сернистый свинец PbS — к инфракрасным лучам; сернистый висмут ViS — к лучам на границе между видимой и инфракрасной областями.

Принцип действия фоторезисторов основан на использовании явления фотопроводимости полупроводников, зависящей от концентрации электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. При комнатной температуре их немного, поэтому сопротивление полупроводника велико, т. е. сопротивление фоторезистора в отсутствие света, называемое *темновым сопротивлением* R_T , будет значительным и составляет $10^4 \dots 10^7$ Ом.

Если же полупроводник облучается светом, то энергия квантов будет, достаточной для того, чтобы электроны преодолели запрещенную зону, проводимость фоторезистора увеличивается.

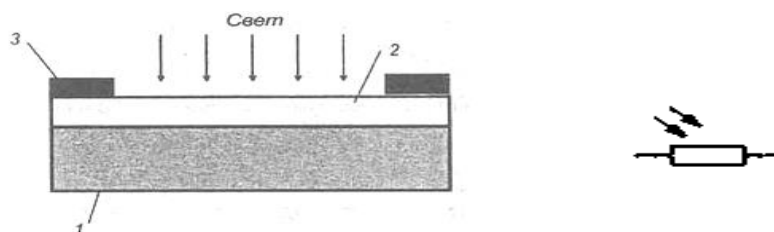


Рис.1. Схема устройства фоторезистора условное обозначение

При воздействии на фоторезистор световым потоком и приложении напряжения E от источника движение электронов станет направленным и по цепи, в которую включен резистор R_H , будет протекать ток I_ϕ , называемый фототоком. Напряжение на резисторе R_H является выходным напряжением $U_{вых}$, используемым для воздействия на последующие элементы электронной схемы.

Значение фототока можно найти из выражения

$$I_\phi = \sigma_\phi E S =$$

где E — напряженность электрического поля; S — площадь сечения полупроводника; σ_ϕ — фотопроводимость, имеющая вид

$$\sigma_\phi = e n_\phi \mu$$

где, в свою очередь, μ — подвижность основных носителей, n_ϕ — концентрация носителей заряда, возбужденных светом:

$$n_\phi = \beta \sqrt{\Phi}$$

где β — коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты падающего света и скорости рекомбинации носителей заряда; Φ — интенсивность облучения (в лм).

Фототок представляет собой разность между световым I_{CB} и тепловым I_T токами:

$$I_{\Phi} = I_{CB} + I_T$$

На световой характеристике (рис. 2) показано значение темнового тока. Световые характеристики фоторезисторов обычно нелинейные. Тепловой ток определяется током, проходящим через фоторезистор при отсутствии освещенности.

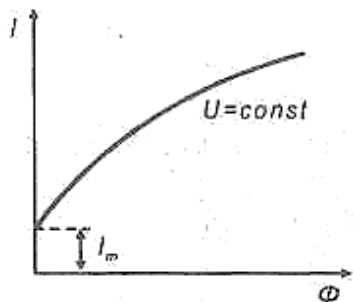


Рис. 2

Световая характеристика фоторезистора

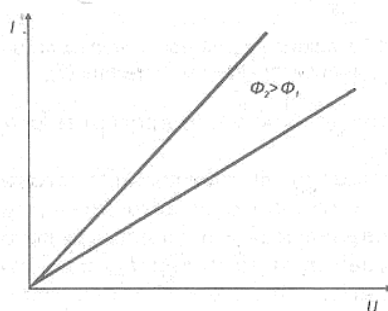


Рис. 3 Вольтамперные характеристики

Вольтамперные характеристики фоторезисторов, показанные на рис.3, линейны в пределах максимально допустимой мощности рассеяния на них, полярность напряжения значения не имеет.

Основными параметрами фоторезисторов являются интегральная, удельная и спектральная чувствительности.

Интегральная чувствительность фоторезистора есть отношение разности токов при освещении и темнового к световому потоку, падающему на резистор, при номинальном значении напряжения:

$$K_{\Phi} = \frac{I_{CB} - I_T}{\Phi} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi} \text{ при } U_{ном}, \quad (15.5)$$

где Φ — световой поток, лм.

Изменение сопротивления освещенного фоторезистора R_{Φ} характеризуется *удельной чувствительностью фоторезистора*, т. е. интегральной чувствительностью, отнесенной к 1 В приложенного внешнего напряжения

Фоторезисторы имеют большую удельную чувствительность (до нескольких сотен

$$K = \frac{K_{\Phi}}{U} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi U}.$$

мА/Влм). Однако их инерционность также велика (0,01...10 мс), характеристики и свойства зависят от температуры.

Спектральная чувствительность фоторезистора определяется значением фототока при освещении его единицей светового потока определенной длины волны.

Фоторезисторы характеризуются еще следующими параметрами: максимальным рабочим напряжением (до 600 В); средней кратностью изменения сопротивления R_T/R_{Φ} (1,2...500); температурным коэффициентом фототока в интервале рабочих температур $TK_{\Phi} = (1/I_{\Phi}) dI_{\Phi}/dT$, K^{-1} .

Фотодиоды и фототранзисторы.

Фотодиод — это полупроводниковый диод на основе р-п-перехода или барьера металл-полупроводник, обратный ток которого зависит от воздействующего на него светового излучения. Действие фотодиода основано на поглощении света вблизи области р-п-перехода, при этом кванты света, разрушая ковалентные связи атомов полупроводника, создают новые носители заряда (электронно-дырочные пары). Эффективное поглощение света происходит на границе раздела областей с противоположными типами проводимости одного и того же полупроводника, вблизи контакта двух различных полупроводников (фотодиоды с гетеропереходом, например, n — AlGaAs, p — GaAs) или металла и полупроводника. При освещении выпрямляющего перехода световым потоком Φ за счет генерации новых носителей обратный ток возрастает на величину I_ϕ , называемую *фототоком*. На рис. 4 показана схема включения фотодиода, его вольтамперная характеристика

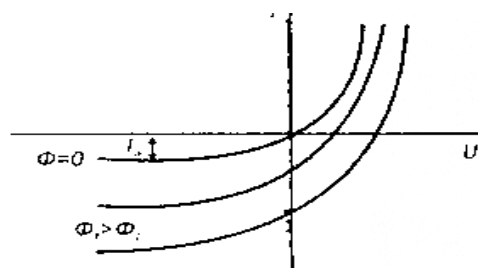
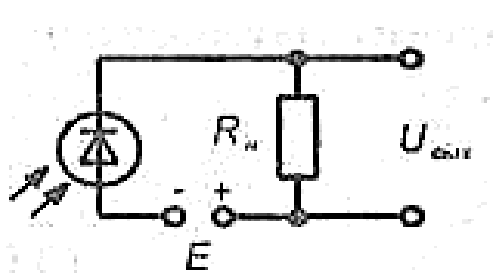


Рис.4 Включение фотодиода совместно с внешним источником E

вольтамперная характеристика фотодиода

При $\Phi=0$ обратный ток называют еще *темновым током*. В этом случае фотодиод ничем не отличается от обычного диода. При освещении фотодиода увеличивается ток во внешней цепи, определяемый в этом случае напряжением внешнего источника и световым потоком. ВАХ фотодиода показывает, что каждому значению светового потока Φ соответствует определенное значение обратного тока.

Фототок суммируется с обратным током теплового происхождения. В соответствии с этим уравнение тока p - n -перехода фотодиода, известное из теории работы полупроводниковых приборов, имеет вид

где I_0 — обратный, или тепловой, ток p - n -перехода.

$$I_{\text{общ}} = I_\phi - I_0 \left(e^{E/\phi_T} - 1 \right),$$

Использование фотодиода с внешним источником напряжения называют *фотодиодным режимом*.

Второй режим применения фотодиода — использование фотодиода как источника *фотоэлектродвижущей силы*, т. е. *фото ЭДС* (рис.5). Этот режим называют еще *фотогальваническим*, или *вентильным*. При освещении p -га-перехода образующиеся в нем электронно-дырочные пары разделяются электрическим полем, обусловленным контактной разностью потенциалов. В результате при освещении фотодиода на его выводах появляется напряжение U и через нагрузку R_H проходит ток

$$I = \frac{U}{R_H} = I_\phi - I_0 \left[\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right].$$

При последовательно с нагрузкой выключенном источнике напряжения E в цепи появляется ток, равный разности встречных токов через p - n -переход.

Рис.5 Включение фотодиода в режиме фото ЭДС световая характеристика фотодиода



Это уравнение считается основным для фотодиода при внешнем напряжении.

Световые характеристики фотодиода, т. е. зависимости типа $I_{\phi}=f(\Phi)$, линейны в широком диапазоне изменения освещенности фотоэлементов и мало зависят от приложенного напряжения. Чувствительность фотодиода $K=dI/d\Phi$ изменяется с длиной волны падающего света и достигает нескольких десятков миллиампер на люмен.

Рабочее напряжение фотодиодов 10...30 В; тепловой ток при рабочем напряжении порядка 10...30 мкА для германиевых фотодиодов и 0,1...3 мкА для кремниевых; инерционность приборов составляет менее 10 нс. Фотодиод представляет собой кристалл германия или кремния с областями дырочной и электронной проводимости, разделенными р-п-переходом, который получают, используя сплавную или диффузионную технологию. Обычно германиевые фотодиоды (например, ФД-1, ФД-2) изготавливают со сплавным переходом, а кремниевые — диффузионным переходом (например, ФДК-1).

Фотодиоды применяют в качестве детекторов излучения, для передачи изображения, для приема оптической информации, в устройствах автоматики, вычислительной и измерительной техники.

Фотодиоды, работающие в фотогальваническом режиме, используют в преобразователях солнечной энергии в электрическую для питания различных устройств, в так называемых солнечных батареях. Фото ЭДС кремниевых фотоэлементов порядка 0,5 В, а ток короткого замыкания 25 мА с 1 см² освещаемой поверхности.

Фототранзисторы. Фототранзистором называют транзистор (обычно биполярный), в котором управление коллекторным током осуществляется на основе внутреннего фотоэффекта. Фототранзистор, как правило, включается по схеме с общим эмиттером, в базе которого при освещении генерируются парные заряды (электроны и дырки). Образующиеся неосновные носители в базе (например, дырки для р-п-р-транзистора) втягиваются полем коллекторного перехода; оставшиеся в базе электроны создают дополнительный пространственный заряд, снижающий высоту потенциального барьера эмиттерного перехода. Поэтому число диффундируемых из эмиттера в базу, а затем в коллектор основных носителей (в частности, для р-п-р-транзистора дырок) возрастает, увеличивая коллекторный ток. Величина коллекторного тока, как и в обычном транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, в β раз будет больше тока базы затемненного фототранзистора, так и тока, создаваемого под действием светового потока.

Основу фототранзистора составляют монокристалл полупроводника *р-п-р-* и *п-р-п-* типа. Кристалл монтируется в защитный корпус с прозрачным входным окном. Включение фототранзистора во внешнюю электрическую цепь подобно включению биполярного транзистора, выполненному по схеме с общим эмиттером с подключенной базой и со свободной базой (рис.6).

Фототранзистор можно рассматривать как комбинацию фотодиода (переход к-б) и транзистора. Его характеристики аналогичны характеристикам фотодиода, но коллекторные токи оказываются увеличенными в соответствующее величине β число раз.

Управляющее действие тока базы характеризуется коэффициентом усиления по току β , т. е. $I_K = \beta I_B$, а действие света — чувствительностью фототранзистора, т. е. $K = I_K / \Phi$ или $I_K = K\Phi$. Приравняв правые части для I_K , получим $K\Phi = \beta I_B$. Из этого выражения можно определить величину светового эквивалента заданного электрического сигнала, или наоборот. Наличие у фототранзистора оптического и электрического входов позволит осуществить суммирование оптического и электрического сигналов. Но обычно электрический сигнал используется в фототранзисторах для получения линейной характеристики прибора при измерении малых световых сигналов.

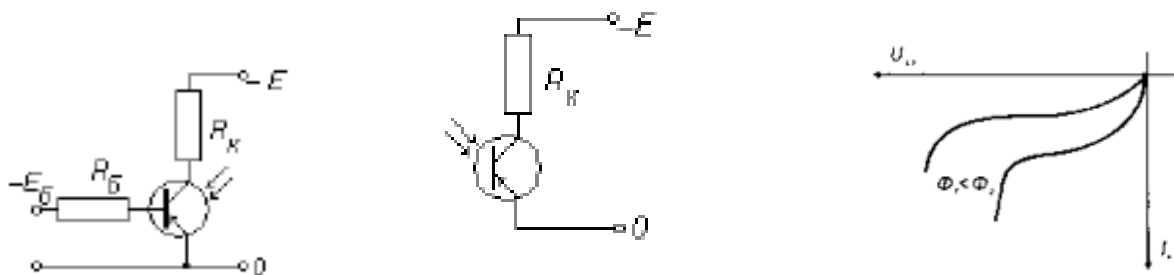


Рис.6 Схема включения фототранзистора с подключенной базой

Схема включения фототранзистора со свободной базой

вольтамперные (выходные) характеристики фототранзистора

Для фототранзистора со свободной базой ток коллектора

$$I_K = \beta I_B + I_T$$

где I_Φ — фототок, I_T — неуправляемый (темновой) ток коллектора в схеме с ОЭ.

При затемнении, т. е. $I_\Phi = 0$, темновой ток $I_T \approx \beta I_{K60}$, т. е. темновой ток фототранзисторов будет значительно больше темнового тока фотодиода.

Коэффициент чувствительности фототранзисторов значительно выше фоточувствительности фотодиодов (0,1...0,5 А/лм при площади освещаемой поверхности 2 мм²), а коэффициент усиления по току достигает 100...1000, рабочее напряжение обычно равно 10...15 В, темновой ток при рабочем напряжении I_T — 100...1000 мкА, диапазон тока при освещении транзистора — 1...20 мА, максимально рассеиваемая мощность — около 50 мВт.

Параметры фототранзисторов в значительной степени зависят от температуры. С ростом температуры чувствительность и скорость роста темнового тока увеличиваются.

Малые габариты и относительная простота конструкции, а также высокие надежность, чувствительность и временная стабильность параметров фототранзисторов позволяют широко использовать их в системах контроля и автоматики в качестве датчиков освещенности и элементов гальванической развязки.

Кроме фототранзисторов р-п-переходами в качестве высокочувствительных фотоприёмников используют полевые фототранзисторы. Они имеют высокую фоточувствительность (до нескольких ампер на люмен), широкую полосу пропускания ($10^6 \div 10^8$ Гц), значительную мощность рассеяния. По своим характеристикам они ближе к фоторезисторам, чем к биполярным транзисторам. Полевой фототранзистор выполняется с управляющим р-п-переходом и, так же как обычный полевой транзистор, имеет три электрода: исток, сток и затвор. Объём полупроводника между стоком и истоком образует проводящий канал. Затвор отделён от канала р-п-переходом, область объёмного заряда которого модулируется потенциалом затвор-исток. Переход затвор — канал можно рассматривать как фотодиод, фототок которого вызывает падение напряжения на резисторе R_z , включённом в цепь затвора (рис. 51. а). При $E_z = \text{const}$ это приводит к модуляции потенциала затвора за счёт световой энергии и соответствующим изменениям сопротивления канала.

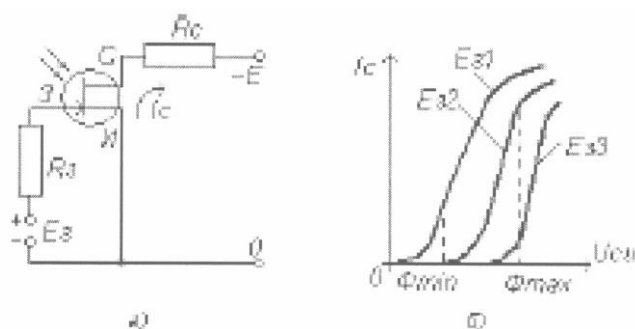


Рис.51 Фототранзистор на базе полевого транзистора (а); его энергетические характеристики (б)
Инерционность полевого фототранзистора определяется инерционностью **фотодиода** в области затвора и временем пролёта носителей заряда через **канал** и оценивается значениями $10^{-6} \div 10^{-8}$ секунды. Граничная частота полевых фототранзисторов находится в пределах $10^7 \div 10^8$ Гц.

Фототиристоры.

Фототиристоры используются для коммуникации световым сигналом электрических цепей большой мощности. Они представляют собой фотоэлектрические аналоги управляемого тиристора. Схема подключения напряжения к фототиристор и его ВАХ-ки показаны на рис.52.

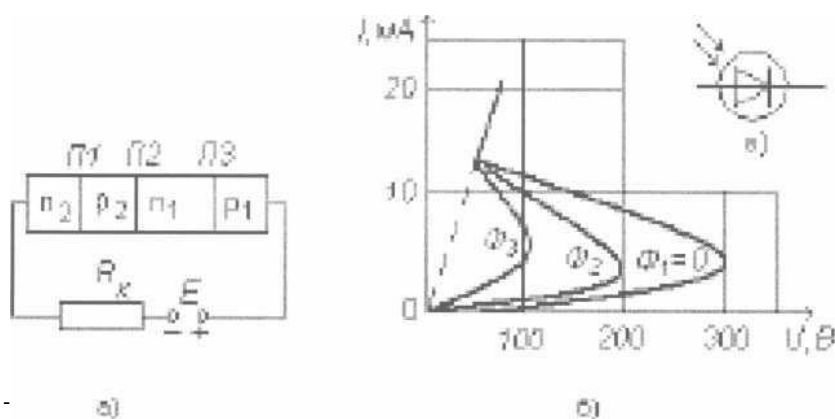


Рисунок 52 – Схема подключения напряжения к фототиристор (а); его ВАХ (б) и условное обозначение (в)

Фототиристор имеет четырёхслойную p-n-p-n структуру у которой переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, а коллекторный переход П2 - в обратном. С вет обычно попадает на обе базы тиристора — слои p2 и n1. При этом с ростом освещённости возрастают эмиттерные токи, что приводит к возрастанию тока через тиристор. ВАХ типового фототиристора имеет вид, показанный на рис. 52, б. Сопротивление фототиристора изменяется от 10^8 Ом (в запертом состоянии) до 0.1 Ом в открытом состоянии. Время переключения тиристора лежит в пределах $10^{-5} \div 10^{-6}$ секунды.

Таким образом, фототиристоры позволяют с помощью светового луча управлять значительными мощностями в электроцепях.

Многочувствительные фотоприёмники.

Эти приборы (сканистор, фотодиодная матрица с управлением на МОП-транзисторе, фоточувствительные приборы с зарядовой связью и другие) относятся к числу наиболее быстро развивающихся и прогрессирующих изделий электронной техники. Оптоэлектрический «глаз» на основе фотодиода способен реагировать не только на яркостно временные, но и на пространственные характеристики объекта, то есть воспринимать его **полный** зрительный образ. Число фоточувствительных ячеек в приборе является достаточно большим, поэтому кроме всех проблем дискретного фотоприёмника (чувствительность, быстродействие, спектральная область) приходится решать и проблему считывания информации. Все многочисленные фото приёмники представляют собой сканирующие системы, то есть устройства,

позволяющие производить анализ исследуемого пространства путём последовательного его просмотра (поэлементного разложения).

Как происходит восприятие образов?

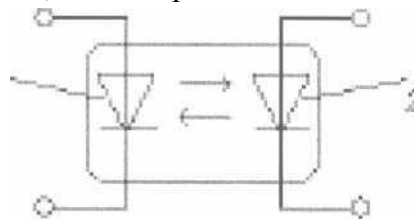
Распределение яркости объекта превращается в оптическое изображение и фокусируется на фоточувствительную поверхность. Здесь световая энергия переходит в электрическую, причём отклик каждого элемента (ток, заряд, напряжение) пропорционален его освещённости. Яркостная картина преобразуется в электрический рельеф. Схема сканирования производит периодический последовательный опрос каждого элемента и считывание содержащейся в нём информации. Тогда на выходе устройств мы получаем последовательность видеоимпульсов, в которой закодирован воспринимаемый образ.

При создании многоэлементных фотоприёмников стремятся обеспечить наилучшее выполнение ими функций преобразования и сканирования.

Оптроны.

Оптроном называется такой оптоэлектронный прибор, в котором имеются источник и приёмник излучения с тем или иным видом оптической связи между ними, конструктивно объединённые и помещённые в один корпус. Между управляющей цепью (ток в которой мал, порядка нескольких мА), куда включён излучатель, и исполнительной, в которой работает фотоприёмник, отсутствует электрическая (гальваническая) связь, а управляющая информация передаётся посредством светового излучения (рис. 53).

Это свойство оптоэлектронной пары (а в некоторых видах оптронов присутствует по несколько не связанных друг с другом даже оптически оптопар) оказалось незаменимым в тех электронных узлах, где нужно максимально устранить влияние выходных электрических пёв на входные. У всех дискретных элементов {транзисторов, тиристоров, микросхем, являющихся коммутационными сборками, или микросхем с выходом, позволяющим коммути-



ровать нагрузку большой мощности) управляющие и исполнительные цепи электрически связаны друг с другом. Это часто недопустимо, если коммутируется высоковольтная нагрузка. К тому же, возникающая обратная связь неминуемо приводит к появлению дополнительных помех. Использование оптронов в электронно-вычислительной аппаратуре является одним из основных методов повышения помехоустойчивости аппаратуры.

Основной носитель помех в радиоэлектронной аппаратуре - корпус. Корпус используется как один из полюсов электропитания, поэтому подключение к нему разных силовых устройств приводит к наведению кратковременных импульсных помех при коммутации цепей с значительными величинами токов в них. В то же время для передачи информации чисто электрическим путём между источником и приёмником информации должна быть электрическая связь по корпусу. Если к этому же корпусу подключены силовые цепи, то помехи, вызванные коммутациями в этих цепях, приводят к сбоям в работе других устройств, подключённых к корпусу.

Передача информации с помощью оптронов позволяет развязать электрические цепи питания источника в приёмника информации» т. к. носителем информации является электрически нейтральное оптическое излучение.

Кроме защиты от воздействия помех гальваническая развязка на основе оптронов позволяет решить ещё одну задачу - совместную работу устройств, находящихся под разными потенциалами. Передача сигнала в оптроне возможна, даже если цепи светодиода и фотодиода находятся под разными (в некоторых оптронах до 500В) напряжениями.

Конструктивно фотоприёмник обычно крепится на дне корпуса, а излучатель - в верхней части. Зазор между излучателем и фотоприёмником заполнен иммерсионным материалом - чаще всего эту роль выполняет полимерный оптический клей. Этот материал исполняет роль линзы, фокусирующей излучение на чувствительный слой фотоприёмника. Иммерсионный материал снаружи покрыт специальной плёнкой, отражающей световые лучи внутрь, чтобы препятствовать рассеянию излучения за пределы рабочей зоны фотоприёмника.

Роль излучателей в оптронах, как правило, выполняют светодиоды на основе арсенид-галлия. Светочувствительные элементы в оптопарах могут представлять собой фотодиоды (оптопары серии АОД.»), фототранзисторы, фототринисторы (оптопары серии АОУ...) и высокоинтегрированные схемы фотореле. В диодной оптопаре, например, в качестве фотоприёмного элемента используется фотодиод на основе кремния, а излучателем служит инфракрасный излучающий диод. Максимум спектральной характеристики излучения диода приходится на длину волны около 1 мкм. Диодные оптопары применяются в фотодиодном и фотогенераторном режимах.

Транзисторные оптроны (серия АОТ...) имеют некоторые преимущества относительно диодных. Коллекторным током биполярного транзистора: управляют как оптически (воздействуя на светодиод), так и электрически по базовой цепи: (в данном случае работа фототранзистора при отсутствии излучения управляющего светодиода оптрона практически не отличается от работы обыкновенного кремниевого транзистора). У полевого транзистора управление осуществляется через цепь затвора.

Кроме того, фототранзистор может работать в ключевом и усилительном режимах, а фотодиод - только в ключевом. Оптроны с составными транзисторами (например, АОТ1ЮБ), имеют наибольший коэффициент усиления (как и обычный узел на составном транзисторе), могут коммутировать напряжение и ток достаточно больших величин и по данным параметрам уступают только тиристорным оптронам и оптоэлектронным реле типа: КР293ЖП2 — КР293КП4, которые приспособлены для коммутации высоковольтных и силовых цепей.

Ход работы.

Изучить материал теоретической части и лекции и ответить на вопросы

1. Что называется внутренним фотоэффектом?
2. Что такое люминесценция?
3. Какие типы люминесценции вы знаете?
4. Дайте определение фоторезистора и объясните его устройство.
5. Нарисуйте световую и вольт-амперную характеристики фоторезистора.
6. Чем различаются интегральная и спектральная чувствительность фоторезистора?
7. Дайте определение фотодиода и нарисуйте схему его включения с внешним источником.
8. Чем различаются вольт-амперные характеристики фотодиода с внешним источником и без него?
9. Напишите основное уравнение для фотодиода с внешним источником.
10. Расскажите об использовании фотодиодов в качестве источников питания.
11. Какой транзистор называют фототранзистором?
12. Какие схемы включения фототранзистора применяются?
13. Расскажите об усилительных свойствах фототранзистора.
14. Какой диод называют светоизлучающим?
15. Нарисуйте схематическое изображение топологии кристалла светодиода.
16. Какие полупроводниковые материалы используются для изготовления фотодиодов?
17. Дайте определение оптрона.
18. Какие оптроны Вы знаете? Нарисуйте их графическое изображение.
19. Нарисуйте схему использования оптрона.
20. Какими электрическими характеристиками обладают диодные оптроны?

Практическая работа № 25.

Тема 5.1. Оптоэлектронные приборы.

Изучение работы светодиода.

Цель работы: измерить контактное напряжение, напряжение зажигания и прямой ток светодиода.

Перечень используемого оборудования: адаптер, мультиметр M890G, светодиод, реостат-потенциометр, провода соединительные.

Теоретическая часть:

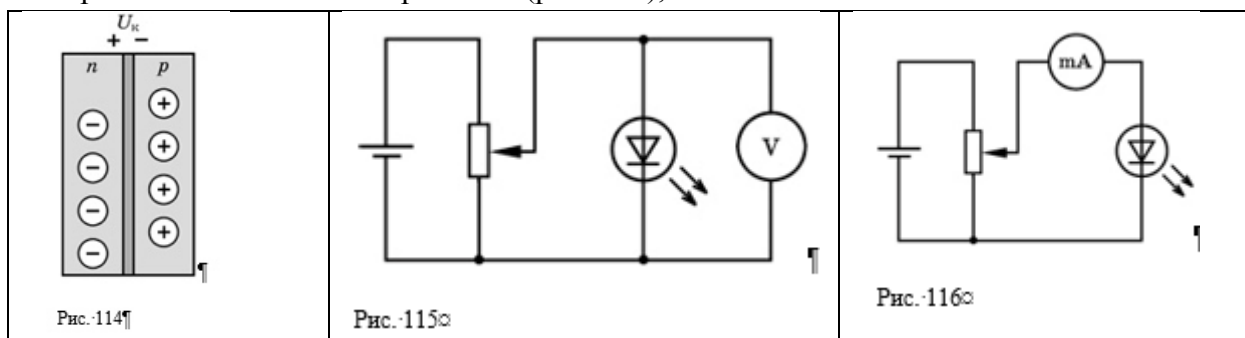
Как у выпрямительного диода, так и у светодиода в основе конструкции лежит p — n -переход. Поэтому механизмы прохождения тока через диод и светодиод в основном одинаковы.

Светодиод — это излучающий полупроводниковый прибор с p — n -переходом, предназначенный для непосредственного преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения.

В качестве материала для изготовления светодиодов обычно используют полупроводниковые соединения: карбид кремния SiC, фосфид галлия GaP, арсенид галлия GaAs и др. Спектр излучения зависит от используемого материала, от рода и концентрации примесей.

Электронно-дырочные переходы в кристаллах полупроводников для светодиодов изготавливают методом диффузии примесей в монокристалл либо методом сплавления.

При отсутствии внешнего электрического поля на электродах светодиода диффузии основных носителей заряда через p — n -переход (электронов из n - в p -область и дырок в противоположном направлении) препятствует внутреннее электрическое поле, называемое контактным. Из-за наличия контактного поля для перевода электрона из n - в p -область и дырки в противоположном направлении требуется совершить работу, равную произведению заряда электрона на контактное напряжение (рис. 114), т. е. $A = eU_k$.



Когда к электродам диода подводят напряжение источника в пропускном направлении, то контактное напряжение убывает и запирающий слой сужается. Это значит, что часть основных носителей заряда получает возможность преодолевать p — n -переход, и тем самым они обеспечивают прямой ток. При равенстве внешнего напряжения контактного электроны и дырки беспрепятственно устремляются навстречу друг другу, и сила тока резко возрастает. При этом дырки и электроны рекомбинируют в соответствующих областях. Процесс рекомбинации сопровождается свечением p — n -перехода, т. е. свечением светодиода.

Ход работы:

Переведите мультиметр в режим вольтметра постоянного тока с пределом «2 В» или «20 В», щупы вольтметра присоедините к выводам светодиода и зафиксируйте показания прибора

при освещенном и затемненном светодиоде. При отсутствии показаний прибора поменяйте полярность подключения светодиода.

2. Соберите электрическую цепь по схеме на рисунке 115 и наблюдайте за показаниями вольтметра в момент зажигания светодиода, т. е. измерьте напряжение в момент зажигания.

3. Соберите электрическую цепь по схеме на рисунке 116 и при повороте ручки потенциометра фиксируйте показания амперметра, т. е. силу тока, протекающего через светодиод.

4. Результаты измерений и наблюдений занесите в таблицу 41.

Таблица 41

Тип светодиода	Контактное напряжение U_k , В	Напряжение свечения U_c , В	Прямой ток светодиода I , А

5. Соотнесите экспериментальные данные с основными теоретическими положениями.

Практическая работа №26.

Тема 5.1. Оптоэлектронные приборы.

Фоторезистор. Простейшее фотореле.

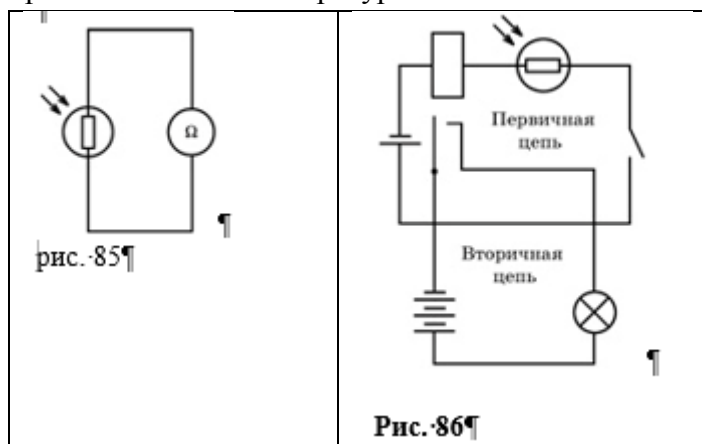
Цель работы: определить зависимость сопротивления фоторезистора от степени его освещенности, собрать и привести в действие простейшее фотореле.

Перечень используемого оборудования: адаптер, мультиметр М890G, фоторезистор, реле поляризованное РП-5, лампа накаливания МН-3,5 В — 0,3 А, провода соединительные.

Теоретическая часть:

Сопротивление полупроводников понижается не только при нагревании, но и при освещении.

В этом можно убедиться, если к фоторезистору подключить омметр мультиметра (рис. 85). При освещении фоторезистора показания омметра заметно уменьшаются. Это указывает на увеличение проводимости (уменьшение сопротивления) полупроводников под действием света. Данный эффект не связан с нагреванием, так как он наблюдается и при неизменной температуре.



Электрическая проводимость фоторезистора возрастает вследствие разрыва связей и образования свободных электронов и дырок за счет энергии света, падающего на полупроводник. Это явление называется фотоэлектрическим эффектом.

Приборы, в которых используют фотоэлектрический эффект в полупроводниках, называют фоторезисторами или фотосопротивлениями. Миниатюрность и высокая чувствительность фоторезисторов позволяют использовать их в самых различных областях науки и техники, например для регистрации и измерения слабых световых потоков. Фоторезисторы являются датчиками в фотореле и различных устройствах автоматики.

Если составить последовательную цепь из фоторезистора и чувствительного электромагнитного реле (рис. 86), то получают простейшее фотореле. Фоторезистор и электромагнитное реле образуют делитель напряжения. При освещении фоторезистора его сопротивление резко уменьшается, а сопротивление реле остается неизменным. Это значит, что в соответствии с законом Ома сила тока в цепи возрастает и происходит перераспределение напряжения: оно увеличивается на реле и уменьшается на фоторезисторе. Увеличение напряжения на реле ведет к увеличению силы тока до значения тока срабатывания. Реле срабатывает и замыкает контакты исполнительной цепи.

Ход работы: 1. Выберите самый высокий предел измерения омметра мультиметра, присоедините его к зажимам фоторезистора (см. рис. 85) и измерьте его сопротивление при полном затемнении, при рассеянном обычном свете, при освещении лампочкой накаливания, присоединенной к адаптеру.

2. Результаты измерений и выводы по опытам запишите в таблицу 36.

Таблица 36

Освещенность	Сопротивление R , Ом	Зависимость сопротивления фоторезистора от освещенности
Полное затемнение		
Естественная		
Лампочка накаливания		

3. Соберите электрическую цепь простейшего фотореле по схеме на рисунке 86. Осветите фоторезистор и проследите за переключением контактов реле. Пучок света, падающий на фоторезистор, перекройте несколько раз рукой и каждый раз проследите за работой контактной системы реле.

4. К контактной системе реле подключите вторичную цепь (см. рис. 86) и проведите опыты по ее управлению при бесконтактных манипуляциях в первичной цепи.

5. Проводимые процедуры и результаты опытов соотнесите с теоретическими положениями.

Практическая работа № 27.

Тема 5.1. Оптоэлектронные приборы.

Исследование оптоэлектронных приборов.

Цель работы: изучение принципа действия и характеристик светоизлучающих и фотоприёмных приборов; определение основных параметров оптоэлектронных приборов.

Перечень используемого оборудования:

Теоретическая часть:

Принцип действия фотоэлектронных приборов основан на явлениях внутреннего и внешнего фотоэффекта.

Внутренний фотоэффект – это изменение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках при их освещении. При внутреннем фотоэффекте, в отличие от внешнего, оптически возбужденные электроны остаются внутри освещенного тела,

нейтральность которого не нарушается. Внутренний фотоэффект приводит к возникновению разности потенциалов между участками освещаемого тела, т.е. генерированию фото-ЭДС (в фотодиодах) и изменению проводимости (в фоторезисторах).

Внешний фотоэффект – испускание веществом электронов под действием светового излучения.

К оптоэлектронным приборам относятся светоизлучающие приборы (лампы накаливания, светоизлучающие диоды и т.д.), фотоприёмные приборы (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры и т.д.).

1.1. Фоторезистор

Фоторезистор (ФР) представляет собой прибор из полупроводника одной проводимости, конструкция которого схематично показана на рис 6.1. Полупроводниковый слой (1) наносится на пластинку из диэлектрика (2). Поверхность полупроводника покрывается пленкой прозрачного лака для защиты от влаги. От концов полупроводникового слоя делаются выводы (3).

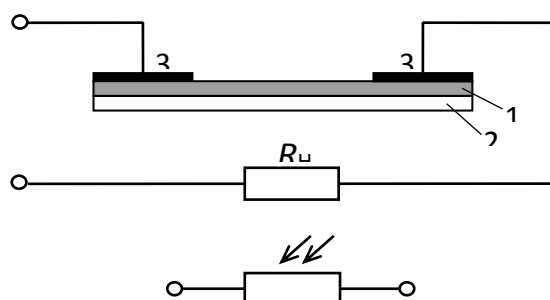


Рис. 6.1. Конструкция фоторезистора

ФР изготавливают из сернистого свинца (серия ФСА), селенида кадмия (ФСД) и др. При подаче внешнего напряжения и отсутствии освещения в цепи ФР протекает темновой ток I_T . При освещении полупроводника, в нем появляется значительное количество дополнительных подвижных носителей заряда (пары электрон-дырка). Повышение концентрации свободных носителей заряда приводит к увеличению электропроводности вещества, следовательно сопротивление ФР падает и по цепи протекает световой ток I_C . Разность $I_C - I_T = I_\Phi$ получила название фототока.

ВАХ фоторезистора показана на рис. 6.2, а. Зависимость его сопротивления от величины светового потока $R_\Phi = f(\Phi)$ представлена на рис. 6.2, б.

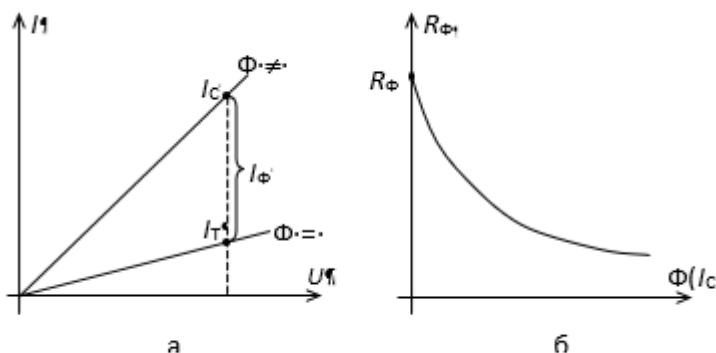


Рис. 6.2. Характеристики фоторезистора

Фототок определяется как разность темнового $I_T = \frac{U}{R_{\Phi T}}$ и светового $I_C = \frac{U}{R_{\Phi C}}$ токов

$$I_\Phi = I_C - I_T = U \left(\frac{1}{R_{\Phi C}} - \frac{1}{R_{\Phi T}} \right).$$

Недостатками ФР являются:

- большая инерционность, которая составляет $10^{-11} - 10^{-10}$ мкс и зависит от световой предыстории;

- сильная температурная нестабильность;
- высокий уровень собственных шумов;
- нелинейность световой характеристики.

К достоинствам ФР относятся:

- высокая чувствительность к световому потоку ($S = dI_{\Phi}/d\Phi$ - спектральная чувствительность);

- простота конструкции и использования, что определяет их использование в качестве датчиков для регистрации наличия светового потока, а также в качестве приемников излучения в резисторных оптопарах.

1.2. Фотодиод

Фотодиод (ФД) - это полупроводниковый диод, в котором используется зависимость его характеристик от освещенности $p-n$ -перехода. Принцип работы фотодиода основан на том, что при облучении $p-n$ -перехода появляются дополнительные носители зарядов и ток через переход увеличивается. Изменяя световой поток Φ , можно регулировать ток через $p-n$ -переход.

Фотодиод может работать в двух режимах (рис 6.3): фотопреобразовательном (ФП) и фотогенерации (ФГ).

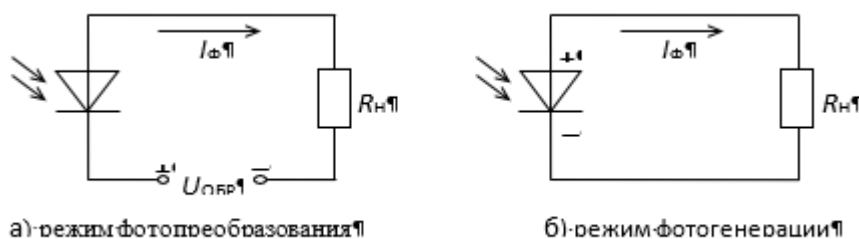


Рис. 6.3. Схемы включения фотодиода

Фотопреобразовательный режим характеризуется тем, что фотодиод работает со смещением, т.е. в цепь включен источник напряжения $U_{обр}$ в обратном направлении. В этом режиме при $\Phi = 0$ через переход протекает тепловой ток, равный по величине току обратного смещенного перехода $I_T = I_0$. При увеличении светового потока $\Phi > 0$ происходит повышение концентрации неосновных носителей и ток через переход увеличивается. Этому режиму на графике (рис. 6.4) соответствует область III, в которой фототок I_{Φ} изменяется пропорционально потоку Φ и практически не зависит от $U_{обр}$.

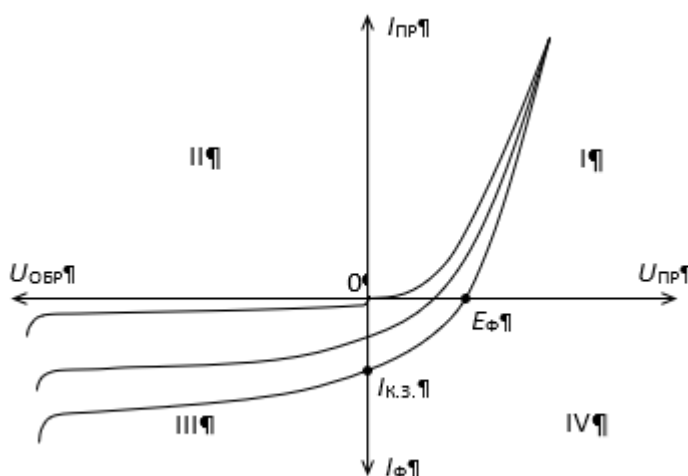


Рис. 6.4. ВАХ фотодиода

В режиме фотогенерации в цепи ФД отсутствует внешний источник питания и сам фотодиод является источником фото-ЭДС $E_{ф}$. Вольтамперная характеристика для этого режима соответствует области IV на рис. 6.4.

Принцип работы ФД поясняется на рис. 6.5 и в режиме фотогенератора заключается в следующем. При облучении такой структуры световым потоком Φ происходит генерация пар электрон-дырка $n_i = p_i$, которые под действием запирающего электрического поля на переходе $E_{з\text{ап}}$ разделяются по знаку (дырки уходят в p -область, а электроны - в n -область).

В результате чего, на концах структуры появляется фото-ЭДС E_{Φ} , причем направлена она встречно по отношению к $E_{з\text{ап}}$. Чем больше величина потока Φ , тем больше и значение E_{Φ} , а, следовательно, и фототок I_{Φ} .

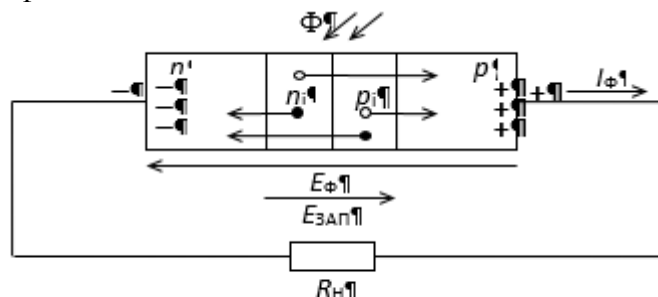


Рис. 6.5. Принцип работы ФД

При этом в режиме короткого замыкания при $R_{\text{н}} \rightarrow 0$ фототок равен току к.з.

$$I_{\Phi} = \frac{E_{\Phi}}{R_{\text{н}} + r} = \frac{E_{\Phi}}{r} = I_{\text{к.з.}}$$

В режиме холостого хода при $R_{\text{н}} \rightarrow \infty$ ток равен нулю $I_{\Phi} = 0$, а

напряжение равно фото-ЭДС $U = E_{\Phi}$.

В области I при прямом включении фотодиод ведет себя практически как обычный диод, т.к. на фоне большого прямого тока $I_{\text{пр}}$ не существенна добавка, вносимая за счет фототока I_{Φ} .

Недостатком ФД является большая температурная нестабильность.

К достоинствам ФД относятся высокая чувствительность, хорошие частотные свойства и малые габариты.

Основные параметры ФД:

- чувствительность $S = dI_{\Phi}/d\Phi$ составляет $10^{\text{ки}} \div 100^{\text{ни}}$ мА/лм;
- обратный темновой ток $I_0 = I_{\text{T}}$;
- ток короткого замыкания $I_{\text{к.з.}} = 10^{\text{ки}} \div 100^{\text{ни}}$ мА;
- инерционность составляет $1^{\text{ци}} \div 10^{\text{ки}}$ нс;
- верхняя граничная частота $f_{\text{в}} = 10^{\text{ки}} \div 100^{\text{ни}}$ МГц.

Фотодиоды могут использоваться как фотоприемники в различных устройствах автоматики как в режиме фотопреобразования, так и в режиме фотогенерации.

1.3. Фототранзистор

Фототранзистором (ФТ) называют фотогальванический элемент с двумя p - n -переходами, предназначенный для преобразования светового потока в электрические сигналы. Структура и схемы включения фототранзистора показаны на рис. 6.6.

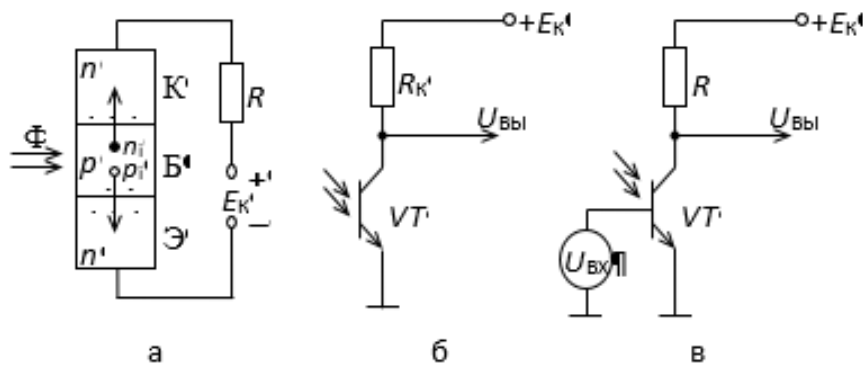


Рис. 6.6. Структура и схемы включения фототранзистора $n-p-n$ -типа

Фототранзисторы изготавливают из тех же материалов, что и фотодиоды: кремний, германий и т.д. Световой поток Φ имеет свободный доступ к базовой области. Фототранзистор включается в цепь как диод с одним свободным электродом (рис. 6.6, б) или как обычный транзистор (рис. 6.6, в). В общем случае возможны три варианта схем включения ФТ: с ОБ, с ОЭ и с ОК.

Принцип действия ФТ заключается в следующем. При облучении световым потоком базовой области, в ней происходит генерация пар электрон-дырка. При этом электроны, являясь неосновными носителями в базе, свободно проходят в коллекторную область, увеличивая ток I_K во внешней цепи. Дырки p_i идут к эмиттерному переходу, их концентрация здесь увеличивается и снижается потенциальный барьер эмиттерного перехода. Таким образом, создаются благоприятные условия для инжекции основных носителей из эмиттера через базу в коллектор, т.е. внешний световой поток Φ в данном случае выполняет роль тока базы как и в обычном транзисторе.

Величина тока коллектора $I_K = I_\Phi$, где β - коэффициент усиления транзистора по току; $I_\Phi = S \cdot \Phi$ - фототок, пропорциональный световому потоку; $S = dI_\Phi/d\Phi$ - чувствительность фототранзистора.

Фототранзисторы используются в качестве приемников световых излучений. Кроме биполярных транзисторов изготавливают лавинные ФТ, а также ФТ на основе МОП и МДП структур.

К недостаткам ФТ относятся:

- большой уровень шумов;
- температурная нестабильность.

Достоинствами являются:

- высокая чувствительность (в β раз больше, чем у фотодиода);
- возможность двойного управления: за счет потока Φ и за счет тока базы I_B путем подключения свободного электрода базы к внешним источникам.

1.4. Светоизлучающие диоды

Светоизлучающий диод (СИД) - это малоинерционный источник светового излучения. Он всегда работает при прямом включении. Структура и принцип работы СИД поясняется на рис. 6.7.

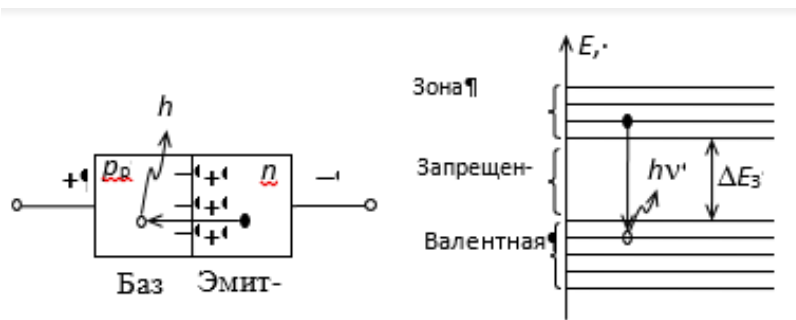


Рис. 6.7. Структура и принцип работы СИД

Принцип работы СИД основан на физических процессах, происходящих в p - n -переходе при рекомбинации носителей. Обычно в эмиттерной области концентрация основных носителей n_n значительно больше концентрации основных носителей в базе p_p . Область базы выполняется протяжённой и имеет свободный выход светового потока Φ . При прямом включении через переход проходят основные носители n_n и p_p . При этом электроны, проходящие в базу, рекомбинируют с дырками, т.е. переходят из зоны проводимости в валентную зону, при этом излучается квант энергии:

$$h\nu = hc/\lambda \approx \Delta E_z; \quad \lambda = \Delta E_z / 1,23,$$

где h - постоянная Планка; c - скорость света; λ - длина излучаемой волны; ΔE_z - ширина запрещенной зоны.

Как видно из формулы, длина излучаемой волны, а следовательно, и цвет излучения, зависит от ширины запрещенной зоны, т.е. от материала из которого изготовлен СИД.

Для кремниевых и германиевых СИД длина излучаемых световых волн λ лежит в области невидимого инфракрасного диапазона. Для получения видимого спектра излучений $\lambda_{\text{вид}} = 0,38 \div 0,78$ мкм ширина запрещенной зоны должна быть $\Delta E_z > 1,5$ эВ.

Для получения длины волны $\lambda_{\text{вид}}$ используют фосфит галлия GaP, карбид кремния SiC, арсенид галлия GaAs.

Вольтамперная характеристика СИД показана на рис. 6.8, из которой видно, что СИД обладает свойством стабилизатора напряжения, т.к. прямое напряжение $U_{\text{пр}} = \text{const}$ на рабочем участке ВАХ.

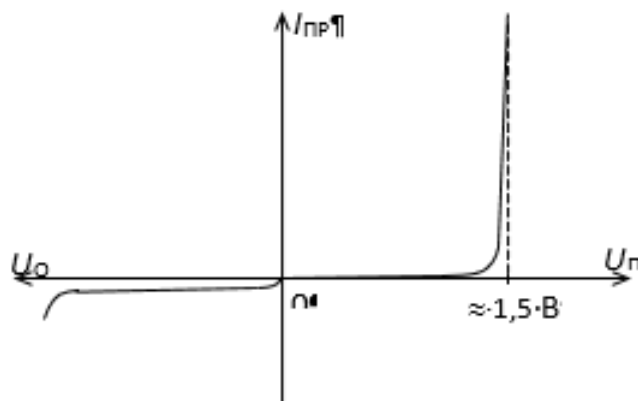


Рис. 6.8. Вольтамперная характеристика СИД

Основные параметры СИД:

- цвет свечения (зависит от исходного материала);
- яркость свечения $B = f(I_{\text{пр}})$;
- максимальный прямой ток $I_{\text{пр. макс. доп}} = 10^{\text{ки}} \div 100^{\text{ни}}$ мА;
- номинальное прямое напряжение $U_{\text{пр}} = 1,0 \div 2,5$ В;
- максимальное обратное напряжение $U_{\text{обр. макс. доп}} = 1^{\text{цы}} \div 10^{\text{ки}}$ В;

- быстродействие, которое определяется временем переключения СИД при подаче прямого импульса тока:

$$t_{\text{ПЕРЕКЛ}} = t_{\text{ВКЛ}} + t_{\text{ВЫКЛ}},$$

где $t_{\text{ВКЛ}}$ и $t_{\text{ВЫКЛ}}$ - связаны с накоплением и рассасыванием заряда на переходе.

К недостаткам СИД относятся:

- необходимость защиты от больших токов;
- необходимость защиты от превышения $U_{\text{ОБР}}$.

Достоинством СИД является его малая инерционность.

1.5. Оптрон

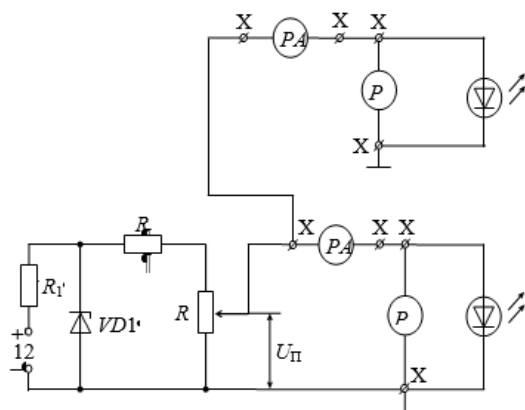
Оптрон или оптопара – это оптоэлектронный прибор, в котором конструктивно объединены источник и приемник излучения, связанные между собой оптическим каналом, например светодиод (источник излучения) и фототранзистор (приёмник излучения). Оптроны в основном используются для работы в импульсном режиме, как бесконтактные коммутаторы, где необходима гальваническая развязка цепей.

Достоинствами оптронов являются:

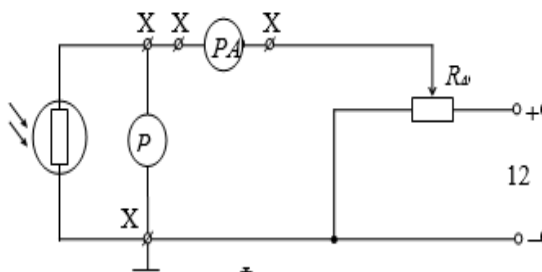
- отсутствие влияния выходной цепи на входную;
- однонаправленность воздействия;
- большая плотность информации;
- высокая помехозащищенность.

К недостаткам оптронов относятся:

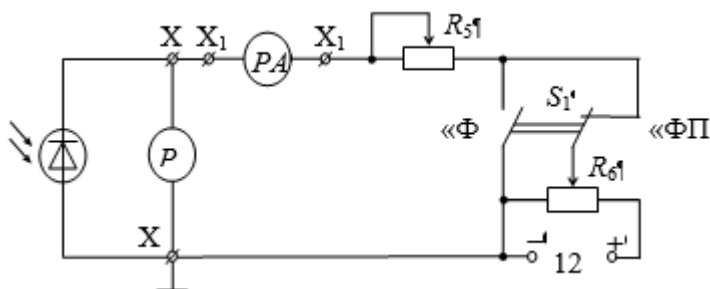
- относительно большое потребление мощности (из-за двойного преобразования энергии);
- низкий КПД (не более 20%);
- высокая температурная нестабильность;
- высокий уровень собственных шумов.



Светодиод видимого излучения



Фоторезистор.



Фотодиод.

Рис. 1. Схема лабораторного стенда.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Принципиальная схема лабораторного стенда показана на рис. 6.9. В работе исследуются два светоизлучающих диода (видимого спектра излучения и невидимого инфракрасного спектра), а также два типа фотоприёмников (фоторезистор и фотодиод).

При выполнении работы используются следующие приборы, которые подключаются к соответствующим гнездам $X_1 \div X_{11}$ стенда:

- цифровой вольтметр типа В7-27 или В7-16А;
- миллиамперметр типа М2015 или аналогичный для измерения тока источника излучения (подключается к клеммам X_1 , X_2 или X_1 , X_4);
- микроамперметр типа Ф195 - для измерения тока в цепях фотоприемников, подключается к клеммам X_7 , X_8 или X_{10} , X_{11} .

Для подвода светового потока к фотоприемникам используется специальный щуп. Питание стенда осуществляется от источника постоянного напряжения +12 В.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Исследовать особенности работы светоизлучающих диодов в следующей последовательности.

3.1.1. Собрать схему для исследования СИД видимого излучения. Для чего потенциометр R_3 установить в крайнее левое положение ($U_{\text{ПР}} = 0$), затем к гнездам X_1 , X_2 подключить миллиамперметр М2015 (предел измерения «15 мА») и к гнездам X_0 , X_3 цифровой вольтметр (предел измерения «1 В»).

3.1.2. Подать напряжение +12 В на испытательный стенд, включив тумблер питания на лицевой панели лабораторного стенда.

3.1.3. Изменяя потенциометром R_3 величину тока I_C от 0 до $I_{C\text{ном}}$ в соответствии с табл. 6.1, контролировать величину падения напряжения на СИД $U_{\text{ПР}}$ с точностью до 0,01. Результаты измерений $U_{\text{ПР}}$ занести в табл. 6.1.

3.1.4. Повторить пп. 3.1.1÷3.1.3 для светодиода инфракрасного излучения. При этом миллиамперметр подключается в гнезда X_1 , X_2 , а вольтметр в гнезда X_0 , X_5 .

Таблица 6.1

I_C , мА	0	0,1	0,5	1,0	2,0	...	10	$I_{C\text{max}}$
$U_{\text{ПР}}$, В СИД								
$U_{\text{ПР}}$, В ИК СИД								

3.1.5. По результатам измерений построить ВАХ для обоих светодиодов в одних координатных осях.

3.2. Исследовать особенности работы фоторезистора.

3.2.1. В гнездо ввода светового потока к фоторезистору установить светодиод видимого излучения и регулятором R_3 сделать ток $I_C = 0$. В этом случае световой поток, воздействующий на фоторезистор будет темновым $\Phi = 0$, а фоторезистор будет иметь максимальное темновое сопротивление R_T более 100 кОм.

3.2.2. Подключить к гнездам X_0 , X_6 цифровой вольтметр, предварительно установив режим работы «измерение R » и предел измерения сопротивления «100 кОм». При этом миллиамперметр должен быть отключен и, следовательно, цепь питания фоторезистора должна быть разомкнута.

3.2.3. Снять зависимость изменения сопротивления R_Φ от величины светового потока $\Phi = k \cdot I_C$, т.е. зависимость $R_\Phi = f(\Phi \equiv I_C)$. Для этого, изменяя дискретно величину тока I_C от 0 до $I_{C\max}$, согласно табл. 6.2, контролировать величину сопротивления R_Φ . Результаты измерений занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Тип источника	I_C , мА	0	0,5	1,0	...	10	...	$I_{C\max}$
Светодиод видимого излучения	$R_{\Phi 1}$, кОм	R_T						
ИК светодиод	$R_{\Phi 2}$, кОм	R_T						

3.2.4. Сменить тип источника светового потока (заменить светодиод видимого излучения светодиодом ИК диапазона) и повторить п. 3.2.3.

По результатам измерений построить графики зависимостей $R_{\Phi 1} = f(I_C)$ и $R_{\Phi 2} = f(I_C)$, сравнить их и сделать соответствующие выводы.

3.2.5. Снять семейство вольт-амперных характеристик фоторезистора, т.е. зависимость $I_\Phi = f(U_\Phi)$ при различных значениях потока, для чего:

а) в качестве источника света использовать СИД видимого излучения и регулятором тока I_C установить световой поток $\Phi_1 = 0$, а затем $\Phi_2 = k \cdot I_{C\max}$;

б) цифровой вольтметр переключить в режим измерения постоянного напряжения (предел измерения «10 В»). К клеммам X_7 , X_8 подключить микроамперметр (предел измерения «100 мкА»), замкнув тем самым цепь питания фоторезистора;

в) установив световой поток Φ_1 , изменять с помощью потенциометра R_4 величину напряжения U_Φ на фоторезисторе с определенным шагом и при этом контролировать фототок $I_{\Phi 1}$. Результаты измерений занести в табл. 6.3.

г) установить максимальный световой поток $\Phi_2 = \Phi_{\max} = k \cdot I_{C\max}$ и повторить п. 3.2.5, в для фототока $I_{\Phi 2}$. Предел измерения микроамперметра при необходимости переключить на «10 мА»;

Таблица 6.3

	U_Φ , В	0	1	2	4	...	12
$\Phi_1 = 0$	$I_{\Phi 1}$, мкА	0					
$\Phi_2 = k \cdot I_{C\max}$	$I_{\Phi 2}$, мА	0					

д) по результатам измерений построить ВАХ фоторезистора и определить его основные параметры.

3.3. Исследовать особенности работы фотодиода в режиме фотогенератора в следующей последовательности.

3.3.1. Собрать схему для исследования фотодиода, для чего установить источник света в гнездо фотодиода, подключить цифровой вольтметр (предел измерения «10 В») и микроамперметр (предел измерения «100 мкА»). Переключатель S_1 поставить в положение

«ФГ» и тем самым отключить источник питания от схемы. Потенциометр R_5 поставить в крайнее левое положение.

3.3.2. Установить ток светодиода $I_{C1} = 5$ мА и, изменяя потенциометром R_5 величину фототока $I_{\Phi \min}$ до $I_{\Phi \max} = I_{\Phi \text{ К.З.}}$, контролировать по вольтметру величину фото-ЭДС $E_{\Phi 1}$, генерируемую фотодиодом. Результаты измерений занести в табл. 6.4.

Таблица 6.4

$\Phi \equiv I_C$	I_{Φ} , мкА	$I_{\Phi \min}$	...	$I_{\Phi \text{ К.З.}}$
$I_{C1} = 5$, мА	$E_{\Phi 1}$, мВ			
$I_{C1} = 10$, мА	$E_{\Phi 2}$, мВ			
$I_{C1} = 20$, мА	$E_{\Phi 3}$, мВ			

3.3.3. Установить ток светодиода $I_{C2} = 10$ мА, а затем $I_{C3} = 20$ мА и повторить п. 3.3.2.

3.4. Исследовать особенности работы фотодиода в режиме фотопреобразователя, для чего переключатель $S1$ поставить в положение «ФП», при этом к фотодиоду подключается внешний источник напряжения, запирающей полярности.

3.4.1. Изменить полярность подключения вольтметра (предел измерения «10В»), и установить темновой поток $\Phi = \Phi_T = 0$, снизив ток I_C до нуля. Регулятор R_5 поставить в крайнее правое положение, в котором $R_5 = 0$.

3.4.2. Снять темновую ВАХ фотодиода, для чего измерять регулятором R_6 величину обратного напряжения на фотодиоде $U_{\text{ОБР}}$ от 0 до $U_{\text{ОБР max}} \approx 12$ В и по микроамперметру (предел измерения «10» или «100 мкА») контролировать величину тока I_{Φ} . Результаты измерений занести в табл. 6.5 в графу I_{Φ} .

Таблица 6.5

Тип источника и величина Φ	$U_{\text{ОБР}}$, В	0	0,5	1,0	2,0	...	U_{max}
$I_{\text{СВ}} = 0$	I_{Φ} , мА						
$I_{\text{СВ}} = 5$ мА	$I_{\Phi 1}$, мА						
$I_{\text{СВ}} = 10$ мА	$I_{\Phi 2}$, мА						
$I_{\text{СВ}} = 20$ мА	$I_{\Phi 3}$, мА						
ИК СД $I_{\text{СВ}} = 20$ мА	$I_{\Phi \text{ ИК}}$, мА						

3.4.3. Снять семейство ВАХ фотодиода в режиме преобразования, для чего последовательно изменять световой поток $\Phi = \text{const}$, устанавливая ток светодиода $I_{\text{СВ}} = 5$ мА; 10 мА и 20 мА в соответствии с табл. 6.5, и при каждом значении тока I_C повторить п. 3.4.2. Результаты измерений занести в табл. 6.5.

3.4.4. Исследовать влияние ИК светодиода на чувствительность фотодиода. Сменить источник светового потока, заменив обычный светодиод ИК светодиодом, затем установить ток $I_{\text{СВ}} = 20$ мА и аналогично п. 3.4.2 снять ВАХ фотодиода. Результаты занести в табл. 6.5 в графу ИК СД.

3.5. По результатам исследований (табл. 6.4 и 6.5.) построить в одних координатах общее семейство ВАХ фотодиода. По характеристикам определить основные параметры ФД и сделать выводы.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 4.1. Исследуемые схемы.
- 4.2. Экспериментальные данные в виде таблиц.
- 4.3. Графики полученных зависимостей.
- 4.4. Краткие выводы по результатам исследования.

Практическая работа №28.

Тема 5.2. Устройства отображения информации.

Устройства отображения информации.

Цель работы: расширить и систематизировать знания по изучаемой теме.

Теоретическая часть:

Виды устройств отображения информации, основные виды, характеристики, преимущества и недостатки

Дисплей (анг. display — показывать) относится к основным устройствам любого ПК, без которого невозможна эффективная работа. В процессе работы на экране дисплея отображаются как вводимые пользователем команды и данные, так и реакция системы на них.

Назначение. Устройство визуального отображения информации или, более точно, устройство отображения информации, находящейся в оперативной памяти, позволяющее обеспечить взаимодействие пользователя с аппаратным и программным обеспечением компьютера. Дисплей — это важнейший компонент пользовательского интерфейса.

Наиболее распространены дисплеи на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ). Большинство персональных компьютеров оснащено в основном ЭЛТ-дисплеями. Они работают подобно бытовому телевизору. *Преимущества:* современные ЭЛТ-дисплеи имеют высокое качество изображения, достаточно дешёвы и надёжны.

Недостатки: такие дисплеи достаточно громоздки, потребляют много энергии, имеют более высокий уровень излучения, чем дисплеи других типов.

Жидкокристаллические дисплеи (Liquid-Crystal Display), или LCD-дисплеи. Их действие основано на эффекте потери жидкими кристаллами своей прозрачности при пропускании через них электрического тока. Применяются преимущественно в портативных компьютерах (notebook).

Преимущества: жидкокристаллические дисплеи не создают вредного для здоровья пользователя излучения, наиболее экономичны в потреблении энергии, обеспечивают хорошее качество изображения.



Недостатки: такие дисплеи достаточно дороги, небольшие (14") размеры экрана; если смотреть на экран сбоку, то почти ничего нельзя разглядеть.

Газо-плазменные дисплеи (plasma displays). Действие основано на свечении газа при пропускании через него электрического тока. Схема такова: имеются два листа, между ними инертный газ; один из листов прозрачный, а на втором расположены электроды, на которые подаётся напряжение. Обычно газо-плазменные индикаторы состоят из нескольких подобных элементарных ячеек, число точек в каждой из которых подобрано наиболее оптимальным образом для отображения одиночных символов. (Выглядит это примерно так же, как часы в метро.) Эти дисплеи применяются в основном в специализированных ЭВМ для отображения строк символов.

Светодиодные матрицы (LED-дисплей). Обычно применяются во встроенных ЭВМ (используемых в автоматизированных линиях на промышленном производстве, в робототехнике и так далее) для отображения небольших объёмов текстовой информации.

Жидкокристаллический дисплей (ЖК-дисплей, ЖКД; жидкокристаллический индикатор, ЖКИ; англ. *Liquid crystal display, LCD*) — плоский дисплей на основе жидких кристаллов, а также устройство (монитор, телевизор) на основе такого дисплея.

Виды:

TN + film (Twisted Nematic + film) — самая простая технология. Слово *film* в названии технологии означает дополнительный слой, применяемый для увеличения угла обзора (ориентировочно — от 90 до 150°). В настоящее время приставку film часто опускают, называя такие матрицы просто TN. Способы улучшения контрастности и углов обзора для панелей TN пока не нашли, причём время отклика у данного типа матриц является на настоящий момент одним из лучших, а вот уровень контрастности — нет.

Технология IPS (англ. *In-Plane Switching*), или **SFT** (*Super Fine TFT*), была разработана компаниями Hitachi и NEC.

Эти компании пользуются разными названиями этой технологии — NEC использует «SFT», а Hitachi — «IPS».

Технология предназначалась для избавления от недостатков TN + film. Хотя с помощью IPS и удалось добиться увеличения угла обзора до 178°, а также высокой контрастности и цветопередачи, время отклика осталось на низком уровне.

VA/MVA/PVA

Технология VA (сокр. от *vertical alignment* — вертикальное выравнивание) была представлена в 1996 году компанией Fujitsu. Жидкие кристаллы матрицы VA при выключенном напряжении выровнены перпендикулярно по отношению ко второму фильтру, то есть не пропускают свет. При приложении напряжения кристаллы поворачиваются на 90°, и на экране появляется светлая точка. Как и в IPS-матрицах, пиксели при отсутствии напряжения не пропускают свет, поэтому при выходе из строя видны как чёрные точки.

PLS-матрица (*Plane-to-Line Switching*) была разработана компанией Samsung как альтернатива IPS и впервые продемонстрирована в декабре 2010 года. Предполагается, что эта матрица будет на 15 % дешевле, чем IPS.^[9]

Достоинства:

- плотность пикселей выше по сравнению с IPS (и аналогична с *VA/TN);
- высокая яркость и хорошая цветопередача;
- большие углы обзора;
- полное покрытие диапазона sRGB;^[источник не указан 458 дней]
- низкое энергопотребление, сравнимое с TN.

Недостатки:

- время отклика (5—10 мс) сравнимо с S-IPS, лучше чем у *VA, но хуже чем у TN;

Дисплей (англ. *display* — показывать) относится к основным устройствам любого ПК, без которого невозможна эффективная работа. Можно, конечно, выводить всю необходимую пользователю информацию о работе и состоянии системы на печатающее устройство (так оно и было в **первых** моделях ЭВМ), но это длительный и не очень наглядный процесс. Наиболее важная отличительная особенность **современных** компьютеров заключается в возможности почти мгновенного взаимодействия (работа в режиме реального времени) между системой и пользователем. В большинстве систем это взаимодействие осуществляется при помощи клавиатуры (и/или манипуляторов) и экрана дисплея. В процессе работы на экране дисплея отображаются как вводимые пользователем команды и данные, так и реакция системы на них.

Назначение. Устройство визуального отображения информации или, более точно, устройство отображения информации, находящейся в оперативной памяти, позволяющее обеспечить взаимодействие пользователя с аппаратным и программным обеспечением компьютера. Дисплей — это важнейший компонент пользовательского интерфейса.

Исторически сложилось так, что устройство отображения информации называют и дисплеем, и монитором (видеомонитором), и терминалом (видеотерминалом). Эти термины часто используются как синонимы, хотя каждое конкретное название используется, чтобы подчеркнуть, высветить требуемую особенность применения устройства.

Дисплей — это общее название устройства, показывающего, отображающего информацию. Под управлением ЭВМ в качестве дисплея может работать даже бытовой телевизор. Казалось бы, проблема решена — есть устройство, позволяющее быстро отображать состояние системы. Однако оказалось, что при продолжительной работе с ним пользователь быстро устаёт: это устройство существенно влияет на работоспособность, эмоциональный настрой, самочувствие и способно даже привести к потере зрения. Возникла необходимость оптимизировать характеристики экрана, добиться более чёткого и устойчивого изображения, чтобы избежать излишней утомляемости. Были разработаны *специализированные устройства* — **мониторы**, контролирующие процесс отображения (*англ.* monitor — староста в классе, наблюдающий за порядком; корректирующее или управляющее устройство). Клавиатуру и монитор можно связать с компьютером как отдельные устройства или соединить их в **терминал**, связанный с компьютером как *единое целое*. Обычно терминалы используются в системах коллективного пользования, когда с одним и тем же центральным компьютером одновременно работают много пользователей. Это называется работой в режиме удаленного доступа.

Принцип работы. Так как информация бывает разной, то используются разнообразные устройства отображения информации. Краткая классификация дисплеев приведена на рис. Отличие **алфавитно-цифровых** (иногда говорят «**знакоместных**») и **графических** дисплеев состоит в том, что:

- первые способны воспроизводить только ограниченный набор символов, причём символы могут выводиться только в *определённые* позиции экрана (чаще всего на экран можно вывести 24 или 25 строк по 40 или 80 символов в строке);
- вторые отображают как графическую, так и текстовую информацию, при этом экран разбит на множество точек (пикселей), каждая из которых может иметь тот или иной цвет. Из этих светящихся точек и формируется изображение.

Изображение состоит из отдельных зёрен экрана. Каждое зерно экрана состоит из трех пятнышек люминофора, одно из которых может светиться красным цветом (*англ.* Red), второе — зелёным (*англ.* Green), третье — синим (*англ.* Blue); каждое из этих пятнышек может и не светиться (быть темным). Комбинация красного и зелёного цветов даёт жёлтый цвет, синего и зелёного — голубой, синего и красного — пурпурный, комбинация всех трёх цветов одной яркости даёт белый цвет, отсутствие всех цветов даёт чёрный цвет. Любой оттенок, различимый человеческим глазом, можно получить, «смешивая» эти три цвета в той или иной пропорции. Как такового смешения цветов не происходит — физически каждое пятнышко располагается на определенном месте. Особенность зрения человека состоит в том, что на некотором расстоянии от экрана он воспринимает близко расположенные цветовые точки различной яркости как единый элемент — пиксель. Цвет пикселя является результатом смешения в восприятии основных составляющих его цветов. Такая модель цветообразования называется RGB-моделью.

1. Дисплеи на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ). Большинство персональных компьютеров оснащено в основном ЭЛТ-дисплеями. Они работают подобно бытовому телевизору.

Под воздействием электрических полей в «электронной пушке» разгоняется поток электронов. Далее при помощи электромагнитных полей пучок отклоняется в нужную сторону. Затем, проходя через апертурную решётку (металлическую маску), этот поток фокусируется, доходит до экрана (внутренней поверхности) и заставляет светиться маленькое пятнышко люминофора (зерно экрана) с яркостью, пропорциональной интенсивности пучка. Так работают монохромные устройства. В цветных мониторах зерно экрана составляют три пят-

нышка люминофора разного цвета (красного, зелёного и синего) и потоки электронов посылаются тремя «пушками», причём электронный луч для каждого цвета должен попадать на свой люминофор.

Преимущества: современные ЭЛТ-дисплеи имеют высокое качество изображения, достаточно дешёвы и надёжны.

Недостатки: такие дисплеи достаточно громоздки, потребляют много энергии, имеют более высокий уровень излучения, чем дисплеи других типов.

2. Жидкокристаллические дисплеи (Liquid-Crystal Display), или LCD-дисплеи. Их действие основано на эффекте потери жидкими кристаллами своей прозрачности при пропускании через них электрического тока.

Преимущества: жидкокристаллические дисплеи не создают вредного для здоровья пользователя излучения, наиболее экономичны в потреблении энергии, обеспечивают хорошее качество изображения (без мерцания), небольшие габариты.

Недостатки: такие дисплеи достаточно дороги, если смотреть на экран сбоку, то почти ничего нельзя разглядеть, менее долговечны в использовании, чем ЭЛТ-дисплеи.

3. Газо-плазменные дисплеи (plasma displays). Действие основано на свечении газа при пропускании через него электрического тока. Схема такова: имеются два листа, между ними инертный газ; один из листов прозрачный, а на втором расположены электроды, на которые подаётся напряжение. Обычно газо-плазменные индикаторы состоят из нескольких подобных элементарных ячеек, число точек в каждой из которых подобрано наиболее оптимальным образом для отображения одиночных символов. (Выглядит это примерно так же, как часы в метро.) Эти дисплеи применяются в основном в специализированных ЭВМ для отображения строк символов.

Преимущества: широкий угол обзора, большее время эксплуатации.

Недостатки: высокая цена, плохая цветопередача изображения.

4. Светодиодные матрицы (LED-дисплеи). Обычно применяются во встроенных ЭВМ (используемых в автоматизированных линиях на промышленном производстве, в робототехнике и так далее) для отображения небольших объёмов текстовой информации.

Стандартная структура ячеек LED состоит из нескольких органических слоёв, расположенных по типу «сэндвич» между прозрачным анодом и металлическим катодом. Органические слои состоят из слоя - источник «дырок»; слоя, транспортирующего электроны, и слоя, где свободные электроны и «дырки» смешиваются вырабатывая свет.

Преимущества: уменьшение толщины экрана при улучшении качества изображения (в сравнении с ЖК-мониторами); уменьшение потребления электроэнергии вследствие отсутствия необходимости в обратной подсветке дисплея; увеличение яркости цветов; улучшение качества цветов при большом угле обзора (до 160°).

Недостатки: высокая цена; использование материалов на основе кристаллической решетки не позволяет создавать маленькие экраны с высоким разрешением.

5. Перспективная разработка — панели на основе светящихся пластмасс (LEP-панели).

Чем хороши LEP-элементы? Во-первых, они светятся сами, что снижает энергопотребление. Кусочки пластика, излучающего красный, синий, зелёный свет, наносятся на гибкую пластиковую основу точно так же, как люминофор на поверхность кинескопа, к ним подводятся проводники — экран готов. Во-вторых, такие панели имеют небольшой вес при больших размерах. Например, гибкий пластиковый экран размером 1 м² может весить несколько десятков грамм. В-третьих, LEP-элементы надёжны.

Единственный **минус** — недолговечность работы полимерных пластин.

На протяжении многих лет механизмы (способы) связи между компьютером и дисплеем непрерывно видоизменялись, всё более совершенствуясь. Для подключения дисплея к компьютеру необходима соответствующая карта — видеоадаптер.

Основные пользовательские характеристики:

- **Размер экрана по диагонали.** Измеряется в дюймах. Имеются 14", 15", 17", 21" и др. мониторы. Следует помнить, что размер изображения, как правило, на дюйм меньше

размера кинескопа. Считается, что 15" монитор отлично подходит для работы в домашних условиях; 17" монитор необходим для профессиональной работы с графикой; размеры экрана, большие 21" для персонального монитора на сегодняшний день не очень удобны для пользования, так как экран тяжело окинуть взглядом.

- *Размер зерна экрана* — расстояние в миллиметрах между двумя соседними люминофорами одного цвета. Меньший размер зерна соответствует более резкой и контрастной картинке, создавая общее впечатление чистоты цвета и чёткого контура изображения. У мониторов разного типа размер зерна экрана может находиться в пределах от 0,18 до 0,50 мм. Наиболее оптимальными для восприятия считаются мониторы с зерном экрана от 0,24 до 0,28 мм.
- *Разрешающая способность* — число пикселей (точек экрана) по горизонтали и вертикали. Эта характеристика определяет контрастность изображения. Она зависит от размера экрана и размера зерна экрана, но может изменяться (в определённых пределах) с помощью программной настройки.

В табл. 1. приведены некоторые оптимальные с точки зрения эргономики разрешающие способности при различных размерах кинескопа и зерна экрана.

Таблица 1

Взаимосвязь размера экрана, размера зерна, разрешения экрана

Размер экрана	Размер зерна экрана				
	Разрешение 640x480	Разрешение 800x600	Разрешение 1024x768	Разрешение 1280x1024	Разрешение 1600x1200
14"	0,35	0,28	0,22	0,18	0,16
17"	0,43	0,34	0,27	0,22	0,19
21"	0,50	0,40	0,31	0,25	0,22

- *Число передаваемых цветов.* Начиная со стандарта VGA, любой монитор способен отображать столько цветов, сколько обеспечивает видеокарта, вернее, объём памяти видеокарты.

Пример. Монитор вашего компьютера имеет размер 14". По паспортным данным вы определили, что размер зерна экрана равен 0,24. Объём памяти видеокарты — 512 Кб. Как определить, какую разрешающую способность и какую цветность вы можете установить на своём мониторе? Определим, какое максимальное разрешение возможно.

Длина диагонали экрана 14 дюймов $\approx 14 \cdot 2,54 \cdot 10 \text{ мм} = 355,6 \text{ мм}$. Длина стороны экрана: диагональ/ $\sqrt{2} \approx 250,42 \text{ мм}$.

Максимальное количество точек по одной из размерностей определяется как отношение длины стороны экрана к размеру зерна и составляет $250,42/0,24 \approx 1044$. Таким образом, на вашем экране можно установить максимальную разрешающую способность 1024x768 (по табл. 1). Конечно же, можно установить разрешение и 800x600, и 640x480.

Рассмотрим сначала возможность установления разрешения 640x480. Разделим 512000 байтов ($\approx 512 \text{ Кб}$ видеокарты) на (640x480) точек экрана. Получим, что на одну точку у нас будет приходиться $\approx 1,67$ байта.

Для хранения информации о цвете одной точки обычно используется либо 4 бита, либо 8 битов (1 байт), либо 16 битов (2 байта), либо 24 бита (3 байта) — эта характеристика называется глубиной цвета. В нашем случае, для хранения кода цвета будет использоваться 8 битов (так как $8 \text{ битов} < 1,67 \text{ байта} < 16 \text{ битов}$) и всего можно установить $2^8 = 256$ цветов.

Рассмотрим возможность установления разрешения 800x600. $512000 \text{ байтов} / (800 \times 600) = 1,07$ байта. Значит, можно установить 256-цветный режим работы. Рассмотрим возможность установления разрешения 1024x768. $512000 / (1024 \times 768) = 0,65$ байта. Значит, можно установить только 2 = 16-цветный режим работы.

Если же для работы вам требуется экран с наилучшими на сегодня параметрами, то для установки фотореалистичной цветовой палитры (16 777 216 оттенков) (глубина цвета равна при этом 24 бита) и высокой разрешающей способности (1600x1280) вам потребуется:

1600*1280*24 ≈ 6 Мб видеопамати и 21-дюймовый монитор с зерном экрана не выше 0,24 или 17-дюймовый монитор с зерном экрана 0,19.

- *Частота кадровой развёртки* (скорость регенерации экрана, частота синхронизации) — это число изображений на экране монитора, перерисовываемых лучом электронной трубки за единицу времени. Данный параметр показывает, с какой скоростью обновляется изображение на экране. Измеряется в герцах.
- При изменении изображения с частотой кадровой развёртки менее 50-60 Гц человеческий глаз успевает реагировать на изменение картины экрана, становится заметным мерцание экрана. При этом глаза устают, воспаляются, может появиться головная боль. Именно поэтому разработан европейский стандарт, определяющий минимальную допустимую частоту кадровой развёртки на уровне 70 Гц, а рекомендуемую — не менее 85 Гц. *Соответствие стандартам безопасности.* Поскольку при работе за компьютером наибольшее внимание уделяется пользователем именно изображению на экране дисплея, а ЭЛТ-монитор, как любой телевизор, излучает электромагнитные волны во всех диапазонах — от частоты развёртки кадров (50-100 Гц) до рентгеновского, то здоровья это не добавляет. И если от телевизора можно отодвинуться, то при работе с компьютером возникают проблемы. Поэтому были разработаны мониторы с внутренним экранированием и пониженным уровнем излучения (LR — Low Radiation). Позже были приняты стандарты на допустимый уровень излучения монитора — MPRII и TCO'92. Глазу вредят и блики — отражение от экрана постороннего света. Специальное антибликовое покрытие хороших мониторов поглощает отражённый свет. Снизить излучение и отражение можно, навесив на монитор специальный экран.

Кинескоп излучает мощные электромагнитные волны не только вперёд, но и вбок, и назад. Экран может защитить от излучений вас, но не ваших соседей по комнате. Ставьте монитор «спиной» к стене, поскольку наиболее опасной зоной в персональном компьютере являются задние панели системного блока и дисплея. И старайтесь не работать за мониторами, не соответствующими стандартам безопасности.

Видеокарта, видеоадаптер

Назначение. Видеокарта — это устройство, управляющее дисплеем и обеспечивающее вывод изображений на экран. Она определяет *разрешающую способность* дисплея и *количество* отображаемых *цветов*.

Сигналы, которые получает дисплей (числа, символы, изображения и сигналы синхронизации) формируются именно видеокартой.

Возможности ПК по отображению информации определяются совокупностью (и совместимостью) технических характеристик дисплея и его видеокарты, то есть видеосистемы в целом.

Практически все современные видеокарты принадлежат к комбинированным устройствам и помимо главной своей функции — формирования видеосигналов — осуществляют ускорение выполнения графических операций. Для этого на видеокарте устанавливаются специальные процессоры, позволяющие выполнять многие операции с графическими данными без использования центрального процессора. Такие устройства называются видеоадаптерами или видеоакселераторами. Они значительно ускоряют вывод информации на экран дисплея при работе с графическими программными оболочками, трёхмерной графикой и при воспроизведении динамических изображений.

Принцип работы.

Видеокарта состоит из:

- набора микросхем (или одной интегрированной микросхемы — видеоакселератора);
- цифроаналогового преобразователя данных, находящихся в видеопамати, в видеосигнал;
- видеопамати;
- самой платы с разъёмами.

Основные пользовательские характеристики.

В настоящее время насчитывается более 30 модификаций видеокарт, различающихся конструкцией, параметрами и стандартами. Классификация видеокарт по принятым стандартам приведена в табл. 2.

Таблица 2

Виды и основные пользовательские характеристики видеокарт

Название видеокарты	Название монитора	Разрешение	Объём видеопам- яти	Количество отоб- ражаемых цветов
MDA — Monochrome Display Adapter	MD	720x350	64 бита-128 Кб	2
CGA — Color Graphics Adapter	CD	640x200	128 Кб	16
HGC — Hercules Graphics Card	MD +	720x348	128 Кб	2
EGA (1984) — Enhanced Graphics Adapter	ECD	640x350	128 битов -512 Кб	16-64
VGA (1987) — Video Graphics Array	ECD	640x480	256-512 Кб	256
SVGA — Super VGA	ECD	800x600	256 Кб-Мб	256-16 млн
XGA — extended Graphics Array	ECD	1600x1200	1-4 Мб	16 млн

Исторический факт. К началу 80-х годов в качестве мониторов обычно использовались алфавитно-цифровые видеотерминалы, которые подключались к большой или мини-ЭВМ при помощи обыкновенных последовательных каналов связи. Скорость обмена данными по таким линиям была очень низкой, поэтому об отображении графики не шло и речи. Первые персональные компьютеры ради удешевления конструкции обходились без специализированного монитора: вместо этого они снабжались специальным видеовыходом, сигнал с которого подавался на обычный бытовой телевизор. Первые серийные IBM PC комплектовались видеокартами MDA и монохромными алфавитно-цифровыми мониторами MD с максимальным разрешением 720x350 точек.

Дисплей — устройство визуального отображения информации.

Дисплей относится к *основным* устройствам персонального компьютера, является важным компонентом пользовательского интерфейса.

Пользовательские характеристики дисплеев:

- размер экрана по диагонали (измеряется в дюймах);
- размер зерна экрана;
- разрешающая способность;
- число передаваемых цветов;
- частота кадровой развёртки;
- соответствие стандартам безопасности.

Формирование видеосигналов, в соответствии с которыми дисплей может отображать информацию различных видов на экране, и ускорение выполнения операций над данными графического вида осуществляется **видеокартой** (видеоадаптером, видеоакселератором — в настоящее время это почти синонимы). Видеокарта определяет разрешающую способность дисплея и количество отображаемых цветов.

Наиболее распространёнными в настоящее время являются видеокарты VGA (Video Graphics Array), SVGA (Super VGA), XGA (extended Graphics Array).

Пользовательские характеристики видеокарт:

- объём и тип видеопамати;
- функциональные возможности процессора (микросхем); совместимость с дисплеем и шиной соединения.

Первое описание таких странных веществ, как жидкие кристаллы, было сделано еще в 1888 году. Первый дисплей на них был создан в 1966 году, но интересен он был лишь с точки зре-

ния науки, а не практики, так как работал лишь при температуре 80⁰С и имел очень маленькие размеры. Сегодня технология изготовления LCD-дисплеев достигла того уровня, когда бракованным считается экран, на котором не работает всего одна точка.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные устройства отображения информации в компьютере.
2. Каковы назначение и основные пользовательские характеристики монитора?
3. Какие виды мониторов (дисплеев) вы знаете?
4. Каковы назначение и основные пользовательские характеристики видеокарты?

Средства отображения (визуализации) текстовой и графической информации, называемые также дисплеями, получили наибольшее распространение как оперативные устройства вывода индивидуального пользования. Дополненные устройствами ручного ввода информации - клавиатурой, "мышью", световым пером, дигитайзером, они являются совмещенными устройствами ввода-вывода информации, обеспечивающими работу пользователя в интерактивном режиме.

Основу любого дисплея составляет индикатор - устройство, осуществляющее непосредственное преобразование электрических сигналов в наглядное изображение текстовой либо графической информации (рис.16.1). В роли индикатора могут выступать разнообразные приборы, предназначенные для получения видимых изображений (традиционные ЭЛТ и другие электронно-лучевые приборы, плоские панели различных видов) и имеющие дополнительные особые свойства, например, воспроизведение цветного изображения или хранение визуальной информации при выключенном питании. Работу всех устройств дисплея организует устройство управления УУ, в котором необходимые процедуры по управлению отображением и редактированием могут быть реализованы либо аппаратными средствами, либо сочетанием аппаратных и программных средств. В последнем случае в качестве УУ используется дисплейный процессор.

Коды отображаемых знаков и элементов чертежа через блок согласования поступают от ЭВМ или с клавиатуры или светового пера и хранятся в буферном ЗУ. Эти коды преобразуются специальным образом в сигналы, с помощью которых на индикаторе формируется изображение знака или элемента чертежа. Функциональная клавиатура позволяет управлять положением указателя (маркера) на экране индикатора, устанавливать режим работы, стирать изображение или его часть и т.п.

Область применения текстовых дисплеев чрезвычайно широка и охватывает все сферы использования проблемно-ориентированных вычислительных комплексов. Это наиболее распространенный, массовый и доступный вид устройства отображения информации при ее выводе и вводе. Дисплеи применяются для отображения информации, получаемой удаленным абонентским пунктом; для передачи скорректированной или вновь введенной оператором информации по каналам связи с ЭВМ; центральные дисплеи контролируют функционирование системы и располагаются в непосредственной близости от ЭВМ.

Графические дисплеи предназначены для активного взаимодействия человека с ЭВМ в диалоговом режиме на графическом языке (чертежи, схемы, графики и т.п.) в различных системах автоматизации проектирования, автоматизации научных исследований, моделирования, АСУ управления полетами и наблюдения за воздушной обстановкой, автоматизации технологических процессов, робототехнике, процессе обучения и др.

Все графические дисплеи способны отображать и текстовую информацию, а некоторые текстовые дисплеи содержат аппаратуру и программы построения простейших графических изображений. Это является одной из причин, по которым практически очень сложно провести четкую классификацию дисплеев по какому-то одному признаку ввиду многообразия свойств и функциональных возможностей устройств отображения информации. В основу классификации, приведенной на рис. 16.2 положен принцип объединения дисплеев по виду отображаемой информации, типу индикатора, способам построения изображения, размерности воспроизводимой информации, и, наконец, по уровню "интеллектуальности".

Уровень интеллектуальности определяется набором системных функций, которые реализуются в самом дисплее. В простом дисплее аппаратно реализуется ограниченный набор функций по отображению, хранению, редактированию и вводу-выводу данных. Такие дисплеи выполняются в качестве специализированных УВВ различного применения.

Микропрограммируемый дисплей позволяет изменять и расширять набор функций, а также производить предварительную несложную обработку данных. Интеллектуальный дисплей, как правило, содержит процессор, ОЗУ, ПЗУ, ВЗУ, устройства ввода-вывода и позволяет реализовать широкий набор функций по обработке и отображению данных. Примером таких дисплеев служат современные графические дисплеи.

Основой телевизионного дисплея является приемная ЭЛТкинескоп. Первый кинескоп был изобретен в 1907 году русским ученым Борисом Розингом и в 20-е годы усовершенствован другим нашим соотечественником Владимиром Зворыкиным. Он же сформулировал принципы цветного кинескопа. Устройство кинескопа в части создания электронного пучка (луча) и обеспечения его сканирования по экрану весьма схоже с устройством передающей ЭЛТ. На рис. 16.3 показано устройство кинескопа. Электронная пушка, называемая также электронным прожектором, состоит из электрода накала (подогревателя), катода, испускающего электроны при его нагреве до температуры порядка 1100°K , и фокусирующей системы. В состав электронной пушки входит еще и управляющий электрод (модулятор) в виде сетки, расположенной перпендикулярно к продольной оси кинескопа.

Под действием электростатического ускоряющего поля, создаваемого положительным напряжением между катодом и анодом, электроны разгоняются и устремляются в сторону анода, образуя электронный луч, достигающий экрана.

Экран изнутри покрыт люминофором - химическим соединением, испускающим полезное излучение под воздействием электрических полей или лучистой энергии. Наиболее важной для индикации является фосфоресценция, то есть испускание света после возбуждения. Механизм генерирования свечения заключается в передаче энергии от быстрых падающих электронов электронам, связанным с кристаллом люминофора. В результате этого последние переходят в возбужденное состояние. При их возвращении в нормальное состояние избыточная энергия выделяется в виде лучистой энергии.

Люминофор в точке бомбардировки его электронным лучом начинает светиться. Минимальный размер пятна на экране составляет 0,25 - 0,4 мм и определяет разрешающую способность ЭЛТ. Другая важная характеристика люминофора - послесвечение. Яркость пятна быстро падает после прекращения бомбардировки люминофора потоком электронов, так, через 0,2 с после выключения электронного луча яркость уменьшается более чем наполовину. Для получения устойчивого немерцающего изображения необходимо многократно, с частотой 30 - 60 раз в секунду повторять изображение, то есть восстанавливать электронным лучом видимые точки. Процесс восстановления изображения называется регенерацией.

На расположенную на пути электронного луча сетку подается положительное управляющее напряжение, от величины которого зависит, какая часть электронов луча сможет пройти через нее и достичь люминофора. От этого будет зависеть интенсивность свечения пятна луча в точке экрана - яркость. Управляя величиной подаваемого на модулятор напряжения яркости, осуществляют модуляцию луча и, таким образом, управляют яркостью светящегося пятна луча на экране.

В случае монохромной ЭЛТ люминофор нанесен равномерно на внутреннюю часть экрана. В случае цветной ЭЛТ изнутри на экран нанесены три типа люминофора, способные под воздействием электронной бомбардировки светиться каждый своим цветом: окись иттрия, активированная европием, - красным; смесь сернистых цинка и кадмия, активированная серебром, синим; сернистый цинк, активированный серебром, зеленым. Именно эти три спектральных составляющих видимого света выбраны в качестве основных потому, что смешением указанных цветов могут быть получены почти все встречающиеся в природе цветовые

тона и большое число градаций их насыщенности. Такой способ образования цветов и их оттенков, используемый в телевидении, называется слагательным или аддитивным, в отличие от вычитательного или субтрактивного способа смешения, применяемого в полиграфии, живописи и цветном кино, при котором в качестве основных цветов используют голубой, желтый и пурпурный.

Люминофоры трех цветов нанесены на экран в виде сотен тысяч (до полутора миллионов в зависимости от размера экрана) размещенных в строго определенном порядке мельчайших точек, объединенных в триады. Внутри цветной ЭЛТ находятся три электронных пушки, по одной на каждую составляющую цвета, причем модуляция каждого из трех электронных лучей производится отдельно. Созданные одновременно три изображения - зеленое, синее и красное смешиваются и преобразуются в зрительном аппарате наблюдателя в многоцветное изображение.

Само изображение создается путем сканирования электронного луча по экрану, достигаемого с помощью отклоняющей системы, подобной отклоняющей системе передающей ЭЛТ. В зависимости от формы напряжений или токов, подаваемых в горизонтальную и вертикальную отклоняющие системы с генераторов развертки, луч ЭЛТ сканирует либо по строкам, образуя растр, подобный телевизионному, либо непрерывно движется по экрану, вычерчивая линии изображения.

В первом случае, при растровой развертке, изображение формируется путем управления интенсивностью свечения точек строк. Изображение, как мозаика, складывается из точек, разноцветных в случае цветной ЭЛТ. Такой способ создания изображения называется растровым. Перемещение луча по экрану не зависит от изображаемых знаков и осуществляется всегда по одной и той же невидимой сетке, образованной строками (линиями).

Знак изображается в пределах предусмотренного знакоместа. На изображение строки текста затрачивается, например, 16 телевизионных линий, из них 7 линий отводятся для собственно знаков (рис. 16.4), а следующие 9 - для промежутка между строками текста. Луч движется слева направо по всей рабочей части экрана сначала по линии Л0, затем по линии Л1 и т.д. Схема синхронизации устройства управления дисплеем вырабатывает сигналы линий Л0, Л1, . . . , Л6, запускающие генератор строчной развертки, а также сигналы Т0, Т1, . . . , Т7 тактов формирования элементов знаков.

Такты Т0, Т1, Т2 формируют промежуток между знаками, в это время луч гасится. Остальные такты, с 3-го по 7-ой, участвуют в изображении знака. При движении пятна луча по линии Л0 модуляция луча формирует только верхние элементы всех знаков данной текстовой строки, при движении по второй линии - вторые элементы и так далее.

Таким образом, для формирования на линии элементов знаков нужно иметь сведения, какой знак должен изображаться (код знака), на какой линии находится пятно луча (сигналы Л0. . . Л7), и на каком столбце знакоместа должно находиться пятно (сигналы Т3, Т4, . . . , Т7). Эти сведения в виде микропрограмм формирования знаков путем модуляции луча хранятся в ПЗУ знакогенератора. В процессе отображения текста ПЗУ выдает сигналы модуляции, соответствующие знаку и положению луча на сетке раstra.

Второй способ формирования знаков - функциональный. Перемещение луча осуществляется двумя электромагнитными отклоняющими системами. Одна из них - знаковая система (ЗС) перемещает пятно в пределах знакоместа, другая - координатная (КС) - после завершения изображения некоторого знака перемещает погашенное пятно в исходную точку следующего соседнего знакоместа. При этом способе устройство управления должно обеспечивать перемещение луча с постоянной скоростью по контуру изображаемого знака (рис. 16.5) и его модуляцию в нужные моменты времени. Здесь I - IV столбцы знакоместа используются для изображения знака, V столбец - для формирования промежутка между соседними знаками. На рисунке цифрами отмечена траектория луча при изображении буквы Б. Микропрограммы формирования знаков также хранятся в ПЗУ знакогенератора.

На рис. 16.6 приведена структурная схема алфавитно-цифрового телевизионного дисплея с растровым способом формирования знаков. Блок генераторов строчной и кадровой развертки обеспечивает сканирование электронного луча по горизонтальным линиям. При выводе информации на экран по инициативе ЭВМ текст, сформированный в виде последовательности кодов знаков, передается через интерфейс в БЗУ. Коды знаков выводимого на экран текста могут поступить также с кодера знаковой клавиатуры. Емкость БЗУ равна максимальному количеству выводимых на экран знаков. Коды знаков в БЗУ располагаются в той последовательности, в какой знаки должны размещаться на экране. Устройство управления УУ - дисплейный процессор, расшифровывая последовательно по одному эти коды, выбирает из ПЗУ знакогенератора ту или иную микропрограмму, соответствующую форме знака, подлежащего отображению, и переписывает ее в ОЗУ кадра, иногда называемое видеоЗУ.

В ОЗУ хранится так называемый “замороженный” кадр, то есть вся информация, выводимая на экран, в виде композиции точек, называемых пикселями. Термин “пиксел” происходит от английских слов picture element и обозначает один элемент из массива графической информации. Пиксел несет в себе сведения о яркости и о цвете небольшого участка изображения. В пикселях определяется разрешающая способность (разрешение, дискретизация изображения, разложение его на элементы). Высоким разрешением считается разложение на 1024 x 768 пикселей. Каждому пикселу на экране соответствует определенная точка - растровый элемент. ОЗУ циклически, с частотой кадровой развертки, опрашивается, и кадр на экране регенерируется. Под управлением переписанных в ОЗУ кадра микропрограмм блок регулировки яркости вырабатывает в определенные моменты напряжение модуляции луча, подсвечивающее нужные точки линий строчной развертки.

Местоположение знака в строке текста на экране указывает регистр знакомест; номер строки текста формируется в счетчике строк и содержится в регистре строки. Взаимодействием всех устройств дисплея управляют УУ и оператор, который с помощью функциональной клавиатуры имеет возможность корректировать выводимую на экран информацию либо создавать новую, модифицируя содержимое БЗУ а также запросить данные из ЭВМ или снова отослать скорректированные. В режиме ввода в ЭВМ информация считывается из БЗУ и направляется в центральные устройства ЭВМ либо в какое-либо внешнее устройство, например, принтер, ВЗУ.

Использование в знакогенераторе ПЗУ позволяет достаточно просто менять алфавит заменой ПЗУ, либо использовать сразу несколько типов алфавитов. Замена алфавита возможна и программным способом с помощью текстовых редакторов.

Растровый способ иногда именуется матричным, поскольку микропрограммы знаков хранятся в ПЗУ знакогенератора в виде матриц с записанными 0 и 1.

Для корректировки информации, вызванной из памяти, используется маркер, перемещаемый оператором по экрану посредством специальных клавиш или мышью. Для стирания какого-либо знака на экране оператор совмещает маркер с этим знаком. В устройстве управления дисплея координаты положения маркера декодируются, что определяет адрес знака, подлежащего стиранию в ОЗУ кадра и в БЗУ. При нажатии клавиши “Стирание” информация в указанной маркером ячейке ОЗУ кадра стирается и в следующем кадре исчезает с экрана. По этому же адресу оператор может записать другой знак. При нажатии клавиши “Возврат” скорректированная и записанная с клавиатуры информация из ОЗУ кадра передается в БЗУ и оттуда в ОЗУ ЭВМ.

На рис. 16.7 приведен протокол сигналов обмена между ЭВМ и дисплеем при приеме и передаче информации в дуплексном режиме.

Дуплекс - соединение между двумя точками, обеспечивающее возможность одновременной передачи данных в обоих направлениях, в отличие от полудуплексного режима, когда между двумя объектами имеется двунаправленная линия связи, по которой передача информации в каждый момент времени может производиться только в одном направлении. Соеди-

нение точек, между которыми данные могут перемещаться только в одном направлении и невозможно движение потока данных в противоположном направлении, называется симплексным соединением, или однонаправленной линией).

Точечный способ формирования знаков прост, но он не позволяет сразу рисовать на экране непрерывную линию, например, прямую по заданным координатам. Линию приходится, так же, как и знак, собирать из точек. При этом необходим большой объем ОЗУ кадра. Для ввода-вывода сложной графической информации применяются графические дисплеи, в которых изображение формируется функциональным способом.

Ход работы

Изучить материал теоретической части и лекции и ответить на вопросы

1. Назовите основные устройства отображения информации в компьютере.
2. Каковы назначение и основные пользовательские характеристики монитора?
3. Какие виды мониторов (дисплеев) вы знаете?
4. Каковы назначение и основные пользовательские характеристики видеокарты?
5. Перечислите типы индикаторов дисплеев.
6. В чем отличие и что общего в структуре текстовых и графических дисплеев?
7. Назовите основные составные части ЭЛТ типа кинескоп.
8. Почему в дисплеях на основе ЭЛТ производится регенерация?
9. Назовите два основных способа формирования символов на экране дисплея.
10. Какое количество триад люминофоров нанесено на внутреннюю поверхность цветного кинескопа?
11. Каким путем получается изображение на экране дисплея при растровой развертке?
12. Каким образом знак выводится на заданное знакоместо экрана?
13. Каким образом достигается невидимость обратных ходов электронного луча на экране дисплея?
14. Где хранятся коды воспроизводимых знаков
15. Какая информация хранится в ПЗУ знакогенератора?

Литература

1. Обязательные печатные издания

1. Кузовкин, В. А. Электротехника и электроника: учебник для среднего профессионального образования / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. — Москва: Издательство Юрайт, 2021. — 431 с. — (Профессиональное образование).
2. Немцов, М. В. Электротехника и электроника: учебник / М. В. Немцов, М. Л. Немцова. Изд. 3-е, испр. - М.: Издательский Центр «Академия», 2020.-480 с.

2. Основные электронные издания

1. Иванов, И. И. Электротехника и основы электроники : учебник для спо / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 736 с. — ISBN 978-5-8114-6756-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152467> ..
2. Основы электротехники : учебник для спо / Г. И. Кольниченко, Я. В. Тарлаков, А. В. Сиротов, И. Н. Кравченко. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 204 с. — ISBN 978-5-8114-8050-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/171409>
3. Скорняков, В. А. Общая электротехника и электроника : учебник для спо / В. А. Скорняков, В. Я. Фролов. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 176 с. — ISBN 978-5-8114-6758-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/152469>.
4. Славинский, А. К. Электротехника с основами электроники: учебное пособие / А. К. Славинский, И. С. Туревский. — М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2021. — 448 с. - Режим доступа: <https://znanium.com/catalog/product/1150305>
5. Тимофеев, И. А. Основы электротехники, электроники и автоматики. Лабораторный практикум : учебное пособие для спо / И. А. Тимофеев. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 196 с. — ISBN 978-5-8114-6827-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/153638>

3. Дополнительные источники

1. Схемотехника. От азов до создания практических устройств Автор: Гаврилов С.А., Бартош А.И. Издательство: Наука и Техника. 2020. – 528 с.